



The logo of Yejinzb.com, consisting of two green curved lines forming a stylized 'Y' shape.
冶金信息装备网
www.yejinzb.com

第六届 全国冶金渣固废回收及资源 综合利用、低碳节能高峰论坛

2021年7月14-15日 湖北·恩施

论文集

主办单位：河北省金属学会、湖北省金属学会、北京金属学会、陕西省金属学会、
河南省金属学会、辽宁省金属学会、江苏省金属学会、湖南省金属学会

赞助支持：濮阳达龙实业集团有限公司、江苏富凯重工机械有限公司

承办单位：冶金信息装备网、石家庄经济技术开发区互联冶金信息中心

军工品质 专业制造
为钢铁企业提供量身定制服务!

济南中鲁特种汽车有限公司
JINAN ZHONGLU SPECIAL-PURPOSE VEHICLE CO., LTD

济南中鲁特种汽车有限公司是一家技术先导型军工企业，是全国唯一一家生产钢铁企业全系列车型的专用汽车生产企业，倡导一站式服务，可提供冶金企业从后勤保洁到生产保障全系列车型。



主要生产

- 1. 冶金企业专用车：**吸排车、红钢坯热送车、铁水/钢水（铝包）运输半挂车、钢渣运输车、渣盆运输车、自行式液压多轴铁水车、抱罐车、废钢吊斗车、废钢斗车、石灰水运输车、真空吸污车、石膏水压滤车、煤气冷凝水运输车等；
- 2. 环卫类：**洒水车多功能抑尘车（雾炮车）、吸尘车、洗扫车、扫路车、后（侧）装垃圾车等；
- 3. 危化品运输车：**运（加）油车、半挂运油车、多燃料加注车、飞机加油车、原油运输车、沥青运输车、润滑油加注车、化工液体运输车、液态食品运输车等；
- 4. 军用及特种作业类车辆：**森林多功能装甲消防车、工程维修车、应急抢险救援车、指挥车、行政执法车、方舱及各种军用



地址：济南市历城区董家镇五里堂工业
电话：0531-81831111 400-656-9166
手机：王总13853192080
网址：www.jnzlqc.com



目 录

| | | |
|-------------------------------------|---------------|-------|
| 典型钢铁冶金固废高效利用技术综述与建议 | 陈亚团 | (1) |
| 钢渣一体化洁净处理技术介绍 | 陈新勇 | (27) |
| 固体废弃物混匀工艺试验研究 | 钱峰 李志斌 刘沛江等 | (49) |
| 钢渣细碎领域的革命—惯性圆锥破碎机 | 唐威 | (59) |
| 除尘灰冷固球团生产技术创新与应用实践 | 王瑞良 安亮 | (66) |
| 钢渣辊压破碎余热有压热闷处理技术的实践 | 吴龙 郝以党 | (72) |
| 钢渣脱硫剂用于湿法石灰石—石膏法脱硫工艺的试验研究 | 张国成 白晓光 邬虎林 等 | (78) |
| 高炉瓦斯灰火法富集回收锌处理工艺 | 徐华军 | (88) |
| 某企业含铁尘泥冷固结球团试验研究 | 陈亚团 | (92) |
| 钢渣在城市道路建设过程中的实践 | 俞海明 陈伟 赵旭章 | (105) |
| 烧结机头电除尘灰的分级利用 | 秦立浩 墙 蕾 阳红辉 | (110) |
| 钢渣和高炉渣微粉技术研究 | 仪桂兰 史永林 | (123) |
| 企业废气废水废渣废热的协同治理与无废建设实用技术探讨 | 刘晨 | (131) |
| 提高炉渣活度在微粉生产技术中的应用 | 吕凌云 | (142) |
| 龙钢微负压点火系统改造实践 | 宁春明 翟玉兵 | (146) |
| 酸洗废液的资源化回收与利用 | 王晓晖 | (153) |
| 某钢铁厂除尘灰综合利用提取次氧化锌环境影响分析 | 林吓宁 | (158) |
| 烧结配加高炉瓦斯灰替代燃料降低NO _x 排放实践 | 裴元东 吴胜利 张俊杰 | (164) |
| 钢渣辊压破碎—有压热闷工艺应用实践 | 滕树满 滕海灏 | (169) |

典型钢铁冶金固废高效利用技术综述与建议

陈亚团

(酒钢集团宏兴股份公司钢铁研究院 甘肃 嘉峪关 735100)

摘要: 本文对钢铁企业典型固体废物的利用技术现状从亮点技术、先进理念两方面进行了介绍。在此基础上笔者结合资料研究和长期工作实践,提出了一些固废利用的思路供广大冶金工作者和固废处理科研单位和企业参考。

关键词: 钢渣; 铁渣; 混凝土; 石膏; 粉碎

0 前言

冶金企业是物流量和产量都十分巨大的产业,这也就决定了生产过程的固体废物产生量也是一个惊人的数字。以钢铁行业为例,钢渣数量为钢产量的8-15%^[1],达到80-150kg/t,铁渣产生量达到300-400kg/t,加上其他各类尘、泥等固体废物,吨钢产生量大约在650kg/t。按照2018年的钢铁产量,全国每年产生固体废物的量就有6亿吨,数量十分可观。由于我国固废利用技术总体不高,固废利用率仅有发达国家的40%的水平,积存的固体废物不仅占用了土地,污染了环境,而且浪费了资源^[2]。国家钢铁工业十三五规划中要求继续深入推进节能减排工作,加大冶金固废的处理力度,尽可能实现资源化利用。因此研发冶金固废的高效利用方法的任務十分紧迫,固废处理不仅关系到钢铁企业的降本增效和清洁文明生产,还关系到我国经济和社会的可持续发展,更关系到中国的大国形象和国际责任。

十七大以来国家提出了绿色发展战略和人与自然和谐共生的理念,可以说正当其时。随后,原本就十分火热的固体废物利用研究领域更加繁荣发展,出现了许多新技术、新产品。固废处理的面越来越广,包括矿山固废、钢铁冶金、有色冶金、铝业等多个领域的固体废弃物处置和高效利用的研究如火如荼。而且固废处理领域出现两种新的气象,一是固废处理不再停留在低端位置,体现出技术的高端化和产品的高附加值化;二是各学科间的结合更加紧密,冶金、建材、化工、物料细碎、环境等多个领域铸件拉近距离,彼此研究,彼此了解,扭转了以往各自为战和单打独斗的局面。这些都说明外国企业和研究机构的认识正在进步,固废处理水平正在进步,总体是一种向好的趋势。本文对于近5年来国内冶金固废利用领域取得的最新成果、亮点技术、全新思路和最新理念进行整理并展示给读者。在此基础上结合笔者钢铁企业多年工作的时间、以往知识积淀和固废处理实践提出若干固废处理的建议。希望以上资料对各位冶金工作者和固废科研人员能有所助益。

1 钢渣处理和利用亮点技术

1.1 钢渣尾渣制造陶瓷颗粒

目前，城市内涝严重，专业人士提出地面透水化，并出现“海绵城市”概念，提出“渗-蓄-净-排”的要素，截至2018年6月，累计有53个城市开展海绵城市试点。钢渣陶瓷颗粒正是实现这一理念的理想方式。该陶瓷颗粒衍生的制品同时具有土壤保湿、吸声隔热和墙体装饰等功能，发展前景广阔，分为钢渣烧胀陶粒和钢渣免烧陶粒，重点介绍后者。

1.1.1 钢渣烧胀陶粒

(1) 原料：钢渣粉、粉煤灰、粘土、各种除尘灰

(2) 工艺：

a. 制粒工艺：在满足熔渣等温截面图的三角形法则基础上，通过干燥、烧制、烧成等工艺制作而成，然后将陶粒用于制造各种成形制品。钢渣中的铁氧化物熔点低，在合理含量下有利于降低陶粒的烧成温度。工艺为：原料破碎→混合碾压→造粒机造粒→回转窑煅烧→产品贮存

b. 制品产业化工艺

陶粒→加料加水→发泡搅拌→脱模→养护→切割整形→包装

(3) 优点：利用固废，外壳坚硬，综合强度高，重量轻于天然石料。

(4) 缺点：能耗高、成本高、产业化不易

1.1.2 钢渣免烧陶粒

(1) 原料

a. 基料：钢渣 + 矿渣粉；

b. 粘结剂：水泥；

c. 密度调节剂：铝粉膏；

d. 外加剂：生石灰、二水石膏、硅酸钠、氢氧化钠

目前的4种钢渣（热泼钢渣、滚筒钢渣、热闷钢渣、风淬钢渣）都可以使用，但因不同钢渣的成分、性能各异，对免烧陶粒的性能产生影响，需针对不同钢渣开展配比研究。

(2) 工艺

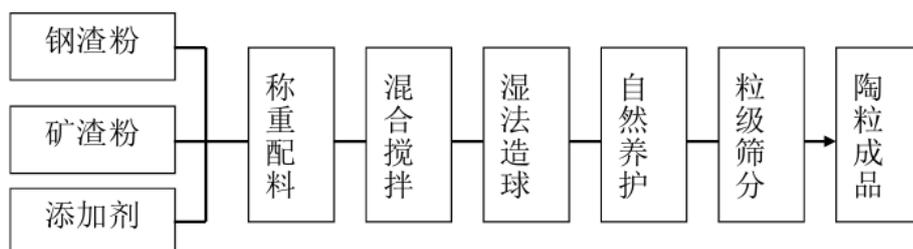


图1 免烧陶粒的生产工艺

(3) 优点：相比于烧胀陶粒，投资少、能耗小、无污染、制备工艺简单。

(4) 不同钢渣身缠免烧陶粒的原料配比：

对于热泼钢渣，钢渣：矿渣：水泥：铝粉膏：生石灰：二水石膏：硅酸钠：氢氧化钠=40：60：10：1：4：2：4：4

对于热闷钢渣，钢渣：矿渣：水泥：铝粉膏：生石灰：二水石膏：硅酸钠：氢氧化钠=40：60：10：1：4：2：4：3

E. 陶粒外观



图 2 热泼渣陶瓷颗粒

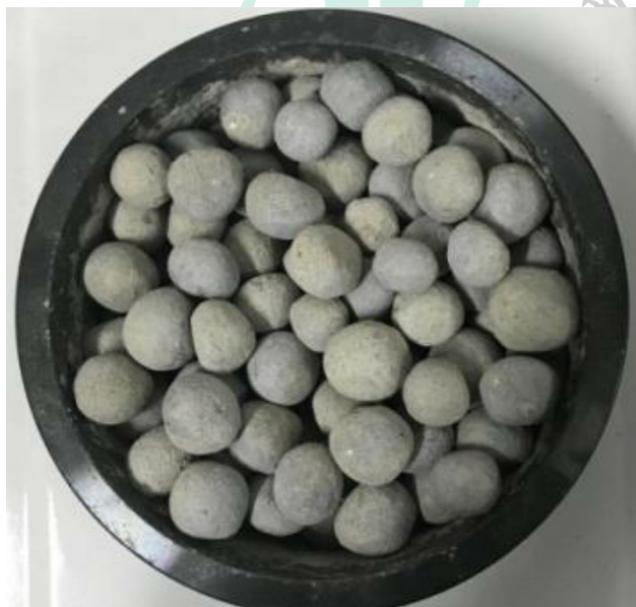


图 3 热闷钢渣陶瓷颗粒

F. 钢渣免烧陶粒应用于海绵城市的可行性分析

可行性取决于 4 点：性能、制备、成本、用量。性能方面，堆积密度 $910\text{kg}/\text{m}^3$ ，筒压强度 11.01MPa ，1h 吸水率 1.71%。符合高强轻质陶粒标准，适合海绵城市建设；制备方面，免烧陶粒制备工艺简单，没有烧制过程，能耗小，无污染，车间占地少。利用固废，原料充足，不用粘土和岩石，有利于环保；成本方面，每吨制造成本比烧胀陶粒低 108 元（成本对比情况见表 1）；用量方面，中国年陶瓷颗粒用量超过 $500\text{万}\text{m}^2$ ，主要用于混凝土工程、砌块和墙板等。海绵城市建设陶粒用量巨大，其用量远远超过建筑工程的用量。可以预期陶粒前景广阔。

表 1 成本对比情况

| 1 吨烧胀陶粒的成本 | | | |
|------------|---------|-----------|--------------|
| 项目 | 原料重 (t) | 单价 (元 /t) | 成本 (元 /t 陶粒) |
| 粉煤灰 | 0.675 | 180 | 121.5 |
| 高岭土 | 0.090 | 350 | 31.5 |
| 其它 | 0.250 | 200 | 50 |
| 煤炭 | 0.200 | 478 | 95 |
| 总计 | | | 298 |
| 1 吨免烧陶粒的成本 | | | |
| 项目 | 原料重 (t) | 单价 (元 /t) | 成本 (元 /t 陶粒) |

续表

| | | | |
|------|--------|-------|-------|
| 水泥 | 0.0170 | 340 | 23.8 |
| 生石灰 | 0.043 | 240 | 10.32 |
| 二水石膏 | 0.014 | 360 | 5.04 |
| 铝粉膏 | 0.007 | 10800 | 75.6 |
| 硅酸钠 | 0.028 | 1050 | 29.4 |
| 氢氧化钠 | 0.028 | 1300 | 36.4 |
| 总计 | | | 180 |

1.2 钢渣全组分分梯级利用



图4 钢渣分梯级利用树状图

武汉理工大学吴少鹏教授课题组对全国钢渣性能调研显示，经过合理冷却处理的钢渣质地密实，用途广泛，提出钢渣全组分分梯级利用的理念，开发出钢渣抗滑集料、沥青面层集料（沥青混凝土）等六种应用途径，这里终点介绍前三种。

（1）钢渣用作高等级沥青抗滑集料

接触角测试结果显示，在同一温度下钢渣相比玄武岩、石灰岩与基质沥青具有更小的接触角。表明沥青更容易润湿钢渣表面，体现出钢渣与沥青优异的粘附性能。钢渣沥青混凝土相比玄武岩沥青混凝土具有更大的残留稳定性、劈裂抗拉强度比，表明钢渣沥青混凝土抗水侵害性能更优。钢渣沥青混凝土比玄武岩沥青混凝土具有更强的抗高温变形能力，低温抗裂性略优，具有更高的疲劳寿命，耐久性更好。

（2）钢渣沥青混凝土 - 沥青路面

钢渣表面以硅酸钙、金属氧化物为主，表面富含 Al^{3+} 、 Ca^{2+} ，与沥青的粘附性好，耐磨性优异，为钢渣沥青混凝土的优良性能奠定了基础。该型混凝土是一种对环境安全的材料，公路路面使用 18 个月后各项性能指标均满足设计要求，尤其耐久型优异，路面综合性能与辉绿岩沥青混凝土无明显差异。该混凝土满足高等级路面建设的要求，可以代替传统混凝土。



图 5 钢渣沥青路面应用实例

(3) 钢渣砂

钢渣砂性能满足《道路用钢渣砂》YB/T4187-2009 的要求，可替代天然砂石制备混凝土。制备水泥混凝土时，可使混凝土成本降低 15% 以上。100% 使用钢渣砂的水泥砂浆安定性良好。合理的钢渣砂掺量能提高水泥砂浆的 28 天抗压强度，可制备 C40 级以上的水泥混凝土。

1.3 利用钢铁企业余热超细粉碎钢渣以及高质化应用

超细粉碎技术被誉为现代核心技术的原点，制备超细颗粒具有粒度小、分布窄、杂质含量低和颗粒形貌可控等特点。西南科技大学流能粉体技术研究所自上个世纪八十年代以来一直专注于超音速气流粉碎、机械粉碎技术、控制性粉碎技术、高精度气流分级、颗粒形貌整形、易燃易爆粉体的粉碎与分级以及超细粉体收集技术。

目前冶金余热利用的途径也仅限于余热发电、余热采暖、烘干物料。磨细钢渣粉作为混凝土掺和料是扩大钢渣应用前景的最重要的途径，也是钢渣规模化应用的有效途径。同时其它大宗工业固废的低成本、规模化粉碎，是实现其高值化、规模化利用的重要途径。

1.3.1 蒸汽动能磨简介

气流粉碎是公认干法有效获得最小微粒的粉碎方法。优点是分级精度高、产品粒度分布窄、纯度高、分散性好、加工设备磨损很小。缺点是能耗高、单机产量小，且仅适用于高附加值产品，因而加工范围有限。以上缺点限制了气流粉碎的广发应用也促使课题组开发了新型细磨设备-蒸汽动能磨，

蒸汽动能磨直接利用蒸汽的动能，减少了中间的能量转换环节，大大提高了能量利用效率。以下是其加工工艺流程。

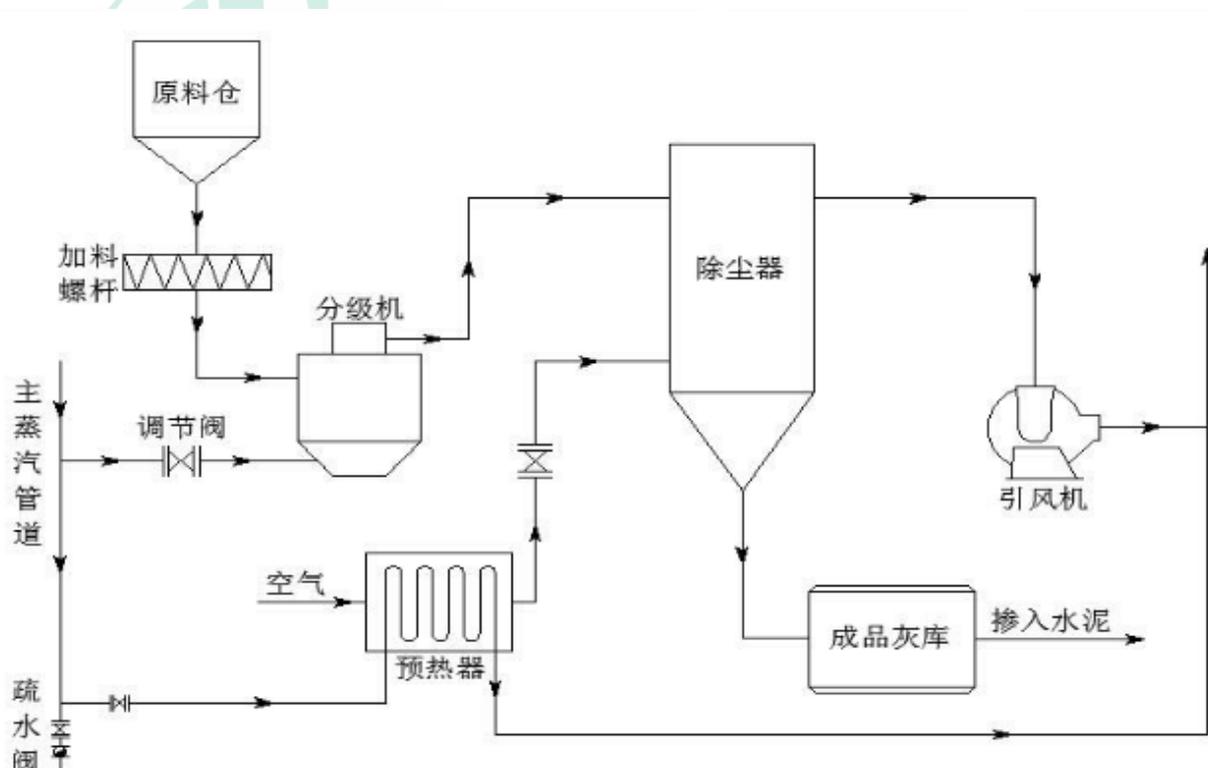


图6 蒸汽动能磨加工工艺流程图

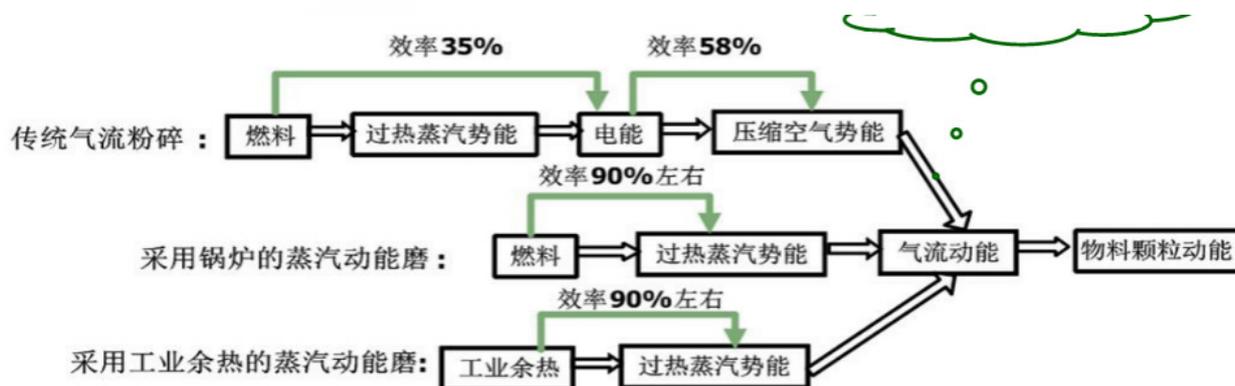


图7 蒸汽动能磨能量利用效率与传统工艺对比

蒸汽动力磨的优势：粉碎强度大，分级精度高、分布窄、产品纯度高、颗粒形态好、设备磨损小、粉剂流动性和分散性好、兼具干燥功能、安全性高（防爆、防静电以及防氧化），加工成本远低于立磨，为工业余热、固废低成本规模化超细粉碎与高值化利用提供了新的理论、方法、工艺与设备，具有很好的经济性和环保性。

1.3.2 蒸汽动能磨的产业化应用

(1) 加工超细固硫灰：固硫灰（例如烧碱烟气脱硫灰）因含游离氧化钙、硬石膏等使其具有大吸水性和高膨胀性，导致其水泥或混凝土制品后期安定性不良。超细化能充分发挥堆积和填充效应，提高胶凝活性，且膨胀性能得到一定控制，适合作为矿物掺合料用于高性能混凝土中。

(2) 加工超细粉煤灰：不仅细化粒度，还保护了粉煤灰中的玻璃微珠，利于其特殊性能的发挥。超细粉煤灰可以制备高性能混凝土、树脂基摩擦材料、在聚合物材料中用作填料、超细粉煤灰基成形吸附剂、塑料制品或涂料中的抗菌填料。

(3) 加工钢渣超细粉：在蒸汽动能磨实现超细粉碎拓展钢渣的使用范围和改善钢渣制品性能的同时，利用脉动气悬分离技术同步从钢渣超细粉中回收部分高品位铁粉。

(4) 其它：蒸汽动能磨还能加工亚微米、纳米级粉体，在粉碎的同时实现烘干。过热蒸汽状态下粉碎，可实现粉碎与高效烘干一体化加工。在粉碎过程中隔绝了粉体与空气，可避免爆炸。

表 2 蒸汽动能磨粉碎 + 烘干部分物料试验参数

| 物料名称 | 粉碎前水分 % | 粉碎后水分 % | 成品粒度 d50/ μm | 成品粒度 d90/ μm | 蒸汽温度 / $^{\circ}\text{C}$ | 蒸汽压力 /MPa |
|-------|---------|-----------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| 脱硫石膏 | 25-30 | 0.5-1 | 1.93 | 3.18 | 400 | 0.5 |
| 褐煤 | 22-30 | 14.5-16.5 | 11.45 | 23.65 | 280 | 0.5 |
| | 22-30 | 6.5-8 | 5.51 | 9.09 | 280 | 0.5 |
| 活性碳酸钙 | 25-30 | 5.2-6 | 3.89 | 11.7 | 280 | 0.5 |
| 石油焦 | 13-15 | 1.1-2 | 23.33 | 65.11 | 230 | 0.5 |

1.4 钢渣辊压破碎和有压热闷技术

中冶节能环保有限责任公司开发的钢渣辊压破碎余热有压热闷新技术是钢渣处理领域的重大革新，提高了处理的质量和效率，经过多年应用和改进，现已成为成熟的渣处理技术。

钢渣有压热闷属于第四代钢渣热闷处理技术。为了能够实现钢渣稳定化处理的连续化、设备化和自动化，2007年-2009年，中冶建筑集团研究总院开始了钢渣有压热闷这一工艺技术的研发课题，组织相关研究人员进行了配套关键设备结构的设计和相关的实验室模拟试验研究，并在2011年开始在河南济源钢铁公司建设了第一条钢渣有压热闷生产线，2012年8月竣工投产。2013年10月，该技术完成了成果鉴定。成果鉴定意见：实现了钢渣处理过程的装备化、自动化、洁净化和高效化。是钢渣处理领域的一次开拓性创新，技术水平达到了国际领先水平。

表 3 一般的钢渣一次处理工艺的优缺点

| 处理方式 | 优点 | 缺点 |
|------|---|--|
| 热闷法 | 工艺适用性广，可处理各种钢渣，处理后钢渣粉化效果好，渣、钢分离彻底，铁回收率高，钢渣安定性合格，尾渣活性高，生产成本低、效率高，环境排放达标。 | 投资较大 |
| 热泼法 | 排渣速度快，冷却时间短、便于机械化生产，处理能力大；钢渣活性较高、生产率高。 | 设备损耗大，占地面积大，破碎加工粉尘大，蒸汽量大；钢渣加工量大，对环境污染严重，金属铁不能全部回收，钢渣稳定性差，利用途径受限制等。 |

续表

| | | |
|-----|---|---------------------------------------|
| 滚筒法 | 流程短，排渣快，自动化程度高，占地面积较小，污染小、渣粒性能视渣型而异。 | 铁回收效果差，收益低。局部漏渣和变形较多（转炉滚筒），运行成本高、投资大。 |
| 风淬法 | 安全高效，排渣快、工艺成熟，占地面积较小。污染小，渣粒性能稳定，粒度均匀且光滑（>5 mm没有），投资少。 | 无法进行铁回收，收益低。 |

1.4.1 钢渣辊压破碎 - 自压热闷技术介绍

由于炼钢过程投入的石灰过量，石灰被已经饱和的钢渣所包裹，生成死烧石灰，另外钢渣中硅酸三钙（ C_3S ）在高温下分解，也产生 $f-CaO$ （自由氧化钙）。 $f-CaO$ 结晶致密，常温下水化反应慢，体积膨胀 98%。该技术通过闷罐提高热闷工作压力，可促进 $f-CaO$ 消解反应。

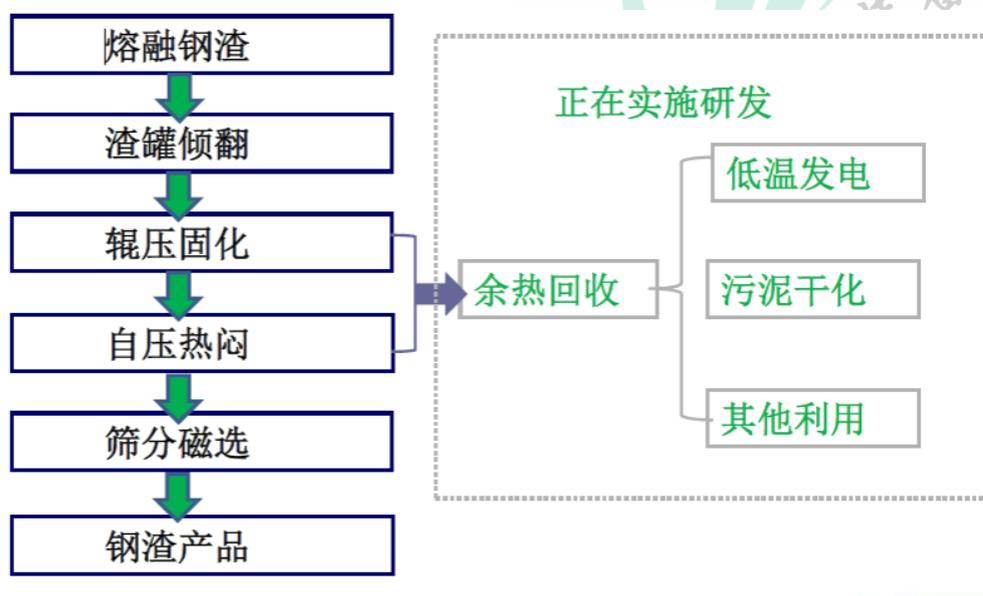


图8 钢渣有压热闷工艺流程图

1.4.2 钢渣辊压破碎 - 自压热闷工艺的基本工序

(1) 辊压固化工序

辊压破碎工序作用：通过机械和喷雾冷却方式，将熔融钢渣快速离散、粒化，为自压热闷工序创造合适的温度和粒度条件。

(2) 自压热闷工序

自压热闷工序作用：利用钢渣自身余热加热水产生的高温高压饱和水蒸气快速完成钢渣中游离氧化钙的消解，实现钢渣的稳定化，渣铁分离，为钢渣高效粉磨以及用于建材等行业创造条件。

(3) 钢渣有压热闷的主要设备

A. 钢渣辊压破碎机。该装置是一种往返移动的辊式熔融钢渣破碎装置；通过回转运动和直线运动的合理匹配，实现多相态并存钢渣的快速固化和推渣落料两种功能；为有压热闷工艺奠定了基础，填补了该工艺专用设备的空白。

B. 渣槽及转运台车。该设备具有转运台车的功能，可完成钢渣在不同作业位置的转运；该设备主要由横、纵两个台车组成（类似铸造桥式起重机的大、小车结构），可沿轨道在横向和纵向方向上运动。渣槽的功能是盛放固态钢渣。

C. 钢渣有压热闷罐。该装置是一种齿啮式快开门结构的高温压力容器，工作压力为0.2-0.4MPa。采用隔热、水冷结构，保证了有压热闷装置的安全性、可靠性。



图9 渣罐倾翻机（实现渣罐360度倾翻作业）



图10 辊压破碎机（实现熔融钢渣快速离散、固化并进行推料）



图11 渣槽及其转运台车（实现热渣转运并卸料）



图12 自压热闷罐（实现钢渣快速消解、稳定化处理）

（4）钢渣辊压破碎-自压热闷工艺的技术优势

- A. 闷周期短（从传统的十几个h缩短为三四个h）。
- B. 自动化水平高，工作定员人数少。
- C. 装备化、自动化程度高。
- D. 清洁化生产：处理过程在密闭罩和热闷罐中进行，蒸汽、粉尘有组织排放。
- E. 建设和运营成本低。
- F. 可实现钢渣余热的回收利用。
- G. 尾渣性能优越，为深加工奠定基础。以下表4是与传统热闷的具体指标对比。

表 4 罐式有压热闷处理方法与池式热闷处理方法的指标对比

| 对比项目 | 池式热闷处理方法 | 罐式有压热闷处理方法 |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|
| 热闷周期 | 24h | 2.5-3h |
| 钢渣稳定性 | a. 游离氧化钙小于 3% b. 浸水膨胀率小于 2% | a. 游离氧化钙小于 2% b. 浸水膨胀率小于 1% |
| 劳动定员 | 罐式有压热闷比池式热闷处理技术热闷区域劳动定员减少 40% | |
| 运营成本 | 罐式有压热闷比池式热闷处理技术运营成本减少 40% | |
| 占地面积 | 罐式有压热闷比池式热闷处理技术占地面积减少 13% | |

(5) 钢渣有压热闷工艺发电工艺流程

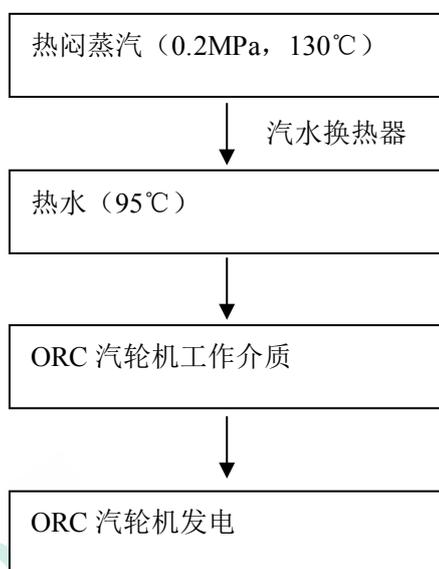


图 13 钢渣有压热闷工艺发电工艺流程

1.5 适合内陆钢铁企业的钢渣的利用模式 (具体需要根据企业地理位置和条件选择实施)

1.5.1 钢渣返回钢铁生产流程

比较常见的如钢渣用作烧结矿熔剂及高炉熔剂；钢渣在转炉回用：留渣操作可认为是热渣循环利用，而有些企业将阶段性的低磷铁水冶炼的钢渣单独存放、相机利用的方式则可称为冷渣循环利用。用作铁前熔剂时，最大的问题是钢渣的P含量问题，钢渣配比不能太大，否则铁水P含量高而得不偿失。回收钢渣中的废铁，手段有破碎、磁选、球磨、水洗等。总之，钢渣做得越细，其中的金属便可以回收得越多。但破碎耗随着粒度的不断增大而成幂函数增长，探索新的低能耗、高效细碎技术是解决这一问题的一个方向。

1.5.2 钢渣用于建筑领域

(1) 用于道路路基，优点是抗冻性好、导电性好、不干扰铁路通讯系统、用于沥青路面强度高、

硬度大、防滑、磨碎率小、结实等优点。

(2) 生产钢渣水泥和钢渣混凝土。其一是细磨成钢渣微粉，作为水泥和混凝土的参合料，优点是适合蒸汽养护、后期强度大、耐磨、耐腐蚀性好、水热低、膨胀度小（形状稳定性好）、生产工艺简单、成本低且减少了熟料的生产量，实现节能减排。其二钢渣小粒作为混凝土砂浆骨料和沥青混合骨料，相当于碎石所起的作用。

(3) 生产定形建筑制品。最常见的应用是生产钢渣蒸养砖瓦制品，形状较多，用于墙体、道路、抑尘路面等（例如格子砖空隙种植耐踩踏植物）。近年来，国内外采用先进的加气和发泡工艺，将钢渣、矿渣、粉煤灰等按照一定比例混合，生产出密度不同的高附加值的钢渣泡沫混凝土砌块，其中钢渣掺混比例高达 50% 以上，最高达到 70%，产品的保温性和物理性能优越，为钢渣综合利用开辟了新路子。另外，国内外还有用钢渣和粉煤灰一起制造钢渣陶瓷的，属于高端领域。

(4) 钢渣用于海绵城市建设。典型例子是钢渣透水砖，其采用沙子、水泥、石屑、碎石和钢渣经过压制成形和养护制成，也有用钢渣配合其它原理制成轻质陶瓷颗粒再制成定型透水制品的案例，广泛用于城市广场、人行道、园林等，具有透水性好、抗磨性好、抗压性好和强度高特点。

(5) 钢渣用于烟气脱硫

传统的烧结和电厂烟气脱硫工艺采用石灰石或石灰作为二氧化硫吸收剂，成本较高。而钢渣中有大量碱性氧化物，适合作为烟气脱硫剂。目前成熟的工艺为循环流态化床烟气脱硫工艺，流程简单，运行成本低，副产品干态化，便于利用。

(6) 钢渣用于高性能填料

填料具有补强作用，可以提高产品的力学性能并且价格低廉，还可降低成本。目前在载重车辆轮胎、铁路道口硬质橡胶垫、接缝伸缩块等橡胶制品中已经应用。

2 炼钢注余渣（或称精炼渣）的充分利用

精炼后的钢包顶渣，相当于一种在炼钢工艺不知不觉间预混的精炼渣，其碱度高、冶金性能好、成分合理、化渣快，除了有些炉次渣这含 S 较高外，大部分炉次渣中 S 都未饱和，完全可以再回到精炼工序二次甚至三次利用。目前有精炼站的钢铁企业有许多都实施了精炼后注余钢渣的热回收，称之为“精炼热渣循环工艺”，但受限於厂房、起重设备、产品大纲和生产组织等条件限制，热渣循环比在 20-50% 间变化，目前还没有哪一家企业可以将注余渣全部利用的，一次都没有循环的注余渣只能倒进渣盘凝固后倒运至渣场，在回收金属后，粉渣堆存。精炼渣由于其高碱度、高还原性的特点，粉化扬尘严重，不利于环境保护且造成资源浪费。为解决以上冷态精炼注余渣利用率不高的问题，关键就要避开厂房、起重设备、产品大纲和生产组织等方面的制约因素，开发出便于循环利用的方式。以下是两项建议。

2.1 注余渣粉的集中

粉渣的集中采用双层格栅，上面一层采用纵横交错的不锈钢方坯制作（最好是圆坯制作，以便粉料易于下落），以保证结构刚度，其空隙较大。下面一层采用不锈钢板制作，类似于转炉地仓的格栅，其空隙较小并有一定坡度，在一旁设置收集斗。在下层格栅的下方布置锥形料仓，采用电振给料，仓的下面是软连接式的插入式料咀，用于给循环料罐装料。渣盘凝固后磕出放置在第一层格栅上逐渐粉化，大型钢片留在格栅上，粉渣和小钢片下落至第二层格栅上，大部分小钢片留在第二层格栅上，粉渣与微小钢片继续下落收集至锥形仓，电振给料至料带或循环料罐。粉渣中混有的小型钢片不影响下料和精炼使用。第一层格栅上的大型钢片采用磁盘吸走，二层格栅上的小型钢片大部分滑落至格栅一旁的收集斗中，少量的可用耙子刷下来或用电动刮板刷下来。设备设想图见图 14。

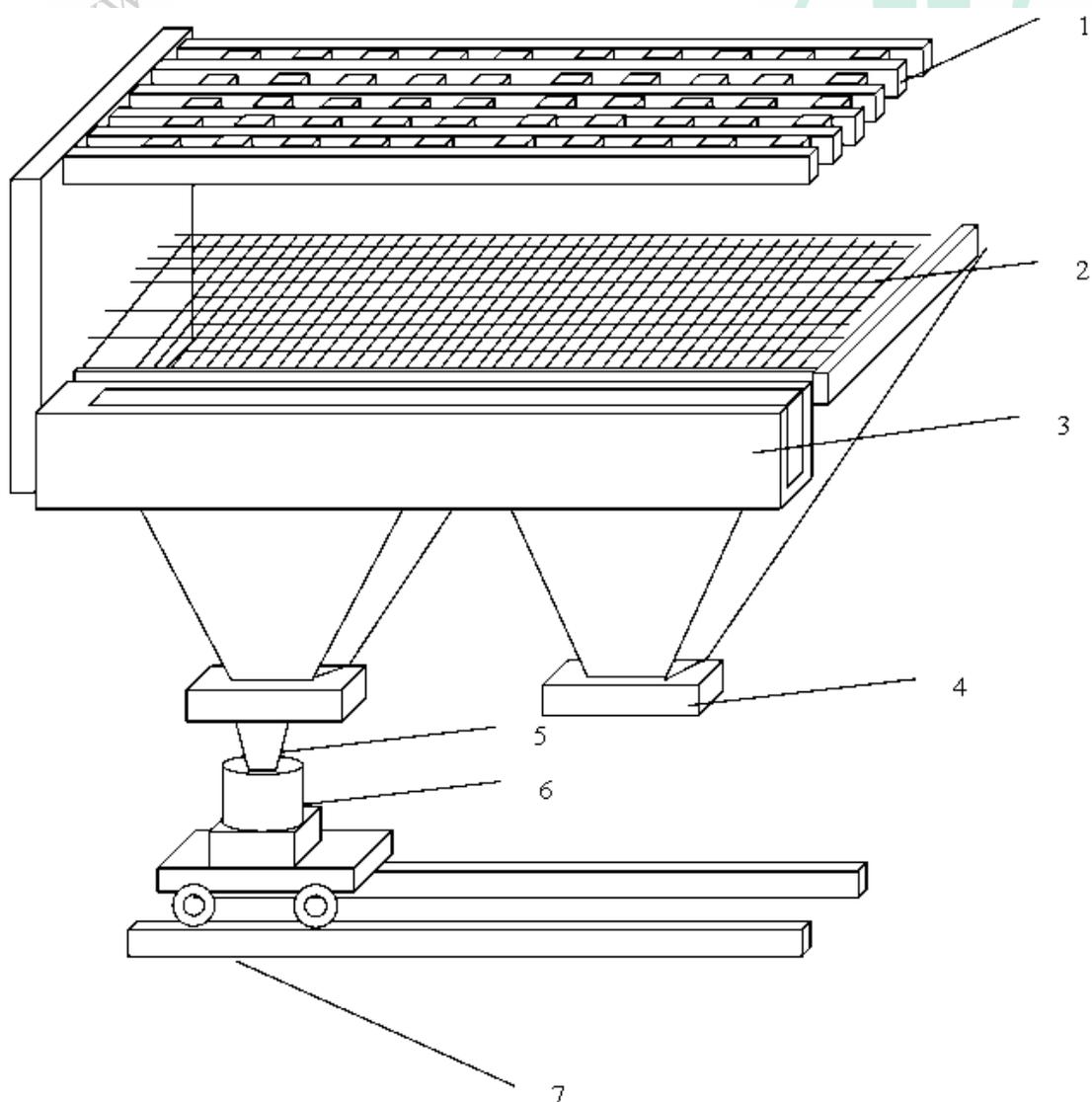


图 14 冷态注余渣筛分、收集装置结构示意图
(1- 上层刚性格栅, 2- 下层斜坡格栅, 3- 废钢料槽, 4- 电振式料仓, 5- 可升降式下料咀)

2.2 注余渣粉的使用

(1) 收集企业内部的装料小袋集中存放，组织人员将分离金属后的精炼渣装袋后运往炼钢系统，

在转炉出钢时加入钢包作为预成渣或在精炼站加入钢包。也可在在炉渣跨设室内注余渣盘暂存池，渣盘先在其中存放一段时间，待渣铁分离后，用磁盘挑出金属，将粉渣装袋在转炉出钢时回用。当然，以上装袋的粉渣也可以在精炼站加入钢包。

(2) 制作多个循环使用的带支架的可移动料罐，放置在上述粉仓下面的轨道平车上，料仓底部的上限活动式料咀插入料罐上部的弹性橡胶环圈可以封闭、抑尘。电振给料将料罐装满，用渣跨天车吊运至过跨电动平车上的罐架上过跨倒运至精炼跨，天车吊运至精炼平台预设的抑尘式下料口上方的称量架上并可靠固定，使用时通过插板控制下料，根据数字显示控制下料量，将粉渣加入钢包。设置下料口时须注意使得落料点处于精炼炉盖下方，以便除尘。循环料罐见图 15。

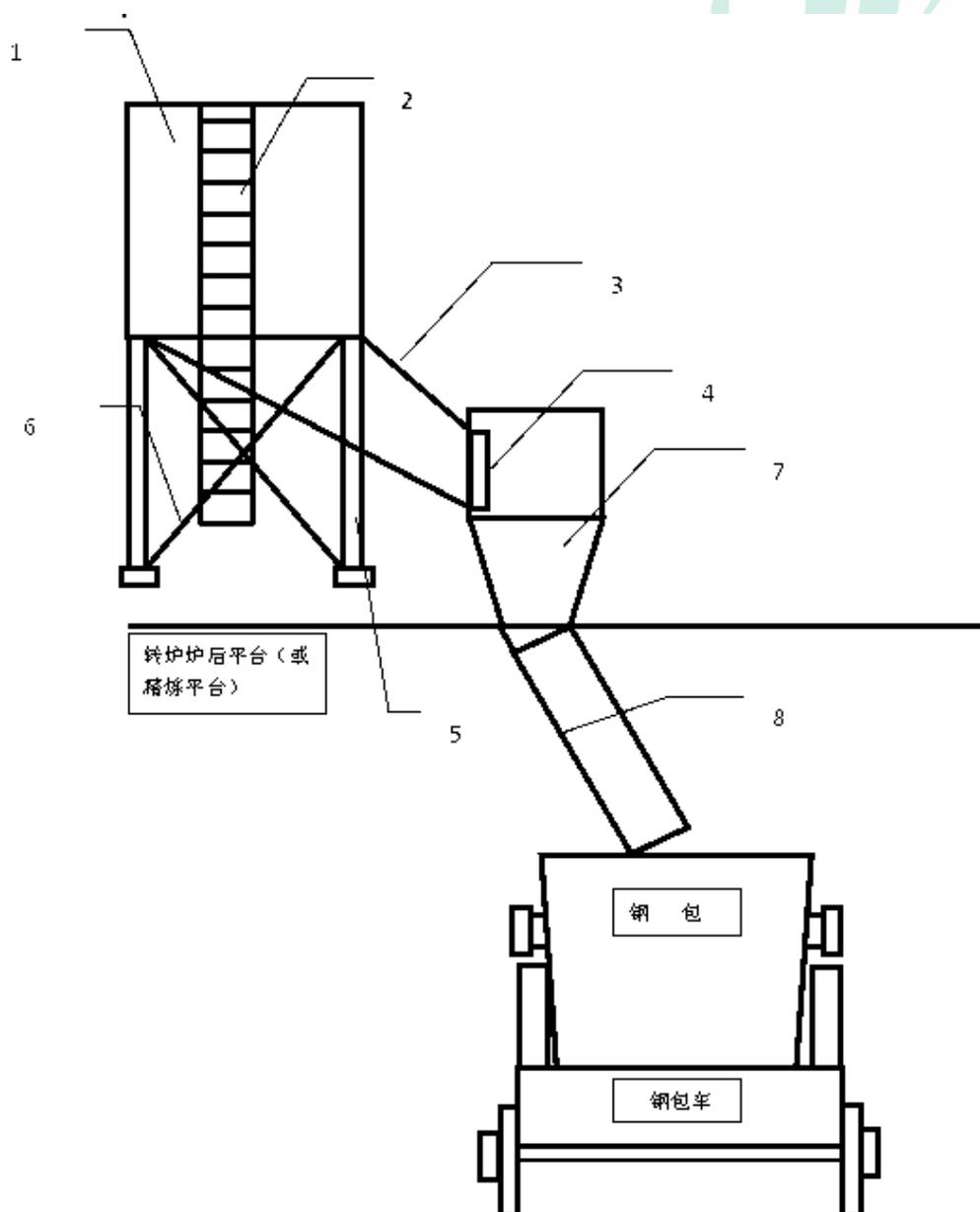


图 15 冷态精炼注余渣循环料罐工作示意图
(1- 罐体, 2- 查看梯, 3- 料罐溜槽 4- 料罐插板阀, 5- 支架, 6- 加强筋, 7- 受料斗 (上方有封闭壳), 8- 下料溜槽)

3 烟气脱硫灰利用技术

二氧化硫的减排方法有三种：源头治理、过程控制和末端治理。末端烟气脱硫已经成为减少二氧化硫排放的有效方法，并取得了显著的经济效益和社会效益。湿法脱硫：产物主要是 CaSO_4 ，成分波动大，性质不稳定。半干法脱硫：产物主要是 CaSO_3 ，有害杂质多， CaSO_3 含量高难利用。

实现半干法脱硫灰资源化利用的关键技术就是：氧化后再利用技术和过程协同氧化技术。安徽工业大学的技术团队开展了大量研究工作，目前在实验室内已经形成三项新技术（烟气脱硫灰湿法氧化新技术，烟气脱硫灰高温（火法）氧化新技术和脱硫灰水热法氧化合成硫酸钙晶须新技术），申请发明专利 10 项，获得国家自然基金的资助。

3.1 低温湿法快速氧化工艺

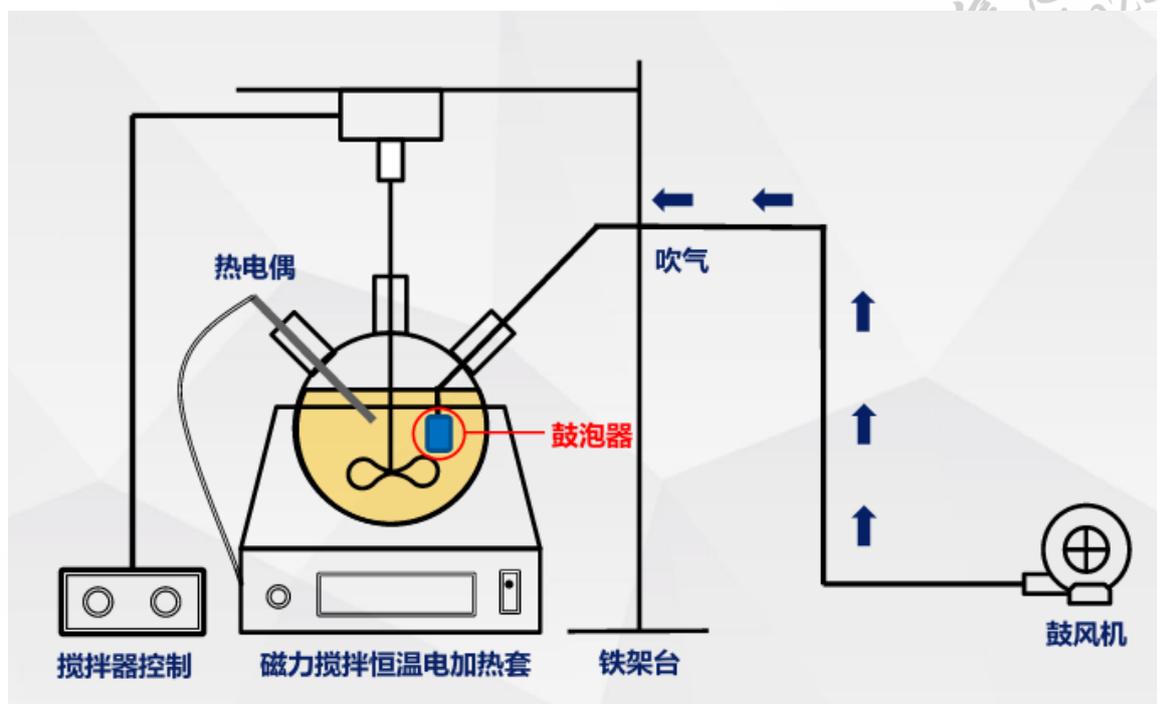


图 16 湿法氧化示意图

常规湿法氧化效率很低，需要加入助氧剂，形成低温快速氧化工艺。助氧剂选择的原则是与钙离子的结合能力要大于 SO_3^{2-} ，同时小于 SO_4^{2-} 。添加助氧剂可实现半干法脱硫灰的低温非催化氧化。助氧剂可以循环利用，降低了氧化成本。脱硫灰氧化后可直接用于石膏制品，水泥缓凝剂和胶凝材料

3.2 烟气脱硫灰高温（火法）氧化新技术

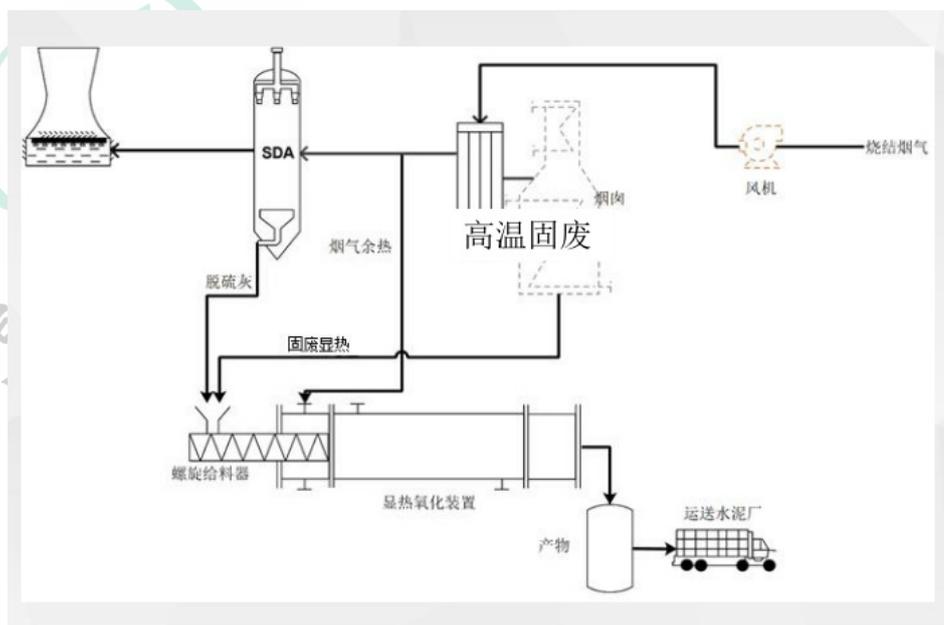


图 17 烟气脱硫灰高温氧化示意图

基本原理是利用高温固废的余热促进亚硫酸钙的氧化速度，同时高温下可将残留的碳酸钙分解，这样不仅提高了产率，也提高了产品的纯度。

3.3 利用脱硫副产品生产硫酸钙晶须

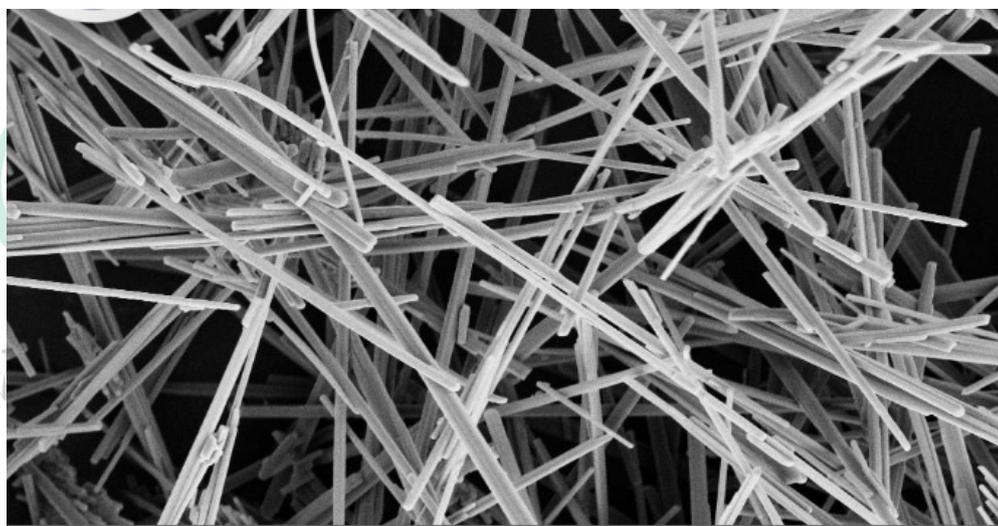


图 18 硫酸钙晶须显微结构

3.3.1 硫酸钙晶须简介

该产品为纤维状或针状单晶体，由于晶须结晶时原子结构排列高度有序，近乎完整晶体，致使晶须的强度接近材料原子间价键的理论强度，远远超过目前使用的各种增强剂。由于硫酸钙晶须有良好的增强性能及强有力的价格优势，受到国内外的普遍关注，价格根据品级在 2000-5000/t 之间变化。晶须制备方法：水热合成法、盐溶液（常压酸化法）、反胶束法、微波反应法等。以脱硫灰为原料，

采用水热合成法即可将脱硫灰氧化，又能制备出硫酸钙晶须，开辟了资源化利用的新途径。

3.3.2 硫酸钙晶须的主要应用领域

(1) 制备复合材料：例如高分子材料中加入硫酸钙晶须，可以提高材料的机械强度、耐热性以及尺寸稳定性等。

(2) 沥青填料及增强剂：以硫酸钙晶须代替石棉及木质纤维制备沥青混合料，可以提高混合料的抗高温车辙能力。

(3) 制备摩擦材料：摩擦材料中加入一定量的硫酸钙晶须，可以提高摩擦材料的耐磨性，延长其使用寿命。

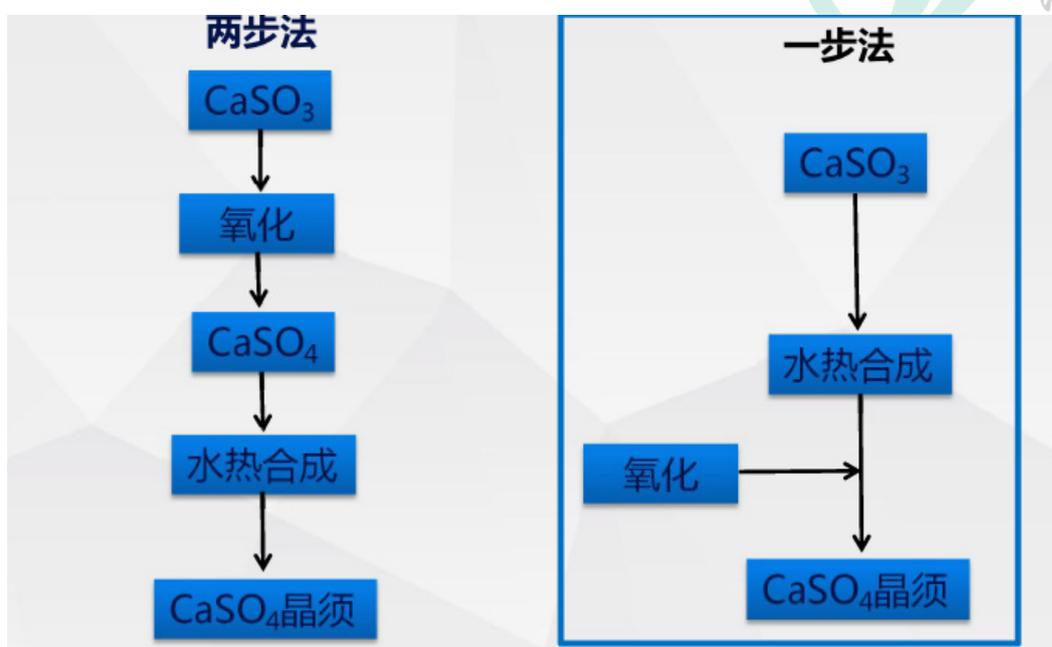


图 19 硫酸钙晶须的制备工艺流程

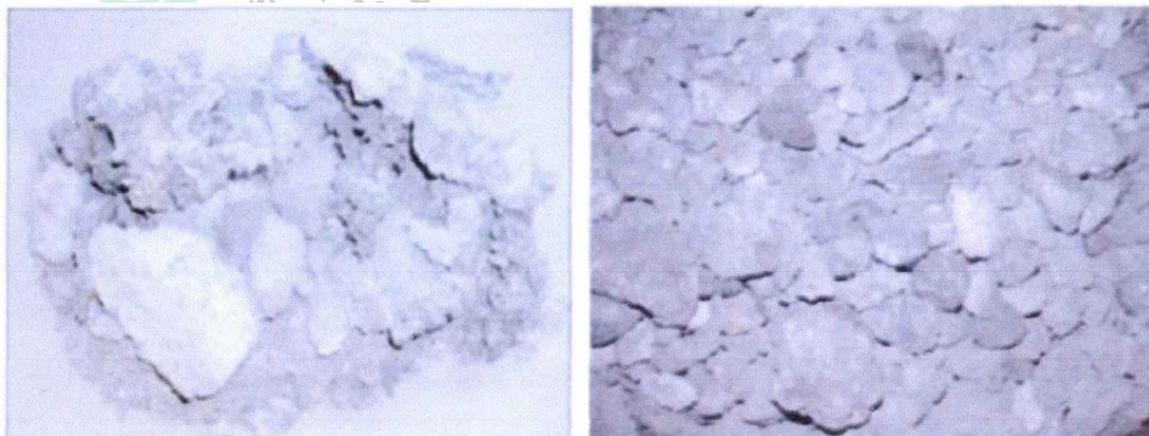
4 非钢铁产线尘泥处理和利用技术

4.1 铝灰高值化利用技术

4.1.1 铝灰特点概述

铝灰是电解铝企业的固废之一，产生量大约 30-50kg/t 铝。因企业不同，铝灰的成分各有不同，大致成分如下：Al 10%-30%， Al_2O_3 20%-40%，Si\MgFe 氧化物 7%-15%，KNaCaMg 的氯化物和微量的氟化物占比 15%-30%。区分铝灰的种类是基于含铝的百分比，分为以下两类：（1）一次铝灰，颜色呈灰白色，铝含量在 15%-70%，因为主要是在不添加盐熔剂的电解铝和铸造过程中产生，铝的含量较高，主要是铝和铝的氧化物混合组成。（2）二次铝灰，由于受到其它物质污染，呈现黑色，铝含量

在 12%-20% 之间，混有一定量的盐熔剂和其他氧化物。铝灰中不仅含有丰富的 Al、 Al_2O_3 ，还含有利于化渣的 CaF_2 ，如加工、使用得当完全可以起到钢液精炼作用。例如铝灰与钙质物料配合压球，生产精炼合成渣并兼具脱氧功能（缓释脱氧剂）。目前只有少量企业开展了试点，使用效果良好。对于周边有电解铝企业的钢铁企业可考察、联系与实施。铝灰外观见图 20。



(a) 一次铝灰

(b) 二次铝灰

图 20 铝灰的外观

4.1.2 铝的回收方法

根据回收工艺可分为加盐类和不加盐类添加剂两种。加盐的分离工艺有炒灰法、ALUREC 法和倾动回转炉法。不加盐的工艺有重力选矿法。不加盐工艺成本低、能耗低、同时解决了添加盐类添加剂产生含盐废料的问题，节约了成本。

4.1.3 氧化铝的回收方法

(1) 高温煅烧法：以铝灰为原料，采用煅烧法，将原料经水洗预处理提高纯度后，在 $1600^{\circ}C$ 高温下煅烧 4h 以上制备氧化铝，所得氧化铝纯度可达到 95% 以上。

(2) 酸浸法：以铝灰和硫酸为原料，采用酸浸法得到硫酸铝，随后采用亚铁氰化钾沉淀法去除硫酸铝中的铁，再利用碳酸氢铵溶液与除铁后的硫酸铝溶液反应得到前驱体碳酸铝铵，在 $1150^{\circ}C$ 下煅烧 2h 可得到纯度为 99% 以上的 $\alpha-Al_2O_3$ 粉体，产物颗粒度约为 70nm。

(3) 碱式法：以铝灰为原料，将铝灰与 NaOH、 $NaNO_3$ 混合，在一定条件下浸出熔炼产物进行晶种分解得到氢氧化铝，再在 $1200^{\circ}C$ 下煅烧 1h 以上得到粒度小于 4.25 微米的 $\alpha-Al_2O_3$ 粉体。

4.1.4 铝灰的除杂

(1) 水浸出法：研究人员分别用一次水溶液浸出法、二段水溶液浸出法、热球磨浸出法、碱液浸出法对二次铝灰做了除杂比较。前三种选择水溶液为介质的浸出法堆 Na、Cl、K 元素的浸出效果

斗十分显著，但无法除 SiO_2 。

(2) 碱液浸出法：将二次铝灰浸泡在 NaOH 溶液中，在一定温度下搅拌，一段时间后经抽滤、干燥得到粉末。碱液浸出法浸出率最高，除杂效果最好。

(3) 酸液浸出法：将铝灰与盐酸溶液混合浸泡，再放入马弗炉中于 1200 下焙烧 2h 以上，可有效除去杂质，并且晶体类型发生改变，从而结构和性质改变，有利于更好地综合利用。

4.4.5 铝灰的应用

(1) 利用铝灰合成 sialon 陶瓷材料

Sialon 陶瓷具有强度高、硬度高、耐高温、热学和电学性能优良等特点。利用铝灰制备 Sialon 陶瓷材料，不仅资源得以利用，还使得该型陶瓷的生产成本得以降低，前景广阔。

(2) 利用铝灰制备棕刚玉

目前用于制备棕刚玉的铝矾土资源日益紧缺，研究发现铝灰也可以制备棕刚玉。

(3) 利用铝灰制备镁铝尖晶石

铝镁尖晶石是高档耐火添加料，随着天然原料来源的日益减少，人们也在积极开发别的原料途径，利用铝灰制造铝镁尖晶石是起重一种方法。高玉成等以铝灰为主料，经二次电熔烧结得到了镁铝尖晶石。该方法成本低、能耗少，是一种性价比较高的方法。钟鑫宇等以铝灰和菱镁矿为原料，研究了不同煅烧温度对产物的组成、晶胞常数和微观结构的影响。结果表明 1400℃ 煅烧得到的镁铝尖晶石晶胞常数最大，结构致密，晶粒均匀。

(4) 利用铝灰制备人造沸石

沸石是一种具有分子空隙的矿物，具有吸附和例子交换的性质，是理想的净化材料。研究人员将铝渣加入磷酸溶液，混合搅拌 1.5h 以上并加入三乙胺再搅拌 1.5h 合成凝胶，再转移到高压釜中加热 10h，取出后过滤、干燥、高温去除三乙胺后得到了沸石。

(5) 利用铝灰制备陶瓷清水砖

徐小红等以铝灰为主要原料，添加不同的烧成助剂，通过压制成型的方法制备了高性能的陶瓷清水砖。该方法得到的产品吸水率高、气孔率大、强度高且保温和隔音性能好，还降低了清水砖的制造成本，开辟了铝灰使用的新途径。

(6) 利用铝灰等固废制造硫铝酸盐水泥

硫铝酸盐水泥具有高抗渗、高抗冻、耐腐蚀等优良性能。研究人员以脱碱赤泥、脱硫石膏、铝灰和电石渣 4 种固废为原料，采用“湿法粉磨-均匀化-压滤”的湿法工艺制备硫铝酸盐水泥取得成功。

(7) 利用铝灰制造硫酸铝

硫酸铝常被作为絮凝剂用于提纯引用水以及污水处理设备当中。研究发现以硫酸和铝灰为原料可生产该型产品。

(8) 利用铝灰制造聚合氯化铝

聚合氯化铝 (PAC) 是一种优良的高分子絮凝剂，适用于多种污水的水质净化。采用酸溶法制备

的 PAC 对废水的 COD（化学需氧量，水体有机物含量指标）去除率高达 60% 以上，且降低了 PAC 的制造成本，使得铝灰得到资源化利用。

(9) 利用铝灰制造炼钢脱硫剂

传统的炼钢脱硫剂主要是 CaO 或 CaO-Al₂O₃ 复合脱硫剂，新型脱硫剂采用铝灰、石灰、萤石复合制备复合脱硫剂。龚建森等对铝灰复合脱硫剂再铸铁和炉外脱硫作用进行了研究。结果表明，适用铝灰脱硫剂的降硫率达到 30% 以上，对产物的形态也有积极作用。

5 铁合金固废利用技术

5.1 铬铁矿热炉渣生产引流剂

某企业研究院 2018 年与自有耐材公司合作，利用铬铁矿热炉渣熔点较高的特点作为铁合金铁包耐材的部分替换料的实验室研究取得了成功。部分指标甚至优于耐火集料。因此铬铁矿热炉渣后续大规模用于冶金厂区铁包料、铁罐料和生产自用 / 外销挡渣锥效益都将十分显著。除了上述用途，这里还有一个设想就是利用铬铁渣熔点高的特点生产钢包引流剂，这样可以将钢铁企业的焦粉、焦油、焦渣、干熄焦除尘灰硅石粉等优势资源加以利用，完全可以尝试开发多个级别品种，在满足自用的基础上可以外销别的企业。对于附近有铬铁公司的企业或起身有铬铁公司的企业，可以考虑铬铁渣的以上拓展利用方式。

5.2 固废利用先进理念

5.2.1 以钢渣产业化利用为例的网络图

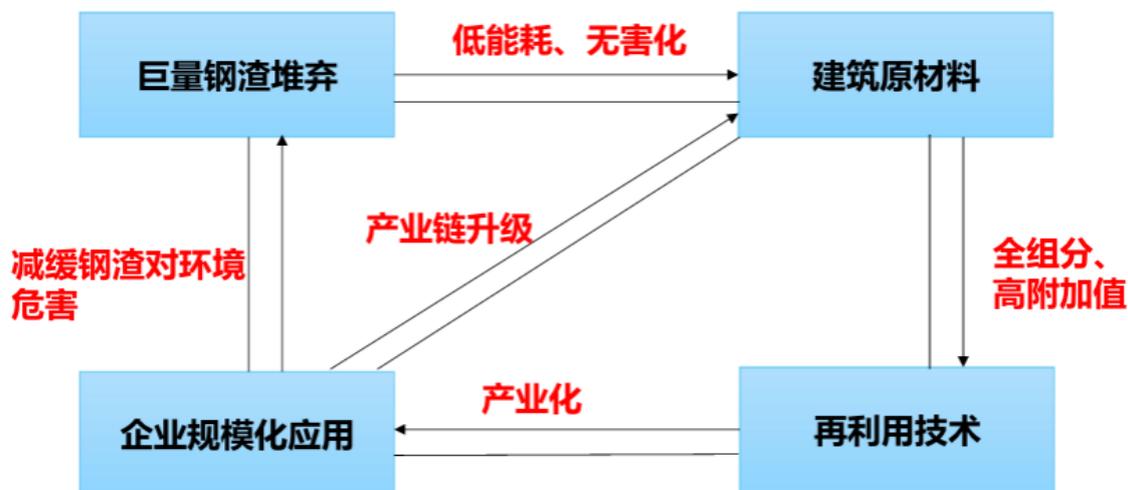


图 21 钢渣产业化利用网络图

5.3 粉磨工艺先进理念

5.3.1 因料而异理念

根据材料的性质、产品质量要求以及设备的粉磨原理，才能正确选择粉磨设备，继而确定合理的工艺技术方案，是建设矿渣粉等粉料生产线的关键步骤。

5.3.2 超细粉磨理念

超细粉磨是增强固废制品质量、扩大固废应用领域的有效途径，也是实现固废增值的有效途径。但应大力发展低成本粉磨技术才能体现经济效益。将企业内部余热作为超细粉磨的动力源是一种低成本模式。

(1) 超细粉磨的特点

由于超细粉磨粉体粒度极细，比表面积大，加之缺陷少，因而其表面活性高，化学反应速度快，溶解度大，烧结温度低且烧结体强度高，填充补强性能好，又具有独特的光、电、磁性能等。同样矿渣被磨制成超细粉也具有了大部分超细粉体的特征，这些特性克服了一般矿渣粉的缺点，主要特征如下：比表面积大，表面能大，使其不会象矿渣粉一样在掺量较大时增加混凝土或者砂浆的泌水性；因表面积大而具有较好的分散性和吸附性，用于建筑材料中时，比一般矿渣粉具有更好的填充和改善空隙结构的作用。另外不会像一般矿渣粉那样降低混凝土的早期强度。

(2) 超细粉磨的展望

超细粉磨目前由于技术瓶颈，产量低且成本高，但随着混凝土用量和性能要求的提高，将来势必需要越来越多的矿渣超细粉，市场是十分广阔的。

5.3.3 复合掺混理念

虽然矿粉已经成为制备高性能混凝土必不可少的组分，可有效改善混凝土的工作性、力学性及耐久性，降低水泥水化热等优点。但目前高品质的矿粉越来越少，很多地区已面临矿粉短缺的情况。而将钢渣粉与矿渣粉复掺用作混凝土掺合料时，两者作用效果能够相互叠加且优势互补，为制备高性能混凝土提供了一条有效途径，同时可加大钢渣掺量，实现钢渣的资源化利用。

5.3.4 引进助磨剂

助磨剂是近年来开发的一种细磨助剂，是以化学激发活化原理作为理论基础，选择对人体和水泥无害的聚合多元醇及有机醇胺类物质作为其助磨成分，选择含硅类和碱金属基无机材料作为活性激发组分复合而成。该助磨剂具有助磨和增强双重作用，其所含的助磨成分在粉磨过程中起到助磨、

改善颗粒组成的作用，所含的激发增强成分在水化过程中起到提高钢渣粉水化反应速度的作用。

5.4 余热利用理念

实现蒸汽、热废气等的一次直接利用（而非发电），作为换热热源或驱动非电设备，可以简化余热回收工艺，提高能量利用效率。而固废的产生往往伴随着余热的产生。蒸汽动力磨以固废余热解决固废自身问题，促进固废升值，是一种很好的节能减排技术革新案例。今后的余热利用方向，应是能直接利用则不要二次转换形式利用。

5.5 学科互补理念

目前存在的问题是，固废相关人员都是某一领域的“专家”，但对于和固废处理相关的别的领域知识与实践欠缺。例如长期从事炼铁的技术人员对于炼铁工艺、铁渣的产生过程、产生量、一次处理工艺、与原燃料的关系、与成本的关系相对比较了解，但对于建筑材料或耐火材料领域的知识则知之甚少。建筑材料或耐材领域的技术人员侧重于物性研究和在此基础上的“因材施教”，但又不了解炼铁工艺和铁渣的其它方面，也不太清楚市场经济理论和环保。环保专家清楚怎样做到清洁无污染，但因缺乏冶金知识，往往不能了解企业真正所需和做到完美的量体裁衣。真正具有一专多能能力的人十分稀缺，这就造成了固废处理方面的诸多问题：兼顾性差、配套性差、固废处理技术创新和发展缓慢。因此固废处理不能偏安一隅，固废处理的团队和专家应是通晓四方、融会贯通型的“博士”，他既精于本专业，也了解异专业；即精于理论，也又丰富的实践；既常于理论研究，也能学以致用和理论联系实际。

6 固废工作的若干建议

6.1 关于大力发展冶金渣微粉事业的建议

矿渣微粉在水泥和混凝土掺合利用取得成功以来，随着细磨技术的不断进步和成本的降低，以上固废细粉的掺合比例越来越高，对水泥和混凝土的性能促进作用也越来越明显。随着经济的发展和社会的进步，各行业对水泥混凝土的性能势必提出越来越严格的要求，在此趋势之下，超细粉磨的研究方兴未艾，超细粉的产量逐年在增长。因此酒钢应适应形势，尽快建立各类冶金渣的细磨企业，先从高细粉磨产品占主导开始，逐步过渡到超细粉磨产品占主导，结合超细粉磨技术和蒸汽动能磨技术积极降低粉磨成本，提高产品附加值，增加经济运距，扩大客户，掌握冶金渣盈利的主动权。

6.2 关于企业高温显热利用的建议

目前企业内部钢渣和铁渣的显热十分显著，部分企业采取钢渣或铁渣生产蒸汽的工艺，但存在蒸汽洁净度差的问题，且设备较为庞杂，需要做进一步研究。另外，以上思维将高热换成低热，把能源的使用范围限制在蒸汽发电、蒸汽养护和蒸汽换热干燥物料的较狭窄的领域。不妨转换思维，直接利用其高温显热，以下是笔者想到的两个方向：

1. 钢渣去 P 回用：既然钢渣是低能态的释放能量后的稳态产物，那么对钢渣加以能量应能恢复其冶金原料的特征。设想是以煤炭作为还原剂，以钢渣显热作为主热，以太阳能光热技术聚焦热为温度保持机制，将钢渣中的 P 还原脱出一部分，恢复钢渣的冶金功能，减少石灰、石灰石乃至白云石的用量。

2. 钢渣显热用于煤化工和生物质化工：钢坯间壁法利用钢渣显热生产低温焦和木炭（机制木炭、修剪枝条原木炭、高档果壳炭、高档果核炭、烧烤蛋）

3. 冶金渣产生的蒸汽用于建材、耐材和球团制品的蒸汽养生。当然这里的蒸汽是实施热闷工艺以后产生的，便于收集与利用，且以上应用对洁净度要求不高，正好无尽其用。

6.3 关于钢渣利用的建议

结合北方内陆的地域特点和条件，作者认为一下 5 种方式比较适合酒钢这样的内陆钢铁企业，也符合甘肃省的省情。

6.3.1 钢渣返回钢铁生产流程回用

分析：该技术简单易行，能利用钢渣高碱度的特点，且酒钢钢渣的磷含量水平与南方企业相比要低得多，烧结工序完全可以低配比配料。另外，钢渣破碎、磁选、球磨工艺已经应用多年，虽有待优化，但比其它利用方式较易于开展。国内部分企业和榆钢曾经进行过选铁后的钢渣用于烧结的生产实践，在合理的配比下有一定的降低辅材消耗和能耗的作用，烧结综合指标没有显著下降。

建议：尽快开展钢渣在烧结回用的试验，先从恢复碳钢薄板厂的磁选线开始，为烧结厂提供细碎钢渣。

6.3.2 钢渣用于道路

分析：西北冬季严寒，昼夜温差大，因此极适合采用钢渣这样的抗冻性好、自然堆角高大、形状稳定性好的材料作为填充材料。另外酒钢临近铁路公路，运输方便，可便捷地将钢渣用于道路施工地点。

建议：像废石一样，目前存在的问题，一是社会尚不知道钢渣的特性以及价值，且甘肃地区地势平坦，砂石不缺，因此施工方宁可就地取砂石作为填料也不使用钢渣。这就需要企业大力宣传，同时政府出于本地区环境治理考虑给予使用方一定的优惠政策，推进钢渣路基工作开展。二是酒钢多

年以来使用原始的弃渣热泼工艺，钢渣消解程度较差，安定性尚不满足道路路基、混凝土骨料、沥青骨料的条件，需要消解（渣场多年堆放的钢渣则需要二次消解）。另外，由于钢渣价值较低，因此应考虑经济运距的问题。后续需要邀请专业单位在针对现产生的钢渣规划处理方式的同时也针对积累的钢渣制定规划逐步处理。

6.3.3 生产钢渣水泥和钢渣混凝土

分析：该技术简单易行，利用了钢渣中的 CaO 和 SiO_2 ，目前酒钢本部小规模利用钢渣细磨粉作为水泥掺合料。榆钢周边也有钢渣微粉企业利用榆钢的钢渣生产微粉供给水泥企业和商砼企业。

建议：虽然钢渣越细磨，其水硬胶凝性越好，潜力越能发挥出来，但目前限制钢渣微粉应用的环节主要是细磨成本高。国外关于低成本高效细磨技术的研究如火如荼，近年来有些企业也从国外引进了一些碎、磨一体的加工线并已经逐步显现效益。宏达公司力量毕竟有限，集团公司宜集中力量建设高端微粉企业，其产品不仅保供宏达公司，也可面向社会。上文已经提及暂本部建设微粉企业的事，后续的模式应是集中建设，分散营销。除此之外，酒钢应与市政府结合，积极创造条件，给予优惠政策，吸引微粉企业来嘉峪关投资兴业也是一条途径。

6.3.4 钢渣生产高档定形建筑制品

分析：生产定性建筑制品的原料除了钢渣，还有粉煤灰和水泥等，这些物料酒钢十分丰富，且就近取材，具有成本优势。酒钢地处内陆，距离市场遥远，从销路来看，嘉酒地区 110 万的人口，按照每人消纳 2 吨的各类定形制品（钢渣砖瓦、砌块和陶瓷等等）来计算，仅消纳 220 万吨的量，仅相当于 2 年的钢渣和粉煤灰产量，消纳当期产生的量尚可，但消纳历史存量就显得力不从心。而解决这一问题的出路之一就是加工成高端的建筑制品，其经济运距可以扩大，至少在省内和周边省份可以销售。钢渣蒸养砖制品和蒸养砌块是酒钢利用钢渣生产并取得成功的最初两种产品，目前又发展为加气砌块、路面砖等多个品种，这是值得肯定的。缺点是技术含量低，产品低端，经济运距和区域人口限制了其发展空间，今后还应继续发展高附加值产品，例如钢渣粉煤灰为原料的陶瓷。

建议：南方已有企业与科研院所一起研制成功平面陶瓷制品并且已经占有一定市场。酒钢即使暂时不具备资金条件建厂也完全可以创造条件吸引这类高科技企业前来投资，且不论合作后的效益有多大，但就固废处理的意义就已经很大了。况且对于变废为宝的行业，国家是有优惠政策的。

6.3.5 钢渣用于烟气脱硫以及副产品用于盐碱沙荒土壤改良

分析：嘉酒地区盐碱沙荒土地占了该地区面积的 60% 以上，耕地面积极少。而酒钢的工业副产品—烧结或电厂烟气脱硫石膏恰恰可以改良这种土壤，并提供一定的 P、Ca 肥力。烟气脱硫方面，酒钢还在使用石灰石脱硫，成本较高，若采用钢渣脱硫不仅可实现以废治废，解决环保问题，其脱硫成

本也可降低。

建议：利用选铁后的钢渣尾料细磨生产脱硫剂（可由集中建设的微粉企业提供），采用全渣脱硫或与石灰石配合的方式，以上脱硫后的副产物可用于嘉峪关周边盐碱沙荒地改造。此项工作需立项争取市政府乃至省政府支持，方能规模化开展，则不仅对于酒钢环保还是周边生产环境改良，乃至土地开发利用都是有重大意义的。

6.4 关于铁合金渣利用的建议

西北的酒钢是全国少有的配备铁合金产线的钢铁企业，条件得天独厚，应积极发展这一优势。后续意向产品有耐火添加料、钢包引流剂、高档磨料和矿棉。

(1) 耐火添加料：铬渣由于含有较高的 Al_2O_3 、 MgO 和 Cr_2O_3 ，并含有尖晶石相，使得熔化温度达到 $1500^{\circ}C$ 以上，这就使其具备了作为耐火浇筑料添加料的条件。经济技术研究所已经与宏电铁合金和科力耐材公司合作进行了前期研究，证明在硅锰合金铁包和铬铁合金铁包打结料中的配比可以达到 10% 以上，耐材的整体耐火度未下降，因此其替代外购耐火集料、实现耐材制品成本降低的潜力是很大的。后续在铁合金铁包应用成功后宜扩大至钢铁主业的铁包，以便实现效益最大化。

(2) 钢包引流剂：铬铁渣采用选矿方法富集氧化铬，再利用酒钢已有的焦油、工艺粉焦，可生产钢包引流剂。不仅可以满足本企业需要，也可外销周边企业扩大市场，可行与否应先开展试验研究。

(3) 磨料：铬铁渣整粒后生产高档磨料（砂轮、砂布、磨刀条石）的试验研究也应尽快开展起来。

(4) 矿棉：硅锰合金炉渣含有 CaO 、 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 其中前 4 中氧化物含量很高，炉渣呈酸性；炼铁炉渣含有较高的 CaO 、 SiO_2 。但 MgO 、 Al_2O_3 含量略显不足，酒钢有白云石资源、有硅石粉、也有粉煤灰，可以说资源种类齐备。后续宜以高炉渣和硅锰炉渣为基础料熔融制备矿棉基料，再根据不同矿棉的要求加入白云石等其它调节剂进行成分调整，可生产多个品种，性能各异的矿棉制品。

6.5 粉煤灰利用建议

6.5.1 选铁后的粉煤灰（资源利用研究所的项目）生产铝酸盐水泥。

6.5.2 选铁后的粉煤灰作为高炉铁沟料配料。

6.5.3 选铁后的粉煤灰用于矿棉成分调节剂。

6.6 精炼 / 铝业除尘灰的高端利用方式

6.6.1 精炼除尘灰与钢包铸余粉渣生产合成精炼渣。

6.6.2 精炼除尘灰生产悬浮乳浆涂料。该方面山西中阳钢铁已与具有研发实力的企业合作开发出产品，后续可参观学习。

6.6.3 铝业铝灰（含 Al_2O_3 和少量 Al ）与石灰生产过程的除尘灰或精炼除尘灰一起生产合成精炼渣。

该方面鞍山钢铁正在开展前期研究，拟根据试用效果决定 2019 年的合成精炼压球生产规模，后续可参观学习。

7 固废处理的应遵循的理念

7.1 金属-渣身份反转理念

核心是做足“固废文章”，固废不应成为企业负担，反而应成为实现企业降本增效的战略资源。以往人们的固有思维注重铁而忽略“渣”，现在不妨反过来思考：能否将固废的效益发挥至大于钢铁主业，颠倒其身份地位（至少在钢市低靡时阶段性实现固废的效益大于钢的效益）。应具有这样的理念：钢铁企业不仅是生产钢材的，它应是钢铁、煤化工、建材、耐材、土壤改良等方面的多元经济体和多种技术碰撞和交汇的大试验基地。尤其在钢铁行业竞争激烈，利润空间减小的态势下，更应建立“东方不亮西方亮”的资源合理组织的多元化企业集团。

7.2 选矿向固废转化的理念

选矿专业，一般认为是专攻矿物富集、提取的专业。但在目前习总书记提出的建设资源集约型和环境友好型社会理念下和冶金固体废物利用研究方兴未艾之时，专业的眼界应拓展，各专业之间应深度融合。例如选矿专业、化工专业完全可以与固废利用相结合，大力推进选矿和化工理论与技术在固废处理领域的应用，实现固废处理的高效化和手段多元化。切今后矿山将越来越少，而固废处理反而日益成为国家和企业关注的重点，也应是选矿专业发力的主要方向。国家和企业应鼓励不同专业人员组成技术团队从事固废利用研究，推进成果转化，将中国的固废利用推向一个新的高度。

7.3 区位条件理念

酒钢地处西部，许多条件不如东部企业，但也不是没有优势。后续消纳固废乃至发展固废产业应遵循“发展区位优势，弱化和规避区位劣势”的理念，具体实施时，能充分发挥区位优势的事业大干，能一定程度发挥区位优势的事业慎干，不能发挥区位优势甚至用自己的区位劣势去与别人的优势竞争的事业坚决不干。后续需要详细发掘和列出本企业具有的区位优势，分析其与固废处理的关系，并组合其中几种与冶金固废处理工艺相结合。笔者分析的酒钢本企业特有的区位优势条件有：

7.3.1 丰富的固废种类

固废种类多从表面看是不利条件，但发展固废产品时选择性强，组合关系多，便于实现以废治废、组合升值和物料优势互补，实际上也是优势。后续大的方向有工艺回用料、建筑材料、无机盐、轻

质保温材料、耐火材料、磨料、其它冶金耗材等。

7.3.2 大集团优势

酒钢集团是大集团、多专业型的综合性企业集团，单位间协作伴生关系优越。在公司的统一筹划下，酒钢各单位的人力与物力可以共享，管理或技术创新成果可以分享。酒钢不仅有钢铁主业，也有煤化工、建筑建材、铁合金、机械加工等。专业多，各专业技术人员也多，酒钢钢铁研究院、技术中心从采矿到炼钢各个环节的技术人员齐备。酒钢有长期以来建立的且尚可不断优化的等多元化的经济实体和互保共建机制，便于整合企业内部各种资源办成大事和难事。

7.3.3 其它优势

地广人稀和廉价的土地使用费，自备电厂和廉价的电力，由冰川作为水库的天然水源，干燥的气候，充足的日照，距离哈密的煤炭资源较近。

以上种种条件都是可观的优势，需要我们去建立高效的机制去整合优势资源，发挥更大的效力。钢铁行业经过几个世纪的发展，虽然越来越成熟，但并不意味着再没有创新的空间。做好钢铁工作最忌讳钢铁本位、不勤不思、不知道拓宽知识和旁学杂收。只要钢铁工作者多留心、勤学习、多考察、爱思考，不断拓宽知识面，做到学以致用，活学活用，以用促学，把别的专业的知识和做法应用的炼钢方面，创新是无止境的，也一定能想出更多更好的降本增效方法。希望读者阅读本文后能在启发之下找到更多的降本增效创新方法。

钢渣一体化洁净处理技术介绍

陈新勇

(一重集团大连工程技术有限公司)

1 钢渣处理技术现状

1.1 钢渣处理标准与处理方法

2019 年《钢渣处理与综合利用技术标准》(GBT51387-2019) 发布, 将钢渣 处理工艺归纳为五类, 描述、概括了每种处理工艺基本要求与规定。这五类钢渣 处理工艺, 按处理技术与属性分类, 列于表 1。

表 1 钢渣处理工艺方法分类

| 序号 | 处 理 方 法 | | 技术分类 | 备注 | 安全性能 |
|----|---------|-----------------|----------|------|-------|
| 1 | 热闷法 | 池式热闷法 | 半干法① | | 有爆炸风险 |
| 2 | | 有压热闷法 | | 京冶节能 | 有爆炸风险 |
| 3 | 风淬法 | 一步风淬法 (开放式③) | 全干法② | | 无爆炸风险 |
| | | 两步风淬法 (密闭式④) | | 中国一重 | 无爆炸风险 |
| 4 | 滚筒法 | | 湿法⑤(水淬法) | 宝钢 | 有爆炸风险 |
| 5 | 带罐打水法 | | 半干法 | | 有爆炸风险 |

在 GBT51387-2019《钢渣处理与综合利用技术标准》归纳的五种处理方法之 外, 还有热泼法在 役大量使用, 包括渣箱热泼、池式热泼等。

有必要对 GBT51387-2019《钢渣处理与综合利用技术标准》所列的钢渣处理 方法加以注释:

①半干法: 以液态水为冷却媒介, 直接与熔融钢渣接触使之冷却, 冷媒以水 蒸气形式换热、消耗, 但液态水与渣的用量比小于 1:1 而且以不产生污水流淌为 限度的方法, 称之为半干法。

②全干法: 以环境大气、或者空分副产物二氧化碳(CO₂)、氮气(N₂)等惰 性气体为冷却媒介 直接与熔融钢渣接触来冷却钢渣的方法。全干法又分为开放 式、密闭式两种。

③开放式一步风淬法: 在开放区间, 以环境大气、或惰性气体为冷却媒介, 直接喷吹熔融钢渣, 熔融钢渣造粒、换热、冷却均在开放式空间内进行的方法。

④密闭式两步风淬法: 在密闭空间, 以环境大气、或惰性气体为冷却媒介, 直接喷吹熔融钢渣, 熔融钢渣造粒、换热、冷却均在密闭空间内部进行的方法。

⑤湿法：以液态水为冷却媒介，直接与熔融钢渣接触使之冷却，冷媒以水蒸气形式换热、消耗，液态水与渣的用量比大于 1:1、且产生大量污水流淌的水洗、水淬、水冲钢渣的方法，称之为湿法。

1.2 钢渣处理过程性质

凭借外部输入能量，金属或非金属、或者其他矿物质在特定熔池内进行冶炼，所得到得得中间产物具有高温、且处于熔融状态、并携带大量余热；工程上需要将中间产物移出熔池，冷却至常温、才能得到所需要的工业产品。采用特定技术，对移出熔池的中间产物进行冷却、至常温得到工业产品，同时在冷却过程中分离、并回收中间产物余热，即“熔融态”中间产物在冷却过程中，与余热分离开来、并予以回收，简称“熔融态”余热回收。

这个处理过程的性质（特点）包括：外部输入能量；熔池高温冶炼；得到高温中间产物；高温中间产物外移；高温中间产物实施冷却至常温；冷却至常温后得到最终产物（产品如：铁，钢，电石，等）。

“采用特定技术”，如果是钢冶炼，中间产物分两种情况，一种情况是高温钢液冷却，这是连铸与轧制技术处理方位。另一种是炼钢副产物高温钢渣（原渣），那么就可以理解为需要对高温钢渣进行处理，于是钢渣处理技术可以按 1.2.1 划分。

“采用特定技术”不仅仅局限于钢渣处理，其他“火法”冶炼得到的高温中间产物、需要冷却至大气环境温度才能得到最终产物（产品）的过程，均属于“熔融态”中间产物冷却与处理范围。

1.2.1 处理技术分类

如果“熔融态”中间产物是钢冶炼过程的副产物钢渣，那么在冷却终点等到了就得到了冷态钢渣，从“熔融态”高到常温钢渣的过程，称为一次处理过程。

从处理过程层面讲：钢渣处理分为一次处理过程，二次处理过程，三处处理过程。

从处理技术层面讲：钢渣处理分为一次处理技术，二次处理技术，三处处理技术。

钢渣一次处理技术过程：即冶炼终点渣（称之为原渣）从熔池中移出、再从高温状态通过特定技术手段处理到常温状态的过程。

钢渣二次处理技术过程：已经冷却至常温的钢渣，经过筛分、破碎、分拣等环节，将尾渣与渣钢分离的过程。

钢渣三次处理技术过程：经过一次处理、二次处理后，剩余钢尾渣工程化应用过程。

1.2.2 处理流程分类

钢渣处理按流程分：长流程，短流程。

长流程处理方法：包括热闷池法，辊压破碎-有压热闷罐法，热泼法（露天热泼、厂房内渣箱热泼、

渣槽热泼），带罐打水法。共同特点：周期长，处理需要十几小时甚至更长时间。

短流程处理方法：风淬法，水淬法。共同特点：处理周期短，从高温熔融状态通过特定技术手段处理到常温，处理周期 30 分钟以内，甚至更短时间。

1.2.3 钢渣分类

黑渣：普碳钢冶炼终点得到的原渣，在自然条件（自然状态）下冷却到环境温度，所得的渣为黑渣，其特点是质地坚硬，密实，呈黑褐色（灰黑色）块状，渣与钢混合，不易分离。

白渣：冶炼特殊钢终点得到的原渣，以及精炼（如 LF 精炼）炉渣，在自然条件（自然状态）下冷却到环境温度，所得的渣为白渣，其特点是质地疏松，多孔，呈灰白色（灰黄色）鱼子状，渣与钢易于分离；如 400 系不锈钢渣在自然条件（自然状态）下冷却过程中会产生自然粉化现象，渣与钢自然分离。

1.2.4 钢渣处理问题的性质

因此，钢渣处理过程的性质，是一系列多种液相物质之间的物理、化学反应以及多种液相物质之间的相变、及换热过程的复杂的耦合过程，其复杂程度不亚于炼钢以及钢的连铸与轧制，炼钢是加入各种添加剂（造渣剂）剔除杂质提纯净化过程，因此钢液的冷却是单一物种冷却过程，在这个冷却过程中如何利用钢液已经具有的高温，在中间产物钢液的温度下降到环境温度之前，使之如何塑造成型，就成了连铸与轧制的任务。

钢渣处理则是针对炼钢的副产品中多种多样、复杂的矿物成分，而且这些多种多样、复杂的矿物成分在经历由高温液态到高温固态相变转化期间，会因添加剂（造渣剂）添加量的百分比不同而发生多种矿物形态的转变，并伴随自由能的释放；从高温固相到低温固相、一直到环境温度固相降温期间，还会发生矿物结晶形态转变。

钢渣中这些复杂的、因各种矿物组分不同、化学成分不同而引生的各种不同的物理、化学反应过程，是远远超出（一般渣处理人）现有的认知水平的，所以也印证了那句名言“炼钢就是炼渣，好渣出好钢”，才有了“渣处理好人不爱干，一般人干不了”，这里的“好人”是指技术水平好，因为技术水平好的人都争着去炼钢去了。

1.3 一体化洁净处理概念

1.3.1 一体化洁净处理

根据中国第一重型机械股份公司长期以来在高温液态原渣处理方面的研究结果，提出洁净化处理理念（此前热污染概念从未见公开场合提及），给出钢渣一体化、洁净化处理概念。钢渣一体化

洁净处理需要满足以下条件：

表 2 钢渣一体化洁净处理技术要求

| 序号 | 具体要求 | 技术条件 | 备 注 |
|----|----------|----------------------------------|---|
| 1 | 处理工序连续 | 从高温到常温处理连续不间断 | 流程要短,处理时间也要要短,一罐渣处理时间 $\leq 30\text{min}$ |
| 2 | 处理过程渣不落地 | | 原渣与被处理渣均不落地,减少倒运\转运次数,最好状态是无倒运、转运 |
| 3 | 粉尘有组织排放 | $<10\text{mg}/\text{Nm}^3$ | 减少倒运、转运次数,最好是无倒运、转运 |
| 4 | 粉尘无组织排放 | 无 | 没有开放式运输过程 |
| 5 | 热污染有组织排放 | $<100^\circ\text{C}$ | ①排放点集中数量少 |
| 6 | 热污染无组织排放 | | ②不存在无组织排放 |
| 7 | 水处理二次污染 | 无 | 不产生次生污染 |
| 8 | 地表水质污染 | 无 | 没有污水泄露于地表 |
| 9 | 地下水水质污染 | 无 | 没有污水泄露于地下 |
| 10 | 一次处理尾渣粒度 | 一次处理后钢渣平均粒度要求 $\leq 10\text{mm}$ | 不需要再经过任何形式二次筛分、破碎、转运处理 |

满足一体化洁净处理要求的处理方法是两步风淬法即密闭式风淬处理方法。

1.4 现有钢渣处理技术

1.4.1 热闷法

分有压热闷法和池式热闷法,前者是后者的改进,增加了高温破碎设备,环保效果得到加强,可以处理热态液态渣、干渣。因使用液态水为冷媒存在爆炸危险,工序间断,辊压破碎后,需要将渣移出罐,并转运至低压蒸压釜中继续热闷中,此方法占地面积大,处理周期较长,存在粉尘、

水蒸汽、污水处理系统二次污染，见图 1、2。



图 1 热闷池法



图 2 热闷灌法

1.4.2 滚筒法

滚筒法是宝钢购买俄罗斯专利二次开发得到的处理技术，能处理热态干渣、液态渣，不能处理渣坨，以液态水为冷媒，新水消耗量最大，存在爆炸危险，污水处理系统占地大，热岛效应突出，发生爆炸几率高，见图 3、4。



图 3 滚筒法生产过程



图 4 滚筒法生产过程发生爆炸

1.4.3 带罐打水法

将盛满液态钢渣的渣罐送至打水跨，直接向渣罐喷淋冷却水，以不爆炸为限。特点：处理周期长，打水后静置 5~6 天，渣罐占用多。处理场地开放或半开放，一次处理时水蒸气及粉尘污染严重，热岛效应突出，作业环境恶劣。渣水比在 1: (0.6~0.7)，伴有地表水、地下水水质、以及作业环境二次污染。（见下页图 5-6）

1.4.4 热泼法



图5 带罐打水法 - 打水过程



图6 带罐打水法 - 倒渣过程

热泼法是直接将盛有液态原渣的渣罐，运至热泼场地直接倾倒入于地面，依靠自然冷却方法来冷却钢渣。图 7~10 是露天泼渣以及冬季泼渣遇雪爆炸过程。热泼法虽然简单、投资少，但污染最严重。



图7 热泼法之一野外热泼



图8 热泼法之二厂外热泼



图9 热泼法之三渣坑热泼



图10 热泼法之四雪地爆炸

1.5 现有主流处理技术比较

钢渣市场现行主流处理技术如下：（见下页表 3）

从应用数量、规模角度来讲：

1 热闷池法（及底部对流热传导焖渣法）：长流程，投资高，占地大，一次热污染，因为以水为冷媒，产生二次次生污染。

2 辊压破碎 - 有压热闷罐法：长流程，投资高，占地大，一次热污染，因为以水为冷媒，产生二次次生污染。

表 3 常用钢渣处理技术比较

| 序号 | 处理工艺 | 性质分类 | 处理周期 | 处理性质 | 渣罐数量 处理类型 | 处理空间 | 处理后 钢渣粒度 | 安全性与 污染形式 | 尾渣利用 难易程度 |
|----|------|------|----------|--------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------|---|---|
| 1 | 有压热闷 | 半干法 | 3~4 h | 慢冷 工序间断 冷媒-水 | 多 适合黑渣 | 密闭空间 工序之间 需要转移 衔接, 存 在污染 | < 100 mm | 存在爆炸 危险, 粉 尘+水蒸 汽+热污 染 | 因 f-CaO 存在, 体 检定性难 以保证, 用途受限 |
| 2 | 风淬法 | 干法 | 4~8 min | 快冷 工序连续 冷媒空气 | 10~20 黑渣白渣 均适合 | 密闭空间 连续处理 工序之间 衔接紧密 | <7.0 mm 可调 | 无污染 渣钢+尾 渣+余热 三种资源 均可回收 利用 | 粒度均匀 呈圆形平 均粒度 \leq Φ 7mm, f-CaO 无, 用途广泛 |
| 3 | 滚筒法 | 水淬法 | 8~20 min | 快冷 工序连续 冷媒水 | 10~20 适合黑渣 | 半密闭 连续处理 工序之间 衔接紧密 | ~40mm | 爆炸危险 水处理存 在二次污 染 | f-CaO 低, 用途土广 |
| 4 | 带罐打水 | 半干法 | (5-6) d | 缓冷 冷媒水+ 空气 | 上千个 用于白渣 | 敞开式 工序之间 需要转移 衔接, 污 染严重 | 不等 | 存在爆炸 危险, 粉 尘+水蒸 汽+热污 染严重 | 粒度不均 f-CaO 难 以消解, 用途受限 |

备注: 1 慢冷过程存在两个不稳定区域: 约 1250℃ 时半液态渣 $C_3S \rightarrow C_2S + f-CaO$, 800~700℃ 固态渣 $\alpha' - C_2S \rightarrow \gamma C_2S + f-CaO$, 析出 f-CaO, 导致体积安定性不稳; 并且结晶充分, 导致颗粒粗大; 玻璃相少而且分布不均, 水化严重。

2 快冷时, 液态钢渣具备良好的动力学和热力学条件, 从 1600℃ 直降到 600℃ 以下, 瞬间完成粒化过程和稳定性处理, 粒度均匀且玻璃相多, 原渣中存在的不稳定相如 f-CaO 相、CgO·FeO 相、MgO·FeO 相, 在处理过程中与空气中 O_2 发生氧化反应生产稳定相, 并具有活性, 以下 4 个反应是风淬渣稳定的根本原因:



经检验渣中无 f-CaO, 滚筒渣中存在 RO 相。

3 与其他工艺相比, 风淬法处理周期短, 资源回收彻底, 污染最小, 具有综合比较优势。

3 水淬-滚筒法: 短流程, 占地少, 投资高, 一次热污染, 因为以水为冷媒, 二次次生污染。

上述三种处理技术, 都具有共同特点:

- 1) 产生一次热污染;
- 2) 不同程度二次污染, 包括大气粉尘、地表水、地下水污染。
- 3) 对安定性有害的成分来自造渣多加入的 f-CaO 及冷却过程析出的 f-CaO、f-MgO 有害成分。
- 4) 现行的所有处理技术的处理方式均为有害成分先析出, 后处理, 没有从源头上抓起。

因此, 政策、用户需要: 一种崭新的处理技术, 在一次处理过程中即能抑制有害成分 f-CaO 析出,

又能消除使用液态冷媒水带来的各种形式的一次污染、以及次生污染问题，解决占地、投资、污染、三大问题，同时又能回收余热，实现碳减排。

2 新风淬法

2.1 开放式一步风淬法

风淬法又称风碎法，是以空气为动力，切割、破碎液态原渣使之粒化的一种方法，将液态原渣倒入中间包，经中间包底部流出，在中间包下部设有高压喷嘴，与水平方向呈一定夹角，将高压风直接吹向液态钢渣，将其切割成条、波动击碎成颗粒，呈抛物线状飞出，最后落到水池中，以液态水为冷媒彻底冷却钢渣，属于风水结合的一种处理方法。优点是占地面积小，投资和运行费用低，直接处理液态原渣。虽然没有爆炸危险，但在敞开式处理车间（或者是半封闭车间）内进行处理，粉尘、水蒸气、噪音污染严重，热量全部对空排放。早期开放式一步风淬法处理钢渣过程图片如下：



图 11-1 开放式一步风淬法之一

图 11-2 开放式一步风淬法之二

2.2 密闭式两步风淬法

在总结现有钢渣处理技术基础上，中国第一重型机械股份公司所属一重大连工程技术有限公司在多年研究钢渣处理技术基础之上，自主开发出密闭式新风淬法（又称两步风淬法）技术，已获得国家发明专利权（ZL201711130103.X）保护；同时针对不同钢渣，开发出专门用来处理适用白渣的回转式白渣处理技术，并已获得国家发明专利权（ZL201811186612.9）保护。

机理：钢渣冷却过程，需要穿越多个相变温度区间；

方法：相变机理、密闭空间、喷吹造粒、负压操作；

来源：中国一重自主开发；

特点：流程短、速度快（处理速度最快 6-10 分钟）；渣与钢自然分离、尾渣体积安定 $f\text{-CaO} \approx 0$ ；

设备：技术先进，干法处理，高度集成，改质彻底，适应性好，分离彻底，实现余热回收。经

济适应性：一次投资费用省，二次运行费用低。

2.3 新风淬法理论基础

熔渣白渣冷却需要经过多个相变温度区间，在 1250 ~ 1900℃ 范围内 C₃S 稳定，是在此之外 C₃S 不存在会分解为 C₃S → C₂S+f-CaO 析出 f-CaO，而 C₃S 胶凝性质要比 C₂S 好，为了得到这部分 C₃S，必须快速跨越→ 1250℃ 温度区间，防止 C₃S 分解。当渣温降至 725℃ 时，固态渣 α' C₂S → γ C₂S+f-CaO 会析出 f-CaO。f-CaO 的析出是导致体积安定性差根本原因。由于慢速冷过程中晶体结晶充分，颗粒粗大，玻璃相少且分布不均，而快速冷条件下直接越过相变温度区间使 f-CaO 无法析出，粒度均匀且玻璃相多。因而，白渣在自然条件下具有遇冷自粉特性，渣与钢自然分离，其主要成份是 CaO 和 SiO₂，在 CaO-SiO₂ 二元渣系中存在 2CaO · SiO₂ 即正硅酸钙 C₂S，在降温过程中 2CaO · SiO₂ 晶相结构发生变化，其相变过程如下 图所示，α' C₂S 将转变成 γ C₂S，密度下降，体积膨胀、同时释放热量，产生体积应力，使钢渣粉化，因此具有遇冷自粉特性。

利用白渣遇冷自粉特性，中国第一重型机械股份公司所属一重集团大连工程技术有限公司开发出专门处理冶炼白渣的新技术来处理冶炼特殊钢的渣，处理后得到：①形状规整、高价值渣钢；②干态尾渣粉；③余热：可以直接用于取暖、干燥、发电等多用途。

2.4 新风淬法特点

功能高度集成：切割、粒化、降温、尾渣稳定化、渣与钢分离、冷却功能于一体，在一道工序内完成上述所有功能，是目前所有处理方法中周期最短、资源回收彻底、具有综合比较优势的方法：具备良好的动力学和热力学条件，在极短时间内完成渣液破碎粒化表面凝固成壳和稳定化处理，不稳定相 f-CaO、CgO · FeO、MgO · FeO 在风淬处理过程中，与外部源源不断进入处理器内部的环境大气中的 O₂ 发生氧化反应生成稳定相，并具有活性： $2 \cdot \text{CaO} + 2 \cdot \text{FeO} + 1/2 \cdot \text{O}_2 = 2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ， $2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{FeO} + 1/2 \cdot \text{O}_2 = 2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ， $2 \cdot \text{MgO} \cdot \text{FeO} + 1/2 \cdot \text{O}_2 = 2 \cdot \text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。f-CaO ≈ 0 是风淬尾渣体积能够稳定的根本原因。更重要的是：经过新风淬法处理得到的钢渣，平均粒度 ≤ 10mm，可以直接进入除铁捡铁环节，省略了传统的二次处理过程中筛分、破碎、转运环节，在输送过程中直接除铁捡铁。

新风淬法是在早期风淬法基础上，将风淬设备置于密闭空间之内，风淬造粒缓冲气体作用下飞行速度降低，渣粒二次冷却；经过转送，落到步进式风冷料床上进行三次冷却，在环境大气连续冷却作用下，渣粒温度降低至接近环境温度并被输送至出渣口排出。

熔渣中会混有部分钢液，在运输过程中因密度不同会分层，上层轻渣喷吹结束后，直接喷吹重渣，渣钢从重渣口排出与轻渣自然分开。相对比早期风淬法，环境保护效果突出，没有捞渣、沥水、淤泥压滤、污水处理等处理环节，余热可回收。钢渣处理技术对比列于图 13。（见下页图 13）

机理：原渣自然冷却过程发生相变。

方法：根据原渣相变机理、在密闭空间内、采用环境大气冷媒、正压喷淬、负压操作。

技术：已申请发明专利并获专利授权保护，采用环境大气为冷媒，先以风刀水平切割液态原渣

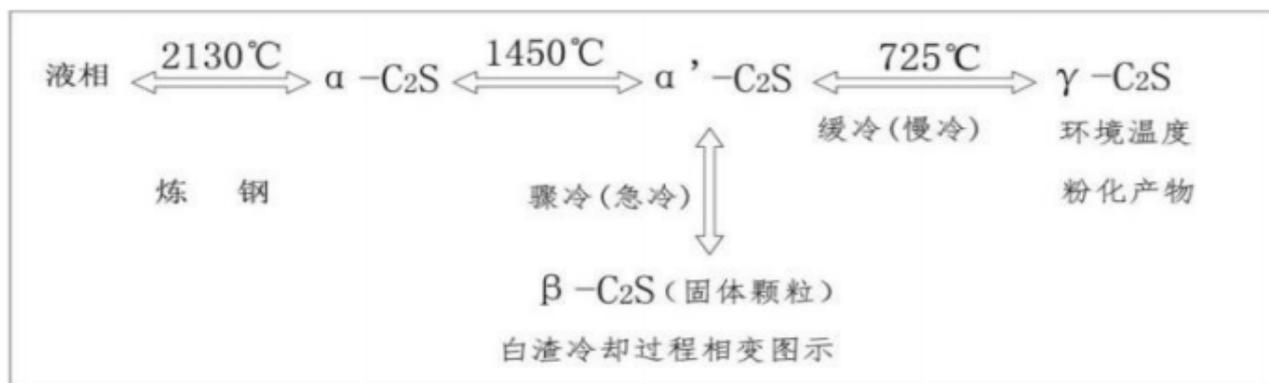


图 13 白渣相变图

直接造粒，使之快速凝结成壳并具有一定强度，再以环境大气辅助以水雾为冷媒冷却钢渣颗粒，简称“两步风淬法”。

来源：中国第一重型机械股份公司所属一重集团大连工程技术有限公司自主开发的液态原渣洁净化处理技术，是长期自主研发的科技成果，已申报发明专利，国家专利局已经授予发明专利（ZL201711130103.X），专利权涵盖了相变原理、密闭空间、大气冷媒、正压喷淬、负压操作，适合于不锈钢渣和普碳钢渣处理。

特点：相变原理、密闭空间、正压喷淬、大气冷却、负压操作，比以往其他处理方法，具有更加鲜明的环境保护特征，同时，技术更先进：完全干法处理，处理周期更短，渣与钢分离更彻底。经济性更好：初期投资与长期运行费用低，尾渣用途更广泛；资源得到充分利用：渣钢、尾渣、余热全部得到利用。

3 钢渣洁净化处理技术

3.1 新风淬法的理论模拟

针对钢渣冷却过程及装备，建立二维流固共轭分析模型应用 Fluent 软件进行流固共轭瞬态传热分析，分析钢渣在设定冷却空气流量条件下的冷却时间，为设计提供参考。部分条件基于假设，计算主要目的是为了得到在一定流量冷却空气作用下钢渣的冷却情况，得到合适的冷却流量及对应的冷却时间。采用有限体积分析方法，计算软件为 ANSYS® Mechanical 中的 Fluent。水平步进式冷却设备篦板下方通过风机鼓入一定流量的冷却空气对篦板上方落入的钢渣进行冷却。钢渣在冷却空气及设备的运动作用下向前运动，直至满足工艺要求。将钢渣视为整体，并设为多孔介质区域，采用将其中的单个钢渣根据假设条件完全建立出来的方法，用以模拟其中的流体流动即流固共轭传热过程。如下图所示为本次模拟过程的二维示意图。（见下页图 14-15）

钢渣采用冷却空气进行冷却。假定空气的物性参数暂时不随温度变化，为常值。采用常温下空气的物理参数设置如下表所示。（见 38 页表 4）



图 14 中国一重白渣回转式干法处理发明专利

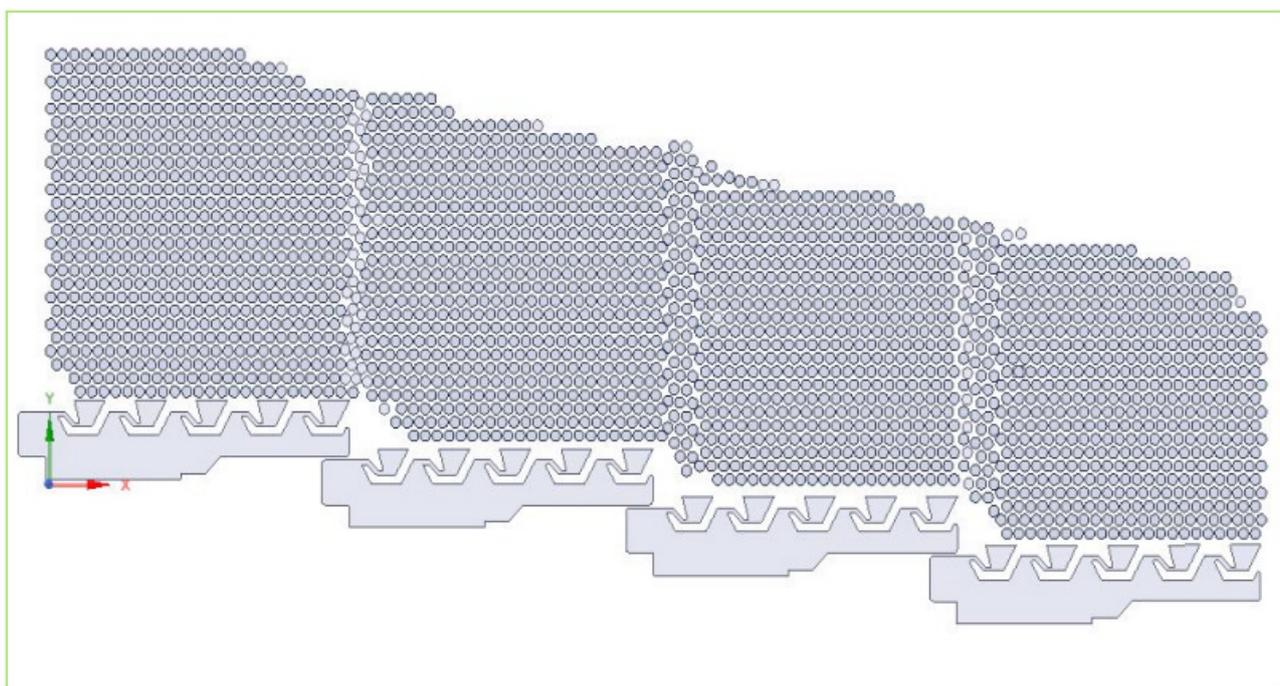


表 4 空气基本性能参数表

| 材料 | 密度 (kg/m ³) | 粘度 (kg/m·s) | 比热 J/ (kg · K) | 热导率 W/ (m · K) |
|----|----------------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 空气 | 1.225 | 1.7894e-05 | 1006.43 | 0.0242 |

表 5 钢渣性能参数表

| 温度 ℃ | 100 | 300 | 500 | 700 | 900 | 1100 | 1300 | 1500 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 比热 J/ (kg · K) | 857.76 | 985.56 | 1029.6 | 1071.7 | 1109.7 3 | 1145.1 5 | 1179.3 8 | 1229.2 2 |
| 热导率 W/(m·K) | 20.05 | 13.74 | 10.23 | 8.43 | 7.62 | 7.14 | 6.78 | 6.41 |

建立单件水平步进式冷却器篦板二维模型，二维模型由篦板及上方钢渣组成。篦板上方钢渣直径保守采用 10mm 进行建模，钢渣整体高度为 320mm 建模，钢渣之间距离设定为 2mm，钢渣与篦板间距为 3mm。如下图所示为钢渣冷却的流固共轭传热计算模型，流体模型与固体模型之间形成耦合面。

针对此模型网格质量及计算速度之间的关系，为获得有效高效的分析效果，采用 workbench 进行分析模型的 CFD 网格划分。如图所示为网格划分图示，分析模型共得到 190594 个节点。

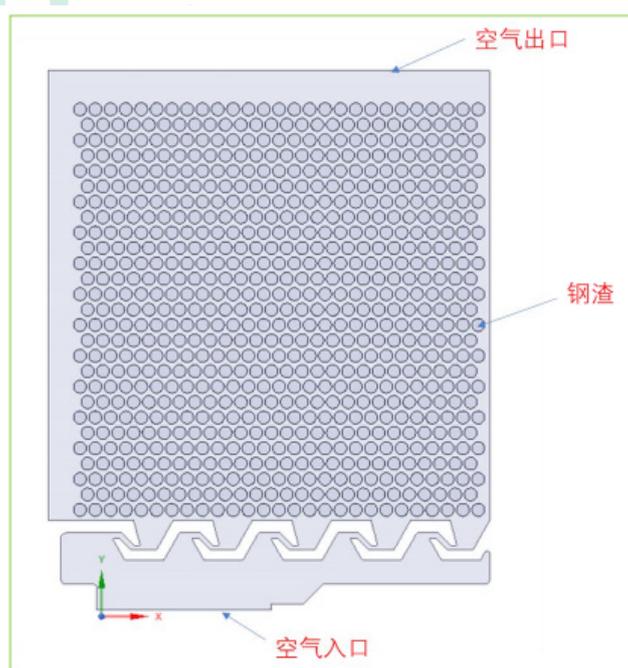


图 16 流固共轭传热计算模型

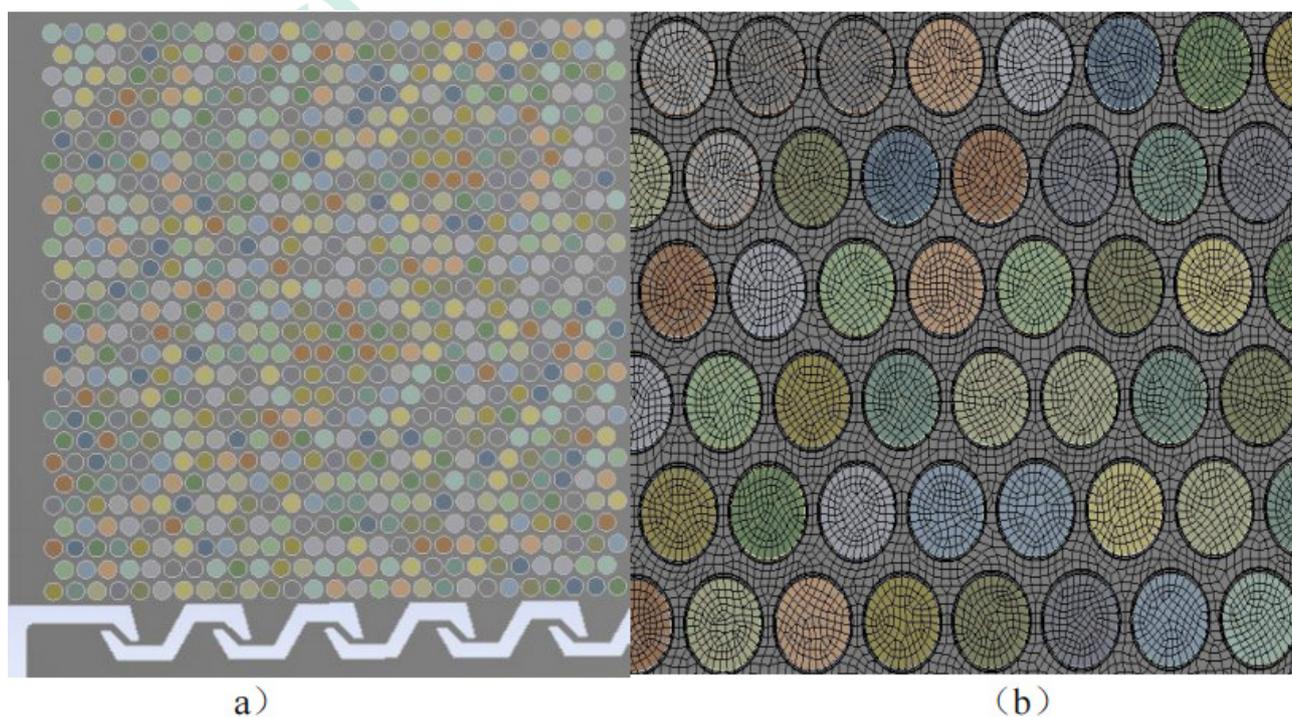


图 17 流固耦传热计算模型网格划分

3.2 理论计算

流固耦传热是流固耦合问题的其中一种。流固耦合问题是流体力学（CFD）与固体力学（CSM）交叉而生成的，既涉及固体求解又涉及流体求解。流体流动遵循基本的守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。如果流体中包括混合的其他成分，还要遵循组分守恒定律。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f \quad (2)$$

其中：t 表示时间

\mathbf{f}_f 是体积力矢量

ρ_f 是流体密度

\mathbf{v} 是流体速度矢量

$\boldsymbol{\tau}_f$ 是剪切力张量，可表示为：

$$\tau_f = (-p + \mu \nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e} \quad (3)$$

其中, p 是流体压力

μ 是动力粘度

$$\mathbf{e} \text{ 是速度应力张量, } \mathbf{e} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)$$

固体部分的守恒方程可以由牛顿第二定律导出:

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (4)$$

其中: ρ_s 是固体密度

$\boldsymbol{\sigma}_s$ 是柯西应力张量

\mathbf{f}_s 是体积力矢量

$\ddot{\mathbf{d}}_s$ 是固体域当地加速度矢量。

上述流体和固体控制方程中没有考虑能量方程, 若考虑流体、固体的能量传递, 需要添加能量方程, 对于流体部分总焓 (hot) 形式的能量方程可以写成如下形式:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{f}_f + S_E \quad (5)$$

其中: λ 表示导热系数

S_E 表示能量源项。

对于固体部分, 增加了由温差引起的热变形项:

$$\mathbf{f}_T = \alpha_T \cdot \nabla T \quad (6)$$

其中: α_T 是与温度相关的热膨胀系数。

流固耦合遵循最基本的守恒原则，所以在流固耦合交界面处，应满足流体与固体应力（ τ ）、位移（ d ）、热流量（ q ）、温度（ T ）等变量的相等或守恒，即满足如下 4 个方程：

$$\begin{cases} \tau_f \cdot n_f = \tau_s \cdot n_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (7)$$

目前，用于解决流固耦合问题的方法主要有两种：直接耦合式解法和分离解法。直接耦合式解法通过把流固控制方程耦合到同一个方程矩阵中求解，也就是在同一求解器中同时求解流体和固体的控制方程：

$$\begin{bmatrix} A_{ff} & A_{fs} \\ A_{sf} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_f^k \\ \Delta X_s^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_f \\ B_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中， k 表示迭代时间步， A_{ff} 、 ΔX_f^k 和 B_f 分别表示流场的系统矩阵、待求解和外部作用力。

同理， A_{ss} 、 ΔX_s^k 和 B_s 分别对应固体区域的各项。 A_{sf} 和 A_{fs} 代表流固的耦合矩阵。

由于同时求解流固的控制方程，不存在时间滞后问题，所以直接解法在理论上非常先进和理想。但是直接解法很难将现有 CFD 和 CSM 技术真正结合到一起，同时考虑到同步求解的收敛难度和耗时问题，直接解法目前主要应用于如压电材料模拟等电磁-结构耦合和热-结构耦合等简单问题中，对流动和结构的耦合只能应用于一些非常简单的研究中。与之相反，流固耦合的分离解法不需要耦合流固控制方程，而是按设定顺序在同一求解器或不同的求解器中分别求解流体控制方程和固体控制方程，通过流固交界面把流体域和固体域的计算结果互相交换传递。待此时此刻的收敛达到要求，进行下一时刻的计算，依次而行求得最终结果。

3.3 Fluent 计算

3.3.1 设置与设定

由于三维分析模型的求解耗费资源过大，因此在有效时间内采用二维模型针对特定问题进行合理简化处理以得到主要的关注问题解是重要的。将以下主要假定及计算设置如下：

- (1) 不考虑钢渣冷却过程中相变及相变潜热，单纯将钢渣视为固体。

- (2) 不考虑钢渣的运动，视钢渣在运动过程中的冷却为持续在单个篦板上方的持续冷却。
- (3) 暂不考虑不同区域篦板的冷却空气量的不同。
- (4) 不考虑垂直于二维模型面方向上的液体流动。
- (5) 分析采用 Pressure-Based 基于压力法的求解器，使用压力修正算法，进行瞬态分析，设置能量方程打开，以计算温度传递，进行瞬态分析。
- (6) 采用 Rngk-epsilon 湍流模型进行物理模型设定，采用可缩放壁面函数。
- (7) 采用 Couple 格式进行计算。
- (8) 离散格式选择上，压强离散格式选择二阶，湍流动能及耗散率选择一阶以提高收敛性。
- (9) 采用局部初始化方法进行初始状态设定。
- (10) Fluent 流场计算采用并行计算方式，以提高计算速度。
- (11) 计算步长为 0.05s，计算时间总长为 30min。
- (12) 其他设置不再列举，采用默认设定。

3.3.2 边界条件

对流固耦合分析模型进行不同区域边界条件的设定。

(1) 入口边界 由于实际入口条件不甚明朗且采用二维模型，因此经过综合换算得到入口空气的质量流量。计算了两个算例，入口空气质量流量分别设为 0.6kg/s、0.7kg/s。入口流量经过换算得到冷却空气与冷却的钢渣的对应关系比分别为 4.8m³/kg、5.6m³/kg。入口空气温度为常温 25℃。

(2) 采用压力出口边界 出口压力边界条件，出口处设定静压为 0MPa，若发生回流，回流温度为 150℃。钢渣初始温度为 1450℃，其他壁面为绝热边界。流固耦合壁面采用 couple 设置。右图所示为流固共轭传热模型的初始温度分布状态。

3.4 模拟计算

3.4.1 入口质量流量 1

入口空气质量流量为 0.6kg/s 时，入口流量经过换算得到冷却空气与冷却的钢渣的对应关系比分别为 4.8m³/kg。经过瞬态计算时长 30min 后即在此条件下冷却时间 30 分钟后得到以下结果。由于此模型中未考虑钢渣在空气作用下的运动翻滚，因此靠近下部出风口的钢渣会迅速冷却，左上部的钢渣冷却最慢，会导致结果中极值温度较大。

由于钢渣反复翻滚变换位置，钢渣区域中温度分布范围会变窄。平均概念下，冷却空气带走的热量 为钢渣区域整体释放的热量。冷却计算 30 分钟后，钢渣整体区域平均 温度为 181.76℃。

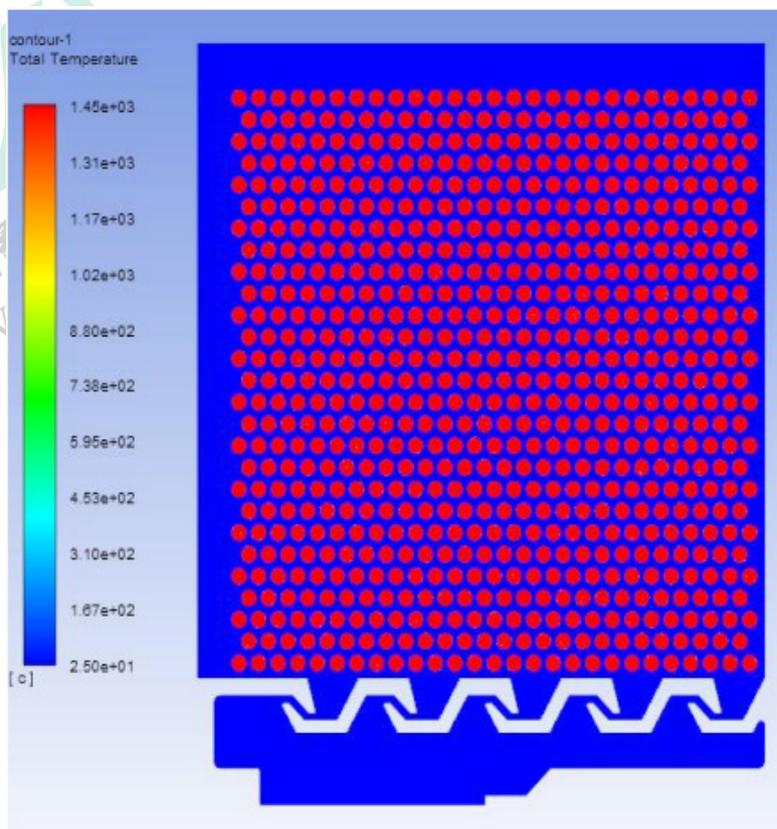


图 18 料床初始温度分布

3.4.2 入口质量流量 2

入口空气质量流量为 0.7kg/s 时，入口流量经过换算得到冷却空气与冷却的钢渣的对应关系比分别为 $5.6\text{m}^3/\text{kg}$ 。在此条件下冷却，瞬态计算 30 分钟后，钢渣整体区域平均温度为 128.46°C 。

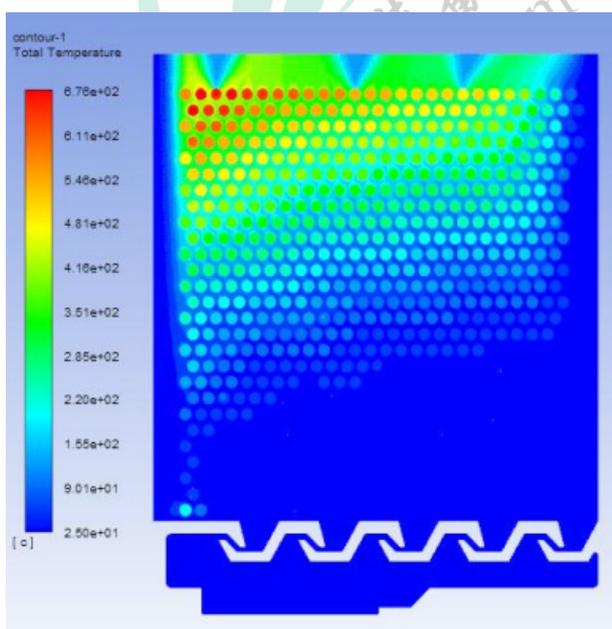


图 19-1 条件 1 结果温度云图

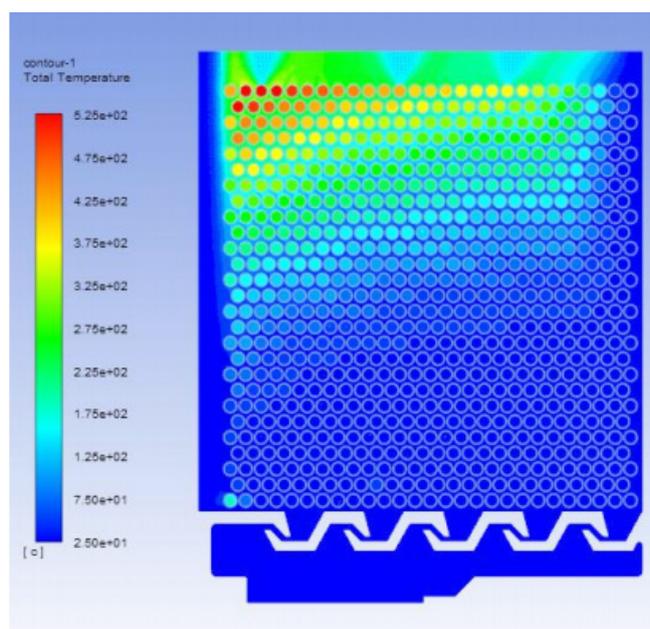


图 19-2 条件 2 结果温度云图

3.5 模拟结果

3.5.1 渣粒冷却效果

由以上计算分析得到主要结论如下:

(1) 入口冷却空气质量流量为 0.6kg/s 时, 即冷却空气与钢渣的对应关系 比为 4.8m³/kg 时, 冷却 30 分钟后, 钢渣平均温度为 181.76℃。

(2) 入口冷却空气质量流量为 0.7kg/s 时, 即冷却空气与钢渣的对应关系 比为 5.6m³/kg 时, 冷却 30 分钟后钢渣平均温度为 128.46℃。

3.5.2 渣液凝固、结壳过程温度场分布

下图 20a 是风速为 1m/s、渣粒直径为 Φ2.0mm, 不同冷却时间的渣液相变化云图。下图 20b 是风速为 1m/s、渣粒直径为 Φ2.0mm, 不同冷却时间渣粒温度场变化等值图。

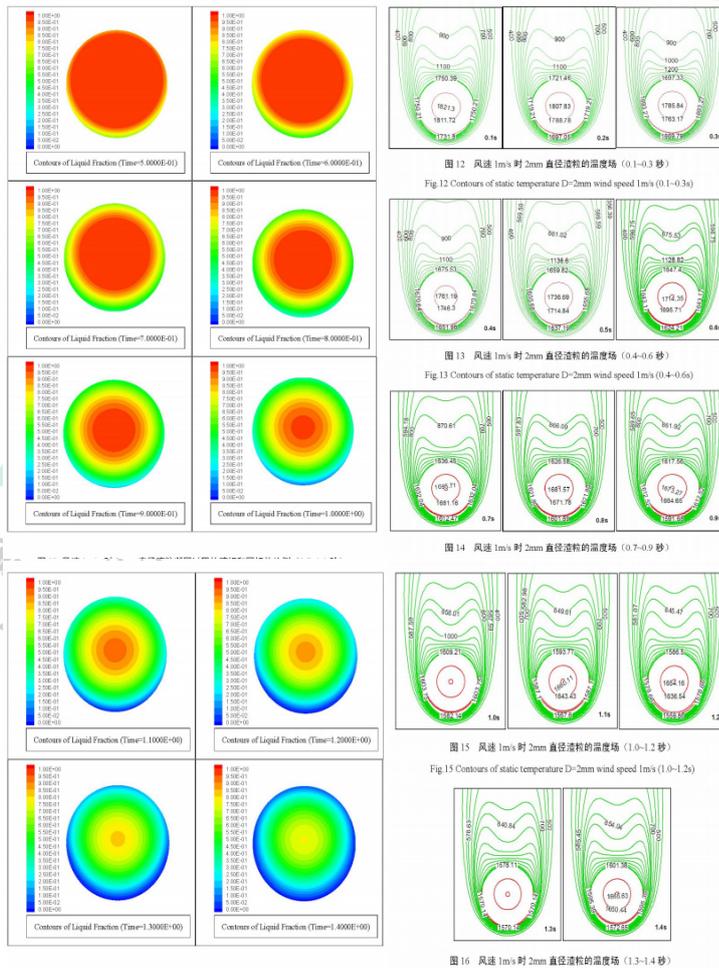


图 19 风速 1m/s 时 2mm 直径渣粒凝固过程的液相和固相的比例 (1.1-1.4 秒)

图 20a

图 20b

图 20 风速为 1m/s 直径为 2mm 渣粒冷却凝固过程中液-固相云图及温度场等值图

4 一体化洁净处理技术

4.1 工艺流程

一体化洁净钢渣处理技术方块流程如下，工艺布置灵活，形式多种，占地面少，完全干法处理，可根据现场实际需要具体布置。对于黑渣，采用两步风淬法，就能够实现快速、环保处理熔融态钢渣。密闭风淬处理后的渣粒，颗粒粒度均 $\leq \Phi 10\text{mm}$ ，省略了传统的二次处理过程中多级破碎、筛分、转运等产生扬尘污染的环节，通过胶带机运输过程直接分拣尾渣的渣钢，同时得到干态的尾渣、以及余热，真正意义上实现了钢渣全资源化利用。

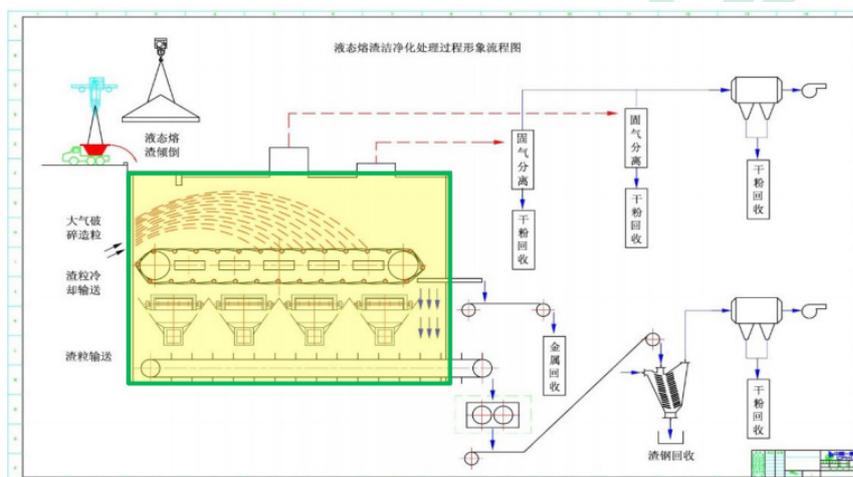


图 21 新风淬法形象流程图

同时针对不同钢渣，如冶炼特殊钢、以及炉外精炼得到的白渣，可以采用一重集团大连工程技术开发有限公司开发、专门用来处理适用白渣的回转式白渣处理设备，该项技术并已获得国家发明专利权保护（ZL201811186612.9）。采用，处理后，直接得到高附加值的渣钢、干态的尾渣、以及余热。

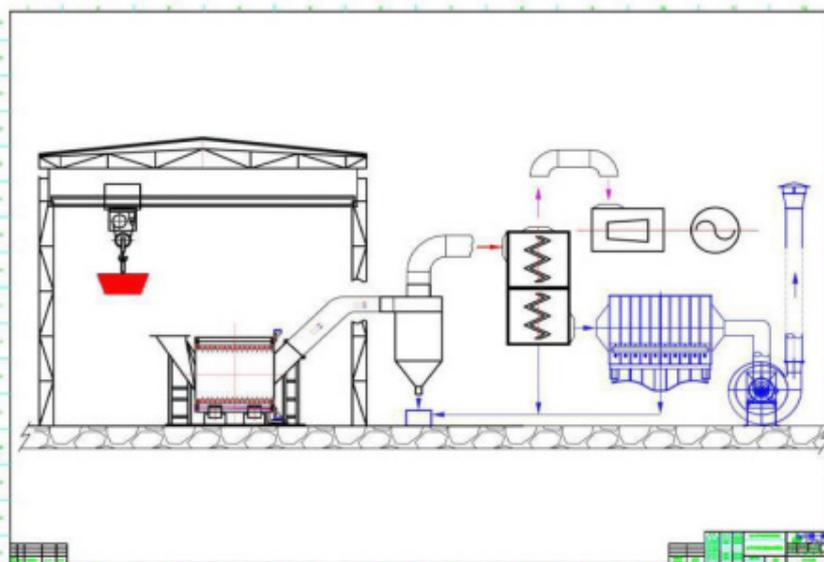
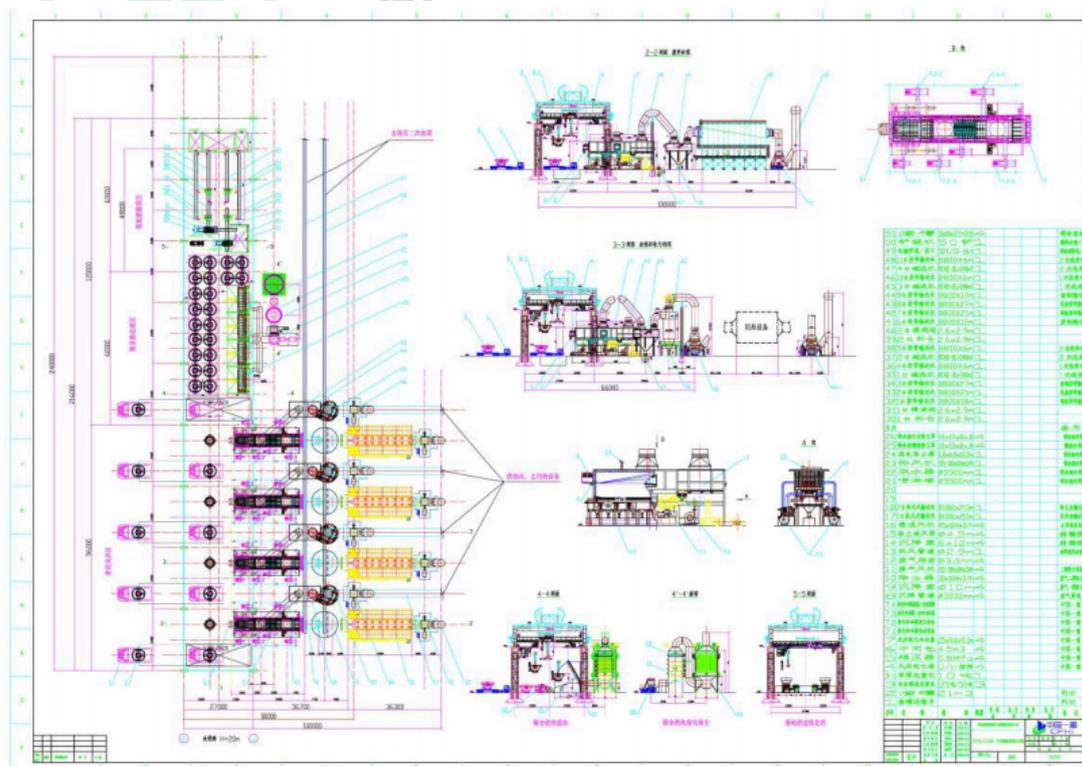


图 22 新干法回转式白渣处理设备与流程

4.2 工艺布置

中国一重为唐山某钢厂投标所做新风淬法钢渣处理工艺布置见下图 23。



4.3 实物检验

对采用开放式一步风淬法处理后的钢渣进行实物检验结果如下：

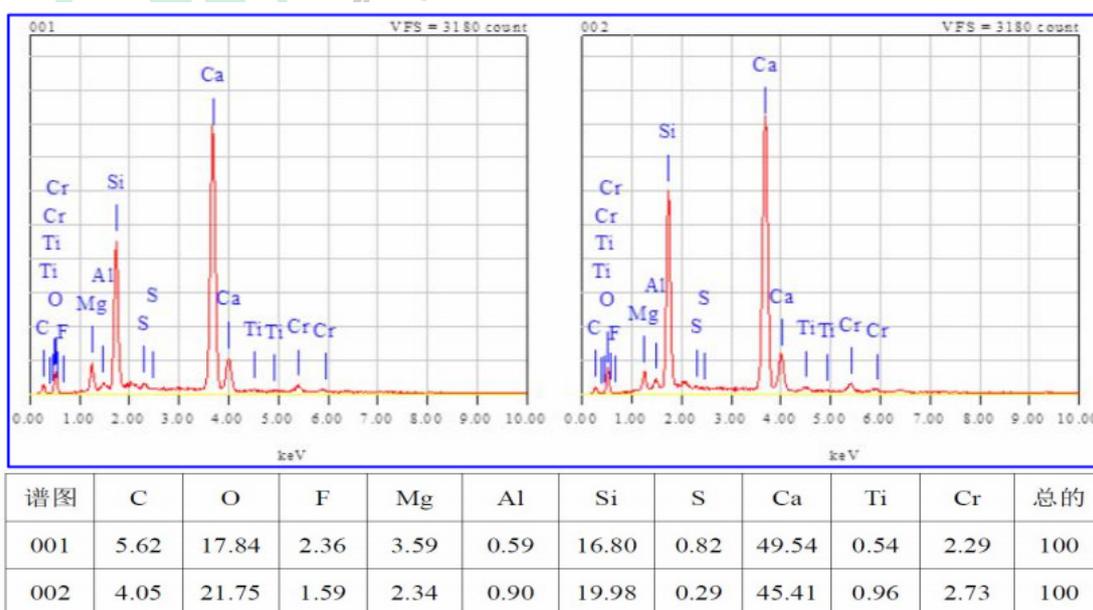


图 24 开放式一步风淬法钢渣成品颗粒检验

检验成分: 主要矿物成分是白硅钙石和枪晶石(结构稳定, 并具有活性), 不稳定相 $f\text{-CaO} \approx 0$;
 特点: 颗粒均匀、表面光滑、呈园球型或椭球型, 右下图是开放式一步风淬喷吹后处理得到的尾渣颗粒实物照片, 左下图是钢渣颗粒 EMS 照片。

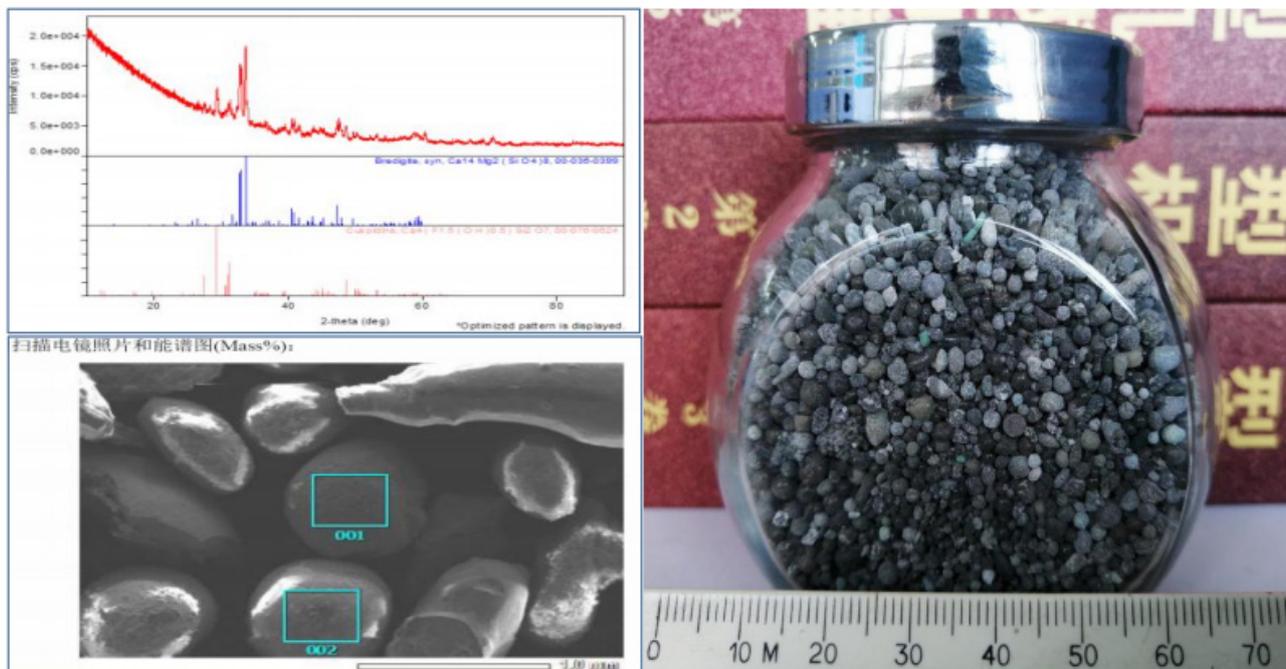


图 25 开放式一步风淬法钢渣成品颗粒实物照片与 EMS 图片

5 新风淬法优势

5.1 产品特性

中国第一重型机械股份公司所属一重集团大连工程技术有限公司自主开发的钢渣洁净化处理技术具有综合比较优势, 经过新风淬法处理的钢渣, 与热闷法、滚筒法相比较, 理、化性质均发生了显著变化, 颗粒圆润光泽, 粒度均匀, 体积安定性稳定:

钢渣粒度小而均匀: $\Phi (0.2 \sim 10) \text{ mm}$, 粒度可调

渣与钢分离更彻底: 颗粒小而匀, 渣与钢自然分离

钢渣颗粒球形度高: 钢渣颗粒均呈球状(其他方法不定形)

彻底消除有害成分: 处理过程 $f\text{-CaO}$ 与其他成分发生反应生成稳定矿物

便于下游产业应用: 粒度均匀, 形状统一, 易于建材化、喷砂、等应用

5.2 工艺特点

1 核心: 干法密闭, 喷吹造粒, 集成处理

2 亮点: 流程短, 集成度高, 占地少

3 效果：效率高，环境好，洁净化

4 收益：渣钢、尾渣、余热三种资源全回收

5.3 技术优势

流程短：集造粒+冷却+降温+输送功能于一体，节省二次处理环节

设备少：集成度高，设备数量大幅减少

效率高：处理过程仅需 4~10 分钟

颗粒度：渣粒直径 $\leq 10\text{mm}$ ，省掉破碎、筛分、转运环节

成本低：短流程、占地少、投资与运行费用低

更安全：以大气为冷媒，无爆炸危险

更环保：处理媒介有组织排放，粉尘浓度 $< 10\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，没有次生污染

运行更可靠：采用成熟技术高度集成运行更安全

资源全回收：渣钢、尾渣、余热能够分别回收

固体废弃物混匀工艺试验研究

钱峰¹ 李志斌² 刘沛江² 侯洪宇¹ 于淑娟¹

(1. 鞍钢股份有限公司技术中心 辽宁鞍山 114009; 2. 鞍钢股份有限公司炼铁总厂)

摘要: 钢铁企业每年产生大量的固体废弃物, 种类杂多且数量巨大。这些固体废弃物中含有一定量的 TFe、C、CaO、MgO 等有价值元素, 可返回烧结工序进行资源化回收利用。由于这些固体废弃物来自于不同工序, 各种固体废弃物物化性能差异较大, 必须进行充分混和均匀后再参与烧结配料, 以保证原料稳定性, 进而保证烧结矿质量及生产顺利进行。一些企业对这些固体废弃物的预处理只是简单粗放地采用铲车堆混, 不但影响混匀效果, 又污染环境。本文以鞍钢厂区产生的固体废弃物为研究对象开展了大量试验, 采用卧式、立式强力混合机分别开展了一系列不同参数的混匀工业试验, 对比了不同填充率、混合时间、转数等参数下的混匀效果, 得到最优化的混匀参数条件, 为钢铁企业多种固体废弃物混匀工艺提供数据支持和参考。

关键词: 固体废弃物; 混匀; 资源利用

随着新《环保法》的实施, 国家对冶金企业环保监管日益严格, 各级别环保部门监查、督导, 对持续性的环境违法行为进行按日连续的罚款, 按照国家要求, 各企业要对所产生的废物进行 100% 合规处置, 达到固废零出厂的目标。另一方面, 钢铁企业每年产生的大量的尘、泥、渣等固体废物, 如高炉灰、瓦斯灰、瓦斯泥、转炉泥、铁皮、切割渣等, 这些固体废物中含有一定量的 TFe、FeO、CaO、MgO 等有价值元素, 应返回烧结工艺循环利用, 从而降低烧结矿成本。由于各类固体废物差别各异, 其中, 由干式除尘器捕集的粉尘, 流动性强, 不易被水润湿, 不易混匀和制粒。有的粉尘荷载电荷, 有的粉尘还有自燃性。由湿法除尘器捕集的泥浆, 湿容量较大, 有的污泥粘滞性大, 不易分散, 难以混匀。这些固体废弃物的不同特性给其综合利用带来一定困难, 解决这些固体废物再资源化利用的技术瓶颈为如何消除干尘的静电性、自燃性及湿泥的粘滞性, 使这些固体废物水分适宜配混、输送、成分均匀、粒度分布合理, 达到再利用要求。

烧结物料的均匀混合对于后续制粒、烧结效果, 甚至冶炼过程均灰产生重要影响^[1], 而固体废弃物经混匀后返回烧结的量通常占全部烧结铁料的 15% 以上, 固废物料稳定率可以影响烧结混合料的成分稳定率, 进而影响烧结矿的质量和产量。国内一些企业采用强力混合机处理烧结原料, 可以明显改善混合、制粒效果, 料层的透气性, 烧结质量也得到显著提升^[2-6], 但对于用于烧结的固体废弃物的强力混合工艺及设备选型研究较少。本文针对一些钢铁企业各类固体废弃物混匀不充分的问题, 分别开展了立式、卧式强力混合机试验研究, 并与铲车堆混的效果进行了对比。

1 固体废弃物种类、配比及成分

选取 10 种主要固体废弃物, 根据其年产生量比例进行配比计算, 并根据试验所选取的混合机容量,

对每种原料加入量进行计算,结果见表1。试验涉及固体废弃物主要包括转炉泥、瓦斯泥、瓦斯灰、铁皮等,对每种原料取样进行主要成分分析,结果见表2。

表1 原料比例

| 项目 | 转炉泥 | 给水 瓦斯泥 | 铁皮 | 磁选粉 | 脱硫 渣粉 | 瓦斯灰 | 燃气灰 | 高炉灰 | 铁红 | 返矿 | 总量 |
|-------|------|-----------|------|------|----------|------|-----|------|-----|-----|-----|
| 重量/kg | 143 | 24 | 92 | 70 | 30 | 88 | 22 | 119 | 12 | 31 | 600 |
| 比例/% | 23.8 | 3.9 | 15.3 | 11.6 | 5.1 | 14.7 | 3.7 | 19.9 | 2.0 | 5.2 | 100 |

表2 原料化学成分%

| | C | P | S | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | TFe | CaO | MgO | 水分 |
|-------|-------|-------|-------|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 燃气灰 | 37.08 | 0.066 | 1.86 | 7.55 | 2.98 | 8.94 | 20.26 | 3.35 | 1.11 | 14.2 |
| 瓦斯泥 | 37 | 0.048 | 1.09 | 7.42 | 2.8 | 8.04 | 20.26 | 3.98 | 0.88 | 34.2 |
| 返矿 | 0.25 | 0.035 | 0.03 | 6.21 | 1.17 | 8.76 | 55.75 | 13.56 | 1.53 | 0.2 |
| 高炉灰 | 8.68 | 0.027 | 0.22 | 6.89 | 1.34 | 3.75 | 49.04 | 11.68 | 1.51 | 0.3 |
| 脱硫钢渣粉 | 1.08 | 0.4 | 0.13 | 10.4 | 2.79 | 35.92 | 39.82 | 25.49 | 7.43 | 6.7 |
| 瓦斯灰 | 36.18 | 0.056 | 0.39 | 10.49 | 3.73 | 5.36 | 31.44 | 9.02 | 1.41 | 16.3 |
| 磁选粉 | 2.15 | 0.36 | 0.17 | 13.09 | 9.14 | 20.73 | 23.05 | 26.96 | 12.76 | 6.2 |
| 转炉泥 | 1.59 | 0.098 | 0.073 | 2.11 | 0.22 | 77.73 | 67.76 | 5.75 | 1.16 | 39.4 |
| 铁皮 | 0.11 | 0.01 | 0.075 | 0.92 | 0.12 | 63.97 | 78.1 | <0.10 | <0.10 | 2.3 |

可以看出,各种固体废物主要成分差别显著,其中燃气灰和瓦斯灰含碳较高,返矿、磁选粉含铁较高,瓦斯泥转炉泥含水较高,其余几种元素硅、铝、钙、镁等也波动较大。可见,各类原料不但产生量差别较大,物理化学性质也差别各异,必须进行充分混合均匀后再参与烧结配料,才能保证原料的稳定性。

2 固体废物立式强力混合试验

在立式强力混合机混合过程中,转数、混合时间和填充率等参数的选择都会不同程度的影响固体废弃物的混匀效果,本试验通过不同转数、不同混合时间和不同填充率条件下将固体废物混匀,将混匀后的样品进行多点取样,并根据各组样品粒度和水分标准偏差分析判断物料的混匀程度,物料平均粒度和水分的标注偏差越小,说明混匀效果越好。由此可以判断混匀程度的优劣,最终确定最优技术参数。不同混匀参数条件下混匀料的水分和平均粒度标准偏差见表3。

表3 不同混匀参数条件下立式混合机混匀料的水分和平均粒度标准偏差

| 试验编号 | 转数 | 填充率 | 时间 | 物料编号 | 水分 | 平均粒度 | 水分标准偏 差 | 粒度标准偏 差 |
|------|-------|-----|----|------|----|------|------------|------------|
| | r/min | % | 秒 | | % | mm | | |

续表

| | | | | | | | | |
|---|-----|----|-----|---|------|-----|------|------|
| 1 | 330 | 20 | 30 | 1 | 14.5 | 3.1 | 0.47 | 0.47 |
| | | | | 2 | 14.1 | 4.1 | | |
| | | | | 3 | 9.5 | 3.1 | | |
| | | | | 4 | 14.5 | 2.9 | | |
| | | | | 5 | 13.8 | 3.3 | | |
| 2 | 330 | 20 | 60 | 1 | 13.5 | 2.7 | 0.57 | 0.57 |
| | | | | 2 | 12.3 | 4.2 | | |
| | | | | 3 | 12.9 | 3.3 | | |
| | | | | 4 | 12.8 | 3.5 | | |
| | | | | 5 | 12.6 | 3 | | |
| 3 | 330 | 25 | 30 | 1 | 12.8 | 3.7 | 0.30 | 0.30 |
| | | | | 2 | 12.8 | 3.8 | | |
| | | | | 3 | 12.4 | 3.2 | | |
| | | | | 4 | 13 | 3.6 | | |
| | | | | 5 | 12.3 | 4 | | |
| 4 | 330 | 25 | 60 | 1 | 12.3 | 2.9 | 0.42 | 0.42 |
| | | | | 2 | 13.2 | 3.3 | | |
| | | | | 3 | 13.1 | 3 | | |
| | | | | 4 | 12.6 | 3.1 | | |
| | | | | 5 | 12.7 | 2.2 | | |
| 5 | 330 | 30 | 30 | 1 | 14.3 | 3 | 0.24 | 0.24 |
| | | | | 2 | 11.7 | 3.6 | | |
| | | | | 3 | 10.9 | 3.4 | | |
| | | | | 4 | 11.9 | 3.4 | | |
| | | | | 5 | 10.9 | 3.6 | | |
| 6 | 330 | 30 | 60 | 1 | 12 | 3.9 | 0.19 | 0.15 |
| | | | | 2 | 11.9 | 4.1 | | |
| | | | | 3 | 11.6 | 3.8 | | |
| | | | | 4 | 12.2 | 3.8 | | |
| | | | | 5 | 12.9 | 3.7 | | |
| 7 | 330 | 30 | 90 | 1 | 13.1 | 3 | 0.32 | 0.32 |
| | | | | 2 | 12.2 | 3.7 | | |
| | | | | 3 | 12.8 | 3.4 | | |
| | | | | 4 | 12.7 | 2.9 | | |
| | | | | 5 | 12.3 | 3.3 | | |
| 8 | 330 | 30 | 120 | 1 | 11.9 | 3.5 | 0.32 | 0.32 |
| | | | | 2 | 12.5 | 3.2 | | |
| | | | | 3 | 12.8 | 2.9 | | |
| | | | | 4 | 12.6 | 2.7 | | |
| | | | | 5 | 11.4 | 3.3 | | |

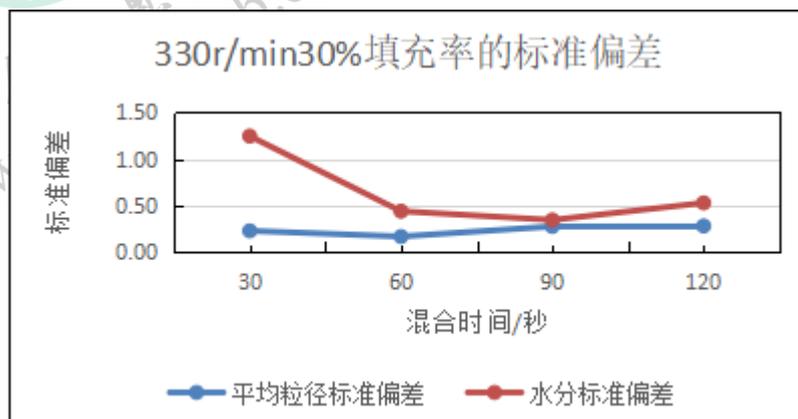
续表

| | | | | | | | | |
|----|-----|----|-----|---|------|-----|------|------|
| 9 | 200 | 30 | 30 | 1 | 12.4 | 3.8 | 0.27 | 0.27 |
| | | | | 2 | 11.5 | 3.8 | | |
| | | | | 3 | 13 | 4.3 | | |
| | | | | 4 | 11.9 | 3.7 | | |
| | | | | 5 | 12.7 | 4.2 | | |
| 10 | 200 | 30 | 60 | 1 | 13 | 3.8 | 0.23 | 0.23 |
| | | | | 2 | 11.4 | 4.2 | | |
| | | | | 3 | 11.5 | 3.7 | | |
| | | | | 4 | 12.3 | 4.2 | | |
| | | | | 5 | 12.2 | 3.9 | | |
| 11 | 200 | 30 | 90 | 1 | 12.5 | 3.6 | 0.29 | 0.29 |
| | | | | 2 | 10.5 | 3.6 | | |
| | | | | 3 | 11.6 | 4 | | |
| | | | | 4 | 12.2 | 4.3 | | |
| | | | | 5 | 12.8 | 3.9 | | |
| 12 | 200 | 30 | 120 | 1 | 13.3 | 4.1 | 0.52 | 0.52 |
| | | | | 2 | 11.8 | 3.3 | | |
| | | | | 3 | 12.6 | 4.1 | | |
| | | | | 4 | 12.7 | 4.2 | | |
| | | | | 5 | 12 | 3.1 | | |
| 13 | 250 | 30 | 30 | 1 | 11.8 | 3.8 | 0.42 | 0.42 |
| | | | | 2 | 13.3 | 4.3 | | |
| | | | | 3 | 12.4 | 4 | | |
| | | | | 4 | 13 | 4.9 | | |
| | | | | 5 | 11.1 | 4.3 | | |
| 14 | 250 | 30 | 60 | 1 | 17.5 | 2.7 | 0.15 | 0.19 |
| | | | | 2 | 11.8 | 2.5 | | |
| | | | | 3 | 11.7 | 3 | | |
| | | | | 4 | 12.8 | 2.7 | | |
| | | | | 5 | 12.4 | 2.9 | | |
| 15 | 250 | 30 | 90 | 1 | 13.4 | 4.3 | 0.48 | 0.48 |
| | | | | 2 | 12.2 | 4.6 | | |
| | | | | 3 | 12 | 4.1 | | |
| | | | | 4 | 12.4 | 3.4 | | |
| | | | | 5 | 11.1 | 3.7 | | |
| 16 | 250 | 30 | 120 | 1 | 11 | 3.6 | 0.38 | 0.38 |
| | | | | 2 | 12.1 | 3.8 | | |
| | | | | 3 | 12 | 4 | | |
| | | | | 4 | 11.5 | 3.2 | | |
| | | | | 5 | 12 | 4.2 | | |

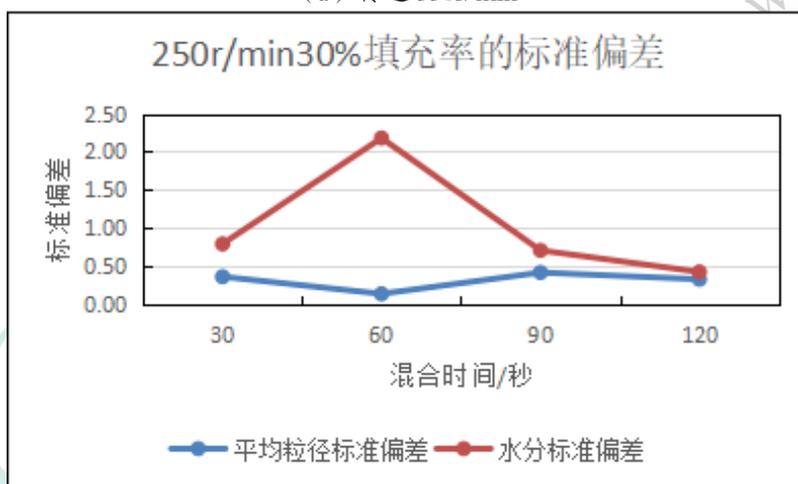
通过表 1 中数据可以对立式强力混合机不同混匀参数条件下的物料混匀效果进行比较：

(1) 混匀时间对立式强力混合效果的影响

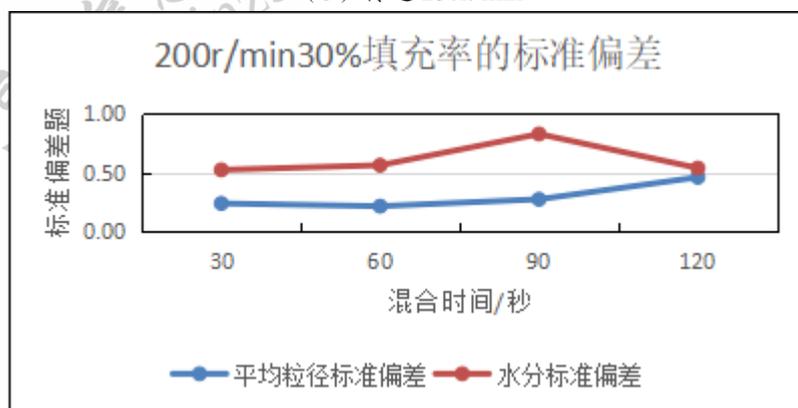
固定立式混合的填充率条件为30%，比较不同混匀时间条件下物料水分标准偏差和粒度标准偏差，结果见图 1。



(a) 转速 330r/min



(b) 转速 250r/min



(c) 转速 200r/min

图 1 填充率 30%- 三种转速条件下混匀时间对混匀效果的影响

从图 1 中可以看出，三种转速条件下水分标准偏差曲线较为混乱，没有明显的规律性趋势，而平均粒径的标准偏差趋势性较为一致。随着时间变大，三种不同转速下混匀的物料平均粒径标准偏差

均呈现先减后增的趋势，并且三种转速下最优混匀时间均为 60s。

(2) 混匀转速对立式强力混合效果的影响

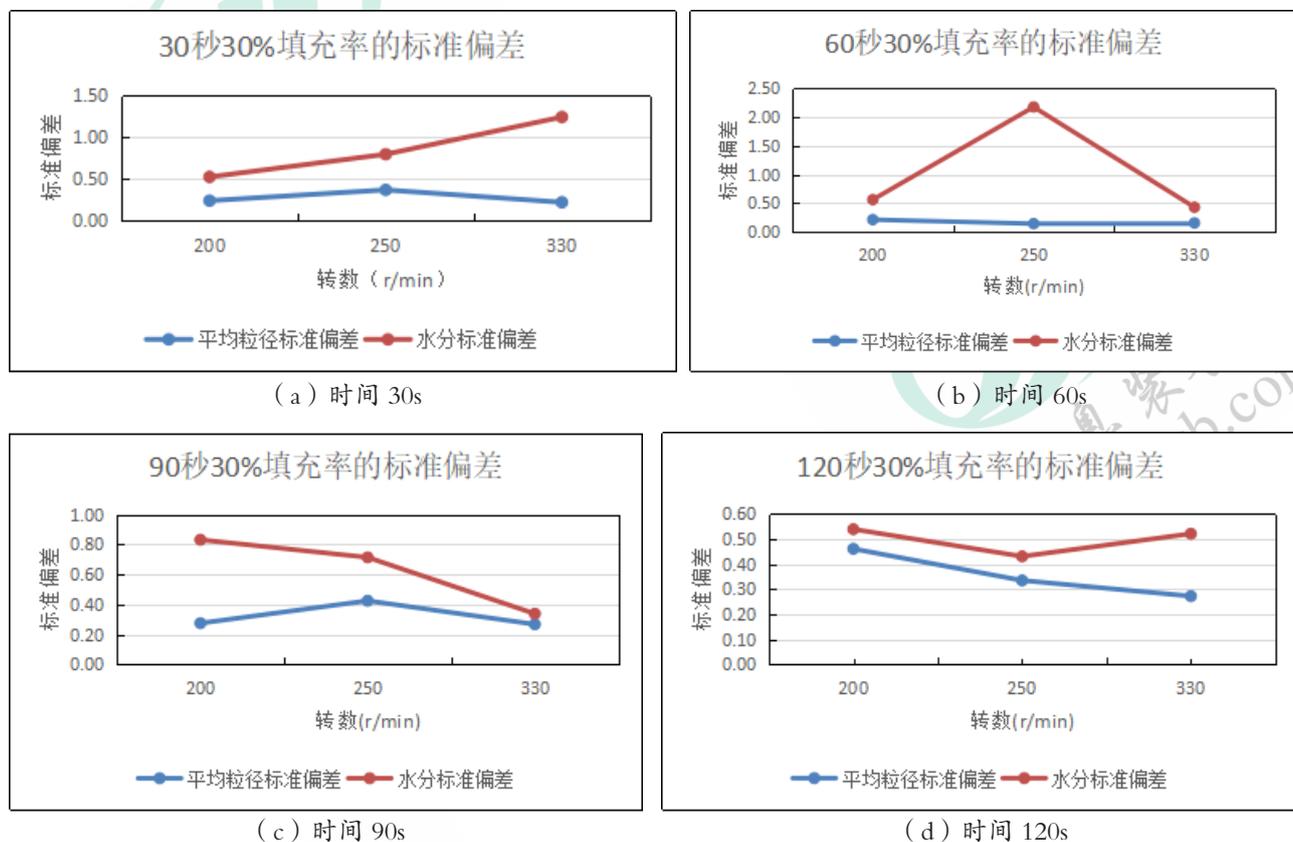


图 2 填充率 30%—四种混匀时间条件下混匀转速对混匀效果的影响

固定立式混合的填充率条件为 30%，比较不同混匀转速条件下物料水分标准偏差和粒度标准偏差。从图 2 中可以看出，四种混匀时间条件下水分标准偏差仍没有明显的规律性趋势。从平均粒度的标准偏差来看，虽未形成完全一致趋势性，但四种混匀时间下的粒径标准偏差最小偏差值均为转速 330r/min 条件下创造的。

(3) 填充率对立式强力混合效果的影响

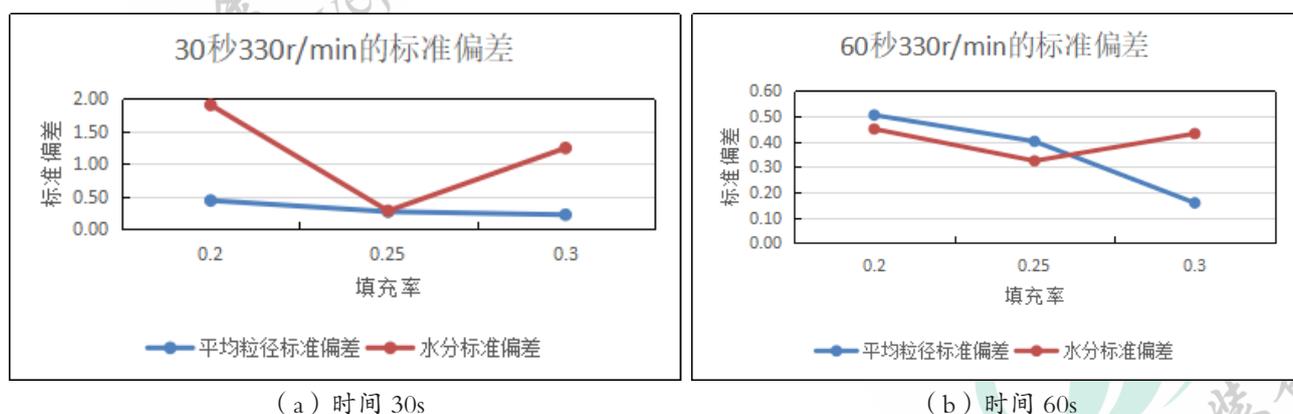


图 3 转速 330r/min—两种混匀时间条件下填充率对混匀效果的影响

固定立式强力混合机转速 330r/min, 比较不同填充率条件下物料水分标准偏差和粒度标准偏差。从图 3 中可以看出, 两种混匀时间条件下水分标准偏差曲线趋势一致, 呈“V”字型。并且, 平均粒度的标准偏差曲线趋势也一致, 呈递减趋势。根据水分标准偏差得到的最优填充率为 25%, 根据平均粒度标准偏差得到的最优填充率为 30%, 所以最佳填充率范围在 25% 至 30%。

3 固体废弃物卧式强力混合试验

采用与立式混合机相同的物料及配比, 通过卧式强力混合机进行固体废弃物混匀试验, 比较不同转数、混合时间和填充率等参数条件下的混匀效果, 并与同种物料条件下的立式强力混合机混匀效果进行对比, 从而得到最佳设备选型。不同混匀参数条件下混匀料的混匀结果见表 4。

表 4 不同混匀参数条件下卧式混合机混匀料的水分和平均粒度标准偏差

| 试验编号 | 转数 | 时间 | 物料编号 | 水分 | 平均粒径 | 水分标准偏差 | 粒度标准偏差 |
|------|-------|-----|------|------|------|--------|--------|
| | r/min | 秒 | | % | mm | | |
| 1 | 100 | 195 | 1 | 11.4 | 3.5 | 0.86 | 0.75 |
| | | | 2 | 9.1 | 2.5 | | |
| | | | 3 | 9.6 | 2.1 | | |
| | | | 4 | 10 | 1.8 | | |
| | | | 5 | 10.1 | 1.6 | | |
| 2 | 100 | 135 | 1 | 8.3 | 2.1 | 1.06 | 0.65 |
| | | | 2 | 9.7 | 3.4 | | |
| | | | 3 | 7.1 | 1.8 | | |
| | | | 4 | 9.6 | 2.9 | | |
| | | | 5 | 8.6 | 2.2 | | |
| 3 | 100 | 70 | 1 | 12.3 | 5.9 | 2.91 | 1.03 |
| | | | 2 | 9.5 | 3.6 | | |
| | | | 3 | 10.9 | 4.3 | | |
| | | | 4 | 17.2 | 6 | | |
| | | | 5 | 13 | 4.9 | | |
| 4 | 100 | 245 | 1 | 10.2 | 2.7 | 0.50 | 0.37 |
| | | | 2 | 10.2 | 2.1 | | |
| | | | 3 | 10.5 | 3.1 | | |
| | | | 4 | 9.2 | 2.6 | | |
| | | | 5 | 9.8 | 2.4 | | |
| 5 | 150 | 33 | 1 | 9.7 | 2.2 | 1.18 | 0.61 |
| | | | 2 | 11.8 | 3.3 | | |
| | | | 3 | 8.6 | 3.7 | | |
| | | | 4 | 9.4 | 3.3 | | |
| | | | 5 | 9.7 | 3.7 | | |

续表

| | | | | | | | |
|----|-----|-----|---|------|-----|------|------|
| 6 | 150 | 80 | 1 | 8.5 | 2.5 | 0.61 | 0.48 |
| | | | 2 | 8.6 | 2.2 | | |
| | | | 3 | 9 | 2.7 | | |
| | | | 4 | 9.7 | 2.8 | | |
| | | | 5 | 9.8 | 1.6 | | |
| 7 | 150 | 129 | 1 | 10.1 | 3.3 | 0.54 | 2.87 |
| | | | 2 | 10 | 1.9 | | |
| | | | 3 | 11 | 8.7 | | |
| | | | 4 | 9.6 | 2.6 | | |
| | | | 5 | 9.8 | 1.9 | | |
| 8 | 150 | 146 | 1 | 11.1 | 2.6 | 0.49 | 0.23 |
| | | | 2 | 10.4 | 2 | | |
| | | | 3 | 10.5 | 2.5 | | |
| | | | 4 | 9.9 | 2.4 | | |
| | | | 5 | 11 | 2.3 | | |
| 9 | 80 | 100 | 1 | 11.4 | 2.5 | 0.40 | 0.29 |
| | | | 2 | 11.2 | 2.6 | | |
| | | | 3 | 10.4 | 2.4 | | |
| | | | 4 | 10.7 | 1.9 | | |
| | | | 5 | 10.8 | 2.1 | | |
| 10 | 80 | 210 | 1 | 10.6 | 2.3 | 0.81 | 0.40 |
| | | | 2 | 12.2 | 2.8 | | |
| | | | 3 | 10 | 1.8 | | |
| | | | 4 | 11.2 | 2.3 | | |
| | | | 5 | 11.1 | 1.9 | | |
| 11 | 80 | 305 | 1 | 11.5 | 2.5 | 0.32 | 0.29 |
| | | | 2 | 10.7 | 2.2 | | |
| | | | 3 | 10.9 | 2.9 | | |
| | | | 4 | 11.1 | 2.2 | | |
| | | | 5 | 10.8 | 2.4 | | |

通过表 4 中数据与表 3 对比可以看出，卧式强力混合机不同参数条件下的水分标准偏差和粒度标准偏差整体显著高于立式强力混合机，其中水分最小标准差为 0.32，粒度最小标准偏差为 0.29，也均远高于立式混合机的最小标准偏差 0.15。并且，卧式强力混合机所需要的混匀时间更长，无论效率和效果均不及立式强力混合机。

4 铲车堆混与立式强力混合机混匀效果对比

为说明强力混合机相比于传统铲车堆混效果的优势，采用相同的物料及配加比例开展铲车堆混和强力混合机混匀效果对比试验。其中，铲车堆混的混匀方式如下：①采用铲车将粒度较大、水分较

小的除尘灰纵向铺底，各类尘泥依次铺在上层。②铺好后，采用铲车“纵向堆”，“横向切”，将混料堆横向切下后，均匀纵向铺在地面上。将铺好后的料堆再重复操作2次，共堆混3次。将堆混后的料堆进行多点取样，进行粒度及水分分析。共开展四组试验，其水分及化学成分标准偏差结果见表5，立式强力混合混匀后的标准偏差结果见表6。

表5 铲车堆混固体废弃物标准偏差

| 试验编号 | 标准偏差 | | | | | |
|------|------|------|------------------|------|------|------|
| | 水分 | C | SiO ₂ | TFe | CaO | 碱度 |
| 1 | 0.39 | 1.75 | 0.1 | 1.25 | 1.13 | 0.25 |
| 2 | 1.16 | 1.89 | 1.07 | 3.85 | 2.7 | 0.08 |
| 3 | 0.37 | 2.88 | 0.42 | 4.93 | 2.36 | 0.35 |
| 4 | 7.95 | 2.69 | 0.56 | 2.66 | 1.58 | 0.3 |
| 平均值 | 2.47 | 2.3 | 0.54 | 3.17 | 1.94 | 0.25 |

表6 立式强力混合固体废弃物标准偏差

| 试验编号 | 转数 (r/min) | 填充率 | 时间 / 秒 | 水分标准 偏差 | 化学成分标准偏差 | | | | |
|------|---------------|------|--------|------------|----------|------------------|------|------|------|
| | | | | | C | SiO ₂ | TFe | CaO | 碱度 |
| 1 | 330 | 0.25 | 30 | 0.28 | 0.49 | 0.1 | 0.65 | 0.36 | 0.05 |
| 2 | 330 | 0.25 | 60 | 0.32 | 0.44 | 0.09 | 0.58 | 0.42 | 0.06 |
| 3 | 330 | 0.3 | 30 | 1.24 | 0.38 | 0.22 | 0.78 | 0.67 | 0.05 |
| 4 | 330 | 0.3 | 60 | 0.43 | 0.72 | 0.15 | 0.25 | 0.69 | 0.1 |
| 5 | 330 | 0.3 | 90 | 0.34 | 0.59 | 0.24 | 0.68 | 0.77 | 0.07 |
| 6 | 330 | 0.3 | 120 | 0.52 | 0.25 | 0.13 | 0.48 | 0.49 | 0.05 |
| 7 | 200 | 0.3 | 30 | 0.52 | 0.48 | 0.13 | 0.42 | 0.34 | 0.05 |
| 8 | 200 | 0.3 | 60 | 0.56 | 0.61 | 0.09 | 0.2 | 0.69 | 0.1 |
| 9 | 200 | 0.3 | 90 | 0.83 | 0.35 | 0.34 | 0.91 | 0.92 | 0.08 |
| 10 | 200 | 0.3 | 120 | 0.54 | 0.66 | 0.31 | 0.97 | 0.46 | 0.03 |
| 11 | 250 | 0.3 | 30 | 0.8 | 0.97 | 0.16 | 0.39 | 0.47 | 0.04 |
| 12 | 250 | 0.3 | 60 | 2.18 | 1.24 | 0.3 | 0.72 | 0.83 | 0.09 |
| 13 | 250 | 0.3 | 90 | 0.71 | 0.71 | 0.44 | 1.04 | 0.62 | 0.01 |
| 14 | 250 | 0.3 | 120 | 0.43 | 0.56 | 0.18 | 1.07 | 0.36 | 0.06 |
| 平均 | | | | 0.69 | 0.6 | 0.21 | 0.65 | 0.58 | 0.06 |

表7 铲车堆混与立式强力混合标准差对比

| | 水分 | C | SiO ₂ | TFe | CaO | 碱度 |
|----------|--------|--------|------------------|--------|--------|------|
| 铲车堆混 | 2.47 | 2.3 | 0.54 | 3.17 | 1.94 | 0.25 |
| 立式强力混合 | 0.69 | 0.6 | 0.21 | 0.65 | 0.58 | 0.06 |
| 混匀程度提高比例 | 71.92% | 73.77% | 61.79% | 79.43% | 70.25% | 76% |

从表 7 中铲车堆混与立式强力混合标准差对比可以看出，立式强力混合后的主要成分、水分、碱度的标准偏差要明显优于铲车堆混的指标。采用强力混合后，物料均匀性和稳定性显著提高，其水分、TFe、CaO、SiO₂、碱度等主要指标稳定率提高 70% 以上。

5 结论

(1) 采用立式强力混合机混合固体废弃物的混匀效果显著好于卧式强力混合机，其最优工艺参数为：混匀时间 60s，转速 330r/min，填充率 25%~30%。

(2) 通过铲车堆混与立式强力混合机混匀效果对比结果可以看出：相比于传统的铲车堆混，采用立式强力混合机处理固体废弃物效果更优，其混匀后的物料稳定性可提高 70% 以上。

参考文献

- [1] 李强, 贺淑珍, 季志云, 等. 强力混合强化微细粒精矿烧结的工艺试验分析 [J]. 中国冶金, 2020, 30(7):56-60
- [2] 王梁. 烧结工序节能降耗新技术发展趋势 [J]. 中国冶金, 2015, 25(12):64
- [3] 朱刚, 陈鹏, 尹媛华. 烧结新技术进展及应用 [J]. 现代工业经济和信息, 2016, 6(5):57
- [4] 伍英, 陶卫忠, 洪强, 等. 宝钢 4 号烧结机新工艺应用 [J]. 烧结球团, 2014, 39(5):20
- [5] 陈鹏. 烧结混合制粒工艺的比较 [J]. 中国设备工程, 2017, (4):75
- [6] 刘文权. 烧结强力与制粒技术 [J]. 山东冶金, 2013, 35(1):7

钢渣细碎领域的革命——惯性圆锥破碎机

唐威

摘要：惯性圆锥破碎机是具有良好的过铁性能的节能超细破碎设备，破碎机构和传动机构之间是柔性联结，过铁时不会损坏机器，破碎比大，可将钢渣破碎至 -5mm 占80%以上，“钢”和“渣”能充分解离，极大提高了钢渣中铁的回收率，能耗低，衬板使用寿命长，尾渣容易处理，已成为钢渣细碎首选设备。使用惯性圆锥破碎机的新钢渣破碎工艺流程简洁高效，技术性能优异，运营成本低。实际工业应用证明该机在钢渣破碎领域具有极其广阔的应用前景。

1 前言

要变废为宝，实现钢渣的“零排放”，破碎是不必可少的工序之一。钢渣的初碎普通颚式破碎机就能适用，但以前一直没有理想的钢渣细碎设备，传统钢渣破碎设备及工艺存在的主要问题是：(1)、由于钢渣中含有钢块，传统破碎设备存在“卡钢”问题，很容易导致设备损坏，无法保证设备的连续正常运转，生产效率低下；(2)、传统破碎设备很难将钢渣破碎到需要的粒度，“钢”和“渣”不能充分解离，钢渣中铁的回收率低，尾渣粒度大；(3)、传统的钢渣破碎采用三段甚至四段闭路循环工艺流程，循环量大，流程复杂，基建投资大，能耗高，易损件消耗快，运营成本高。

传统的钢渣破碎设备有锤式破碎机、液压圆锥破碎机和棒磨机等：

(1)锤式破碎机破碎钢渣时锤头磨损十分严重，锤头使用寿命短，更换频繁，生产效率低，工人劳动强度高，而且锤头一旦磨损，产品粒度迅速变粗。

(2)液压圆锥破碎机产品粒度一般80%为 -40mm ，很难将钢渣破碎到需要的粒度，“钢”和“渣”不能充分解离。特别是液压圆锥破碎机动锥的运动轨迹是固定的，过铁时会发生动锥和铁硬碰硬、动锥硬憋过去的情况，即我们常说的“卡钢”，很容易导致传动齿轮损坏、偏心轴套坏或者主轴断裂等事故发生，而钢渣中含有大量铁块，频繁过铁让设备难以连续正常运转，生产效率低下。国外品牌的液压圆锥破碎机如美卓、山特维克在我国矿山行业应用很广泛，处于垄断地位，但在钢渣破碎领域应用基本为零，不是他们不想干，而是他们知道确实干不了。

(3)由于以前没有其它适合的钢渣细碎设备，不少企业只能选用投资大、生产成本高的棒磨机细碎钢渣。

研究表明，因为工作原理不同，磨机的电耗只有不到10%用于矿石的破碎，而绝大部分都消耗在发热、发声和磨机筒体的滚动上，磨机的破碎效率远低于破碎机，要达到相同的破碎效果，磨机的电耗和钢耗都远大于破碎机，在同样产量和产品粒度的情况下进行比较，棒磨机的能耗是破碎机的5倍以上，钢耗是破碎机的10倍以上，所以磨机的生产成本远高于破碎机，“多碎少磨”已成为粉碎工程领域的共识，目前公认的最佳入磨粒度为 -10mm ，在矿山选厂，那种经颚式破碎机初碎后的大颗粒物料直接进磨机细碎的落后生产工艺早已被淘汰。

因此棒磨机适用于将钢渣中已经磁选出来的磁性料进行提纯，以得到高品位的渣钢，而不适合直接用来细碎钢渣。

央企矿冶科技集团有限公司与俄罗斯合资成立的北京凯特破碎机有限公司引进俄罗斯先进技术，生产出在破碎领域具有革命性突破的新型节能细碎设备——惯性圆锥破碎机，在过铁和产品粒度方面与传统破碎设备相比具有明显的优势，特别适合于钢渣的细碎。

2 惯性圆锥破碎机结构特点

2.1 惯性圆锥破碎机结构

惯性圆锥破碎机的结构如图 1 所示。

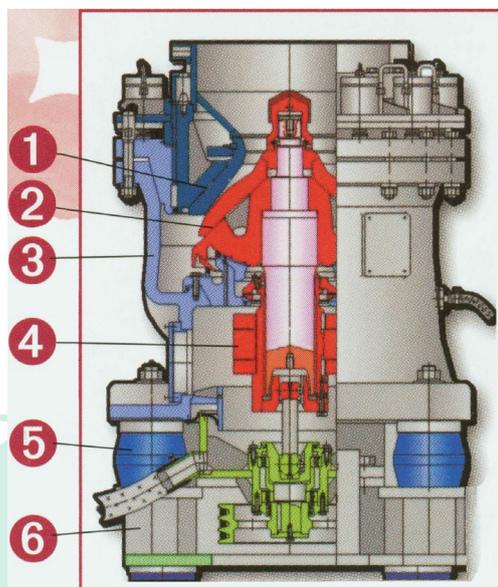


图 1 惯性圆锥破碎机结构原理图

1- 定锥 2- 动锥 3- 外壳 4- 激振器 5- 减震器 6- 底架

惯性圆锥破碎机机体通过减震器座落在底架上，破碎机构由定锥和动锥组成，锥体上均附有耐磨衬板，衬板之间的空间形成破碎腔。动锥轴插入轴套中，电动机的旋转运动通过传动机构传给固定在轴套上的激振器，激振器旋转时产生惯性力，迫使动锥绕球面瓦的球心做旋摆运动。在一个垂直平面内，动锥靠近定锥时，物料受到冲击和挤压被破碎，动锥离开定锥时，破碎产品因自重由排料口排出。动锥与传动机构之间是柔性联结。

2.2 惯性圆锥破碎机特点

普通圆锥破碎机动锥的运动轨迹是固定的，产品粒度的大小由紧边排矿口尺寸决定。

惯性圆锥破碎机工作时，激振器旋转产生的惯性力推动动锥做旋摆运动，动锥的运动轨迹不是固定的。破碎腔内无物料时，动锥在惯性力作用下可以碰到定锥，因此惯性圆锥破碎机不管实际排矿

口尺寸为多大，紧边排矿口尺寸都可以视为是无限小；破碎腔内有物料时，动锥在惯性力作用下将尽量的冲击和挤压破碎物料。这是惯性圆锥破碎机产品粒度细的原因之一。

惯性圆锥破碎机动锥的旋摆频率远大于普通圆锥破碎机动锥的摆动频率，物料从进入破碎腔到被排出这个过程中被破碎达上百次，远大于物料在普通圆锥破碎机破碎腔中被破碎的次数。另外，与普通圆锥破碎机相比，惯性圆锥破碎机的动锥运动轨迹可变，动锥沿物料层每滚动一周都伴随有 100 多次的振动，由附加的这种强烈脉动冲击加强了破碎效果。

惯性圆锥破碎机工作时破碎腔是挤满给料，在由激振器旋转产生的惯性力作用下，物料层被充分地压实，承受全方位的剪切、挤压、扭转和弯曲应力，物料颗粒之间相互作用，从而实现了“料层粉碎”。

与单颗粒破碎相比，“料层粉碎”有三大好处：①因为破碎腔是挤满给料，破碎腔内的物料承受全方位的破碎作用，所以能充分利用破碎能量，提高破碎效率，单位破碎比功耗仅为普通设备的一半左右；②物料的破碎不仅发生在物料颗粒和衬板之间，同时主要发生在物料颗粒之间，破碎腔内的物料承受全方位的破碎作用，因此破碎得更细；③因为物料的破碎主要发生在物料颗粒之间，从而减少了衬板的磨损，延长了衬板的使用寿命。

基于以上原因，惯性圆锥破碎机产品最大粒度只有排矿口尺寸的 $1/5 \sim 1/6$ 左右，即使在排矿口为 60mm 的情况下，也能将物料破碎至 10mm 以下，开路破碎的产品粒度为毫米级。

普通圆锥破碎机由齿轮带动偏心轴套和动锥一起转动，动锥的运动轨迹是固定的，如果物料中混入了不可破碎物体，因为动锥运动轨迹不能改变，就会出现动锥和不可破碎物体硬碰硬、动锥硬憋过去的情况，导致破碎机零部件的损坏。

惯性圆锥破碎机的排矿口比普通圆锥破碎机大，如 GYP-1200 排矿口可达 50 ~ 60mm，而给料粒度小于 80mm，稍微经过破碎就会小于排矿口尺寸，因此基本上不会出现“卡钢”的情况，一般钢渣中的渣钢、一般的钢块如螺栓等硬物进入破碎腔都会被轧扁排出。

如果物料中混入了不可破碎物体如铲齿，由于动锥与传动机构之间无刚性联接，动锥被卡住不动，激振器绕动锥轴继续转动，绝对不会破坏传动机构和主机。因为动锥被卡住不动，破碎机的电流、震动和声音都减小，也不再排料。此时只要停机，从破碎机上的观察孔中找到此物体，用气割割掉即可继续开机运行，因为惯性圆锥破碎机是带负荷启动，不需要清空破碎腔。

为了防止动锥和定锥碰撞，惯性圆锥破碎机要求带料启动，启动力矩较大，因此启动电流较大。为了保证破碎机安全平稳的启动，选用了较大功率的电机。破碎机正常运转时的工作电流只有额定电流的 60% 左右，因此破碎机实际消耗功率只有电机额定功率的 60% 左右。

惯性圆锥破碎机可破碎任何硬度下的脆性物料，甚至可破碎硬质合金刀头。

钢渣抗压强度为 169 ~ 306MPa，莫氏硬度为 6 ~ 8，很容易破碎。破碎时钢渣中渣钢被轧扁，尾渣被破碎到 10mm 以下，钢渣中的“钢”和“渣”基本解离。

惯性圆锥破碎机挤满给料，无需给料机，产品粒度细，无需振动筛构成闭路，能简化碎磨流程，减少辅助设备台数，大大节省设备和基建投资。

惯性圆锥破碎机的衬板是用螺栓固定，不需要灌铅或树脂，更换方便省时，维护简单。

工作时惯性圆锥破碎机的破碎腔是封闭的，只有排料口处会产生大的粉尘，只要在排料口处做好

除尘，就能保证环境清洁，完全满足国家环保要求。

惯性圆锥破碎机的主机坐落在减震橡胶弹簧上，工作基础振动小，噪音小。

2.3 惯性圆锥破碎机技术参数

应用于钢渣破碎的惯性圆锥破碎机主要有四种规格，其技术参数见表 1。

表 1 惯性圆锥破碎机技术参数

| 型号 | GYP-600 | GYP-900 | GYP-1200 | GYP-1500 |
|-----------------------|---------|---------|----------|-----------|
| 产量 / $t \cdot h^{-1}$ | 15 ~ 25 | 30 ~ 50 | 70 ~ 100 | 180 ~ 280 |
| 给料尺寸 /mm | <50 | <70 | <80 | <180 |
| P80 产品粒度 /mm | <5.0 | <10.0 | <10.0 | <12.0 |
| 装机功率 /kW | 55 | 110 | 185 | 315 |

3 高效钢渣破碎工艺流程

相对于传统的钢渣破碎工艺流程，采用惯性圆锥破碎机的新钢渣破碎工艺流程十分高效、简洁，如图 2 所示。

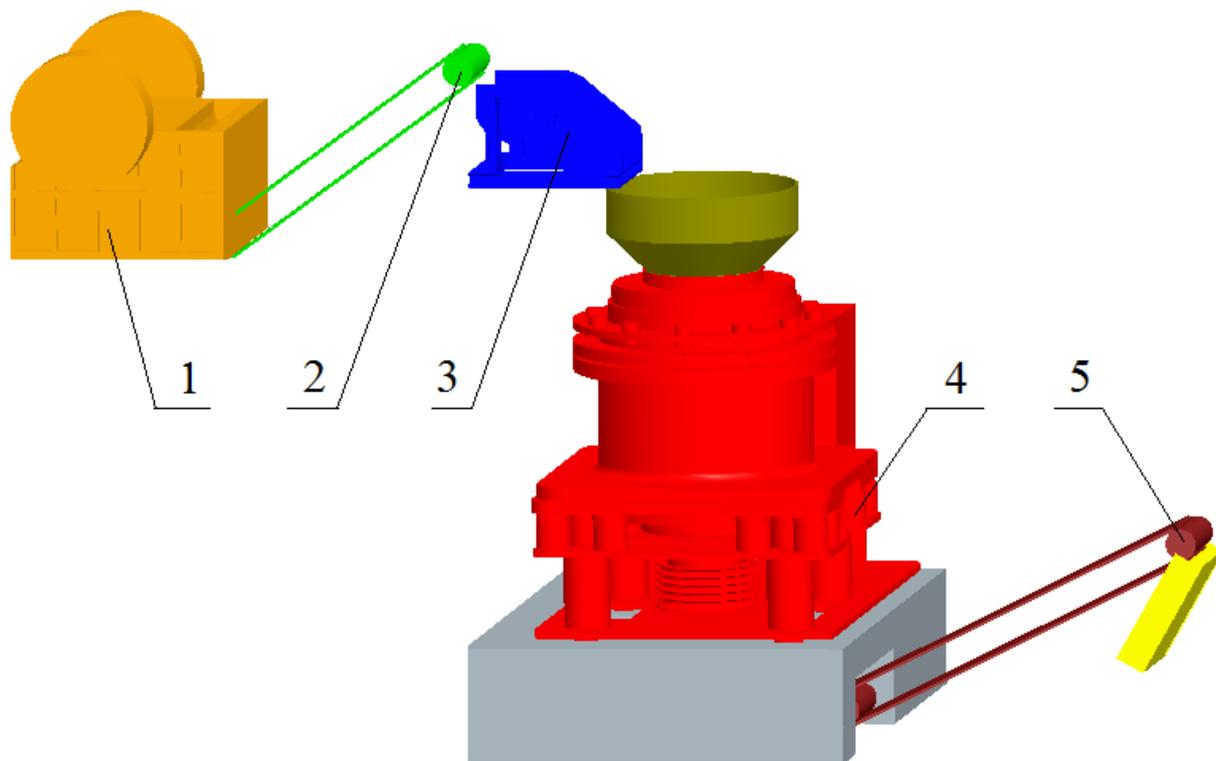


图 2 高效钢渣破碎工艺流程
1- 颚式破碎机 2- 磁滚筒 I 3- 振动筛 4- 惯性圆锥破碎机 5- 磁滚筒 II

钢渣经颚式破碎机初碎后，通过磁滚筒 I 选出磁性钢块，初碎产品由振动筛分级，筛上产品进入惯性圆锥破碎机细碎，筛下产品和惯性圆锥破碎机细碎产品合并进行磁选和分级。

磁选可根据产品的要求选择一段磁选或两段磁选甚至是多段磁选，磁选的钢和分离出的尾渣可根据需要筛分分级，以满足不同应用的要求。

传统钢渣破碎工艺流程相比，新高效钢渣破碎工艺流程具有如下特点：

(1)流程配置简单：开路细碎，流程简洁，辅助设备少，基建投资低。

(2)技术性能优异：产品粒度为 -10mm ，“钢”和“渣”能充分分离。

(3)系统稳定性高：破碎机构和传动机构之间是柔性联结，过铁不会损坏机器，生产效率高。

(4)运营成本低：能实现 24 小时连续工作，单位破碎比功耗低，衬板使用寿命长，有效处理量大，运营成本仅为使用其他设备的一半左右。经过多家钢渣处理企业的比较，每处理 1 吨钢渣，惯性圆锥破碎机生产线的生产成本要比棒磨机生产线节约 15 ~ 25 元。

(5)尾渣利用好：尾渣粒度细，尾渣中磁性铁的含量小于 1%，便于磨矿，附加值高。

4 应用情况

惯性圆锥破碎机已广泛应用于钢渣细碎，传统的钢渣细碎设备如液压圆锥破碎机、锤式破碎机已基本被淘汰。目前大型国有企业如首钢京唐公司、湘钢、龙钢、济钢、首秦、邯钢，大型民企如晋钢、中天钢铁、浙江元立，还有更多的中小型企业都在使用惯性圆锥破碎机细碎钢渣，已有上百条钢渣处理生产线使用惯性圆锥破碎机，年细碎钢渣超过 2000 万 t。

4.1 GYP-600 和 GYP-1200 细碎钢渣情况

河北某钢铁集团的钢渣都由其附属企业处理。该钢铁集团附属企业钢渣厂于 2011 年 3 月购买了两台 GYP-600 惯性圆锥破碎机细碎钢渣，细碎产品经磁选后，磁性料直接回转炉； -8mm 尾渣作为烧结原料，在烧结混合料中配 3% ~ 4% 的钢渣尾渣； $+8\text{mm}$ 尾渣用于铺路，所有钢渣百分之百得到利用。

新钢渣处理生产线开路破碎产品粒度近 90% 在 5mm 以下，磁性铁回收率在 98% 以上，回收的磁性料品位也得以提高，生产效率高，成本费用大大降低，使用效果良好，经济效益突出。该厂钢渣破碎工艺流程取样筛分结果见表 2，两条钢渣生产线产量为 $35 \sim 40\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ ，一天产量为 800 ~ 1000 t。

表 2 GYP-600 惯性圆锥破碎机细碎钢渣取样筛分结果

| 粒度 /mm | + 5 | - 5 ~ + 3 | - 3 ~ + 1 | - 1 |
|--------|------|-----------|-----------|------|
| 产率 /% | 12.5 | 20.5 | 40.5 | 26.5 |

图3为钢渣原料、颚式破碎机产品和惯性圆锥破碎机产品粒度对比图，其中标注的小圆圈中为惯性圆锥破碎机轧扁的小钢块。



图3 原料和产品粒度对比

因为惯性圆锥破碎机细碎钢渣效果很好，为了扩大产量，该钢铁集团附属企业钢渣厂于2011年7月又购买了一台GYP-1200惯性圆锥破碎机，该机生产取样筛分结果见表3。

表3 GYP-1200 惯性圆锥破碎机细碎钢渣取样筛分结果

| 排料间隙 mm | 产量 $t \cdot h^{-1}$ | 粒度 mm | + 10 | - 10 ~ + 8 | - 8 ~ + 5 | - 5 ~ + 3 | - 3 ~ + 1 | - 1 ~ + 0.18 | - 0.18 |
|------------|------------------------|----------|------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|--------|
| 40 | 69 | 产率 /% | 7.4 | 14.4 | 39.5 | 8.8 | 15.8 | 9.2 | 4.9 |
| 57 | 108 | 产率 /% | 16.9 | 18.9 | 29.4 | 8.7 | 13.8 | 8.7 | 3.6 |

经实测，GYP-1200 惯性圆锥破碎机把钢渣从-80mm破碎到-8mm单位功耗为 $1.2 \sim 1.3 kW \cdot h \cdot t^{-1}$ ，远低于其它钢渣破碎设备。GYP-1200 惯性圆锥破碎机产量为 $69 \sim 108 t \cdot h^{-1}$ ，破碎产品粒度十分理想，充分满足了该钢铁集团生产的需要。

图4为GYP-1200 惯性圆锥破碎机轧扁的渣钢块，大约半个巴掌大，厚约25 mm。



图4 GYP-1200 惯性圆锥破碎机轧扁的渣钢块

4.2 GYP-900 细碎钢渣情况

山东某钢铁集团采用一台 GYP-900 惯性圆锥破碎机细碎钢渣，在不同排料间隙下，测试 GYP-900 惯性圆锥破碎机的破碎产品，两次取样，筛分结果见表 4，产量为 $38 \sim 42 \text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 4 GYP-900 惯性圆锥破碎机细碎钢渣取样筛分结果

| 粒度 /mm | + 8 | - 8 ~ + 5 | - 5 ~ + 3 | - 3 ~ + 1 | - 1 ~ + 0.15 | - 0.15 | |
|--------|-----|-----------|-----------|-----------|--------------|--------|-----|
| 产率 /% | 1 | 12.0 | 9.5 | 30.0 | 24.4 | 15.6 | 8.5 |
| | 2 | 13.8 | 10.2 | 29.1 | 25.3 | 15.0 | 6.6 |

4.3 GYP-1500 细碎钢渣情况

陕西某钢铁集团采用一台 GYP-1500 惯性圆锥破碎机细碎钢渣，在排料间隙为 65 mm 时，产量为 $250 \text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右，取样筛分结果见表 5。

表 5 GYP-1500 惯性圆锥破碎机细碎钢渣取样筛分结果

| 粒度 /mm | + 12 | - 12 ~ + 10 | - 10 ~ + 8 | - 8 ~ + 5 | - 5 ~ + 3 | - 3 ~ + 1 | - 1 |
|--------|------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|------|
| 产率 /% | 11.7 | 12.6 | 14.1 | 24.9 | 12.8 | 13.5 | 10.4 |

因为 GYP-1500 惯性圆锥破碎机产量大，只用了 1 年时间，不但钢厂每天产生的钢渣处理完了，连堆放多年的钢渣山都清空了。

5 结语

惯性圆锥破碎机的研制应用已荣获国家省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 7 项，国家专利 26 项。

惯性圆锥破碎机具有两大特点：1、破碎机构与传动机构之间是柔性联结，过铁时不会损坏设备；2、可将钢渣开路破碎（不用过筛）至 10 毫米以下，将“钢”和“渣”充分解离。因此惯性圆锥破碎机特别适合于细碎钢渣，已成为钢渣细碎首选设备。采用惯性圆锥破碎机的新钢渣破碎工艺流程简洁高效，技术性能优异，运营成本低。推广应用后，将推动钢铁工业的技术进步，提高企业的竞争力，为实现钢渣的“零排放”、促进二次资源高效利用和保护环境作出重大贡献，为企业取得巨大的经济效益和社会效益。

除尘灰冷固球团生产技术创新与应用实践

王瑞良 安亮

(河钢集团邯钢公司环保能源部)

摘要: 转炉炼钢过程会产生大量的除尘灰,其粒度细并含较多有害物质,直接外排或堆放会污染环境。当前钢厂多将其返回烧结配料,回收利用灰中的Fe、Ca等有益成分,但会对烧结混料质量、透气性、烟气污染物控制、烧结热平衡、烧结矿质量和高炉寿命、高炉炉况等产生不利影响。为此针对转炉除尘灰的合理利用,降低炼钢成本进行了专项研究,本文重点阐述了除尘灰冷固球团技术创新及应用实践,通过设备、工艺、物料配比等一系列研究优化,既充分利用除尘灰中铁、钙等有价值资源,降低冶炼的成本,还能一定程度解决废料产生的资源浪费和环境污染等现象,创造了显著的经济效益和社会效益,推进钢铁业的可持续发展。

关键词: 转炉除尘灰;冷固球团;技术创新

1 项目背景

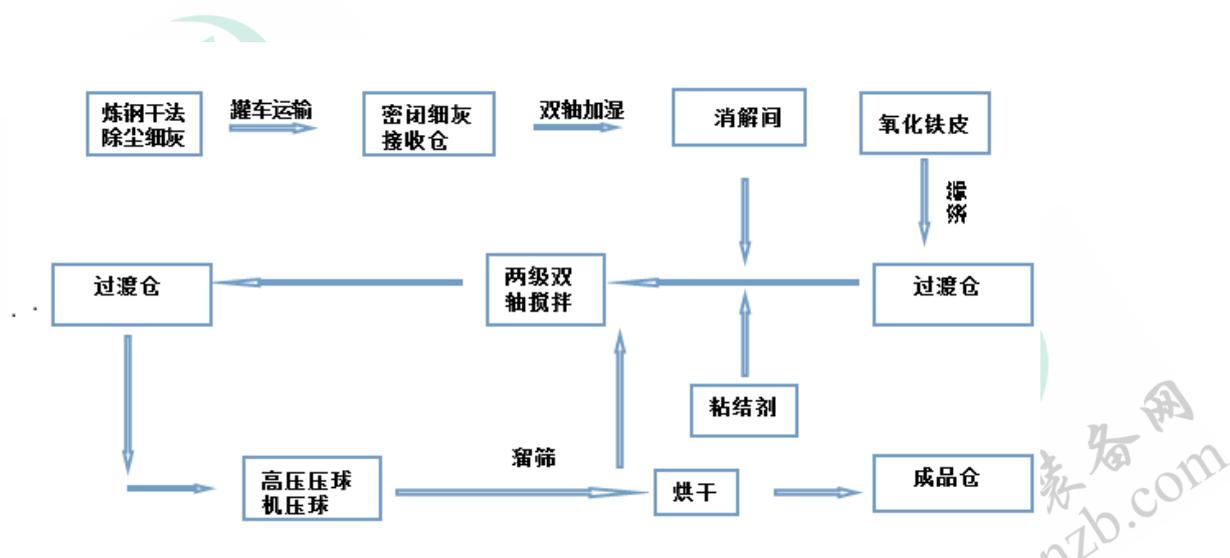
炼钢除尘灰中铁品位较高,近年来均作为混匀料返回烧结工序循环利用,但该方法存在流程长、运输使用不方便等缺点,而且目前国内钢铁企业受炼钢加大配吃废钢的影响,除尘灰中的锌含量偏高,给高炉的顺行带来不利影响。对此,开启对炼钢除尘灰再利用的重新思考:一方面,通过冷压球的方法可以避免炼钢除尘灰在运输、使用过程中易扬尘的问题;另一方面,通过炼钢除尘灰冷压球再加入转炉炼钢利用,大大缩短了循环流程,也避免了炼钢除尘灰中有害成分对高炉带来的不利影响。本项目采用技术引进和融合创新相结合的方式开展,项目总体思路是借鉴、引用国内外已有关键理论、技术、装备和控制手段,优化应用除尘灰冷固压球工艺,在行业形成先进的应用示范。

2 除尘灰冷固球团工艺、设备研究

本项目主要由原料准备及消化、配料及搅拌、压球及一次筛分、烘干及二次筛分四部分组成。生产工艺流程:除尘密封罐储存→除尘灰消解→加入搅拌系统→粘结剂配料→搅拌混匀→压球→球干燥→成品球入库→送交炼钢,冷压球项目在工艺生产过程中概括分为卸灰系统、消解系统、配料系统、压球系统。(见下页图)

2.1 卸灰系统

2.1.1 工艺流程



冷压球工艺流程简图

冷压球主要消化邯宝炼钢和一连钢的一次除尘细灰，除尘细灰由灰罐车运送到冷压球卸灰点，通过压缩空气打到冷压球储灰仓。再由储灰仓经过卸灰阀、双螺旋称量输送机、双轴加湿搅拌机、拉链机、斗提机，将除尘灰卸到储灰池。

2.1.2 主要设备

卸灰系统设备主要包括两个 50 立方的储灰仓，两台仓顶单体除尘器，两个卸灰阀，两台双螺旋称量输送机，两台双轴加湿搅拌机，一台拉链机和一台斗提机。

2.1.3 设备的改进研究

成型前的物料搅拌过程需要多次加水，常规的方法是通过搅拌后物料的干湿状态来确定是否需要补充水量，但旧的操作方法由于操作者个体感觉差异，往往判断不准确，或者不能随原料水分波动而实时调整加水量，经常出现物料偏干或过湿现象，直接影响压球成型率及产品质量。因此，对物料搅拌加水过程进行攻关，开发了搅拌过程自动加水控制系统，该系统包含原料称量系统、原料水分在线监测系统、自动计量加水系统。该自动控水系统根据计量进料量和实时含水率，计算出需补水量，并根据水管流量精确控制加水量，实现产品质量的稳定提升。

2.2 消解系统

2.2.1 工艺流程

消解系统建有一个密闭消解间，主要将卸灰系统卸到灰坑里的料由天车经抓斗运送到消解间，进

行消解，消解时间为 24 小时，消解完成后进行压球配料。消解间配有两个卸料池，用于接卸氧化铁皮，由天车抓斗运送到配料仓，参与配料。

2.2.2 主要设备为抓斗天车。

2.2.3 设备改进研究

除尘灰的消解是冷固球生产的第一个重要环节，消解的好坏程度直接影响成球率以及成品球裂解数量。消解间配合抓斗天车取代消解仓，彻底解决了多内其它生产线无法解决的湿法除尘 OG 泥的配吃问题，

另外配合抓斗天车对除尘灰加湿后进行搅拌，增加了原料的混匀过程，并使原料中的 CaO 充分与水反应，保证彻底消解。

2.3 配料系统

2.3.1 工艺流程

配料系统主要是将除尘灰、氧化铁皮、粘结剂按照相应的比例进行混合。三种原料分别通过配料仓、给料机，再通过皮带机输送到加湿搅拌机，进行充分混合后，进入到压球系统。

2.3.2 主要设备

配料系统主要包括三个除尘灰配料仓、一个氧化铁皮料仓、一个粘结剂料仓、皮带机、2 台斗提机、2 台加湿搅拌机、1 台拉链机。

2.3.3 设备的改进研究

在搅拌仓入口处加装原料筛分装置，筛网为 10mm 方孔筛，采用 15° 倾角倾斜布置，同时施加振动装置防止堵料。该原料筛分装置可以避免过大粒径的原料进入搅拌机仓内导致混料效率降低及冷压球产品成分、性能不均匀等问题。搅拌叶由连续螺旋形改进为间断螺旋形，缺口设置 1cm，同时在搅拌叶面上间隔 10cm 焊接挡片。通过搅拌叶的改进，物料混合作用更强，尤其对物料中大块板结物料有较强的分散作用。搅拌叶使用合金钢材料，安装方式为螺栓巴结，可拆卸更换，方便检修操作。

2.4 压球系统

冷压球团关键设备为压球机，其工作原理是利用压辊将粉状原料压制成相应大小的球团。

2.4.1 工艺流程

压球系统主要是将配料系统输送过来的炼钢细灰、氧化铁皮及粘合剂的混合料由压球机进行挤压处理，压制成球，最后落地晾干或通过烘干机进行烘干处理，提高成品球的强度并降低水分。

2.4.2 主要设备

压球系统主要包括两台压球机，一条成品皮带，成品球筛分装置，皮带秤。

2.4.3 设备的改进研究

2.4.3.1 送料溜槽拐角曲线设计优化

为避免将物料卸到送料溜槽后，在转角处发生物料粘壁聚集最终堵塞溜槽的问题，对送料溜槽拐角曲线进行重新设计，改为大曲率圆弧设计，避免物料转弯角度突变造成的物料挤压；同时缩短卸料口与中转料仓水平距离，最大限度降低物料水平移动距离。改进后生产连续性获得大幅提升。

2.4.3.2 中转料仓布料均匀化

单侧布料溜槽设置造成中转料仓内物料偏析，靠近溜槽口一侧物料较细且密实，远离溜槽口一侧物料相对较粗且疏松，导致预压螺旋的压力传递不均匀，远离溜槽口一侧物料仅靠自重被压球对辊咬合，造成生球密实度参差不齐。开发了双侧布料溜槽，与对辊轴线垂直布置，减轻中转料仓内物料偏析，预压螺旋的压力得到更均匀的传递。

2.4.3.3 预压螺旋喂料机优化升级

采用双倾斜式螺旋喂料机，使仓内物料受压更趋均匀，保证生球质量均匀。并配备变频调速电机，依据主机电机电流实现速度调整，具备 PLC 系统自动调整和手动调整功能以实时改变进料量。易磨损位置全部堆焊高寿命耐磨合金层，全部为组合件，采用螺栓连接，易于更换。

2.4.3.4 球碗表面改良

针对压球完成后脱模率不高的问题，分析问题产生的原因。一方面，由于物料分布不均匀导致的

成型压力不够，球的强度就不够，压制完成后生球没有发生弹性形变，弹性恢复力作为主要脱模力就不够，再加之球强度低，多表现为半球粘结在球碗中不脱落；另一方面，由于球碗内表面经长期磨损后出现划痕、缺损等，导致生球和球碗间结合力增强，脱模膨胀阻力增大，从而不利于脱模。对此，将球碗内壁统一更换为光滑且高耐磨合金材料，生球脱模率接近 98%。

2.4.3.5 压球设备密闭性改造

采用全密封方式，增设过度设施与下游设备无缝连接，避免粉尘外溢。

2.4.3.6 辊皮耐磨化与装配式设计

辊皮采用 9Cr2Mo 合金锻造，经特殊热处理收硬度达到 280 度以上，热处理后的压辊需经过喷砂处理，提高球窝表面光洁度。辊皮采用组合装配，磨损后更换更加方便快捷。

3 除尘灰冷固球团技术实施效果

3.1 加快成渣

在转炉吹炼初期炉内温度较低时加入除尘灰球团，由于熔点较低的除尘灰球团富含 Fe_2O_3 ，增加了出渣中的 FeO 含量，加速 CaO 的溶解速度，显著降低炉渣黏度，有利于 FeO 向石灰晶格内迁移并生成低熔点物质，防止石灰表面 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的生成。同时前期较高的 FeO 能快速在钢渣界面形成乳化渣，加速脱磷反应。

3.2 冷却效果较好、改善渣料结构

冷却吸热包含物理冷却吸热和化学冷却吸热两方面。物理冷却吸热方面，除尘灰球团与铁矿石的组成相似（主要含 TFe），二者的物理吸热原理相同。化学冷却吸热方面，冷压球以分解还原反应吸热为主，发生的主要吸热反应为 Fe_2O_3 、 FeO 与 CO 间的吸热反应，但铁矿石中的 TFe 较除尘灰球团略高 3%–8%，所以铁矿石的化学冷却吸热好于除尘灰球团。在相近铁水成分、出钢温度范围内，针对除尘灰球团与铁矿石的冷却效果进行对比，验证除尘灰球团的冷却效果与铁矿石的冷却效果基本相近。由于渣中分批加入冷固球团，其溶解吸热可相应减少其它渣料的投入。冷固球团加入转炉后，石灰熔化率的提高加上冷固球团带入的一部分 CaO 可减少石灰的消耗。

3.3 简化炉前操作

因冷固球团良好的起渣、化渣效果，代替了矿石，大大简化了炉前操作。吹炼前期配加除尘灰球团能均衡冶炼前期升温速率，遏制吹炼前期因化学元素氧化期短而造成的前期渣还未化好已开始进入 C—O 反应期，进而避免了吹炼中期金属“返干”和脱磷率低的情况，同时降低了转炉钢铁料消耗。

3.4 降低转炉护炉成本

目前转炉护炉主要依靠吹炼过程增加炉渣碱度、MgO 含量来减少转炉吹炼过程对炉衬的侵蚀；使用补炉料对出钢面和出渣面进行适当的补炉。但加入冷固球团可使转炉炼钢初期炉渣的碱度提高，使 MgO 在渣中的溶解度降低，减少转炉冶炼前期炉衬的侵蚀，有利于延长转炉耐材的寿命，进而降低转炉的护炉成本。

3.5 提高金属收得率

冷固球团中 TFe 含量在 50%-55%，使转炉除尘灰中的金属得到有效回收。通过转炉使用冷固球团的大量数据对比分析得出，在其他冶炼条件相同时，使用冷固球团的钢铁料消耗比未使用降低 6.35kg/t，经济效益非常显著。

4 总体评价

除尘灰冷固球团项目实施后，通过设备、工艺、物料配比等一系列研究优化，为转炉冶炼创造了条件，实现了短流程废旧金属循环综合利用，既充分利用除尘灰中铁、钙等有价资源，降低冶炼的成本，还能一定程度解决废料产生的资源浪费和环境污染等现象，创造了显著的经济效益和社会效益，推进钢铁业的可持续发展。

钢渣辊压破碎余热有压热闷处理技术的实践

吴龙 郝以党

(中冶建筑研究总院有限公司 北京 100088; 中冶节能环保有限责任公司 北京 100088)

摘要:我国钢渣产生量大,环保要求日益严格,钢渣的洁净化处理及资源利用日益迫切。本文介绍了钢渣辊压破碎余热有压热闷技术的工艺路线和配套专用装备,并进行了有压热闷蒸汽余热发电中试试验,对钢渣余热利用进行了工艺探索,实现了钢渣余热回收的突破。钢渣辊压破碎余热有压热闷技术装备自动化水平高,钢渣处理效果好,是一种新型绿色环保的现代紧凑流程渣处理方式,具有清洁化、装备化、资源化、钢渣不落地、占地面积小等特点,将钢渣处理由工程机械作业方式提升为装备化、自动化作业,为钢渣的环保处理提供了条件,应大力推广应用。

关键词:钢渣;资源利用;热闷

1 前言

钢渣是伴生炼钢过程产生的固体废弃物,每冶炼一吨约产生12—15%的钢渣。2018年我国钢渣总产生量约1.2亿吨,钢渣产生量十分巨大。钢渣主要成分由硅酸钙类矿物、金属铁和铁氧化物等化学物质组成。硅酸钙类矿物及其他成分主要由硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、橄榄石($\text{CaO} \cdot \text{RO} \cdot \text{SiO}_2$)、蔷薇辉石($3\text{CaO} \cdot \text{RO} \cdot 2\text{SiO}_2$)以及R0相(MgO 、 MnO 、 FeO 的固溶体)等组成。

目前钢渣主要作为建筑材料和道路用料,但由于钢渣中含有一定的游离钙镁氧化物,钙镁氧化物遇水膨胀,带来了钢渣作为建筑等材料的安性性问题,致使大量的钢渣无法有效利用。2019年,我国钢渣实际利用率不到30%,钢渣资源浪费,占用大量土地,并可能污染环境,迫切需要合理的处理方式和消化途径。近年来我国环境排放标准日益提高,钢渣的资源化和环境排放要求的提高对钢渣处理利用技术也提出了更高的要求。本文对钢渣处理技术的发展进行了阐述,详细介绍了钢渣辊压破碎余热有压热闷工艺及开发历程,并针对钢渣辊压破碎余热有压热闷技术的应用实践进行了阐述。

2 钢渣热闷原理和技术发展

2.1 钢渣热闷原理

炼钢过程添加大量石灰,由于造渣时间较短,过量的 CaO 、 MgO 还未能完全熔化,以游离态在钢渣中包裹。钢渣热闷处理是在密闭容器内利用钢渣余热,对热态钢渣进行打水产生过饱和水蒸气,促进钢渣中 $f\text{-CaO}$ 和水蒸气快速反应消解。热闷过程中发生复杂的物理和化学作用,具体特点如下:

(1) 钢渣急冷破裂。高温钢渣遇到大量水产生急剧温降,熔渣快速冷却过程中各矿物发生剧烈

的相变，产生应力使钢渣破裂。

(2) 汽蒸作用。高温渣和热闷打水反应产生大量温度在 105℃ 以上、且具有一定压力的过饱和水蒸汽。这种环境促进了水蒸汽向破裂的钢渣缝隙内扩散、渗透，有利于 f-CaO 消解反应的进行。

(3) 硅酸二钙 (C₂S) 晶型转变。在钢渣从 750℃ 冷却到 650℃ 过程中，硅酸二钙 (C₂S) 由 β-C₂S 转变为 γ-C₂S，体积膨胀 10%，钢渣继续碎裂。

(4) 钢渣和过饱和水蒸气封闭条件下 f-CaO 与水反应生成 Ca(OH)₂，体积膨胀 98%，f-MgO 与水反应生成 Mg(OH)₂，体积膨胀 98%。

钢渣热闷即基于上述的物理化学作用破碎、粉化，消除了钢渣不稳定性，促进了渣铁分离。钢渣热闷过程发生的主要反应为游离氧化钙和游离氧化镁的反应。钢渣中 f-CaO 因过烧而结晶致密，活性差，常温下水化反应慢，自然条件下往往需要数年的时间才能全部消解。水蒸气浓度含量越大，压力越高越有利于 f-CaO 的消解反应，且在反应能够进行的条件下温度越高反应速率也较快。

2.2 钢渣热闷技术的发展

为解决钢渣快速破碎和安定性问题，中冶建筑研究总院与有关单位于 1992 年研究成功第一代钢渣热闷处理技术，是将钢渣热泼，落地冷却到 400℃ 左右再铲运倾倒在热闷装置内，盖上盖密封喷水产生蒸汽，和钢渣发生物理力学和化学反应而开裂粉化。但存在钢渣热泼落地环境污染、占地面积大、处理时间长等缺点。

2004 年成功开发第二代钢渣热闷处理技术。为了缩短钢渣处理周期，将液态钢渣热泼落地，冷却到 800℃ 时用铲车或抓斗机将钢渣运往热闷装置倾翻，然后盖上盖密封喷水热闷。第一代热闷装置内衬钢板在 800℃ 易变形，第二代工艺采用耐热铸铁板作内衬。存在的问题是没有彻底解决钢渣热泼落地环境污染、占地大的问题，并存在 800℃ 钢渣损坏抓运设备的问题。

2008 年成功第三代熔融钢渣热闷处理技术，是将 1650℃ 左右的钢渣直接倾翻在热闷装置内，喷水使其表面固化，然后盖上装置盖间断喷水，直到钢渣温度降到 65℃ 左右时热闷结束。该技术基本解决了以往的占地和环保排放问题，但仍存在装备自动化水平不够高、热闷周期仍较长的问题。

2012 年成功研发第四代钢渣热闷处理技术即熔融钢渣辊压破碎—余热有压热闷新技术。先后进行实验室模拟实验和中试试验后，并最终在河南省济源钢铁（集团）有限公司建设了示范生产线，实现了工业化生产，在热闷技术装备和自动化水平实现了巨大的进步。

3 钢渣辊压破碎—余热有压热闷新技术

围绕有压热闷工艺，中冶建筑研究总院研发了系统的工艺装备技术，其中核心装备主要有钢渣辊压破碎装置和有压热闷罐，具体如图 1 所示。（见下页图 1）

熔融钢渣高效罐式有压热闷处理技术大致可分为钢渣辊压破碎和余热有压热闷两个阶段。辊压破碎阶段主要是完成熔融钢渣的快速冷却、破碎，此阶段的处理时间约 30min，经过此阶段的处理，可

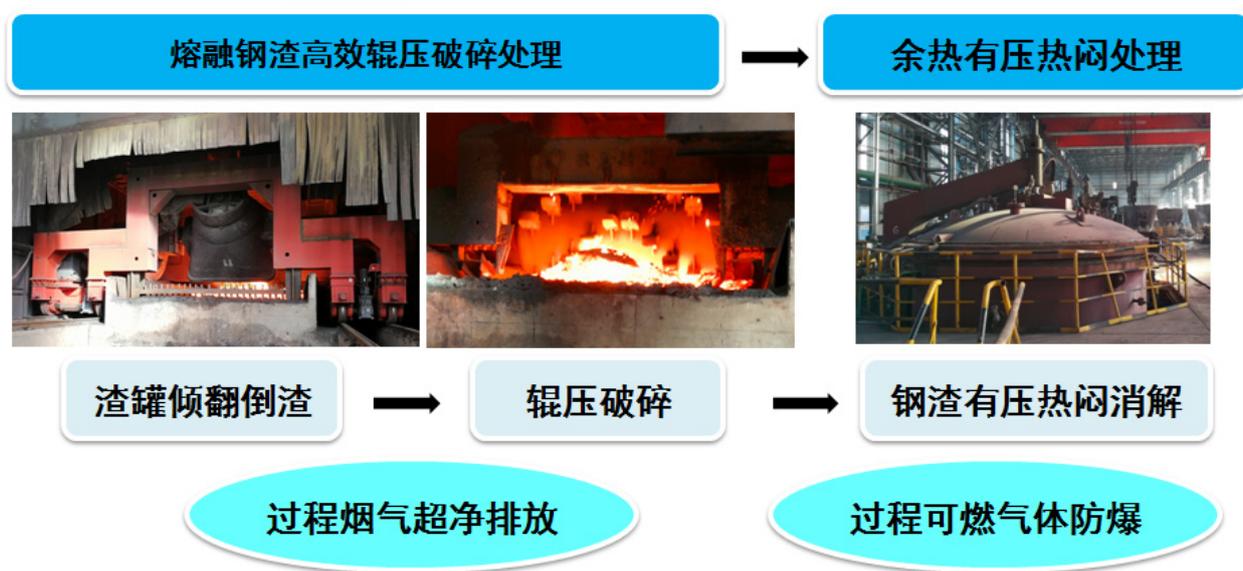


图 1 钢渣有压热闷主要装备

将熔融钢渣的温度由 1600℃ 左右冷却至 600℃ 左右，粒度破碎至 300mm 以下。余热有压热闷阶段主要是完成经辊压破碎后钢渣的稳定化处理，此阶段的处理时间 1.5-3h，处理后钢渣的稳定性良好，其游离氧化钙含量小于 2.5%，浸水膨胀率小于 1.5%。

钢渣余热有压热闷技术配套自主研发的关键工艺装备主要有：渣罐倾翻车、辊压破碎机、渣槽转运台车和钢渣有压热闷装置。此种钢渣处理新工艺与目前使用比较广泛的钢渣池式热闷工艺相比较，满足现代炼钢钢渣处理高效化、装备化、安全清洁化生产要求，使得钢渣处理过程更加清洁高效，改善了现有钢渣稳定化处理工艺操作环境差，工人劳动强度大和处理周期长等不足。

钢渣辊压破碎 - 余热有压热闷技术与现有常压池式热闷技术相比，具有以下几个独特优势：

- (1) 热闷周期短，约 2h，处理效率高，与普通现有常压池式热闷工艺相比缩短 7-10h；
- (2) 自动化水平高，工作定员人数少；
- (3) 处理过程洁净化程度高，作业环境好，环保水平高；
- (4) 热闷后的钢渣粉化率高，粒度小于 20mm 的钢渣含量大于 70%，浸水膨胀率小于 2%，稳定性好；
- (5) 钢渣处理生产过程烟气排放浓度 $< 10\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，满足超净排放要求。
- (6) 建设成本和运营成本低，运营成本可节约 40%。

有压热闷罐处理是全密闭体状态下进行的，相比以往钢渣处理技术洁净化程度更高，更加环保；此外，有压热闷罐处理过程在封闭罐体内产生大量蒸汽，可望进行整合发电，为钢渣显热的回收利用创造了条件。

4 有压热闷余热发电探索试验

在科技部环保院所技术开发研究专项经费的支持下，自 2012 年针对钢渣余热回收技术进行研究。有压热闷工艺为钢渣余热回收发电提供了连续、有压、可控的高温蒸汽，具备进行发电回收钢渣余

热的物质条件基础。

2015年起，项目研发团队在沧州中铁进行有压热闷发电中试试验的准备工作，于2016年初完成中试试验线建设。本发电热源来源于沧州中铁钢铁公司钢渣处理车间热闷反应罐产生的有压蒸汽，蒸汽管道共接自两个热闷罐，经由蒸汽主管道送至汽水热交换器进行换热。

钢渣余热有压热闷蒸汽温度 120°C ，压力 $0.2\text{--}0.4\text{MPa}$ ，采用有压热闷蒸汽经换热器加热其中的密闭循环水，加热后的循环水进而加热发电工质，最终通过工质驱动发电机发电。图2为有压热闷余热发电中试试验现场。



图2 钢渣有压热闷余热发电中试现场

2016年钢渣有压热闷余热发电中试试验结果表明，该试验线运行稳定，可靠，通过整合有压热闷蒸汽可进行发电；通过该方式进行钢渣余热发电可望实现吨钢渣发电量 $3\text{--}5\text{kWh}$ ，未来可进行更大规模的发电工业试验，实现钢渣余热的回收利用。

5 工业生产推广应用

钢渣辊压破碎余热有压热闷处理工艺技术在经过一系列系统化研究和工业优化设计后，已成功应用于国内首钢京唐钢铁有限公司、宝钢湛江钢铁、宝钢武汉钢铁、河北乐亭钢铁、沙钢、建龙集团等53家钢铁企业，并出口至“一带一路”沿线马来西亚联合钢铁集团，完成及在建钢渣处理生产线100余套，涉及钢渣处理量超过3800万吨，对应钢铁产能超过3亿吨。

2012年10月，河南济源钢厂完成了首套产业化示范推广应用工程。现已投产运行超过8年，生产经验表明，采用该技术钢渣处理效果良好，实现处理后的钢渣中 -20mm 粒级超过75%，游离氧化钙含量小于2.5%，浸水膨胀率小于1.5%，尾渣中金属铁小于1.5%。（见下页图3）

2017年由中冶节能环保有限责任公司EPC总承包的江苏鑫鑫钢铁集团70万吨/年钢渣有压热闷处理及加工提纯生产线工程一次带料成功，顺利投产，该项目首次采用钢渣立式有压热闷技术。钢渣立式有压热闷技术是中冶节能环保有限责任公司在卧式有压热闷技术的基础上，对工艺流程重新进行优化，取消装渣车运转与轨道对接等工序，大多缩短了原有工艺流程。该技术在未经任何工



图3 河南济源钢铁 60 万吨 / 年钢渣处理生产线现场

业试验的基础上直接在实际过程中应用，运行效果取得了业主的认可与好评。

2019 年 5 月，首钢京唐钢铁有限公司设计能力 60 万吨 / 年钢渣处理生产线正式投产。系统装备运行稳定可靠，钢渣处理效果良好。项目针对钢渣生产过程烟气治理实施湿式电除尘器湿法除尘技术，实现了钢渣处理过程烟气排放浓度稳定达到 $<10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的超低排放效果。项目是本技术及装备成功首次应用于国内一流钢铁企业，有力的推动国内钢渣处理利用项目开拓。

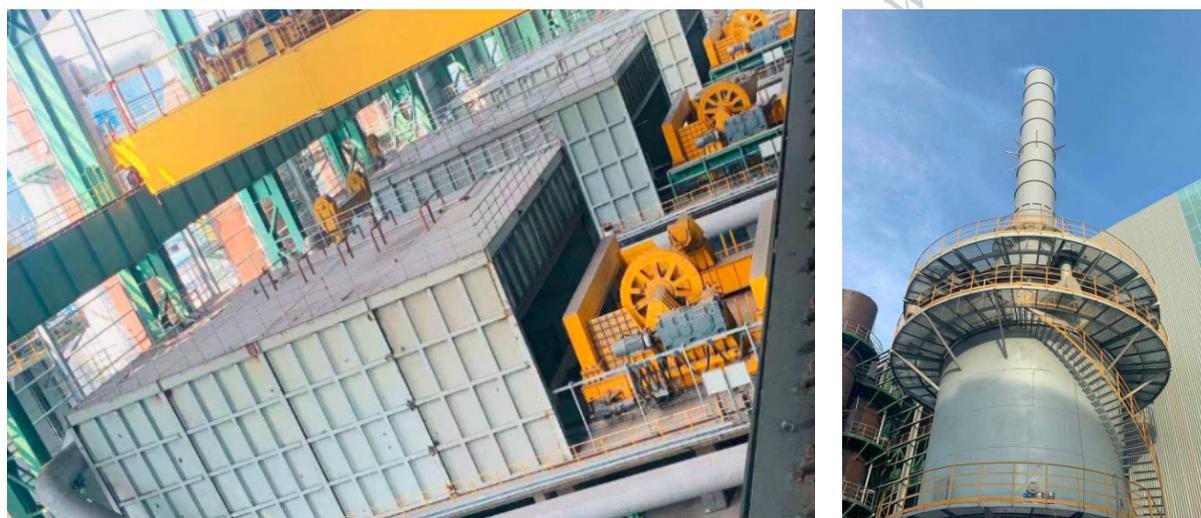


图4 首钢京唐 60 万吨 / 年钢渣处理生产线现场

联合钢铁（大马）集团钢渣处理生产线设计能力 50 万吨 / 年，该生产线于 2018 年 6 月正式投产，现已投产运行 2 年多。系统装备运行稳定可靠，钢渣处理效果良好。项目针对钢渣生产过程烟气治理实施湿式电除尘器湿法除尘技术，实现了钢渣处理过程烟气排放浓度稳定达到 $<10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的超低排放效果。项目是本技术及装备成功出口至“一带一路”沿线马来西亚，为钢渣处理技术的国际市场应用建立了典型示范。（见下页图 5）

6 结语

近年来，我国工业发展迅速，环境问题也日益严重，钢渣的资源化利用也日益紧迫。以钢渣辊压



图 5 联合钢铁（大马）集团 60 万吨 / 年钢渣处理生产线现场

破碎 - 余热有压热闷技术为代表的钢渣预处理技术具备更高的装备化、自动化水平，可实现钢渣处理的高效化、连续化生产，钢渣处理效果好，系统装备占地少，配套土建、公辅投资低。新技术在钢渣处理具有更为显著的技术优势以及极具竞争力的价格优势。此外，本技术应用过程更加环保等优点，能够满足我国日益提高的环境排放标准，符合装备化自动化提升需求，是未来钢渣处理技术应用的可靠选择。目前国内 50% 以上的钢渣处理仍采用落后的热泼生产工艺，当前形势下钢铁企业应提高钢渣处理的技术水平和装备水平，以满足日益严格的环保要求。加快淘汰钢渣热泼等落后的处理方式，大力推广钢渣辊压破碎余热有压热闷技术，早日实现钢渣的清洁化、高效化、装备化处理。



钢渣脱硫剂用于湿法石灰石—石膏法脱硫工艺的试验研究

张国成^{1,2} 白晓光² 邬虎林² 罗果萍¹ 李玉柱¹

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心 内蒙古 包头 014010)

摘要: 针对钢渣脱硫剂的脱硫性能, 在球团工序湿法石灰石—石膏法脱硫系统开展了钢渣脱硫剂全部替代石灰石的大型工业试验研究。研究表明: 从脱硫效果的角度分析, 在烟气流量约 $34 \text{万 m}^3 / \text{h}$, 入口二氧化硫质量浓度约 $7000 \text{mg} / \text{m}^3$ 的超高硫负荷条件下, 钢渣脱硫剂的脱硫效果良好, 脱硫效率大于 97%, 脱硫率和石灰石接近; 从脱硫系统的稳定性角度分析, 采用钢渣脱硫剂, 脱硫废水表现出不同的性质特征, 主要体现在 pH 值降低至 4.0, Mg^{2+} 质量浓度循环富集至 $4536 \text{mg} / \text{L}$, 不符合脱硫系统防腐蚀要求, 通过采取在脱硫废水中配加固液比为 $37.5 \text{kg} / \text{m}^3$ 的添加剂的技术措施, 可提高脱硫废水 pH 值至 8.33, Mg^{2+} 质量浓度降低至 $880 \text{mg} / \text{L}$, 有利于实现脱硫废水的循环利用。因此, 采用钢渣脱硫剂替代石灰石应用于湿法石灰石—石膏法脱硫系统是可行的, 可以实现脱硫系统长期、稳定运行的目标。

关键词: 钢渣脱硫剂; 脱硫效率; pH 值; 废水利用

钢渣是炼钢过程产生的废渣, 中国的钢铁工业 每年产生大量钢渣^[1]。目前, 钢渣的综合利用途径较少, 利用率不到 30%, 大部分仍处于简单堆存状态^[2-3]。钢渣因含有 CaO 、 MgO 等碱性物质而具有一定的脱硫功能^[4-6], 国内已有不少单位进行过钢渣脱硫方面的相关研究, 但大部分都停留在实验室研究阶段, 研究所涉及的烟气流量、入口二氧化硫浓度、入口硫负荷水平以及试验的控制条件、状态等和生产实践相比差距甚远。付翠彦等采用钢渣、粉煤灰等混合制备脱硫剂, 通过实验室研究发现脱硫剂性能随钢渣配加比例增加而升高^[7]; 丁希楼等通过对脱硫工艺参数的调整控制, 发现钢渣湿法烟气脱硫效率可达 80% 以上^[8]; 史汉祥等采用 DS—多相反应器的专用脱硫设备, 将钢渣脱硫剂应用于烧结脱硫系统, 脱硫率为 96%^[9]。目前, 国内外将钢渣脱硫剂替代石灰石直接应用于高 烟气流量、超高硫负荷条件下的球 团工序湿法石灰石—石膏法脱硫系统的探索性工业试验研究 还未有过, 本文基于包钢球团工序超高 硫负荷的条件和石灰石—石膏法脱硫系统, 开展钢渣脱硫剂替代石灰石的脱硫试验研究, 探索钢渣脱硫剂的脱硫性能及稳定性。

1 钢渣脱硫剂理化性能

钢渣主要由金属和非金属氧化物 (CaO 、 FeO 、 SiO_2 、 MgO) 等构成, 主要的矿物相为硅酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、硅酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、钙镁橄榄石 ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$)、镁蔷薇辉石 ($3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$)、铁酸钙 ($\text{CaO} \cdot \text{FeO}$)、铁铝酸钙 ($2\text{CaO} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (1-x)\text{Fe}_2\text{O}_3$) 以及 Si、Mg、Fe、Mn、P 的氧化物形成的固溶体, 还含有少量的游离氧化钙以及金属铁、氟

磷灰石等^[9]。钢渣脱硫剂是将钢渣经过破碎、磁选、筛分并粉磨到一定细度的产品，主要化学成分见表1。钢渣脱硫剂脱硫就是将钢渣脱硫剂和水调制成一定浓度的浆液在吸收设备中与烟气中的二氧化硫反应生成稳定的化合物，从而使二氧化硫从烟气中分离出来，达到烟气脱硫的目的。

表1 钢渣脱硫剂化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of steel slag desulfurizer

| | | | | | | % |
|-------|------|-----|------------------|-------|------|--------------------------------|
| CaO | MgO | FeO | SiO ₂ | Fe | MnO | Al ₂ O ₃ |
| 38.02 | 7.62 | 9.3 | 12.47 | 15.92 | 2.63 | 6.99 |

由表2分析可知，和石灰石相比，钢渣脱硫剂主要特点为：矿物组成复杂，粒度细，脱硫剂有效成分（质量分数）为38%的CaO和7.62%的MgO，含有的铁氧化物对脱硫反应有促进、催化氧化的作用^[9]。原浆浆液pH值呈强碱性，脱硫后浆液pH值降低至4.0左右。

表2 石灰石和钢渣脱硫剂脱硫性质比较

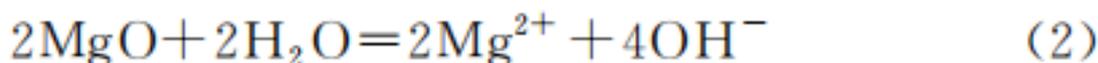
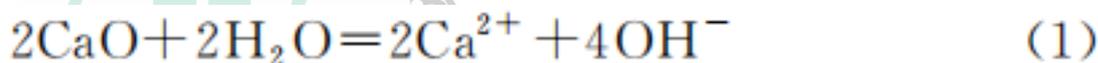
Table 2 Comparison of properties of desulfurizer between limestone and steel slag

| 项目 | 石灰石 | 钢渣脱硫剂 |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 原料主要成分 | CaCO ₃ , 纯度90% | CaO、MgO、SiO ₂ 、Fe等 |
| w(CaO)/% | 50 | 38.02 |
| w(MgO)/% | <2 | 7.62 |
| 粒度/mm | <0.074 | <0.045 |
| 溶解性 | 不溶于水 | 不溶于水 |
| 密度/(g·cm ⁻³) | 2.7~2.95 | 2.9 |
| 原浆浆液pH值 | 9.0 | 12.0~13.0 |
| 脱硫后浆液pH值 | 5.0~6.0 | 4.0 |

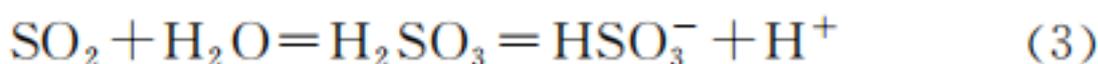
2 钢渣脱硫剂脱硫机制

钢渣脱硫剂矿物组成复杂，一般认为，其矿物组成主要由金属和非金属氧化物（CaO、FeO、SiO₂、MgO）等构成，脱硫有效成分主要是矿物中所含的CaO和MgO等碱性金属氧化物。其脱硫反应主要包括以下几步^[9]。

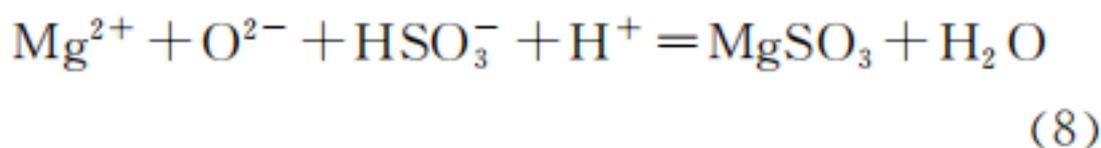
第1步：含 CaO、MgO 等金属氧化物的水解反应。该步反应主要发生在浆液制备和消化阶段，与 SiO₂ 接触反应之前，含 CaO、MgO 的碱性氧化物含量少，具有反应速度快、反应进程短的特点。发生的主要反应为



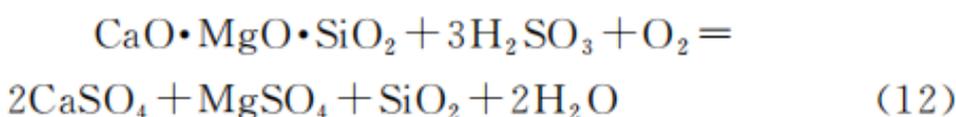
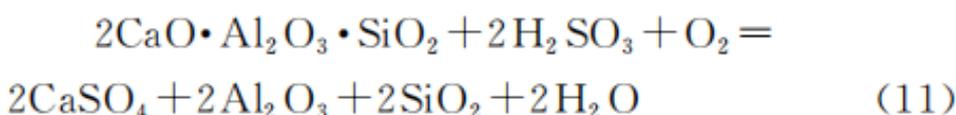
第2步：SiO₂ 在水中的溶解、氧化反应。该反应主要是 SiO₂ 溶解于水中解离成 SiO₂⁻³ 和 SiO₂⁻⁴ 的过程，同时解离出 H⁺，使溶液呈现酸性。



第3步：脱硫反应。该步反应主要是有效脱硫离子 Ca²⁺、Mg²⁺ 与 SO₃²⁻、SO₄²⁻ 的结晶反应，形成脱硫石膏。同时，发生 H⁺ 和 OH⁻ 的中和反应，形成 H₂O，从而降低溶液中的 H⁺ 含量，使溶液由酸性中和为碱性^[10]。



第4步：含 CaO、MgO 等硅铝酸盐矿物的水解脱硫反应。该步反应在碱性氧化物水解完成后进行，由于硅铝酸盐矿物反应活性低，发生水解反应速度慢，且受反应动力学条件限制，故该反应具有反应速度慢，反应进程时间长特点^[11-12]。



3 钢渣脱硫剂用于湿法石灰石-石膏法脱硫试验研究

为了探究钢渣脱硫剂应用于湿法石灰石-石膏法脱硫系统的脱硫效果和稳定性,开展钢渣脱硫剂替代石灰石的脱硫试验研究^[13-14]。

3.1 试验方案及过程

包钢球团工序为年产 120 万 t 链篦机-回转窑氧化球团项目,脱硫系统采用湿法石灰石-石膏法脱硫工艺,脱硫系统主要由石灰石浆液制备及输送系统、烟气系统、二氧化硫吸收系统、工艺水系统、脱硫副产品处理系统、压缩空气系统等组成。脱硫工艺以石灰石作为脱硫吸收剂,与水混合形成浆液,并作为碱性吸收浆液不断补充到吸收塔中,在吸收塔内,补充吸收浆液后的循环浆液与经气-气换热器 (GGH) 降温后的酸性烟气混合接触,烟气中的二氧化硫与浆液中的碳酸钙 (CaCO_3) 以及鼓入的空气进行吸收、氧化等物理化学反应,最终形成反应产物石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)^[15-17]。

试验采取钢渣脱硫剂按照 1 : 1 全部替代石灰石的研究方案,单独考察分析钢渣脱硫剂的脱硫效果和与脱硫系统的匹配程度,在球团工序脱硫系统开展脱硫试验研究,试验累计共开展 4 个月有余,取得了预期效果。

3.2 脱硫效果评价

将钢渣脱硫剂全部替代石灰石用于球团工序湿法脱硫系统,脱硫效率见表 3。

表 3 石灰石与钢渣脱硫剂用于湿法石灰石-石膏法脱硫工艺的脱硫效果对比

Table 3 Comparison of desulfurization effect of limestone and steel slag desulfurizer in wet limestone-gypsum desulfurization process

| 项目 | 脱硫剂 | 烟气流量/(万 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 入口二氧化硫质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 出口二氧化硫质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 脱硫效率/% |
|-------|-------|--|--|--|--------|
| 基准期 | 石灰石 | 30.4482 | 5849.65 | 143.06 | 97.53 |
| 试验期 1 | 钢渣脱硫剂 | 32.3093 | 6616.80 | 144.07 | 97.83 |
| 试验期 2 | 钢渣脱硫剂 | 34.8509 | 7531.45 | 139.55 | 98.14 |
| 试验期 3 | 钢渣脱硫剂 | 34.4293 | 6178.00 | 125.71 | 97.77 |
| 试验期 4 | 钢渣脱硫剂 | 35.0662 | 7577.38 | 129.89 | 98.26 |
| 平均值 | 钢渣脱硫剂 | 34.8437 | 7089.85 | 125.73 | 98.16 |

注:表中的基准期和试验期 1~4 的数据均为月均值。

由表 3 可知,从脱硫效果角度分析,在当前超高硫负荷(入口二氧化硫质量浓度为 $7000 \text{mg} / \text{m}^3$ 左右)条件下,钢渣脱硫剂的脱硫效率均大于 97%,平均为 98.16%,其脱硫效率和石灰石接近,脱硫率稳定性佳,试验期间未出现出口二氧化硫浓度超标和脱硫效率降低的情况,表明钢渣脱硫剂替代石灰石用于湿法石灰石-石膏法脱硫系统的可替代性强,脱硫效率高,效果良好。从脱硫剂消耗角度分析,根据实际使用情况测算,使用石灰石脱硫,平均脱除 1t 二氧化硫消耗石灰石约 1.75t;而试验期间,平均脱除 1t 二氧化硫消耗钢渣脱硫剂约 1.68t,由此可见,脱除同样含量的二氧化硫,钢渣脱硫剂的消耗量基本接近甚至略低于石灰石,因此,钢渣脱硫剂具有良好的脱硫使用价值和经济

效益,更为重要的是,实现了含铁固废钢渣的再利用,环境综合价值高。

3.3 脱硫系统稳定性评价

钢渣脱硫剂脱硫效果良好,单从脱硫效果角度分析,钢渣脱硫剂完全可用于湿法石灰石-石膏法脱硫系统。脱硫系统的稳定性需要通过脱硫废水的回收利用情况及对系统的腐蚀性影响来综合评价。

3.3.1 脱硫废水水质分析

采用石灰石和钢渣脱硫剂的脱硫废水水质见表 4。

表 4 石灰石和钢渣脱硫剂脱硫废水水质比较

Table 4 Comparison of properties of limestone and steel slag desulfurization wastewater

| 项目 | pH 值 | 化学成分(质量浓度)/(mg·L ⁻¹) | | | | |
|---------|------|----------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | | F ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ |
| 石灰石脱硫废水 | 6.70 | 10.50 | 3199 | 900 | 1380 | 3199 |
| 钢渣脱硫废水 | 4.08 | 124.61 | 9882 | 520 | 4536 | 8097 |

由表 4 可知:(1)采用钢渣脱硫剂,脱硫废水 pH 值降低至 4.08,而采用石灰石脱硫时,脱硫废水 pH 值为 6.70,这主要是由于石灰石和钢渣脱硫剂的反应活性及脱硫机制不同所导致^[18-20]。采用石灰石脱硫剂, CaCO₃ 水解反应快,杂质少, Ca²⁺ 与 SO₃²⁻ / SO₄²⁻ 反应会消耗大部分 SO₃²⁻ / SO₄²⁻, 同时发生 CO₃²⁻ + 2H⁺ → CO₂ + H₂O 反应,消耗掉大部分 H⁺, 所以脱硫废水 pH 值可维持到 6.70。而采用钢渣脱硫剂,由于有效脱硫物质为 38% (质量分数)的 CaO 和 7.62% (质量分数)的 MgO,且主要以硅酸盐的形式赋存,反应活性弱,水解反应慢^[21-22],在一定时间条件下,并不能完全水解消化,随着脱硫反应的不断进行,SO₂ 继续溶入浆液,而钢渣脱硫剂所含部分游离氧化钙和少量复合硅酸盐电离出的 OH⁻ 离子并不能完全中和溶液中产生的 H⁺, 导致留存于脱硫废水中的 SO₃²⁻ 和 H⁺ 含量持续增加,使得脱硫废水 pH 值降低。(2)采用钢渣脱硫剂, Mg²⁺ 质量浓度循环富集至 4536mg / L。由于钢渣脱硫剂中含有质量分数约 7.62% 的 MgO,在脱硫过程中, Mg²⁺ 发生水化反应溶解于水中,和 SO₃²⁻ / SO₄²⁻ 反应形成 MgSO₃ / MgSO₄, 该物质呈微溶状态,一般不能形成结晶类沉淀物被脱除,而是在脱硫废水中循环富集,不符合脱硫废水回收利用要求。

由以上分析可知,采用钢渣脱硫剂,脱硫废水 pH 值降低至 4.08, pH 呈酸性会对脱硫系统造成严重腐蚀,设备更换维修频次增加,使用寿命降低; SO₄²⁻ 和 Mg²⁺ 循环富集可导致管道结垢,不仅会对脱硫效率造成影响,而且脱硫废水不符合回收利用要求,增加环保负担。由此可知,从脱硫废水对系统的影响角度分析,钢渣脱硫剂与脱硫系统的匹配程度差,需要同时采取相应的技术措施来实现对脱硫废水的处理,从而使得脱硫系统稳定性提高。

3.3.2 改善脱硫废水水质试验

(1) 试验过程: 为了提高脱硫废水 pH 值, 提升脱硫废水回收利用率, 开展在脱硫废水中加不同质量的添加剂来提高脱硫废水 pH 值的试验研究。取 2000mL 钢渣脱硫废水作为基础水样, 检测其成分, 模拟现场脱硫工艺控制条件, 采用水浴加热的方式控制脱硫废水温度为 40℃ 左右, 逐渐加入不同质量的添加剂, 并采用玻璃棒不断搅拌溶液, 搅拌时间为 30min, 同时不间断测试溶液 pH 值变化。待反应完成即溶液 pH 值无变化时, 采用真空抽滤的方式, 将脱硫废水溶液过滤, 上清液为滤液, 过滤物为滤渣, 分别检测滤液和滤渣的化学成分和性质, 同时对 Mg^{2+} 的来源和去向进行平衡分析计算。

(2) 结果分析: 采用在脱硫废水中配加添加剂的方法来实现废水水质的改善, 分析废水溶液中滤液和滤渣的成分变化。试验研究方案见表 5, 添加剂的化学成分见表 6。

表 5 脱硫废水配加不同含量添加剂试验研究方案

Table 5 Experimental research scheme of adding different content additives to desulfurization wastewater

| 试验方案 | 添加量/g | 固液比/($kg \cdot m^{-3}$) |
|-------|-------|---------------------------|
| FS-0 | 0 | 0 |
| FS-25 | 25 | 12.5 |
| FS-50 | 50 | 25.0 |
| FS-75 | 75 | 37.5 |

注: 表中固液比表示单位立方米脱硫废水中配加的添加剂质量, 即添加剂添加量(kg)与脱硫废水体积(m^3)的比值。

表 6 添加剂理化性质

Table 6 Physical and chemical properties of additives %

| $w(Ca(OH)_2)$ | $w(SiO_2)$ | $w(MgO)$ | $<0.074 mm$ |
|---------------|------------|----------|-------------|
| 89.52 | 4.38 | 0.50 | 90.96 |

添加剂的主要成分为 $Ca(OH)_2$, 其质量分数为 89.52%, MgO 的质量分数为 0.50%, 粒度较细。

由表 7 可知, 配加一定含量的添加剂可以有效提高脱硫废水 pH 值, 同时降低脱硫废水(滤液)中 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量。由图 1 分析可知: 随着添加剂配加量的增加, 废水溶液溶质质量分数和 pH 值均表现出增加的趋势, SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量降低, 废水水质改善效果因添加剂配加量的不同而有所差异。从添加剂对废水 pH 值和 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 的处理效果方面分析, 当固液比为 $37.5 kg / m^3$ 时,

废水的成分最适宜回收利用，此时 pH 值提高至 8.33， Mg^{2+} 质量浓度降低至 880mg / L，同时，废水溶液溶质质量分数由 FS-0 的 1.84% 增加到 FSD-75 的 9.87%，增幅 8.03%，经过添加剂处理的废水（滤液）水质符合回收利用及环保要求。

表 7 配加不同含量添加剂的脱硫废水溶液理化性质

Table 7 Physical and chemical properties of desulfurization wastewater solution with different contents of additive

| 试验方案 | 废水溶液物理性质 | | 废水溶液(滤液)化学成分(质量浓度)/(mg·L ⁻¹) | | | | |
|-------|----------|------|--|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | 溶质质量分数/% | pH 值 | F ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ |
| FS-0 | 1.84 | 4.08 | 124.61 | 9882 | 520 | 4536 | 8097 |
| FS-25 | 4.13 | 5.35 | 380.80 | 7425 | 1600 | 4080 | 9397 |
| FS-50 | 6.62 | 7.95 | 49.78 | 2099 | 2133 | 3867 | 7997 |
| FS-75 | 9.87 | 8.33 | 28.48 | 1020 | 4000 | 880 | 8597 |

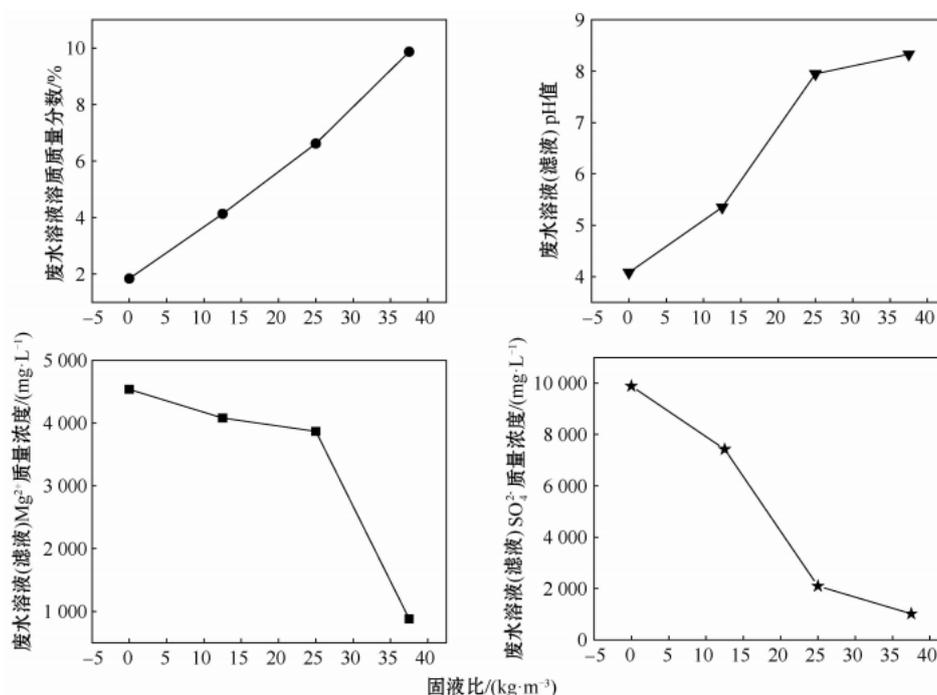


图 1 配加不同含量添加剂的脱硫废水理化性质变化趋势

Fig. 1 Change trend of physical and chemical properties of desulfurization wastewater with different contents of additive

为了查明废水溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的去向，同时对经过添加剂处理的废水（滤渣）进行检测，结果见表 8。

表 8 配加不同含量添加剂的废水溶液
(滤渣)化学成分(质量分数)

Table 8 Chemical composition of desulfurization wastewater solution (filter residue) with different contents of additive

| 试验方案 | CaO | MgO |
|-------|-------|------|
| FS-0 | 23.39 | 1.85 |
| FS-25 | 23.75 | 2.73 |
| FS-50 | 26.64 | 4.43 |
| FS-75 | 27.92 | 6.43 |

从表 9 可以看出：在 2000mL 脱硫废水中配加 75g 添加剂，即固液比为 $37.5\text{kg} / \text{m}^3$ 时，通过计算反应前 FS-0（滤液）和 FS-0（滤渣）以及添加剂带入的 Mg^{2+} 质量，得出反应前 Mg^{2+} 质量总计为 9.50g；计算反应后 FS-75（滤液）和 FS-75（滤渣）中 Mg^{2+} 质量，得出反应后 Mg^{2+} 质量总计为 9.11g，差值 0.39g，反应过程中， Mg^{2+} 质量偏差损失率为 4%，可以得出 Mg^{2+} 来源和去向基本平衡。未配加添加剂前，FS-0（滤液）中 Mg^{2+} 质量为 9.07g，配入 75g 添加剂，FS-75（滤液）中 Mg^{2+} 质量降低至 1.63g，降低了 7.44g，降低幅度为 82.02%，同时 FS-75（滤渣）中 Mg^{2+} 质量由 FS-0（滤渣）的 0.21g 增加至 7.48g，增加了 7.27g，增加了 34.5 倍，可知从 FS-0（滤液）中结晶析出 Mg^{2+} 质量为 7.44g，表明添加剂的配加，对于降低废水中 Mg^{2+} 含量有显著效果。

表 9 FS-75 Mg^{2+} 含量平衡计算
Table 9 FS-75 Mg^{2+} content balance calculation

| 项目 | Mg^{2+} 来源和去向 | 体积或质量 | 成分(质量浓度或质量分数) | 带入量/g |
|-----|-------------------------------|----------|---------------|-------|
| 反应前 | FS-0(滤液) | 2 000 mL | 4 536 mg/L | 9.07 |
| | FS-0(滤渣) | 18.73 g | 1.85% | 0.21 |
| | 添加剂 | 75 g | 0.50% | 0.23 |
| | FS-75 Mg^{2+} 含量总计/g | | | 9.50 |
| 反应后 | FS-75(滤液) | 1 850 mL | 880 mg/L | 1.63 |
| | FS-75(滤渣) | 193.87 g | 6.43% | 7.48 |
| | FS-75 Mg^{2+} 含量总计/g | | | 9.11 |

水质得到改善，废水回收利用率提高，设备抗腐蚀性增强，脱硫系统运行的稳定性能改观，可实现长期、稳定运行的目标。

4 结论

(1) 钢渣脱硫剂矿物组成复杂，含有杂质多，有效脱硫成分为 38% 的 CaO 和 7.62% 的 MgO 以及含有 CaO 和 MgO 的硅铝酸盐矿物，和石灰石相比，钢渣脱硫反应机制复杂，水解反应活性弱，反应进程要求时间长，具有原浆浆液 pH 值高 (12)，脱硫后废水 pH 值迅速降低的特点 (4.08)。

(2) 钢渣脱硫剂全部替代石灰石应用于球团工序湿法石灰石—石膏法脱硫系统，在超高硫负荷（入口二氧化硫质量浓度 $7000\text{mg} / \text{m}^3$ 左右）的条件下，脱硫效果良好，脱硫率大于 97%，充分表明钢渣脱硫剂具有良好的脱硫性能，单从脱硫效率角度分析，钢渣脱硫剂完全可用于湿法石灰石—石膏法脱硫系统。

(3) 采用钢渣脱硫剂，脱硫废水 pH 值降低至 4.08， Mg^{2+} 质量浓度循环富集至 $4536\text{mg} / \text{L}$ ，脱硫系统受腐蚀风险加大，废水水质降低，不符合环保要求及回收利用标准，脱硫系统稳定性变差，通过采取在废水中配加固液比为 $37.5\text{kg} / \text{m}^3$ 添加剂的措施可以有效提高废水 pH 值至 8.33，同时 SO_4^{2-} 质量浓度降低至 $1020\text{mg} / \text{L}$ ， Mg^{2+} 质量浓度降低至 $880\text{mg} / \text{L}$ ，废水溶液溶质质量分数增加至 9.87%，经过处理的废水水质明显改善，符合脱硫系统回收利用要求，脱硫系统稳定性提高，可实现长期、稳定运行的目标。

参考文献

- [1] 黄毅, 徐国平, 程慧高, 等. 典型钢渣的化学成分、显微形貌及物相分析 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (8): 1902.
- [2] 朱桂林, 张淑琴, 孙树彬, 等. 钢铁渣零排放与节能减排 [J]. 中国钢铁工业, 2009 (4): 11.
- [3] 苏世怀, 李辽沙, 陈广言, 等. 冶金固体废弃物资源综合利用的技术开发研究 [C] // 2005 年中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [4] 赵俊学, 李小明, 唐雯聃, 等. 钢渣综合利用技术即进展分析 [J]. 鞍钢技术, 2013 (3): 1.
- [5] YiH XuG, chenf H, et al. An overview of utilization of steel slag [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16 (5): 797.
- [6] 于同川, 于才渊, 胡冠男. 基于湿法脱硫技术的钢渣脱硫性能研究 [J]. 化学工程, 2009, 37 (8): 55.
- [7] 付翠彦, 郑轶荣, 刘建秋. 对不同配比钢渣脱硫剂脱硫性能的实验研究 [J]. 洁净煤技术, 2008, 14 (1): 61.
- [8] 丁希楼, 郭应春, 唐胜卫, 等. 废钢渣粉渣湿法脱硫工艺实验研究 [J]. 环境工程, 2009, 27 (3): 100.
- [9] 史汉祥, 刘常胜, 史跃展, 等. 钢渣、高炉渣用于烟气脱硫 [C] // 2010 年全国炼铁生产学术会议暨炼铁学术年会论文集 (下). 北京: 中国金属学会生产技术与期刊部, 2010: 1134.
- [10] 吴忠标, 潘学良, 钟丽, 等. 钢渣湿法脱硫实验研究 [J]. 环境工程, 1996, 12 (6): 17.
- [11] 谢赛, 贵永亮, 胡宾生. 钢渣用于烧结烟气脱硫的现状和展望 [J]. 环境工程, 2014, 32: 523.
- [12] 于同川. 基于湿法脱硫技术的钢渣脱硫剂性能研究 [D] // 大连: 大连理工大学, 2009.
- [13] 张顺雨, 贵永亮, 宋春燕, 等. 钢渣烧结烟气脱硫现状 [J]. 矿产综合利用, 2018 (1): 2.
- [14] 马涛, 杨桂宇, 邓美乐, 等. 钢渣对烧结烟气脱硫的动力学影响分析 [J]. 矿产综合利用, 2018 (2): 143.
- [15] 史跃展, 刘玉荣, 饶文军. 钢铁冶金渣用于烧结机烟气脱硫述评 [J]. 冶金设备, 2018 (4): 54.
- [16] 李海英, 郑雅欣, 王锦. 不同烧结烟气脱硫工艺应用比较与分析 [J]. 环境工程, 2018, 36 (3): 103.
- [17] 张顺雨, 贵永亮, 袁宏涛, 等. 钢渣湿法脱硫工艺试验研究 [J]. 产综合利用, 2017 (6): 109.

- [18] 李玉然, 闫晓森, 叶 锰, 等. 钢铁烧结烟气脱硫工艺运行现状概述及评价 [J]. 环境工程, 2014, 32 (11) : 82.
- [19] 何环宇, 倪红卫, 刘 吉 钢, 等. 亚临界水对钢渣再生脱硫的作用 [J]. 过程工程学报, 2009, 9 (s1) : 230.
- [20] 张朝晖, 廖杰龙, 巨 建 涛, 等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术 [J]. 钢铁研究学报, 2013, 25 (7) : 1.
- [21] 姚星亮, 廖洪强, 宋慧平, 等. 钢渣超微粉理化特性 [J]. 钢铁研究学报, 2017, 29 (3) : 196.
- [22] 赵福才, 巨建涛, 廖 杰 龙, 等. 转炉钢渣基础性能及综合利用分析 [J]. 钢铁研究学报, 2013, 25 (11) : 24.



高炉瓦斯灰火法富集回收锌处理工艺

徐华军

(中国恩菲工程技术有限公司 北京 100038)

摘要: 针对目前工业广泛应用的回收处理高炉瓦斯灰的火法富集工艺, 本文主要介绍了转底炉法和回转窑法的工艺流程, 并分析了两个工艺的优缺点。

关键词: 高炉瓦斯灰; 火法富集; 转底炉; 回转窑

0 前言

高炉瓦斯灰是高炉炼铁过程中产生的固体废弃物。在高温下铁矿石中的杂质铅、锌等被还原成蒸汽, 与矿石、焦炭和熔剂等粉尘一起随着高炉煤气携带出炉外, 由煤气除尘净化装置捕集, 第一级除尘器捕集下来的干式粗粒粉尘称为重力灰, 可返回配料; 而第二级布袋除尘器捕集的干式细粒尘称为高炉瓦斯灰(简称瓦斯灰)。生产 1t 铁大约产生 15—25 kg 高炉烟尘, 按我国高炉产铁 10 亿 t/a 计算, 高炉烟尘高达 2000 万 t/a, 其中 60%—70% 为重力尘, 30%—40% 为瓦斯灰^[1]。高炉瓦斯灰中的主要成分见表 1。

表 1 高炉瓦斯灰的主要成分

| 成分 | Zn | Pb | Fe | C | Cl | F | Cd |
|------|-----------|---------|-----------|------|---------|---------|---------|
| 含量/% | 15.0~25.0 | 2.0~5.0 | 30.0~40.0 | ≤4.0 | 1.0~5.0 | 0.2~4.0 | 0.1~0.2 |

我国目前虽未将瓦斯灰列为危废, 但若其得不到妥善处置, 将占用大量堆放土地, 同时也将造其中有价金属的资源浪费, 还将会给环境带来安全隐患。因此, 高炉瓦斯灰的资源利用具有重要意义, 生产中一般是先火法富集回收锌, 得到高品位的氧化锌烟尘, 再进行湿法氧化锌浸出处理。目前工业广泛应用的火法富集工艺主要有转底炉法和回转窑法, 本文对这两种工艺和设备特点进行了介绍。

1 转底炉火法富集工艺

1.1 转底炉的发展

转底炉由轧钢使用的环形加热炉演变而来, 具有环形炉膛和可转动的炉底, 炉膛为一个固定的环状容器, 炉侧壁和炉膛顶部配有高效燃气烧嘴和热风喷嘴, 用于控制炉内温度和气氛。转底炉最早由加拿大国际镍集团开发用于处理不锈钢的粉尘, 在 20 世纪 90 年代开始应用于处理钢铁厂的含锌烟尘, 目前我国、日本、美国和韩国等都有规模化应用。

2009 年我国莱钢与北京科技大学合作建设了一条转底炉火法富集生产线, 处理含锌烟尘 32 万 t

/ a, 该生产线可获得氧化锌烟尘, 同时产出金属化球团^[2]。马钢、莱钢和沙钢也在 2010 年左右开始采用此工艺处理钢铁厂尘泥。

1.2 转底炉法的工艺流程

转底炉生产系统主要包括原料运输存储、配料、混料、压球、烘干、焙烧还原、冷却和储存等^[3]。瓦斯灰与其他烟尘一起先配料, 在强力混合机内配水和膨润土等粘结剂充分混匀, 再用对辊压球机压球送入链蓖机内烘干至含水 3% 以下, 烘干好的生球经布料器均匀分布到转底炉床上。炉料随着炉底一起转动, 不受挤压, 先在预热区加热到 1000℃ 以上, 再进入还原区。在炉内高温 1250℃—1350℃ 下, 球团内氧化铁被还原金属化, 物料中的铅锌氧化物被碳还原, 形成金属蒸汽进入烟气, 在气相时又重新形成金属氧化物随烟气进入余热回收和烟尘净化处理系统。

转底炉的烟气约 1100℃, 先经余热锅炉进行余热回收, 接着进入换热器预热助燃风和二次风, 最后进入低压蒸汽发生器和布袋除尘器, 充分回收热量并收集得到粗氧化锌烟尘。转底炉出料口设置螺旋出料机将高温球团通过溜槽排入振动冷却机组, 经冷却水间接冷却后, 可作为配料返回加入电炉或高炉中炼铁。

1.3 转底炉法的工艺特点

转底炉工艺不仅可富集回收瓦斯灰里铅锌, 外售给锌厂进一步提取回收锌。同时可以使烟尘里的铁金属化, 回收金属 Fe。生产中锌回收率为 90%, 铁金属化率为 70%, 具有脱锌率高、金属化率高和自动化程度较高等优点。但一般瓦斯灰里的铁含量较低, 金属化球团中还含有较高的硫和其他杂质, 而球团含铁品位要求高于 60%, 所以不能单独直接处理高炉瓦斯灰, 必须配入铁精矿或高品位电炉灰或转炉灰等含铁物料, 才能产出合格的直接还原球团。同时转底炉对进料粒度要严格, 原料配料复杂, 需要成球团和烘干。而且生产中还需要大量的燃气来提供热量维持炉内温度, 虽后期建设的沙钢工程采用了蓄热式转底炉但同样需要消耗大量的燃气。对于锌冶炼厂来说, 一般都没有自产煤气, 而天然气价格较高, 燃料选择受限, 推广较难, 故转底炉法大多只在钢铁厂使用。

2 回转窑火法富集工艺

回转窑法(又称威尔兹法), 1926 年波兰首先用于处理低品位锌氧化矿^[4], 后被广泛应用到锌浸出渣、铅鼓风炉高锌水淬渣和其它含锌烟尘废料的处理上。我国钢厂烟尘综合回收的锌冶炼工厂大多采用回转窑工艺, 主要集中在云南、河北、湖南和台湾等地。

2.1 回转窑法的工艺流程

处理高炉瓦斯灰的回转窑与处理湿法炼锌浸出渣的回转窑在工艺和装备都基本相同，但因瓦斯灰粒度更细，为提高粗氧化锌烟尘品质，一般在入窑前要求混合制粒。生产中可根据瓦斯灰中的含碳量来计算还原剂焦粉的配入量，含碳量高时，基本不用额外添加焦粉，只需加入熔剂调整渣型。

混合物料通过胶带输送机先送入强力混合制粒机中造粒，为增加强度，球粒一般先晾晒 7 天左右，再送入斜率为 2%—5% 的回转窑中。窑内分干燥段、预热段、反应段和冷却段，炉料随回转窑的转动向窑头运动，而高压空气从窑头罩鼓入并直接向高温炉料喷吹。高压风作用既可以加剧焦炭的燃烧，还可以掀动炉料延长反应带使反应更充分。炉料与烟气在逆向运动中被烟气加热，在干燥段首先进行水的蒸发，窑内反应段温度能达到 1200℃—1300℃，高温下铅锌等金属氧化物被碳还原成金属，然后以蒸汽的形式从料层中挥发出来，在窑内上部空间又和氧结合，重新生成金属氧化物，并随烟气一起离开回转窑进入余热回收和收尘净化系统。回转窑产生的含尘烟气先入窑尾除尘室，收集出的锌低铁高的粗粒烟尘返回配料。除尘室出口烟气温度的 750℃ 左右，余热锅炉回收余热，再经电收尘器收尘，余热锅炉和电收尘器收集得到高品位氧化锌烟尘，送锌厂氧化锌浸出车间提炼锌，除尘后的烟气送脱硫系统，尾气达标后排放。

回转窑法是半熔化挥发，炉料中各物互相嵌布紧密。窑头排出的热渣一般进行水淬，热焓没有回收且还会产生大量蒸汽。窑渣中含有 30% 左右的 Fe，其中 60%—70% 被金属化了，同时还含有 5%—15% 左右的残碳。窑渣经磁选后可产出铁磁精矿，因含硫难以作为炼铁原料返回铁厂，一般只可作为有色金属冶炼的铁熔剂。部分锌厂还对窑渣进行了摇床选碳，选出的部分焦粉返回回转窑配料使用，降低能耗^[5]。

2.2 回转窑法的工艺特点

回转窑法具有设备简单、建设投资低和动力消耗小等优点，是目前常用的二次锌物料处理工艺，被大多中小型锌冶炼厂采用。回转窑法目前在窑机械部分、节能和环保等多方面做了较大的改进，其生产更趋大型化和现代化，但还存在一些待改进的地方。主要体现在：炉衬寿命短、作业率低、年实际工作日一般只有 240—300 天、维修费用较高、生产能力低、设备占地面积大、需要价格昂贵的焦炭、经济效益较差、操作环境不好以及热渣热焓没有等到回收等。

3 结束语

我国高炉瓦斯灰产量大，是良好的锌二次资源。锌冶炼企业从中既可回收金属锌，提高本厂的经济效益，又可解决钢铁行业瓦斯灰的堆存处理问题，发展前景良好。氧化锌烟尘的湿法浸出工艺基本成熟，而瓦斯灰前段的火法富集回收锌工艺，转底炉法和回转窑法是目前常见的工艺，但仍存在一些问题。改进和发展火法富集回收锌处理工艺和设备是未来的发展趋势。

参考文献

- [1] 王树楷 高炉炉尘回收有色金属的工业实践 [J] 钢铁研究, 2010 (3) : 45 — 49
- [2] 余雪峰, 薛庆国, 王静松, 等 莱钢转底炉生产实践 [C] 沈阳: 中国金属学会 2012 年非高炉炼铁学术年会论文集, 2012, 113—117
- [3] 霍天玺, 声王莉, 侯莉洋 转底炉直接还原处理含锌尘泥的设计特点、[J] 河北冶金, 2013 (6) : 40 — 42, 48
- [4] 铅锌冶金学编委会 铅锌冶金学 [M] 北京: 科学出版社, 2003, 238 — 240
- [5] 王辉 锌挥发窑废渣物理分选回收工艺研究 [J] 稀有金属与硬质合金, 2007 (1) : 31 — 35



某企业含铁尘泥冷固结球团试验研究

陈亚团

(酒泉钢铁公司 甘肃 嘉峪关 735100)

摘要: 本文对某企业铁钢工序典型的含铁尘泥的混合冷固结造块进行了试验研究。文中分析了各物料的特点、粘结剂的作用机理和球团固结机理,在采用有机粘结剂进行冷压球试验的基础上,将新型球团与原来球团的指标进行了对比。证明采用有机粘结剂和适当的工艺可以生产出满足炼钢需求的冷固结球团。

关键词: 氧化铁皮; 含铁尘泥; 冷固结; 粘结剂

1 前言

钢铁行业是物流量很大的行业,生产过程不仅产生大量的产品,也产生大量的固体废物,若不加利用,不仅占用土地,造成环境污染,还使得有限的资源浪费,中国钢铁工业发展面临前所未有的挑战^[1]。铁钢系统是钢铁冶金企业固体废物的主要来源,其固体废物含铁量显著,若能加以适当利用,则不仅减轻环境压力,也能给企业带来可观效益,实现降本增效。

冷固结球团冶金效果显著,具有减少石灰等辅材消耗量,提前化渣,减少钢铁料消耗等优点^[2]。以上工艺已经在各钢铁企业应用多年,在酒钢也应用了十余年,取得了一定的降本增效的效果,但工艺尚需要优化。

本文结合三种典型含铁尘泥的优化搭配对冷固结球团的工艺优化试验过程进行了介绍,重点是降杂质、提碱度和内配碳。另外,通过工艺改进使得不适合在铁前工序大比例使用又难以压球的高炉重力灰得以在炼钢系统使用,一定程度减轻了炼铁工序消纳高碱高锌固废的负担,为重力灰的消化找到了一条可行的途径。

2 某企业三种典型含铁尘泥基本情况

表1 某企业三种典型含铁尘泥的成分

Table1 component of three typical ferro-contained dust & ash

| 序号 | 项目 | TFe | K ₂ O | Na ₂ O | ZnO | C | S | P | SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ |
|----|------|-------|------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|------------------|------|------|--------------------------------|
| 1 | 重力灰 | 31.19 | 0.326 | 0.186 | 0.555 | 25-30 | 0.719 | 0.044 | 7.71 | 6.85 | 1.47 | 2.68 |
| 2 | OG泥 | 56.04 | 0.06 | 0.041 | / | / | 0.26 | 0.16 | 2.85 | 8.93 | 1.01 | 0.16 |
| 3 | 氧化铁皮 | 70 | 0.013 | 0.015 | 0.013 | / | 0.015 | 0.017 | 0.52 | 0.34 | 0.41 | 0.15 |

2.1 高炉重力除尘灰

高炉重力灰吨铁产生约 12kg/t，其年产生量在 6 万吨。该物料为灰黑色粉状，铁含量较低，粒度在 1mm 以下，以往造球实践显示，亲水性差，不易冷压成球。

2.2 氧化铁皮

氧化铁皮吨钢产生量约 11kg/t，其年产生量在 5.5 万吨。该物料为灰色略带光泽的细鳞片状，铁含量高，亲水性中等，成球性稍好于重力灰，但单独造球性能差。

2.3 OG 泥

OG 泥吨钢产生量约 12kg/t，其年产生量在 6 万吨。该物料为灰黑色粉状，铁含量较高，亲水性好，成球性好于以上两者，可单独造球。

氧化铁皮、OG 泥普适性强。高炉重力灰因含有较高的钾钠和锌，无法在铁前大比例使用。

3 本试验研究要解决的问题

3.1 以往冷造球模式存在的问题

3.1.1 有害物质含量高

含铁物料冷固结制球原来的工艺压要加入大量白粘土（配比 20% 左右）来提高粘结性，由于配加粘土后球团的 SiO_2 与 Al_2O_3 含量增加，使得含铁量下降，还会造成转炉石灰用量增加。虽加工成本不高，但由于品位低使得冶金表现不理想（化渣效果及降低钢铁料消耗的作用不理想），“使用成本”高。

3.1.2 配比不合理

以往含铁固废造块时，复合造块工艺应用不成熟，搭配比例不合理，不利于发挥每种物料的长处以及扬长避短。其中，氧化铁皮由于使用途径较多，含铁量高，市场价格较高，但目前压球中氧化铁皮的配比过高，用于压球不经济。OG 泥加入量少，不能利用其物料特点有效发挥其促进成球的作用。

3.1.3 未采取配碳措施

目前含铁团块未采取针对性的内配碳措施，不含或仅含少量碳素，主要依靠金属熔池中的碳与硅等元素进行还原，反应诸元向反应区扩散成为限制环节，所以反应速度以及还原量均不高。

3.1.4 未能实现高炉重力灰等铁前物料的消纳

不适宜在炼铁使用的高炉重力灰未纳入压球原料中，不能消纳这一综合利用价值较高的重点固体废物。

本试验研究就是在一般粘机理的基础上引进高效的有机粘结剂来压球，解决球团杂质高的问题、不能充分发挥各物料功能的问题、不含碳的问题等。在保证球团铁含量与以往相比不降低的基础上，使得重力除尘灰得以消纳，生产出适合炼钢工序使用的综合性能更优的冷固结球团产品。

4 球团固结机理粘结剂的选型

粘结剂的粘机理按照是否发生化学反应可分为物理粘结和化学粘结^[3]。发物理粘结常见的有粘土、膨润土、糖浆和淀粉（纤维素）基粘结剂。化学粘结剂常见的有水泥和水玻璃和消石灰。其中淀粉（纤维素）基粘结剂由于缩聚反应的存在，又同时存在着化学粘结的作用。

4.1 物理固结

这一类粘结剂多数都具有极性基团或极性表面，对水分子具有良好的固定作用。这种粘结剂固定水分的机理是，极性基团与水分子接触时，在很大范围内使得水分子定向排列，从而有束缚水的作用。极性表面与非极性表面的界面水结构很不相同，Drost. Hansen^[4]提出了极性表面水分子排列的经典三层结构模型，如图1所示。

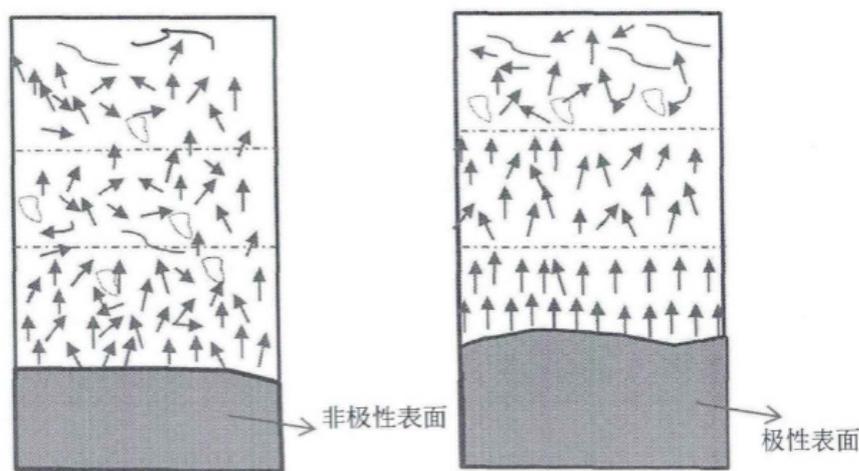


图1 极性表面水分子排列示意图

Fig.1 The schematic of water molecules arrange on the polar surface

从上图可看出，极性表面水分子排列具有三层排列结构，最靠近极性表面的水分子呈定向有序排列。膨润土、白粘土是这类粘结剂的典型。而糖浆、改性淀粉和典型纤维素也属于这类粘结剂，这些物质中含有大量的羟基（-OH），对水分子固定作用很强，主要以氢键存在，氢键的键能大小为8-42KJ/mol^[5]。因此这类有机粘结剂堆水分子有很强的固定作用，在球团固结之初，能将水分牢牢地控制住，发挥固结作用。另外以下的情况也属于物理固结。

4.1.1 压力固结

对辊球窝的存在限制了物料向四周的流动，促进了小颗粒在大颗粒之间的填充占位，同时压力作用下水流动速度更快，某种程度上促进了水裹挟小颗粒和可溶性物质流动和填充附着作用的发挥，拉近了质点之间的距离，有利于范德华力发挥作用。

4.1.2 粗细料集配

配料有粗颗粒也有细颗粒。OG泥是充分消解的除尘灰，粒度较细。重力灰和氧化铁皮种也有数量可观的细颗粒。这些细颗粒能够填充粗颗粒之间的间隙，使得粒子距离更近，使得范德华力得以发挥作用。

4.1.3 水基固结

冷造球过程必须加水，而水的加入促进了可溶物质的溶解，产生一定的胶凝性。而水的存在增加了小颗粒在大颗粒间流动性，从而促进了填充和附着作用，为范德华力起作用进一步创造了条件。水的极性特征还为白粘土和有机粘结剂发挥作用奠定了基础。

4.1.4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 固结

OG泥是充分水浸消解的炼钢尘泥，其 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量较高，而我们知道建筑上制作砂浆时常用生石灰泡水生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，由于极性分子的原因，其分子周围电荷不对称，便于与其它集团产生吸附效应。因此 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是一种有着良好胶结性的物质。

4.2 化学固结

这种粘结是指粘结剂在粘结过程中依靠化学反应产生新相来固结的粘结，常见的水泥和水玻璃固结法都属于化学固结，碳酸化固结也属于化学固结（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的另一作用是与 CO_2 反应生成坚固的 CaCO_3 ，也是它发挥固结作用的一个原因，只是作用相对缓慢，但球团在长期的放置过程势必

会强度越来越高)。有些有机粘结剂在发生固结时,受外部或内部条件的刺激,有机分子发生聚合或缩聚反应,从而加强了与粘结物的粘结强度,这样的粘结也归为化学粘结。他们就是通过缩聚反应来加大两个物体之间的粘结力。

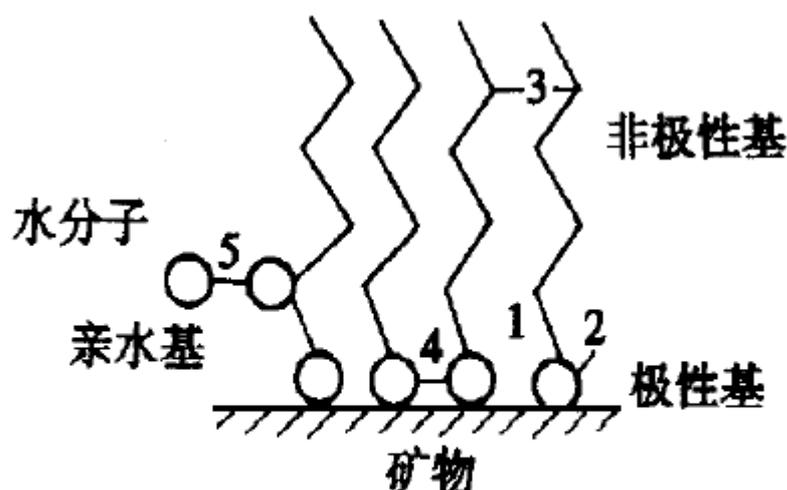
4.3 有机粘结剂

有机粘结剂是应用历史较长的一种粘结剂,从工业生产实践来看,有机粘结剂不仅胶结作用明显,还具有配比低,对球团品位影响小,杂质带入少等优点;另外,有机粘结剂在入炉后被烧掉,但使得球团品位和气孔率都得以提高,有利于改善还原性和改进炼钢指标。

有机粘结剂是人工合成的高分子聚合物或其混合物,有大量的活性官能团,有很强的吸水能力,溶于水后粘度迅速增加。典型的有机粘结剂有:羧甲基纤维素钠、变性淀粉系列、聚丙烯酰胺等。随着科技的进步,许多新型有机粘结剂被开发出来,使得冷固结球团领域可选种类增多。

基于对有机粘结剂在球团中作用机理的研究,认为理想的有机粘结剂分子应具有以下特征:具有铁精矿表面发生强烈化学吸附作用的极性官能团;具有增强矿物表面亲水性的亲水基团;其本身的链架不易断裂,具有良好的胶结性能。

根据以上三条特征设计的有机粘结剂的粉子结构模型为: X-P-K。X 为能吸附在矿物表面的极性基团, P 为有机链架, K 为亲水基团。有机粘结剂粉子的各种作用见图 2。



1—X 与矿物的作用; 2—P 与 X 的作用; 3—P 与 P 间的作用
4—X 与 X 间的作用; 5—K 与 H₂O 分子间的作用

图 2 有机粘结剂作用机理示意图
Fig.2 Mechanism of action on organic binder

经研究, $-\text{COO}-$ 可以和铁精矿表面发生离子键合, 是理想的 X 基团; $-\text{OH}$ 亲水性较强, 可大大改善粘结剂的亲水性, 是理想的 K 基团。因此后续进行粘结剂选型时将本着以上原则进行。最终确定的粘结剂类型为改性淀粉为主要成分的混合型有机粘结剂。

5 压球试验情况

从上表可见，新型压球的二元碱度在 0.8-0.9，较原来的粘土压球提高 0.4 左右；新型压球的四元碱度在 0.8-0.9，较原来的压球提高 0.3 左右。酸性氧化物总量从 14.5% 减少到 7% 左右。此次压球试验由于采用高压机，预期冶金效果会好于上次试验球，辅材与钢铁料成本都将降低，对炉衬和烟道的影响也将比较微弱，具体需待转炉批量试用后再作评价。另外，将粘土球和有机粘结剂球都晾晒 5 天后再测强度，如上表所示，有机粘结剂球比粘土球高出 1000N 以上，且落下次数多出 1.5 次。这样一来，在甲单位压球的重力灰配比还有望提高 5% 左右。

存在问题：由于压出的新球的强度较粘土球略低，故一次成球率比粘土球略低。因此球的干后强度不成问题，后续控制的关键主要是如何提高一次成球率。

5.1 试验基本条件

5.1.1 物料条件

试验基础物料和白粘土理化指标见表 2 和表 3。

表 2 含铁基础物料成分

Table 2 Component of ferro-contained fundamental materials

| 项目 | TFe | K ₂ O | Na ₂ O | ZnO | C | S | P | SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ |
|------|-------|------------------|-------------------|-------|------|-------|------|------------------|------|------|--------------------------------|
| 重力灰 | 31.19 | 0.326 | 0.186 | 0.555 | 30 | 0.719 | 0.04 | 6.85 | 1.47 | 2.68 | 31.19 |
| 氧化铁皮 | 68-72 | | | | | | | | | | |
| OG 泥 | 56.04 | / | / | / | 0.98 | 0.26 | 0.16 | 2.85 | 8.93 | 1.01 | 0.16 |

表 3 白粘土理化指标

Table 3 Physical & chemical index of clay

| 项目 | FeO% | SiO ₂ % | CaO% | MgO% | Al ₂ O ₃ % | S% | P% | 粒度 mm | 水分 % |
|----|------|--------------------|------|------|----------------------------------|----|------|-------|------|
| 成分 | 5.76 | 52.01 | 5.93 | 2.63 | 15.7 | | 0.64 | ≤ 0.2 | ≤ 1 |

5.1.2 物料配比

为了发挥 OG 泥的胶结作用，此次试验确定的基础料配比为氧化铁皮、OG 泥和高炉重力灰重量比 5:3:2、有机粘结剂配比 2%，黏土配比 1.5%，通过试验验证其可行性。试验前先将基础物料按照上述 5:3:2 的比例混合均匀。基础料混合好后经济所人员用电炉 + 铁盘加热法检测水分含量，为过程配水和粘结剂加入量提供依据。混合料水分检测结果，甲单位 7%，乙单位 10%。粘结剂配比以物

料称重量减去测得的水含量作为依据。具体试验物料称重见表 4。

表 4 试验物料配比表

Table4 proportioning of metaterials for tast

| 项目 | 配比 | 甲加工产线混合料 kg | 乙加工产线混合料 kg |
|--------|----------------------------------|-------------|-------------|
| 氧化铁皮 | 50% | 1620±100 | 1080±100 |
| OG 泥 | 30% | | |
| 重力灰 | 20% | | |
| 有机粘结剂 | 2% | 30±1 | 19±1 |
| 白粘土粘结剂 | 1.5% | 22±1 | 15±1 |
| 水 | 综合不大于 10% | 根据出球情况调整 | 根据出球情况调整 |
| 搅拌时间 | 要求大于 5 分钟 | | |
| 排水和通风 | 在晴好天气试验，有 3 级威风，场地排水通风条件良好，光照充足。 | | |

5.1.3 加工单位生产工艺对比

压球加工单位的生产工艺对比见表 5。

表 5 压球单位生产工艺对比

Table5 comparison of production process of two factories

| 单位 / 项目 | 上料模式 | 搅拌机型号 | 压球道次 | 有无回料系统 | 出球方式 |
|---------|-----------------|-------|------|--------|---|
| 甲加工单位 | 料斗上料至搅拌机再输送至压球机 | 750 | 2 | 有 | 环形出料，先出一堆作为基础堆，后续环形出料，出料皮带缓慢移动，球顺料堆斜坡下滑，球在原地堆放 1 天铲走。 |
| 乙加工单位 | 料斗上料至搅拌机再输送至压球机 | 550 | 1 | 无 | 固定出料至深坑，坑满必须铲运，否则无法后续生产。 |

5.1.4 加工工艺（以单位 2 的工艺为例）

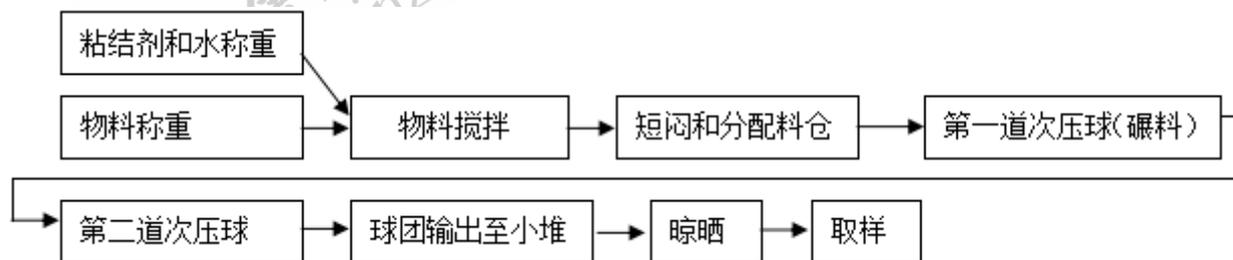


图 3 冷压球团工艺流程图

Fig.3 Process flow of Cold-Solid Pellet

5.2 理化指标检测方法

冷固结球团指标检测方法和指标要求见表 6。

表 6 冷固球团指标检测方法和指标要求

Table6 Testing method & index demand of cold solid pellet

| 指标 | 化学成分 | 落下强度 | 粉碎率 | 抗压强度 |
|------|---|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 单位 | % | 次 / 球 | % | N/ 球 |
| 具体要求 | TFe ≥ 52%, SiO ₂ 和 Al ₂ O ₃ 等酸性物质含量较正常球降低 50%, 球内碱度有所增加, 水分小于 3% | 大于 2 次 | 落下五次后 8mm 以下粒度占比 ≤ 30% | ≥ 700N/ 球 |
| 检测方法 | 用检验正常氧化铁皮的方法检测成分和水分。 | 取 20 个以上球, 2 米高度落下至 20mm 钢板。 | 取 20 个以上球, 2 米高度落下至 20mm 钢板 | 取 20 个球, 利用铁前试验室的球团抗压试验机进行检测, 取平均值。 |
| 备注 | 主要考核指标 | 主要考核指标 | 参考指标 | 参考指标 |

5.3 数据采集

在自然晾晒 3 日后分别在甲单位和乙单位加工厂取样, 每个料堆分 5 点取样 10kg 以上, 于取样 10 日后分别送检化学成分以及物理指标。球团落下强度、球团抗碎裂指标和球团抗压强度检测情况分别见表 7、表 8 和表 9, 汇总指标见表 10。

表 7 球团落下强度对比表

Table7 Comparison of strength for cold solid pellet

| 次数 | 甲加工单位 | | | 乙加工单位 | | |
|-----|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 样品球 (个) | 不同次数占比 | 平均碎裂次数 | 样品球 (个) | 不同次数占比 | 平均碎裂次数 |
| | 90 | 100% | | 42 | 100% | |
| 1 次 | 15 | 16.67% | 3.09 | 5 | 11.90% | 2.98 |
| 2 次 | 18 | 20.00% | | 7 | 16.67% | |
| 3 次 | 20 | 22.22% | | 16 | 38.10% | |
| 4 次 | 22 | 24.44% | | 12 | 28.57% | |
| 5 次 | 15 | 16.67% | | 2 | 4.76% | |

表 8 球团抗碎裂指标 (落下 5 次后 8mm 以下颗粒占比)

Table8 Against-rupture index of cold solid pellet

| 单位 | 单位 1 | | 单位 2 | |
|--------------------|------|--------|------|--------|
| 总测试质量和占比 (kg) | 5.25 | 100% | 4.45 | 100% |
| 小于 8mm 质量 (kg) 和占比 | 1.25 | 23.81% | 1.6 | 35.96% |
| 大于 8mm 质量 (kg) 和占比 | 4 | 76.19% | 2.85 | 64.04% |

表 9 球团的抗压强度

Table9 Pressure strenth of cold solid pellet

| 测试项目 / 单位 | 甲加工单位 | | 乙加工单位 | |
|---------------|-------------|-----|-------|------|
| 测试总球数 (个) | 测试数据记录 N/ 球 | | | |
| 每个单位 20 个 | 638 | 980 | 2172 | 1945 |
| | 754 | 887 | 1470 | 1863 |
| | 990 | 888 | 1699 | 2176 |
| | 796 | 764 | 736 | 1519 |
| | 1005 | 610 | 1549 | 1299 |
| | 807 | 834 | 1171 | 1479 |
| | 728 | 738 | 1118 | 973 |
| | 978 | 861 | 1142 | 1011 |
| | 845 | 628 | 1678 | 997 |
| | 885 | 626 | 1882 | 976 |
| 平均抗压强度 (N/ 球) | 812 | | 1443 | |

5.3.1 强度检测

表 10 新型压球和原来球团的理化指标汇总对比表

Table10 Comparison of physical & chemical index for new type & original pellet

| 品名 | 干基成分 (%) | | | | | 成球水分 % | 一次成球率 % | 落下强度 (次 / 球) | 抗碎裂性 (落下 5 次 8mm 以上粒度占比) % | 抗压强度 (N/ 球) |
|-------------|----------|--------------------|------|------|----------------------------------|--------|---------|--------------|----------------------------|-------------|
| | Fe% | SiO ₂ % | CaO% | MgO% | Al ₂ O ₃ % | | | | | |
| 甲单位新型球 | 53.47 | 4.62 | 6.21 | 1.16 | 1.14 | 1.15 | ≥ 90 | 2.98 | 64 | 1443 |
| 乙单位新型球 | 59.76 | 4.17 | 1.47 | 0.38 | 1.21 | 0.94 | ≥ 70 | 3.09 | 77 | 812 |
| 甲单位原来球 | 52.5 | 11.89 | 5.94 | 1.59 | 2.68 | 1.33 | ≥ 90 | 2.1 | 56 | 870 |
| 30 天后甲单位新型球 | | | / | / | / | / | ≥ 90 | 3.12 | 67 | 1670 |

5.4 数据分析

5.4.1 一次成球率和粉末率

甲单位一次成球率 90%，比乙单位高出 20% 以上。甲单位新型球的一次成球率与正常球基本相当，而乙单位一次成球率比甲单位正常成球率低 20%。从刚出来的湿球情况来看，乙单位的粉末率显著高于甲单位。乙单位采用单道次压球，甲单位采用双道次压球，且甲单位有自动碎料回料系统以及环形顺坡下料机制，因此甲单位一次成球率较高。乙单位的深坑出料造成球的落差较大，造成成球率低。

5.4.2 落下强度和抗碎裂性

从落下强度（主要考核指标）来看，不论是甲单位还是乙单位，新型球直到碎裂时的平均次数都接近3次，显著高于甲单位的原来球，证明落下强度1方面新型球有优势。乙单位和甲单位的落下强度指标基本持平。从抗碎裂性指标（参考指标）来看，乙单位和甲单位分别达到77%和64%，显著高于甲单位正常球的56%，证明抗碎裂性方面新型球比正常球有优势。对于落下强度和抗碎裂性，两个加工厂的压球都达到了指标要求和前期的合同要求。

5.4.3 抗压强度的改进

不论是乙单位还是甲单位的新型压球，其抗压强度指标均优于甲单位原来球；而甲单位新型球的抗压强度高于乙单位。乙单位压球配水量较大，工艺上有局限性，受气候变化的影响更强烈些，因此次球的强度低于甲单位。总体上两种球的抗压强度都达到了强度指标要求。

5.4.4 湿球的抗转场能力

从现场观察来看，不论是乙单位还是甲单位，转场至大堆后的新型球的粉末率均高于正常球。新型球的抗转场能力不如原来球。甲单位的粉末率小于乙单位，抗转场能力相对较强。

分析：两家压球单位均采用铲运机对压好的球实施转场，这是相同之处。乙单位由于是料坑出料，坑满即倒，是在湿球状态下转场，时间不超过5小时，球的缓存强化时间短，强度不足；甲单位因为有环形出料的条件，一般是在原地放置1天乃至2天后转场，球的缓存强化时间较长。因此，甲单位球的抗转场能力强。至于新型压球的抗转场能力不如正常球，主要是新型粘结剂的理化特性，决定了它压制的球团的湿球强度较差，所以不能高空落下和立即转场，宜在堆存较长时间后转场。

5.4.5 化学成分的改进

正常氧化铁皮的成分是随机取样结果，从化学成分来看，试验批次的新型球的铁品位略高于正常压球。查阅以往模式压球的质量抽检记录，正常球的氧化铁皮铁品位大致在50%–60%之间波动，故可以认为新球的铁品位与正常球大体持平，首先达到了铁品位不降低的要求。 SiO_2 和 Al_2O_3 等酸性物质的含量显著低于正常球，以甲单位压球为例，分别从11.89%和2.68%降低至4.62%和1.14%，综合从14%以上降低至6%以内，球内二元碱度从0.5增加到1.3。以上指标都达到了化学成分的要求。成分的优化语气可为转炉辅材的降低和渣量的减少创造了条件。

5.4.6 混合料的水分配比和合理配水范围确定

氧化铁皮、OG 泥中含有生产过程的油污，采用烘干法检测水分含量时，水分检测结果受油品挥发的影响，其值会偏大。油品含量的测定尚无合适方法，混合料的含水量暂不能取得精确值。但从甲单位试验加水量、得到的湿球情况、转场情况和强度检测来看，初步确定合理的综合水含量区间应在 7%~10%（也即自带水和加入水的量综合不大于 10%）。

6 炼钢工序试用评价情况

按照试验确定的工艺压制有机粘结剂压球 120 吨，分别供给钢轧一厂和钢轧二厂在转炉进行了试用。这里以炼轧厂为例说明试用评价情况

6.1 制定的加入方式

表 11 计划加入方式

Table11 Feeding method of new type pellet

| 铁水硅 (%) | 小于等于 0.4 | 0.4 ~ 0.6 | 0.6 ~ 0.8 | 大于 0.8 |
|----------------|----------|-----------|-----------|------------|
| 头批料铁皮球加入量 (kg) | 0 | 0 ~ 450 | 450 ~ 900 | 900 ~ 1300 |
| 石灰减少量 (kg) | 0 | 0 ~ 100 | 100 ~ 200 | 200 ~ 300 |

试验氧化铁皮球分两批加入，第一批在吹氧 2 min 内加入，加入量执行上表。同时头批适当减少石灰的加入；第二批根据后期温度情况，少量多批加入，在吹氧 10 min 之内加完。活性石灰加入方式不变，加入量以上表为基础并根据渣样抽查碱度进行调整。

6.2 球的外观和理化指标评价

经检验对比新型球的 SiO_2 含量比原来降低，同时含有一定量的 MgO ，理论上对转炉有利。从铁皮球外观情况看，基本与前期使用的氧化铁皮相当，有少量粉末物料。上料过程观察物料正常，使用过程中，未出现在料仓内结块、蓬料，高位料仓正常使用。

6.3 对炉料消耗的影响

表 12 转炉过程实际炉料

Table12 Factual materials Feeding of converter

| 项目 | 试验氧化铁皮 | 石灰 | 白云石 | 正常氧化铁皮 |
|------|--------|--------|-----|--------|
| 试验炉次 | 500 | 1729.7 | 524 | 0 |
| 常规炉次 | 0 | 1759.5 | 546 | 609.3 |
| 差异 | 500 | -29.8 | -22 | -609.3 |

从试验数据看，试验炉次氧化铁皮球料平均加入量 500kg/ 炉，加入试验氧化铁皮炉次未加入其它的氧化铁皮及矿石等，其石灰加入量降低约 30kg，白云石降低约 20kg，与正常氧化铁皮相比加入量减少约 110kg。

6.4 对钢水终点成分、温度的影响

表 13 冶炼终点钢水成分、温度对比表

Table13 Comparison of destination component & temperature for these two type

| 项目 | C | Mn | P | S | 温度 |
|------|-------|------|-------|-------|--------|
| 试验炉次 | 0.09 | 0.31 | 0.021 | 0.038 | 1647.5 |
| 常规炉次 | 0.1 | 0.29 | 0.021 | 0.038 | 1649 |
| 差异 | -0.01 | 0.02 | 0 | 0 | -1.5 |

从试验数据看，转炉终点 C、Mn、P、S 与常规炉次无明显差异，也无显著变化。

6.5 终渣碱度对比

表 14 终渣成分对比表

Table13 Comparison of component for destination slag

| 项目 | SiO ₂ | CaO | MgO | Σ FeO | R |
|------|------------------|------|-----|-------|-----|
| 试验炉次 | 17.1 | 49.9 | 5.4 | 13.3 | 2.9 |
| 常规炉次 | 17.6 | 51.1 | 4.5 | 11.3 | 2.9 |
| 差异 | -0.5 | -1.2 | 0.9 | 2.0 | 0.0 |

从终渣样对比来看，与常规的氧化铁皮差别不大。

7 结论

新的基础料配比的有机粘结剂压球取得成功：在配碳情况下（重力灰含碳）球的强度高于原来的粘土球；全铁含量达到了不低于原粘土球的目标；酸性物质显著降低，球内二元碱度显著增加。且从球的强度来看，重力灰配比还有少量增加空间。较之原来的压球，转炉试验未显示副作用，强度指标和抗破碎性有所改善。试用显示有一定的降低辅材消耗的作用，但受操作波动的影响，辅材降低尚未达到预期目标。随着后续操作的优化和管理的加强辅材指标应能继续优化。历次试验总结新型球的特点是：新型压球的湿强度低于粘土压球，抗转场能力稍逊，但只要天气好，球越放强度越高，且抗雨水冲刷，其强度增加速度要高于正常球。对于新型压球的这一特点，可通过建设长皮带线直接输送至大堆，减少转场的方式来解决；也可将原地堆放的高度适当减小，时间适当加长予以解决。这样就可以达到强化优势弱化劣势的作用，为新型压球的常态化生产奠定基础。从原来压球的强度

和以往保供来看，能够满足转炉对强度的要求。此次新型球的强度是高于正常球的，保证转炉需求不成问题。目前供货模式是提前生产并供给堆存 1 月以上的球，在晾晒周期延长的情况下，球的强度还会增加，因此季节因素造成的强度波动将不会影响新型压球在转炉使用。通过试验初步确定的合适压球配水量在 7%-10%，也即自带水和加入水的量综合应不大于 10%。高炉重力灰中少量的锌、铅、锡、钾、钠等金属元素对除尘设备的影响还需继续长期跟踪观察。总体上新型球团具备在转炉批量使用的条件。

参考文献

- [1] 李国军, 宋国梁. 中国钢铁企业发展现状、问题和对策研究 [J], 江苏科技信息, 2010, (3) 7-10.
- [2] 转炉污泥合成渣文集编辑组. 转炉污泥合成渣文集 [C], 包头: 冶金部炼钢情报网, 1981, 14-69.
- [3] 居天华. 提高转炉除尘灰冷压球团强度的粘结剂研究 [C], 东北大学硕士学位论文, 2014. 6, 10.
- [4] Drost-Hansen W. Ind&Engng [J], Chem., 1969, 61:10.
- [5] Lee L H. Adhesive Bonding [M]. New York and London: Plenum Press, 1991.

钢渣在城市道路建设过程中的实践

俞海明¹ 陈伟² 赵旭章³ 吴汉元¹ 解英明³

(1 新疆中合大正冶金科技有限公司; 2 新疆交通建设集团股份有限公司;

3 新疆互利佳源环保科技有限公司)

摘要: 钢渣是一种优质的路桥建设材料, 在道路施工工艺中, 钢渣的稳定性是首要解决的难题, 新疆地区降水量偏少, 钢渣陈化消解 f-CaO 的效果不稳定, 本文介绍了在乌鲁木齐市头屯河区三供一业改造过程中全钢渣快速铺筑城市道路的工艺实践。

关键词: 钢渣; 粒度; 碱度; 稳定性; 全钢渣道路结构层

1 前言

钢渣修路技术已有 70 余年的历史, 关于钢渣修路的技术文献逾千篇, 出台的标准有 GB/T25824-2010《道路用钢渣》、GB/T24765-2009《耐磨沥青路面用钢渣》、GB/T24766-2009《透水沥青路面用钢渣》等。

钢渣的应用是公路领域, 该领域的技术人员对于钢渣的稳定性存在较多的担心, 消除担心的方法是钢渣的稳定性检验, 按照 GB/T24175-2009《钢渣稳定性试验方法》检验钢渣的稳定性, 费用较高, 单项每次超过 1.5 万元。八钢的钢渣是热闷渣与精炼渣、脱硫渣等钢渣破碎磁选后整体堆存的, 所以取样测试的结果不具有普遍性。为了消除钢渣在道路建设过程中的不稳定性因素, 我们针对钢渣的粒度、碱度与稳定性之间的关系做了全面的分析, 提出了利用调整钢渣细集料的比例, 消除钢渣不稳定性方法, 在乌鲁木齐市头屯河区三供一业的改造过程中应用, 采用全钢渣铺筑城市道路 15km 以上, 使用钢渣 30 余万吨, 缩短了施工工期, 并且道路实现了铺筑后即开放交通, 为城市道路建设提供了示范性的工程, 本文予以浅述, 供同行参考。

2 钢渣 f-CaO 的产生和特点

文献指出^[1], 钢渣中 f-CaO 的来源主要有以下的几个方面:

(1) 由于炼钢出渣时间缩短, 投入的石灰过量, 使石灰被已经饱和的钢渣所包裹。这些石灰石是原状石灰, 在与钢渣接触面生成死烧石灰, 一般固熔有氧化铁 (FeO)。它是属于活性极差的结构致密石灰。水化速度十分缓慢。

(2) 石灰的溶解度已经饱和, 石灰颗粒已不能与酸性氧化物结合成矿物。一般呈细小颗粒分散在钢渣内部, 常固熔一部分氧化铁 (FeO)。细小的 CaO 固熔了氧化铁 (FeO) 后具有很强的不稳定性。然而结构致密, 水化很慢。

(3) f-CaO 固熔有 Fe 和 Mn 的固溶体 (CaO · Fe · MnO), 在扫描电镜下呈圆形颗粒, 这种固溶

体在一定的温度和空气较大湿度下是可以水化的，会造成钢渣不稳定性。

(4) 钢渣中 C_3S 在一定的高温下分解， $C_3S \rightarrow C_2S+CaO$ 产生的 f-CaO。这部分 f-CaO 在湿度的情况下生产 $Ca(OH)_2$ ，体积膨胀也会造成钢渣的不稳定。游离氧化钙主要构成见图 1。

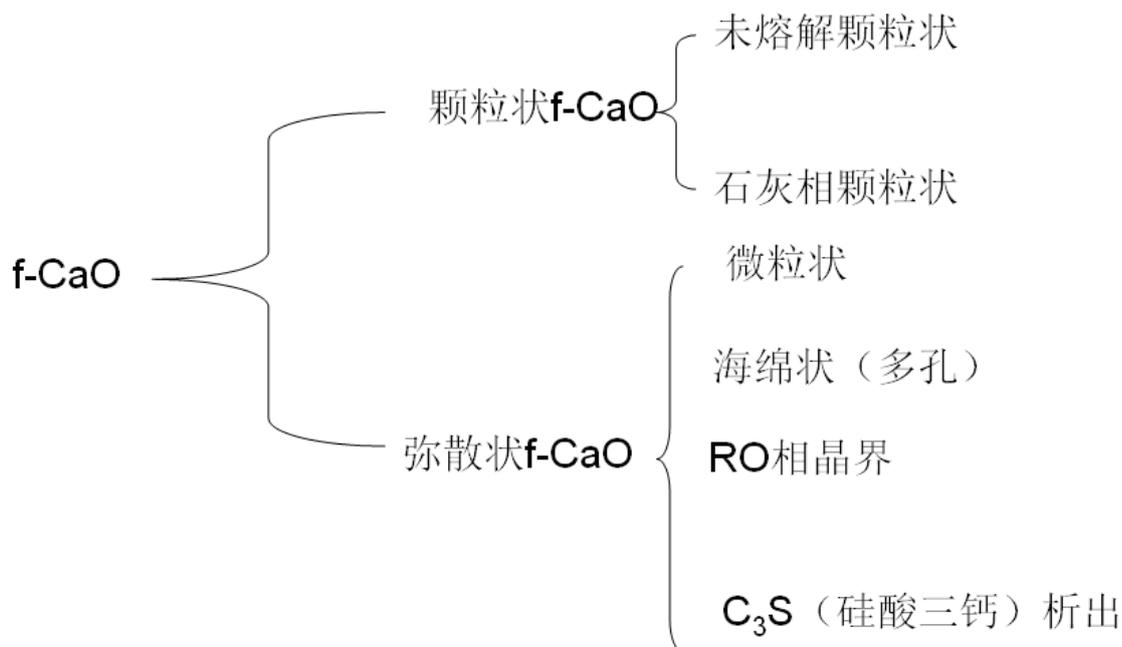


图 1 钢渣中 f-CaO 的来源与特点

根据以上的论述，结合我们的检测试验，得出以下的结论：

1. 钢渣中游离氧化钙的分布有 6 种，每种分布都可以通过控制钢渣的粒度实现游离氧化钙颗粒与钢渣其它矿物相在物理状态下独立，能够在水稳料拌和生产中消除大部分的膨胀危害。
2. 钢渣中的硅酸三钙的含量低，即碱度越低，钢渣中的游离氧化钙含量越少。
3. 硅酸三钙相变析出的游离氧化钙与硅酸二钙矿物相共生。

所以我们采用了棒磨机处理热闷渣，然后进行磁选含铁物料，发现钢渣粒度、碱度和稳定性的关系如下：

- 1) 钢渣的碱度大于 2.5 ($CaO/SiO_2+P_2O_5$)，钢渣的粒度分布细集料（粒度低于 2.36mm）部分占比超过 30%，钢渣的整体膨胀率低于 2%；
- 2) 钢渣的碱度 ($CaO/SiO_2+P_2O_5$) 低于 2.5，钢渣的稳定性与集料的粒度之间没有明显的线性关系；
- 3) 钢渣经过棒磨机处理后磁选的尾渣，粗集料部分，大多数为 RO 相和尖晶石相，其中的游离氧化钙含量低于 3%，压蒸膨胀率低于 2%

武钢工厂回填钢渣的实践表明，钢渣的粒度小于 0.06mm，钢渣的膨胀率低于 2%，即钢渣中的游离氧化钙能够达到安全的要求，与我们的试验分析吻合。

3 八钢钢渣的性能分析和工艺实践

3.1 八钢的钢渣性能分析

八钢的钢渣我们取样做的试验分析见下表 1 ~ 2:

表 1 钢渣筛分表

| | 第 1 组 | | | | 第 2 组 | | | | 平均 |
|-----------|---------|----------|----------|-----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
| 总质量 (g) | 3017.1 | | | | 2943.9 | | | | |
| 筛孔尺寸 (mm) | 筛上重 (g) | 分计筛余 (%) | 累计筛余 (%) | 通过百分率 (%) | 筛上重 (g) | 分计筛余 (%) | 累计筛余 (%) | 通过百分率 (%) | 通过百分率 (%) |
| 26.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 52.4 | 1.7 | 1.7 | 98.3 | 48.6 | 1.7 | 1.7 | 98.3 | 98.3 |
| 16 | 109.6 | 3.6 | 5.3 | 94.7 | 104.9 | 3.6 | 5.3 | 94.7 | 94.7 |
| 13.2 | 178.5 | 5.9 | 11.2 | 88.8 | 192.2 | 6.5 | 11.8 | 88.2 | 88.5 |
| 9.5 | 229.8 | 7.6 | 18.8 | 81.2 | 308.6 | 10.5 | 22.3 | 77.7 | 79.4 |
| 4.75 | 694.2 | 23.0 | 41.8 | 58.2 | 685.2 | 23.3 | 45.6 | 54.4 | 56.3 |
| 2.36 | 581.3 | 19.3 | 61.1 | 38.9 | 552.9 | 18.8 | 64.4 | 35.6 | 37.2 |
| 1.18 | 277.9 | 9.2 | 70.3 | 29.7 | 250.0 | 8.5 | 72.9 | 27.1 | 28.4 |
| 0.6 | 243.3 | 8.1 | 78.4 | 21.6 | 227.6 | 7.7 | 80.6 | 19.4 | 20.5 |
| 0.3 | 236.6 | 7.8 | 86.2 | 13.8 | 202.3 | 6.9 | 87.5 | 12.5 | 13.2 |
| 0.15 | 140.6 | 4.7 | 90.9 | 9.1 | 123.8 | 4.2 | 91.7 | 8.3 | 8.7 |
| 0.075 | 126.0 | 4.2 | 95.1 | 4.9 | 112.0 | 3.8 | 95.5 | 4.5 | 4.7 |
| 筛底 | 146.9 | 4.9 | 100 | 0 | 135.8 | 4.6 | 100 | 0 | 0 |

通过表 1 筛分表数据可知, 钢渣级配较好, 粗细料比较均匀, 细集料占比超过 30%。

表 2 钢渣压碎值

| | 试样总质量 (g) | 留在 2.36mm 筛上的试样质量 (g) | 压碎值 (%) | 平均压碎值 (%) |
|-----|-----------|-----------------------|---------|-----------|
| 1 组 | 3077 | 2559 | 16.8 | 16.8 |
| 2 组 | 2984 | 2488 | 16.6 | |
| 3 组 | 3095 | 2566 | 17.0 | |

道路建设中的水稳层, 是以级配碎石作骨料, 采用一定数量的胶凝材料和足够的灰浆体积填充骨料的空隙, 按嵌挤原理摊铺压实。其压实度接近于密实度, 强度主要靠碎石间的嵌挤锁结原理, 同时有足够的灰浆体积来填充骨料的空隙。根据这一原理, 我们认为, 全钢渣铺筑城市道路的基层、水稳层, 是最为经济和科学的工艺方法。

3.2 全钢渣道路结构层的实践

2018 年, 乌鲁木齐市头屯河区开始供水、供电燃气供应和供暖改造, 头屯河区的主要的能源介质管线均在城市道路下方铺设。

工程建设开始，道路开挖，将原有的道路挖开，倒运走挖方后，开始管线的施工与铺设，对于居民的民生影响很大。为了尽快的完成施工，施工方参考了交建集团在高速道路的钢渣施工方法，实施了道路下方管线改造完成后，采用钢渣回填替代基层和水稳层的工艺，并且在回填结束后就开放道路，待自然养护后择机铺筑沥青混凝土面层，开放后的道路天无侧限抗压强度超过了 6.1 MPa，施工现场的照片见下图：



图 2 城市道路钢渣回填替代基层和水稳层的施工现场

铺筑水稳层后，铺筑了沥青混凝土面层，铺筑后的现场照片见下图 3：



图 3 道路铺装沥青混凝土后的实体照片

整个工程使用钢渣混合料 30 余万吨，铺筑道路 15km，节约施工工期近 1 个月，节约钢渣堆存成本 1000 万元以上，并且铺筑的全钢渣道路在使用 3 年后，道路无干缩裂纹、平整度好、临近绿化带区域无沉陷、各种路害同比条件下大幅度降低。

4 结论

通过控制钢渣的粒度，能够有效的解决钢渣的不稳定性，能够使之成为道路建设过程中的优异材料。

乌鲁木齐市三供一业改造使用全钢渣回填替代传统的基础+水稳层的工艺方法，能够节约城市道路建设的时间，简化施工工艺，对于钢渣的资源化利用具有积极的示范性作用。

参考文献

- [1] 俞海明、王强主编，钢渣处理与综合利用 [M]，冶金工业出版社，北京，2015年。

烧结机头电除尘灰的分级利用

秦立浩¹ 墙 蓓² 阳红辉² 孙彩虹¹ 代梦博¹ 春铁军¹

(1. 安徽工业大学冶金工程学院 安徽 马鞍山 243002;

2. 广西柳州钢铁集团有限公司技术中心 广西 柳州 54500)

摘要:以某钢铁企业烧结机头电除尘灰为原料,采用水浸-过滤-蒸发浓缩-冷却结晶工艺研究 KCl 的回收试验及浸出渣的再利用。研究浸出时间、液固比、搅拌速度和浸出温度等因素对 KCl 的回收效果的影响。结果表明:1号、2号电场除尘灰经过一次水洗浸出后,碱金属 K、Na 的脱除率分别达 99.90%、99.99%和 99.85%、99.93%,浸出渣铁品位为 47.51%和 43.90%,重金属 Pb 质量分数为 0.14%和 0.57%,浸出渣可返回烧结工序;3号、4号电场除尘灰经过二次水洗浸出后,碱金属 K、Na 的脱除率分别达 99.34%、99.66%和 99.38%、99.69%,浸出渣铁品位为 35.19%和 20.86%,重金属 Pb 质量分数为 1.86%和 14.50%,浸出渣可作为火法回收铅的原料。浸出液经过蒸发浓缩-冷却结晶,得到产品中 KCl 质量分数为 93.39%。

关键词:烧结;电场除尘灰;分级利用;水洗浸出;KCl

烧结机头电除尘灰是铁矿石烧结过程中通过烧结机头烟气电除尘器所收集的粉尘,其 Fe、K、Na、Pb 含量较高,全国每年各大钢铁企业烧结除尘灰的产量可达 1500 万 t 左右^[1-2]。烧结机头电除尘灰富含大量可回收资源,如碱金属资源 K、Na,重金属资源 Pb、Zn 以及大量的 Fe。烧结除尘灰未经除杂直接返回烧结循环利用会造成碱金属 K、Na 的不断富集^[3-5]。碱金属的富集在钢铁冶金过程中会带来一系列问题,如加快高炉炉壁的腐蚀,影响高炉的顺行,大大降低高炉使用寿命,同时还会影响烧结电除尘系统的除尘效率^[6-8]。除此之外,碱金属的进入会导致还原过程中产生液相,严重影响铁氧化物的还原,增加了高炉燃料消耗^[9-11]。烧结除尘灰含大量的碱金属、重金属,如何实现铁资源、碱金属及重金属统筹兼顾的回收利用,国内外专家学者们一直在研究。张福利等人^[12]提出利用烧结除尘灰生产 KCl,给出了水浸-沉降分离-硫化钠除杂-分步结晶的工艺路线,可以有效缓解中国 K 资源短缺的问题,但只对烧结除尘灰中碱金属 K 进行了处理,未涉及重金属的处理利用情况。钱锋等人^[13]提出水浸-磁选-过滤-蒸发工艺对除尘灰进行资源化回收利用,并开发出二次提纯方法得到 KCl 的质量分数可达 99.8%。湘潭大学的蒋新民等人^[14],同样采用水洗除尘灰,通过一系列工艺处理制得工业级 K₂SO₄ 及 KCl,并且 K 的总回收率达到 95.54%。国外企业青睐于火法处理钢铁固废,注友公司开发的 SPM 工艺以及川琦开发的 Z-star 炉都是通过火法工艺处理烧结除尘灰^[15]。里约 Dutra 通过氢氧化钠进行常规浸取钢厂烧结除尘灰,可实现铅锌回收率达到 74%^[16]。目前,上述学者主要对烧结机头电除尘灰进行整体综合利用研究,但由于烧结机头电除尘器一般包括 3~4 个电场,每个电场除尘灰的理化性质差异很大,1、2 电场除尘灰粒度较粗,铁含量相对较高,碱金属含量相对较低,3、4 电场除尘灰粒级较细,铁含量相对较低,碱金属和铅含量相对较高。因此,开展烧结机头不同电场除尘灰分级利用具有重要意义。

1 实验

1.1 实验原料

实验原料采用某钢铁企业 360m² 烧结机机头电除尘器 1~4 号电场除尘灰, 其主要成分组成如表 1 所示。1 号电场和 2 号电场除尘灰中 Fe 含量相对较高, KCl、NaCl、PbO 和 ZnO 含量相对较低, 3 号电场和 4 号电场除尘灰中 Fe 含量相对较低, 而 KCl、NaCl、PbO 和 ZnO 含量相对较高。其中 1 号、2 号电场除尘灰中 Fe 质量分数为 41.75% 和 33.76%, PbO、ZnO 质量分数均低于 1%; 3 号、4 号电场除尘灰 KCl 和 NaCl 质量分数分别为 38.42% 和 44.39%, 12.72% 和 16.48%, PbO 质量分数分别为 4.97% 和 6.86%。

表 1 烧结除尘灰主要组分及其含量(质量分数)

| Table 1 Main components of sintering dust | | % | | | |
|---|-------|-------|-------|------|------|
| 种类 | Fe | KCl | NaCl | PbO | ZnO |
| 1 号电场除尘灰 | 41.75 | 4.99 | 6.05 | 0.19 | 0.06 |
| 2 号电场除尘灰 | 33.76 | 12.04 | 7.48 | 0.70 | 0.07 |
| 3 号电场除尘灰 | 13.05 | 38.42 | 12.72 | 4.97 | 0.39 |
| 4 号电场除尘灰 | 5.67 | 44.39 | 16.48 | 6.86 | 0.29 |

4 种除尘灰的物相组成如图 1 所示, 由 XRD 得到烧结除尘灰中 K、Na 等碱金属元素主要以氯化物形式存在, 氯化物溶于水, 而除尘灰中其他元素如 Pb、Zn 等难溶于水, 以 4 号电场除尘灰为例, 其中 KCl 和 NaCl 质量分数为 68.3%。图 1 中, 由于 1 号电场 K、Na 质量分数为 2.61% 和 2.38% 相对较低, 其特征峰不明显。

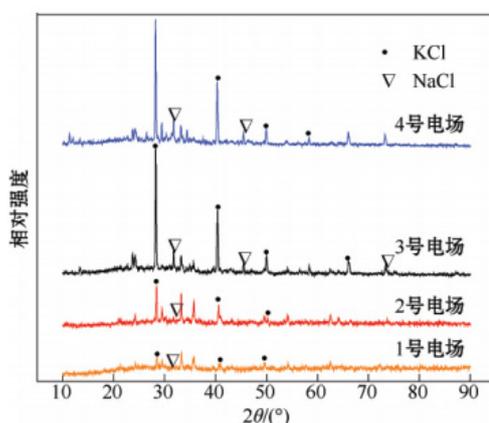


图 1 烧结机头 1~4 号电场除尘灰的 X 射线衍射谱

Fig 1 X-ray diffraction spectrum of No. 1-4 sintering EAF dust

1~4号电场除尘灰粒度组成如表2所示,从1号到4号电场除尘灰粒度逐渐降低,小于0.038mm粒径灰占比从12.27%增加至97.59%,大于0.074mm粒径灰占比从66.41%减小至0.76%。随着电场的递增,烧结除尘灰中小粒径灰尘占比越来越大,与Lanzerstorfer^[17]在烧结粉尘在静电除尘器各领域的收集特性一文中所述一致。

表 2 原料粒度组成

Table 2 Particle size composition of raw material %

| 种类 | <0.038 mm | 0.038~ 0.044 mm | 0.044~ 0.074 mm | >0.074 mm |
|---------|-----------|--------------------|--------------------|-----------|
| 1号电场除尘灰 | 12.27 | 5.22 | 16.10 | 66.41 |
| 2号电场除尘灰 | 52.58 | 13.70 | 18.74 | 14.98 |
| 3号电场除尘灰 | 83.18 | 10.88 | 3.43 | 2.51 |
| 4号电场除尘灰 | 97.59 | 1.08 | 0.57 | 0.76 |

1.2 实验设备和分析仪器

本文所用设备主要有:101-2AB型电热鼓风干燥箱(上海坤天实验仪器有限公司),CP214型电子天平(奥豪斯仪器有限公司),JJ-1B恒速电动搅拌器(金坛区西城新瑞仪器厂),HJ-6B型数显磁力搅拌器(金坛区西城新瑞仪器厂),HH-4型数显恒温水浴锅(常州市越新仪器制造有限公司),SHZ-D(III)型循环水式多用真空泵(河南省予华仪器有限公司),DK-98-II型电子调温万用电炉(天津市泰斯特仪器有限公司)。分析仪器有:D8ADVANCE型X射线衍射仪(XRD,德国布鲁克公司),ARL AD-VANTAGE XIntellipower TM 3600型扫描X射线荧光光谱仪(XRF,赛默飞世尔)。

1.3 实验方法

1.3.1 烧结除尘灰理化特性

1~4号电场除尘灰元素分析通过X射线荧光光谱仪检测。XRD进行物相分析,测定碱金属元素K、Na赋存形式,XRD图谱用Jade6.0软件处理。烧结除尘灰粒径筛分按铁矿石粒度分布的筛分标准(GB/T10322.7-2004)进行测定。

1.3.2 碱金属脱除实验

实验流程如图2所示。研究水洗条件浸出时间、液固比、搅拌速度以及温度对碱金属脱除率的影响，另一方面研究水洗浸出次数对碱金属脱除的影响，从而进行单因素实验得到最佳水洗条件。碱金属的脱除率计算见式(1)：

$$\mu = \left(1 - \frac{m_1 \times \beta}{m_0 \times \alpha}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中： μ 为碱金属脱除率，%； m_1 为浸出渣质量，g； β 为浸出渣中碱金属质量分数，%； m_0 为实验用除尘灰质量，g； α 为除尘灰中碱金属质量分数，%。

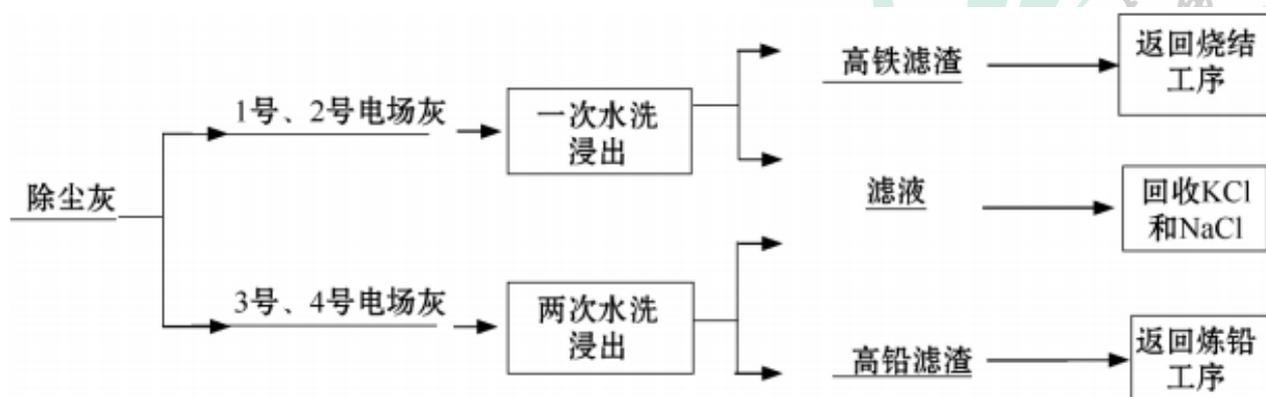


图2 烧结除尘灰分级利用流程图

Fig 2 Flow chart of classification and utilization of sintering dust

1.3.3 KCl 分离回收

最佳水洗条件下得到富含K、Na离子的浸出液。浸出液经电炉蒸发浓缩至溶液体积的30%后再进行水浴蒸发浓缩至、然后冷却结晶、真空抽滤、烘干，得到KCl产品。通过X射线荧光光谱仪分析产品中KCl含量，为获得较高质量分数的KCl晶体，研究不同水浴蒸发浓缩体积比对KCl晶体的影响。KCl的回收率计算见式(2)：

$$\eta = \frac{m_2 \times \gamma}{m_3 \times \lambda} \times 100\% \quad (2)$$

式中： η 为KCl的回收率，%； m_2 为KCl产品质量，g； γ 为产品中KCl质量分数，%； m_3 为实验用除尘灰质量，g； λ 为除尘灰中KCl质量分数，%。

1.3.4 烧结杯试验研究

烧结杯实验条件如下：按照工艺需求计算烧结混合料的各组分质量，经圆筒混料机制粒，再将混合料装入烧结杯料筒中，料层高度为700mm。使用液化气作点火燃料，点火压力—7kPa，点火温

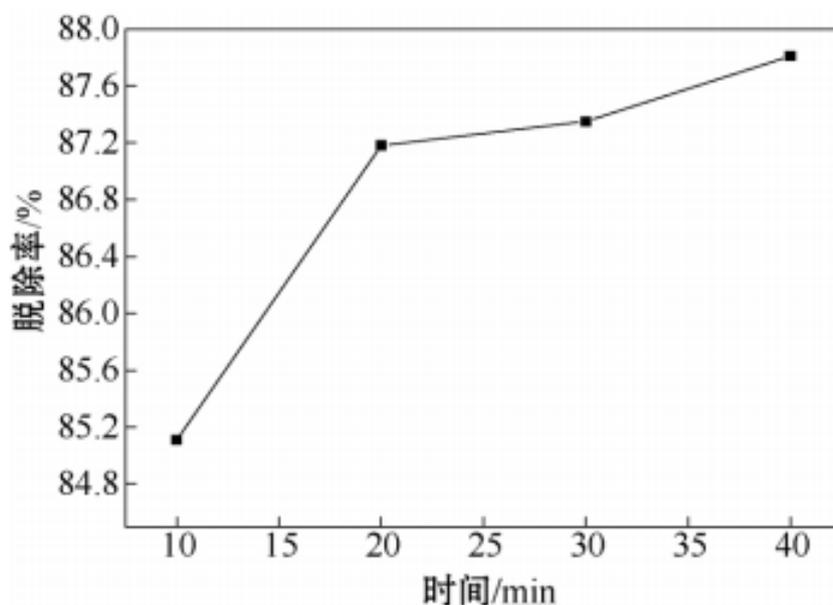
度为 $(1050 \pm 50)^\circ\text{C}$ ，点火时间为 90s，保温时间 30s，烧结过程压力为 -14kPa 。烧结过程结束后，调节风机压力至 7kPa ，冷却 5min 后将烧结料卸出，对烧结矿进行落下、筛分和转鼓强度检测^[18]。

2 结果与讨论

2.1 高碱金属含量电场除尘灰回收利用

2.1.1 浸出时间对 K 脱除率的影响

浸出时间对 4 号电场烧结除尘灰碱金属脱除的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出，烧结灰中 K 脱除率随搅拌时间的增加，总体呈现递增的趋势，10 ~ 20min 内 K 脱除率增幅较大，从 84.9% 增加至 85.6%。这是因为在开始阶段随着搅拌的进行除尘灰迅速与水接触，大量的碱金属迅速溶于水中，使得碱金属脱除率在很短时间内增加至较大值；20 ~ 40min K 脱除率增幅较小，增加量仅为 0.3%。从浸出动力学角度考虑，这主要是因为随着搅拌的进行水中溶解的碱金属已经基本达到平衡，继续延长时间整个体系中溶解的碱金属会越来越少。20min 后继续延长时间，K 脱除率增加效果不明显。因此，适宜的浸出时间为 20min。



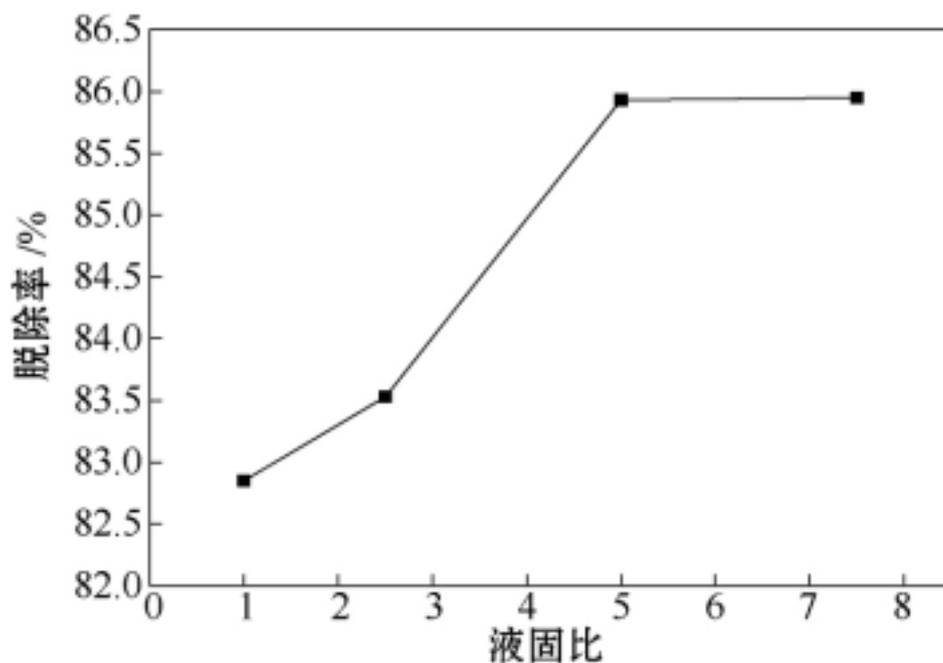
水浸条件：温度 20°C ，液固比 5:1，搅拌速度 500 r/min 。

图 3 浸出时间与 K 脱除率的关系曲线

Fig 3 Relationship between leaching time and potassium removal rate

2.1.2 液固比对 K 脱除率的影响

液固比对 4 号电场烧结除尘灰碱金属脱除的影响如图 4 所示。由图 4 可知，当液固比为 1 时，烧结灰除尘灰的液体浓度较大，整个浸出体系比较粘稠呈现泥浆状。在这样的情况下，烧结灰中碱金属 K 无法充分与水接触溶解，导致烧结灰中 K 脱除率为 82.85%；当液固比从 2.5 : 1 增加到 5 : 1 时，K 脱除率从 83.52% 激增 85.93%，这是因为整个浸出体系中水大幅增加，本来在低液固比下无法与水接触的那部分灰迅速溶于水，碱金属脱除率迅速增加；当继续扩大液固比至 7.5 : 1 时，K 脱除率增加幅度较小，所以继续加大液固比对碱金属脱除率的影响较小。因此，适宜的浸出液固比为 5 : 1。



水浸条件：温度 20 ℃，搅拌速度 500 r/min，搅拌时间 20 min。

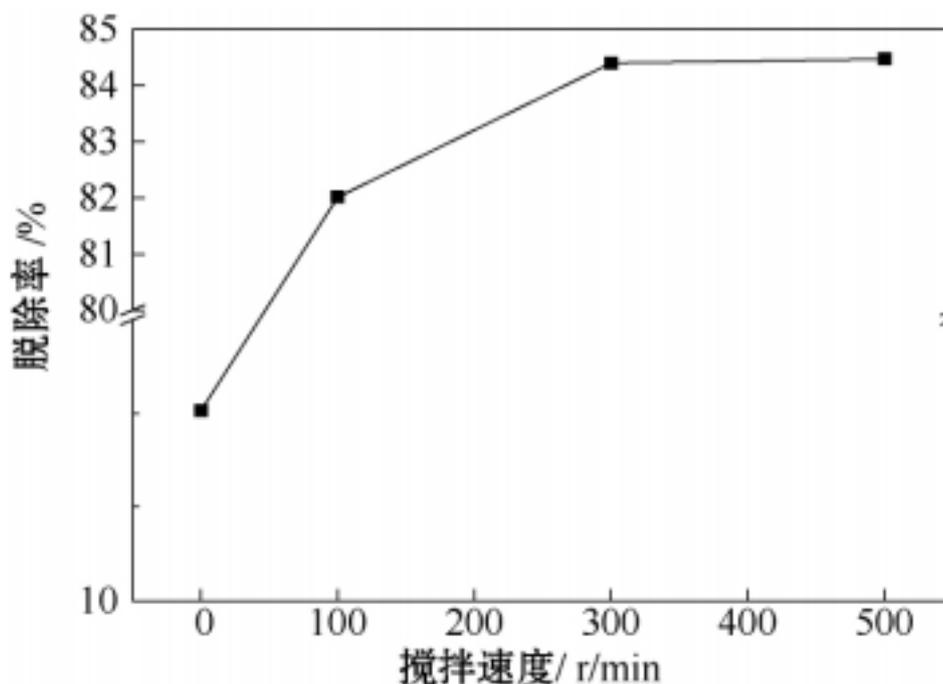
图 4 液固比与 K 脱除率的关系曲线

Fig 4 Relationship between liquid-solid ratio and potassium removal rate

2.1.3 搅拌速度对 K 脱除率的影响

搅拌速度对 4 号电场烧结除尘灰碱金属脱除的影响如图 5 所示。由图 5 可知，当搅拌速度为 0 r / min 时，即直接将除尘灰浸于水中，只有与水接触的除尘灰存在碱金属 K 的浸出溶解，因此 K 脱除率极低为 16.77%；增大搅拌速度至 100r / min 时，由于与水存在一个相对较大的混匀，与水接触的除尘灰量较大，浸出溶解的 K 也相对较多，因此浸出率存在较大增幅；随着搅拌转速的增

加，除尘灰与水接触的更加均匀，灰中的 K 尽数溶解于水中，继续增大搅拌速度为 300 和 500r / min 时，K 脱除率基本稳定在 84.40% 左右，这说明试样除尘灰中碱金属已经基本浸出完成。因此，适宜的搅拌速度为 300r / min。



水浸条件：温度 20℃，液固比 5:1，搅拌时间 20 min。

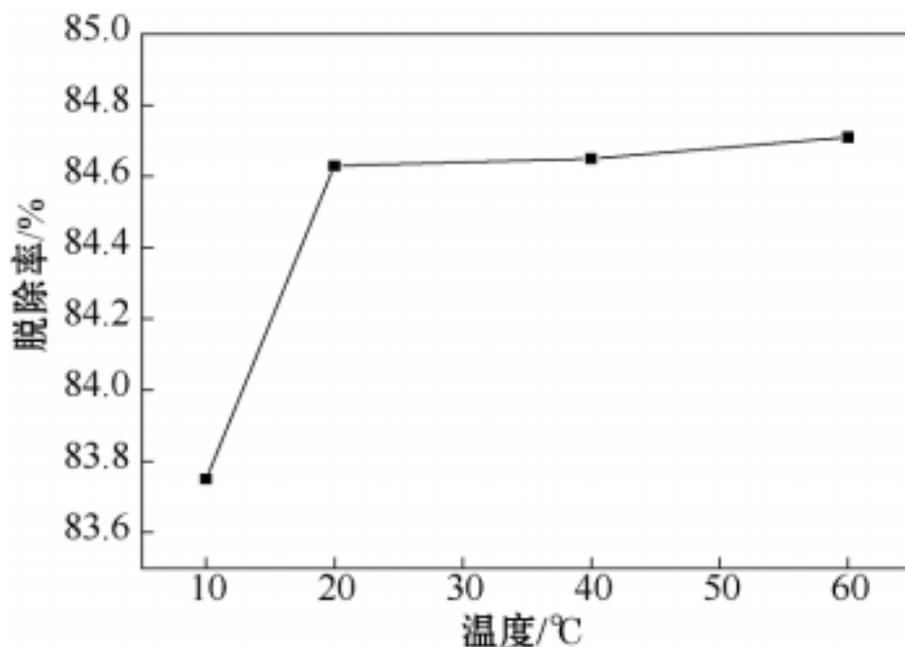
图 5 搅拌速度与 K 脱除率的关系曲线

Fig 5 Relationship between stirring speed and potassium removal rate

2.1.4 温度对 K 脱除率的影响

温度对 4 号电场烧结除尘灰碱金属脱除的影响如图 6 所示，由图可得，K 脱除率随温度的升高而变大，从动力学角度来说吸热反应过程中温度升高有利于反应的进行，本研究中的浸出体系在温度升高的情况下碱金属 K 更容易浸出，K 脱除率与温度并非线性关系。当温度较低为 10℃ 时脱除率较低仅为 82.75%；随着温度的升高浸出体系中分子运动加剧，使得搅拌的更充分，水与除尘灰的接触更为紧密，当温度达到 20℃ 时脱除率达到较大值 84.63%，继续升高温度，考虑浸出平衡的原因，K 脱除率增加幅度不明显。因此，适宜的浸出温度为 20℃。（见下页图 6）

通过对水洗条件进行单因素实验，确定 4 号电场除尘灰水洗条件为：浸出时间 20min，液固液比 5:1，搅拌速度 300r / min，温度 20℃。此条件下得到碱金属 K 的浸出率为 90.26%。



水浸条件:时间 20 min,液固比 5:1,搅拌速度 500 r/min。

图 6 搅拌温度与 K 脱除率的关系曲线

Fig 6 Relationship between stirring temperature and potassium removal rate

2.1.5 二次浸出对 K 脱除率的影响

最佳水洗条件下,碱金属 K 的浸出率为 90.26%,浸出渣中 K 质量分数为 9.74%,碱金属浸出不充分,具有再次浸出价值。因此,考虑对 4 号电场除尘灰进行二次浸出实验。在 Zhang 等人^[19]等研究中发现由于使用回收滤液做浸出可显著降低粉尘的浸出率,建议不回收浸出液,所以二次浸出依然选择清水做浸出实验,得到浸出渣主要化学成分如表 3 所示。由表 3 可知,一次浸出后浸出渣中 K 质量分数为 9.74%,经二次浸出后浸出渣中 K 质量分数显著降低至 0.62%。因此,对 4 号电场除尘灰做 2 次浸出处理可以有效地脱除其中碱金属元素,得到富含碱金属 K 的浸出液。考虑 3 号、4 号电场除尘灰成分含量大致相同,所以对 3 号、4 号电场除尘灰做相同二次浸出处理。(见下页表 3)

2.1.6 高碱金属含量电场除尘灰浸出渣利用

3 号、4 号电场除尘灰经二次浸出后,浸出渣铁品位达 35.19%和 20.86%,重金属 Pb 质量分数超过 10%,碱金属 K、Na 质量分数为 0.6% 和 0.3%左右,浸出渣成分与付志刚^[20]在氧化铝提

表3 3号、4号电场浸出渣主要元素含量(质量分数)与浸出次数的关系

| 种类 | 水洗次数 | Fe | K | Na | Cl | Zn | Pb |
|---------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| 3号电场除尘灰 | 一次水洗 | 31.32 | 3.46 | 1.09 | 7.43 | 0.27 | 8.58 |
| | 两次水洗 | 35.19 | 0.66 | 0.33 | 3.47 | 0.39 | 10.86 |
| 4号电场除尘灰 | 一次水洗 | 17.31 | 9.74 | 0.58 | 6.53 | 0.19 | 12.84 |
| | 两次水洗 | 20.86 | 0.62 | 0.31 | 3.34 | 0.35 | 14.50 |

取研究中原料的成分类似,所以3号、4号电场除尘灰经水浸脱除碱金属后可以作为火法回收氧化铅的原料。

2.2 高铁含量1号、2号电场除尘灰回收利用

2.2.1 1号、2号电场除尘灰浸出

在浸出时间10min,液固比5:1,搅拌速度300r/min,温度为20℃条件下得到浸出渣主要化学成分如表4所示。由表4可得,在此条件下1号、2号电场除尘灰一次浸出后,浸出渣中碱金属K质量分数为0.1%左右,碱金属K脱除率达99.9%。因此,1号、2号电场除尘灰通过一次浸出可将其中K几乎完全脱除。

表4 1号、2号电场除尘灰浸出渣成分化学分析(质量分数)

Table 4 Chemical analysis of leaching slag composition of No. 1 and No. 2 electrical precipitator dust %

| 种类 | Fe | K | Na | Cl | Zn | Pb |
|---------|-------|------|------|------|------|------|
| 1号电场除尘灰 | 47.51 | 0.10 | 0.01 | 0.35 | 0.04 | 0.14 |
| 2号电场除尘灰 | 43.90 | 0.15 | 0.07 | 0.27 | 0.09 | 0.57 |

2.2.2 1号、2号除尘灰浸出渣利用

1号、2号电场除尘灰经水洗浸出后得到浸出渣中铁品位为47.51%和43.90%,碱金属K、Na质量分数为0.1%左右,重金属Pb质量分数也相对较低为0.14%和0.57%,可返回烧结配矿系统。将1号、2号电场除尘灰浸出渣按一定配比返回烧结,烧结杯实验得到表5数据。配比1%和2%的除尘灰浸出渣后对烧结矿转鼓强度有所影响,转鼓强度分别由70.53%降到68.63%和66.57%。对于配比1%除尘灰浸出渣而言,对烧结指标影响相对较小。因此,可以配入不超过1%的浸出渣到烧结工序。

表 5 烧结矿质量指标参数

Table 5 Index parameters of sinter quality

| 种类 | 垂直烧结速度 / (mm·min ⁻¹) | 固体燃耗 / (kg·t ⁻¹) | 利用系数 / (t·m ⁻² ·h ⁻¹) | 成品率 / % | 转鼓强度 / % |
|--------------|----------------------------------|------------------------------|--|---------|----------|
| 基准 | 21.28 | 68.20 | 2.32 | 75.85 | 70.53 |
| 添加 1% 除尘灰浸出渣 | 21.60 | 67.94 | 2.34 | 76.91 | 68.53 |
| 添加 2% 除尘灰浸出渣 | 21.33 | 67.85 | 2.20 | 73.98 | 66.57 |

2.3 KCl 的回收

4 号电场除尘灰一次浸出最佳条件得到的浸出液的主要成分为 K、Na、Cl，其中 K 质量浓度 26.98g / L、Na 质量浓度 8.9g / L、Cl 质量浓度 36.27g / L。采用水浴蒸发分别将溶液体积浓缩至 45%、40%、35%、30%，得到的 KCl 晶体主要成分如表 6 所示，KCl 晶体纯度与回收率如图 7 所示。

表 6 不同蒸发浓缩体积比下的 KCl 晶体主要成分
(质量分数)

Table 6 Main components of KCl crystals under different evaporative concentration ratios

| 浓缩体积比 | K | Na | Cl |
|-----------|-------|------|-------|
| 蒸发浓缩至 30% | 47.25 | 1.62 | 47.26 |
| 蒸发浓缩至 35% | 47.89 | 1.43 | 48.59 |
| 蒸发浓缩至 40% | 48.90 | 1.08 | 47.73 |
| 蒸发浓缩至 45% | 50.43 | 1.14 | 46.63 |

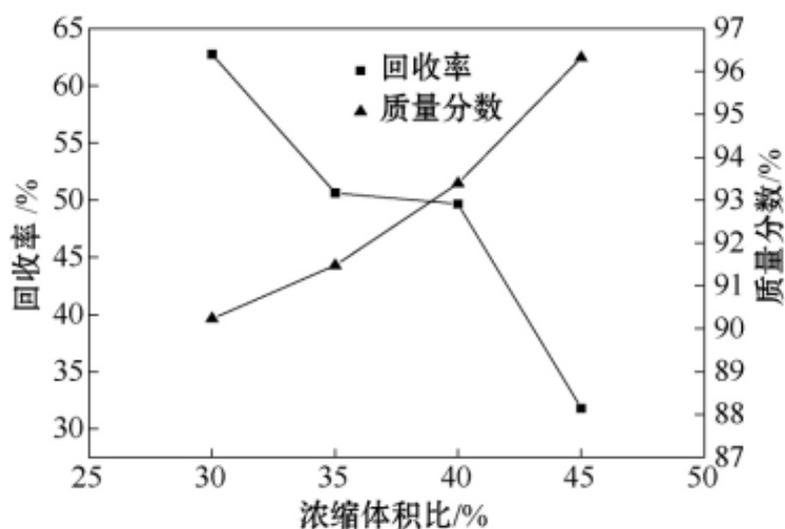


图 7 不同浓缩体积比下 KCl 回收率与含量关系

Fig 7 Relationship between KCl recovery rate and KCl content at different concentration volume ratios

由表 6 和 图 7 可知,随着浓缩体积比的增大, KCl 的回收率逐渐减小,而纯度呈现上升的趋势。因为浓缩体积比越小, KCl 晶体析出的量就越多,同时杂质晶体 (NaCl) 析出的量也会增加,因此纯度就会下降。浓缩体积比由 30% 增大到 40% 时, KCl 产品质量分数从 90.24% 增至 93.39%,当浓缩体积比由 40% 增加至 45% 时, KCl 产品质量分数从 93.39% 上升到 96.32%。综合考虑,将浓缩体积比确定为 40%,此时 KCl 产品质量分数 93.39%,回收率约为 50%。本文中所涉及的 KCl 产品回收率单指水浸之后根据 KCl、NaCl 的溶解度不同进行的一次回收 KCl 产品,剩余浸出液为 KCl—NaCl 的混合溶液,实际生产过程中 KCl 的回收为一个循环的系统,将剩余 KCl—NaCl 混合溶液继续返回循环系统内,从而提高 KCl 的回收率。在 KCl 产品回收循环系统中,溶液里的 NaCl 含量会不断提高,当达到 NaCl 富集到一定程度时,将 NaCl 产品分离回收,后续将对 KCl—NaCl 混合溶液循环以及 NaCl 回收开展研究。

在浓缩比例在 40% 条件下得到的 KCl 产品的 SEM 图像如图 8 所示。结果表明, KCl 主要为针状和棒状形成存在,其尺寸范围为 10 ~ 200 μm ,且产品中 KCl 纯度较高,可作为生产钾盐的原料。

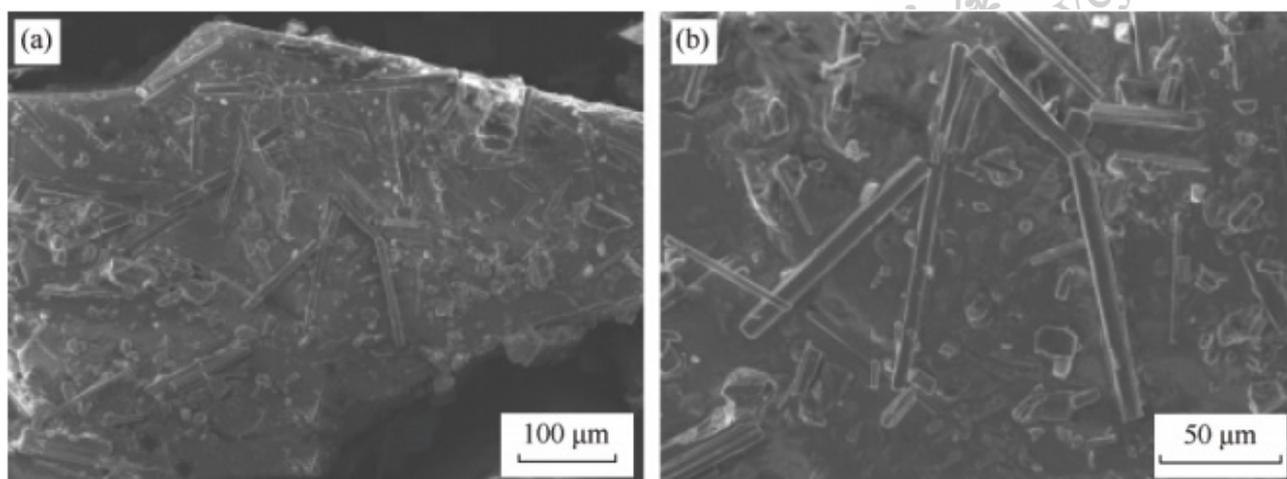


图 8 40% 浓缩体积比下 KCl 产品 SEM 图像

Fig 8 SEM image of KCl product at 40% concentration volume ratio

3 结论

(1) 1 号、2 号电场除尘灰在搅拌时间 10min,液固比 5 : 1,搅拌速度 300r / min,温度为 20℃ 的条件下,碱金属 K 的脱除率可达 99.9%。

(2) 3 号、4 号电场除尘灰在搅拌时间 20min,液固比 5 : 1,搅拌速度 300r / min,温度 20℃ 的条件下经两次浸出,碱金属 K 的脱除率约为 99.4%。

(3) 最佳水洗条件下得到浸出液回收 KCl,控制蒸发浓缩体积比为 40%,KCl 产品质量分数达 93.39%。

(4) 1 号、2 号电场除尘灰经水洗浸出后得到浸出渣中铁品位为 40% 以上,碱金属 K、Na 质量分数为 0.1% 左右,重金属 Pb 质量分数也相对较低为 0.14% 和 0.57%,可直接返回烧结工序;3 号、

4号电场除尘灰浸出渣中铁品位达20%，重金属Pb质量分数超过10%，碱金属K、Na质量分数为0.6%和0.3%左右，可以作为火法回收氧化铅的原料。

参考文献

- [1] 康凌晨, 张垒, 张大华, 等. 烧结机头电除尘灰的处理与利用 [J]. 工业安全与环保, 2015, 41 (3): 41.
- [2] 张梅, 付志刚, 吴滨, 等. 钢铁冶金烧结机头电除尘灰中氯化钾的回收 [J]. 过程工程学报, 2014, 14 (6): 979.
- [3] 郭玉华, 马忠民, 王东锋, 等. 烧结除尘灰资源化利用新进展 [J]. 烧结球团, 2014, 39 (1): 56.
- [4] 柏凌, 张建良, 郭豪, 等. 高炉内碱金属的富集循环 [J]. 钢铁研究学报, 2008, 20 (9): 5.
- [5] 杜光宝, 张梅, 郭敏. 电炉粉尘中锌金属回收的试验研究 [J]. 钢铁研究学报, 2010, 22 (10): 25.
- [6] 刘宪, 蒋新民, 杨余, 等. 烧结机头电除尘灰中钾的脱除及利用其制备硫酸钾 [J]. 金属材料与冶金工程, 2011, 39 (3): 40.
- [7] 王成立, 吕庆, 顾林娜, 等. 碱金属在高炉内的反应及分配 [J]. 钢铁研究学报, 2006, 18 (6): 10.
- [8] 马怀营, 裴元东, 潘文, 等. 烧结机头除尘灰特性及资源化利用进展 [J]. 中国冶金, 2018, 28 (6): 8.
- [9] 潘文, 吴铿, 赵勇, 等. 碱金属对铁氧化物气-固还原行为的影响 [J]. 钢铁, 2013, 48 (6): 7.
- [10] 余松, 赵宏博, 程树森, 等. 高炉内碱金属和碱金属氯化物对焦炭的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (5): 20.
- [11] 尉迟鹤鹏, 莫朝兴, 付忠旺, 等. 分段尝试法研究碱金属对铁氧化物还原的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2018, 30 (12): 949.
- [12] 张福利, 彭翠, 郭占成. 烧结电除尘灰提取氯化钾实验研究 [J]. 环境工程, 2009, 27 (S1): 337.
- [13] 钱峰, 于淑娟, 侯洪宇, 等. 烧结机头电除尘灰资源化再利用 [J]. 钢铁, 2015, 50 (12): 67.
- [14] 蒋新民. 钢铁厂烧结机头电除尘灰综合利用 [D] // 湘潭: 湘潭大学, 2010.
- [15] 王涛. 国外钢厂含锌粉尘的循环利用 [J]. 炼钢, 2002, 18 (5): 50.
- [16] Dutra AJB, Paiva PRP, Tavares L M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust [J]. Minerals Engineering, 2006, 19 (5): 478.

[17] Lanzerstorfer C, Steiner D. Characterization of sintering dust coeected in the various fields of the electrostatic precipitator [J]. Environmental Technology, 2016, 37 (12) : 1559.

[18] 邢宏伟, 李东亮, 张玉柱. 配加高磷铁矿的烧结杯实验 [J]. 河北冶金, 2012 (3) : 3.

[19] Zhang G , Guo Z C. Water leaching kinetics and recovery of potassium salt from sintering dust [J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2013, 23 (12): 3370.

[20] 付志刚. 钢铁冶金烧结灰中铅的浸取回收和一氧化铅的制备 [D] // 湖南: 湘潭大学, 2015.

钢渣和高炉渣微粉技术研究

仪桂兰 史永林

(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心 山西 太原 030003)

摘要: 本文研究了不锈钢渣、碳钢渣、高炉渣(水渣)的易磨性,研究了不锈钢渣微粉、碳钢渣微粉、水渣微粉的基本特性(包括活性、物相组成及颗粒形貌),并通过差热分析研究了不锈钢渣、碳钢渣、水渣微粉活性不同的机理。在此基础上,进行钢铁渣复合微粉的活性试验。试验表明:钢渣微粉、水渣微粉双掺制备钢渣-水渣复合微粉,实现了钢渣粉和水渣粉优势互补,并避免产生单独使用水渣粉和钢渣粉的缺点,可有效改善水泥性能,成为钢渣高附加值利用的主要方向。

关键词: 不锈钢渣; 碳钢渣; 高炉渣; 微粉

1 前言

在钢铁冶炼过程中,会产生大量的钢铁废渣,按来源不同,分为高炉渣(水渣)和钢渣。其中,每生产 1 t 铁产生 0.25 ~ 0.30 t 高炉渣,每生产 1 t 钢产生 0.15 ~ 0.20 t 钢渣。高炉渣和钢渣的不断积累会造成环境污染和资源浪费,建材行业是提高钢铁渣外循环的有效途径,它既减少了对环境的污染,又增加了建材行业“绿色”含量,对实现低碳经济,节约不可再生资源,促使钢铁企业可持续发展具有十分重要的意义。本文研究了钢铁渣的易磨性、钢渣微粉和水渣微粉的特性以及钢铁渣复合微粉的活性,为钢渣微粉利用提供了技术支撑。

2 试验原料化学成分

对不锈钢渣、碳钢渣、水渣原料进行了成分分析,见表 1。由表 1 可知,碳钢渣碱度较高,不锈钢渣次之,水渣碱度最低。

表 1 化学成分分析表

| 序号 | 品名 | TFe | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | P | S | Cr | Ni | R |
|----|------|------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 水渣 | 1.04 | 31.3 | 11.4 | 40.3 | 7.11 | 0.01 | 0.86 | | | 1.29 |
| 2 | 碳钢渣 | 16.9 | 13.7 | 4.72 | 44.2 | 9.57 | 0.43 | 0.16 | | | 3.23 |
| 3 | 不锈钢渣 | 2.67 | 26.6 | 3.27 | 52.4 | 8.25 | 0.01 | 0.31 | 0.62 | 0.13 | 1.97 |

3 钢渣、水渣易磨性试验

为研究球磨时间对不同冶金渣比表面积的影响,分别对不锈钢渣、碳钢渣和水渣进行球磨,每次球磨量 2 kg,球磨时间为 1 h、2 h、3 h、4 h,每球磨 1 h 进行一次磁选,然后再进行球磨。对于钢渣的易磨性主要通过钢渣微粉比表面积大小来衡量,比表面积测试结果如图 1 所示。

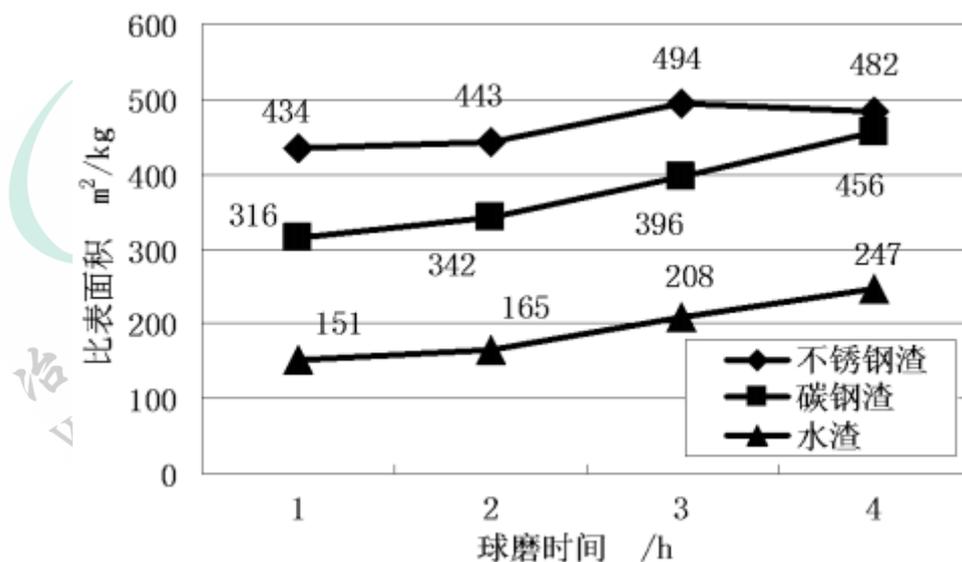


图 1 球磨时间与比表面积的关系图

由图 1 可知：（1）不锈钢渣易磨性较好，球磨 1 h 比表面积达 400 m²/kg，但球磨过程中有团聚现象。（2）碳钢渣易磨性较差，球磨 4 h 后比表面积达 400 m²/kg。（3）水渣易磨性也较差，球磨 4 h，比表面积达 247 m²/kg。

4 钢渣微粉、水渣微粉特性研究

4.1 不锈钢渣、碳钢渣、水渣微粉的活性

4.1.1 不锈钢渣、碳钢渣、水渣微粉的活性试验

对不同球磨时间的水渣、碳钢渣、不锈钢渣微粉进行活性试验，按照 GB/T17671-1999 水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）进行试样的配料、搅拌、成型、养护和测试。7 天活性试验结果见表 2。

表 2 试验结果表

| 球磨时间 / (h) | 活性 (%) |
|------------|--------|
| 水渣 1 h | 73.4 |
| 水渣 2 h | 76.3 |
| 水渣 3h | 80.6 |
| 水渣 4 h | 87 |
| 碳钢渣 1 h | 40.8 |
| 碳钢渣 2 h | 42.2 |
| 碳钢渣 3 h | 43.2 |
| 碳钢渣 4 h | 51.6 |
| 不锈钢渣 1 h | 33.8 |
| 不锈钢渣 2 h | 34.1 |
| 不锈钢渣 3 h | 35 |
| 不锈钢渣 4 h | 34.5 |

从表 2 可知, 三种废渣的活性依次为: 水渣 > 碳钢渣 > 不锈钢渣。另外, 随着粉磨时间的延长, 活性增加。通过粉磨活性增加的主要原因是: (1) 细度降低, 颗粒粒径减小, 比表面积增加, 废渣颗粒“二次反应”的活性面扩大; 粉磨提高了废渣颗粒的球形度, 其“形态效应”和“微集料效应”得到了充分发挥。(2) 粉磨破坏了颗粒表面致密的外壳, 增加了活性硅铝的溶出, 有利于“活性效应”发挥; 颗粒在粉碎过程中, 部分外加能量转化为颗粒的表面能, 使表面呈现亚稳态, 增大了表面的反应活性。(3) 晶体结构的变化。在强烈的粉磨过程中, 粉体物料不同程度地发生晶格畸变, 晶粒尺寸变小, 结构无序化, 表面形成无定形或非晶态物质。(4) 硅铝键的断裂。尽管硅氧键和铝氧键的键能较大, 但不同晶面和晶向上的键能不同, 硅酸盐层与层之间的结合相对较弱, 因此, 键能较低的硅氧键和铝氧键在粉磨过程中可能被破坏, 从而增加了活性硅铝基团的数量。

4.1.2 不锈钢渣、碳钢渣、水渣微粉活性不同的机理

4.1.2.1 废渣在水泥中的作用机理

从活性试验不难看出, 三种废渣在水泥中的作用机理不同。

(1) 水渣: 水泥水化逐步释放出氢氧化钙, 增大了系统的碱度, 对水渣玻璃体产生腐蚀, 促使水渣玻璃体解离, 溶解出硅、铝阴离子团, 然后与溶液中的氢氧化钙发生如下反应:



水化硅酸钙和水化铝酸钙赋予材料胶结强度。水渣在水化过程中, 高聚合度的铝硅酸钙也可发生类似水泥矿物的水化。因此, 只要体系中具有促使玻璃体解离的 pH, 就能使水渣持续水化。其水化产物通过不断交织、填补空隙、缺陷和毛细孔, 对水泥石结构进行优化, 从而提高强度。

(2) 不锈钢渣: 尽管不锈钢渣含有与水泥相似的矿物, 但因过烧, 在 28 d 龄期内几乎不发生水化, 所以, 磨细的不锈钢渣更多是起到微集料的作用。从其矿物组成分析, 不锈钢渣填充的水泥混凝土应具有较好的后期强度, 因随着时间的延长, 不锈钢渣将在水泥水化完成后继续水化, 但这一时间是漫长的。

(3) 碳钢渣: 其活性发挥与不锈钢渣基本相同, 难以通过自身矿物的水化对胶凝材料的性能产生贡献。

从活性试验看出, 水渣活性发挥较好, 是良好的水泥掺合料; 而不锈钢渣和碳钢渣的活性很低, 尽管它们可能在中长期会表现出好的水化效果, 但可能又会通过体积膨胀破坏混凝土结构, 因此, 这是混凝土行业广泛使用水渣而较少使用钢渣的主要原因。

4.1.2.2 差热分析活性试样

对水泥、不锈钢渣、碳钢渣、水渣的活性试样进行差热分析, 如图 2 所示。

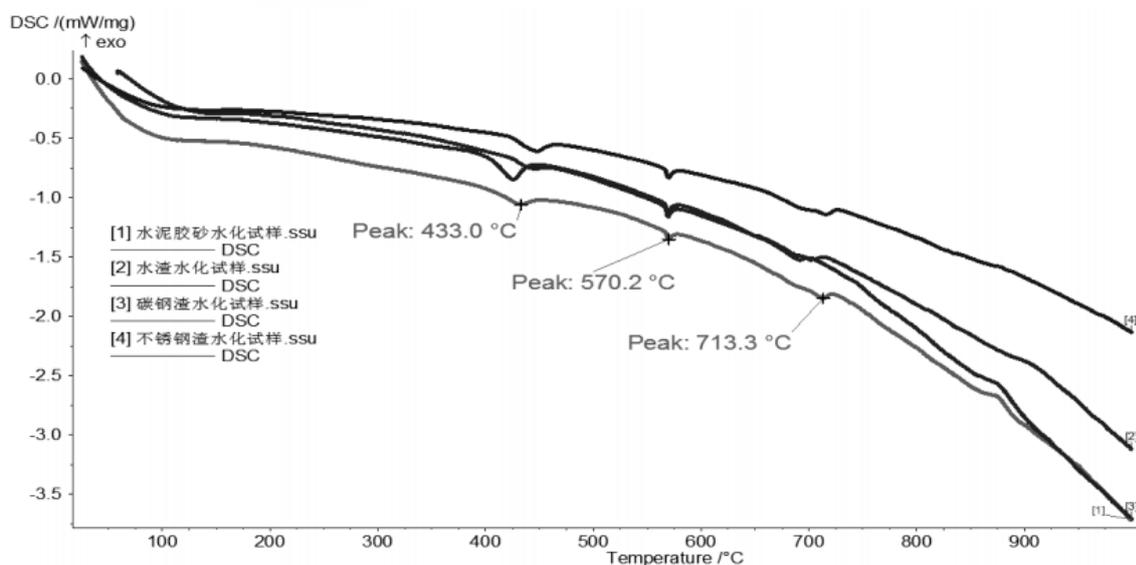


图 2 水泥及废渣活性试样的差热分析图

由图 2 可知，430 °C 为水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解吸热峰，570 °C 左右为水泥水化硅酸钙凝胶 (C-S-H) 及方解石的脱水吸热峰。水渣热分析曲线 430 °C 左右 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解吸热峰不明显，证明水渣活性试样中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 大部分与水渣中 SiO_2 、 Al_2O_3 发生二次水化反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙，从而提高其强度和活性。

4.2 钢渣微粉、水渣微粉 XRD 分析

对不锈钢渣微粉、碳钢渣微粉、水渣微粉进行 XRD 分析，如图 3、图 4 和图 5 所示。

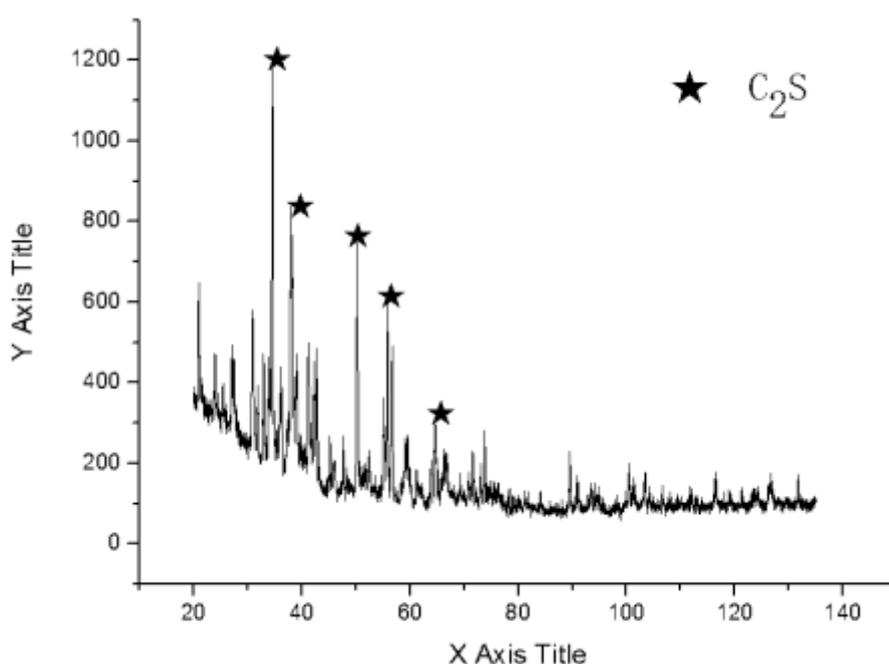


图 3 不锈钢渣微粉 XRD 分析图

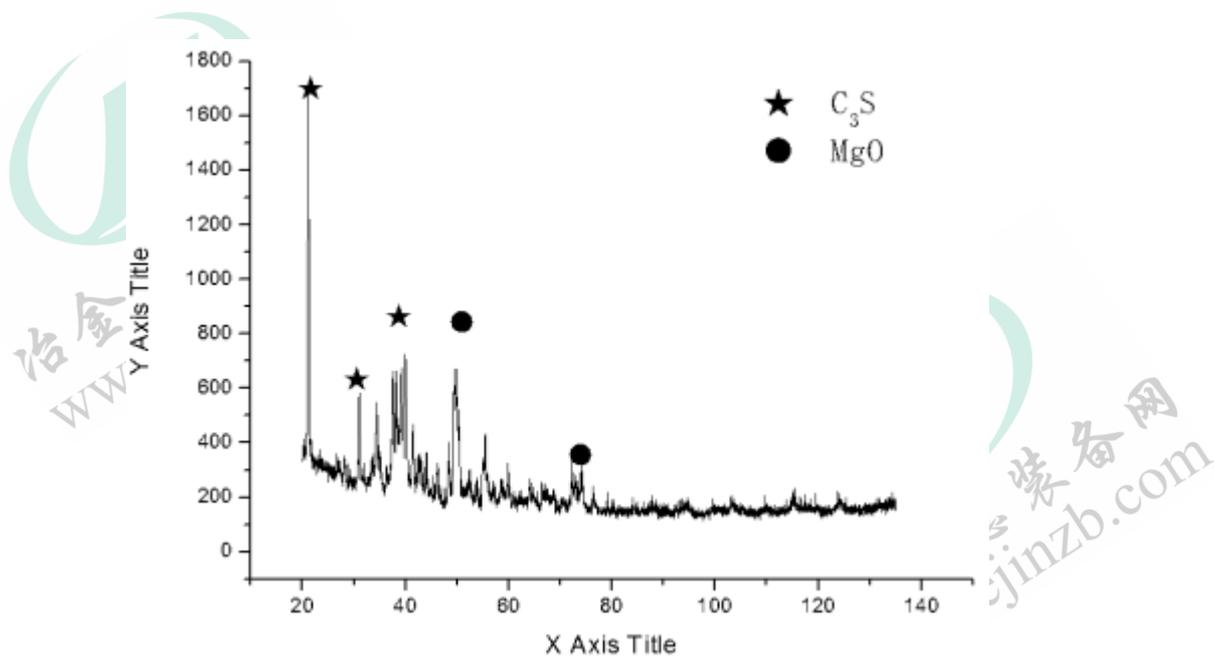


图4 碳钢渣微粉 XRD 分析图

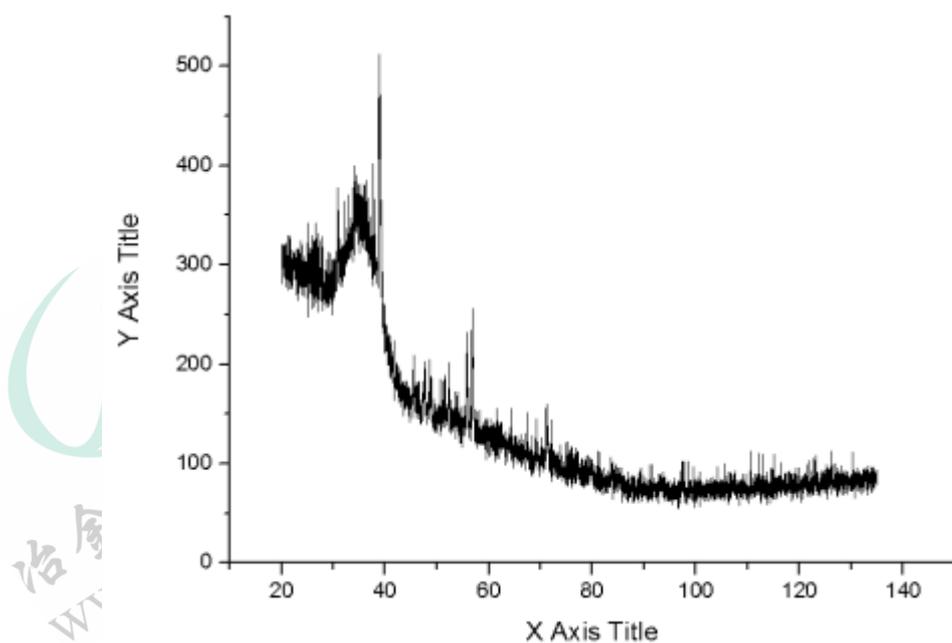


图5 水渣微粉 XRD 分析图

由图 3、图 4、图 5 可知，不锈钢渣微粉主要物相为硅酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)，碳钢渣微粉主要物相为硅酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)，水渣微粉主要为玻璃体。

4.3 扫描电镜分析钢渣微粉、水渣微粉的颗粒貌

利用扫描电镜进行钢渣微粉、水渣微粉的颗粒形貌分析，如图 6、图 7 所示。

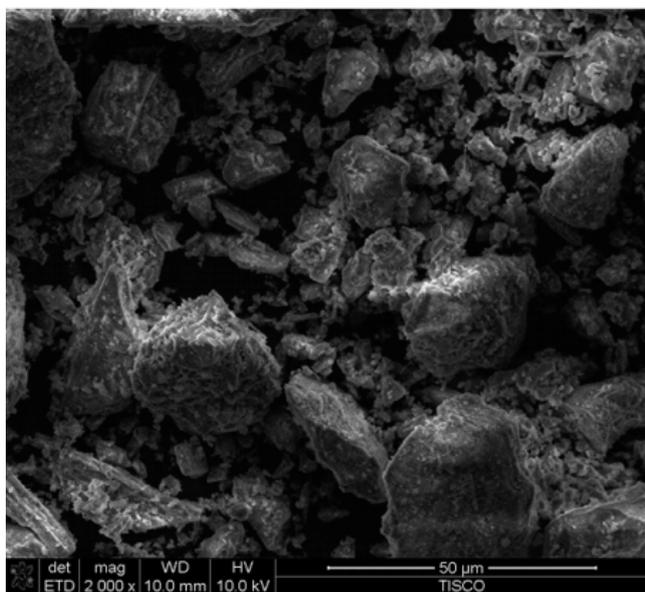


图6 钢渣微粉颗粒形貌图

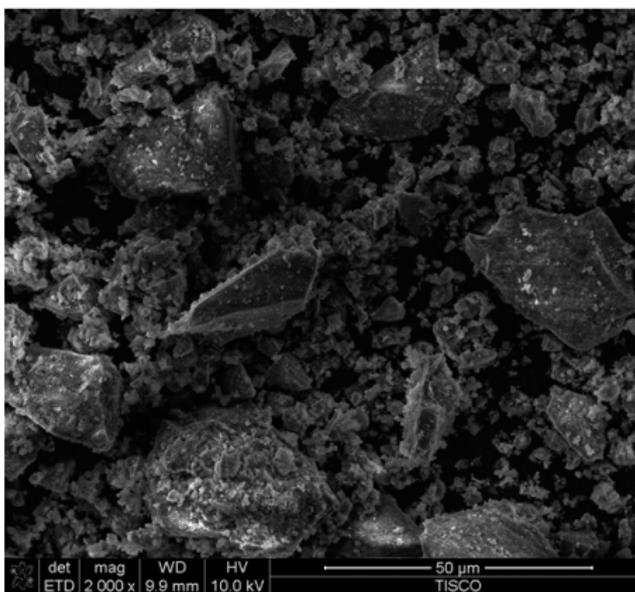


图7 水渣微粉颗粒形貌图

由图6可知，钢渣微粉微粒较为圆滑，呈球形，级配中颗粒约4 μm。由图7可知，水渣微粉颗粒带有棱角，形状不规则，级配中大颗粒（10 μm）和小颗粒（3 μm）较多，中间颗粒较少。

当钢渣微粉和水渣微粉掺合在一起时，钢渣微粉的粒径可以填补水渣微粉颗粒级配中断档的粒径范围，从而提高复合粉颗粒级配的连续性，有助于水化强度的形成。

4.4 钢渣微粉、水渣微粉的特性小结

4.4.1 钢渣微粉

（1）使混凝土液相碱度较高，钢筋表面钝化膜不易被破坏，改善了混凝土耐久性能；（2）凝结时间长，早期强度增长缓慢；（3）钢渣微粉微粒较为圆滑，呈球形，颗粒在4 μm左右。

4.4.2 水渣微粉

（1）使混凝土液相碱度相对较低，钢筋表面钝化膜相对易被破坏；（2）早期强度增长快，提高混凝土的密实性；（3）水渣微粉微粒带有棱角，形状不规则，级配中大颗粒（10 μm）和小颗粒（3 μm）较多。

4.4.3 钢渣 - 水渣复合微粉

（1）钢渣粉和水渣粉按一定比例复合成的钢铁渣粉，使混凝土液相碱度提高，为混凝土中的钢筋锈蚀提供更好的保护，降低钢筋锈蚀率。（2）水渣粉早期强度增长快，能提高混凝土的密实性，

避免单独使用钢渣粉导致的水泥凝结时间长、早期强度低等缺点。(3) 钢渣粉的粒径可以填补水渣粉颗粒级配中断档的粒径范围,提高了复合粉颗粒级配的连续性,有利于提高水化强度。(4) 水渣粉利用自身水化产生的收缩,降低体系因钢渣粉中 $f\text{-CaO}$ 、 $f\text{-MgO}$ 延迟膨胀造成开裂的风险。

5 钢渣——水渣复合微粉技术研究

钢铁渣复合粉活性试验方案见表 3。

表 3 钢铁渣复合粉活性的试验方案

| | 标准砂 | 钢渣粉 | 水渣粉 | 水泥 | 水 |
|------|------|-------|-------|-----|-----|
| 方案 1 | 1350 | 22.5 | 202.5 | 225 | 225 |
| 方案 2 | 1350 | 45 | 180 | 225 | 225 |
| 方案 3 | 1350 | 67.5 | 157.5 | 225 | 225 |
| 方案 4 | 1350 | 90 | 135 | 225 | 225 |
| 方案 5 | 1350 | 112.5 | 112.5 | 225 | 225 |

根据上述活性试验方案进行活性试验,试验结果见表 4。

表 4 钢铁渣复合粉活性的试验结果

| 方案 | 抗压强度 (MPa) | | 活性指数 (%) | | 级别 |
|------|------------|------|----------|-------|-----|
| | 7 d | 28 d | 7 d | 28 d | |
| 对比样 | 43.8 | 60.5 | 100 | 100 | |
| 方案 1 | 37.0 | 58.7 | 84.47 | 97.02 | S95 |
| 方案 2 | 33.4 | 55.9 | 76.26 | 92.40 | S85 |
| 方案 3 | 31.0 | 51.7 | 70.78 | 85.45 | S85 |
| 方案 4 | 27.9 | 48.4 | 63.70 | 80.00 | S75 |
| 方案 5 | 26.8 | 46.7 | 61.19 | 77.19 | S75 |

由表 4 可知,方案 1 钢渣粉:水渣粉 (1:9) 混合制成的复合微粉可达到 S95 级别要求;方案 2 钢渣粉:水渣粉 (2:8) 和方案 3 钢渣粉:水渣粉 (3:7) 混合制成的复合微粉可达到 S85 级别要求;方案 4 钢渣粉:水渣粉 (4:6) 和方案 5 钢渣粉:水渣粉 (5:5) 混合制成的复合微粉可达到 S75 级别要求。这都是利用了水渣与钢渣互相激发的原理,提高了钢渣微粉的活性。

6 结论

不锈钢渣易磨性较好,球磨 1h 比表面积达 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$,但球磨过程中有团聚现象;碳钢渣易磨性较差,球磨 4h 后比表面积达 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$;水渣易磨性也较差,球磨 4h,比表面积达 $247 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

三种废渣的活性依次为：水渣 > 碳钢渣 > 不锈钢渣。

活性试验表明，三种废渣在水泥中的作用机理不同：（1）水渣：水泥水化逐步释放出氢氧化钙，增大了系统的碱度，对水渣玻璃体产生腐蚀，促使水渣玻璃体解离，溶解出硅、铝阴离子团，然后与溶液中的氢氧化钙发生二次水化反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙，提高胶结强度。（2）碳钢渣和不锈钢渣：尽管钢渣含有与水泥相似的矿物，但因过烧，在早期内几乎不发生水化，所以，磨细的钢渣更多是起到微集料的作用。

不锈钢渣微粉主要物相为硅酸二钙($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)，碳钢渣微粉主要物相为硅酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)和氧化镁(MgO)，水渣微粉主要为玻璃体。钢渣微粉、水渣微粉双掺制备钢渣 - 水渣复合微粉，实现了钢渣粉和水渣粉优势互补，并避免产生单独使用水渣粉和钢渣粉的缺点，可有效改善水泥性能，成为钢渣高附加值利用的主要方向。

企业废气废水废渣废热的协同治理与无废建设实用技术探讨

刘晨

(斯普瑞喷雾系统(上海)有限公司 上海市松江工业区书林路 21 号 201611)

摘要: 钢铁焦化企业都涉及废气、废水、废渣、废热的处理和资源回收利用, 实践中感觉到, 单打独斗的治理很难治理彻底和经济、有效益, 按照国务院无废城市建设的理念, 本文探讨如何进行废气、废水、废渣、废热协同治理, 以便在现有工艺流程设备上通过加旁路、打补丁治理, 彻底以废治废治理污染的同时, 通过回收资源降低投资、成本, 增加效益。

关键词: 废气超低排放; 废水零排放; 余热回收利用

0 概述

我国人口众多、经济总量巨大, 几十年经济高速发展之下, 废水、废气、固废、废热等环境领域都积累了较多问题, 废气除尘、脱硫、脱硝, 还要脱 VOCs、控制臭氧、重金属、二噁英。没完没了, 废水处理投资、成本高, 还存在黑臭水体, 特别是上天的水汽没有任何标准约束, 垃圾、固废处理也是问题多多, 环境治理就是花钱的代名词, 环境治理已经成为国家、企业难以承受之重, 需要结合国情弯道超车, 多研发符合中国国情厂情的、成本低的、最好有效益的实用技术。以排放烟气除湿脱白深度治理为突破口, 尝试利用废气协同处理废水、废渣、废热。

1 参考案例

为便于说明, 这里介绍一个燃煤锅炉废气除湿脱白、深度净化改造案例。用户为江苏徐州的一家大型化工企业, 自备热电厂有两座 75 吨、一座 100 吨循环流化床燃煤锅炉两用一备, 配套两套湿法脱硫塔一用一备, 原有烟气达标净化流程是炉内脱硝、布袋除尘器和氨法脱硫, 2018 年进行超低排放改造, 增加了 SCR 脱硝、塔顶湿电。项目进行过程中, 地方政府要求进行烟气除湿脱白, 又在塔顶脱硫喷淋之后、湿电前增加了直接喷淋冷凝+混风脱白系统, 工艺流程如图 1 所示。(见下页图 1)

由于改造时间和投资限制, 全部利用了原有废气治理工艺流程和设备, 在湿法脱硫塔顶部补丁式新增直接喷淋冷凝区, 低温循环水喷到饱和湿烟气中, 吸收烟气中的水蒸汽和残留的污染物, 循环排水升温后通过空气换热器和冷却塔组合降温后循环使用, 通过除湿实现每年三季脱白, 还设置了一路热混风系统, 用混风使外排烟气成为干烟气, 实现了四季无白。

运行效果

项目于 2018 年 9 月底投入运行, 经过了两个冬季的运行, 验证了以下效果:

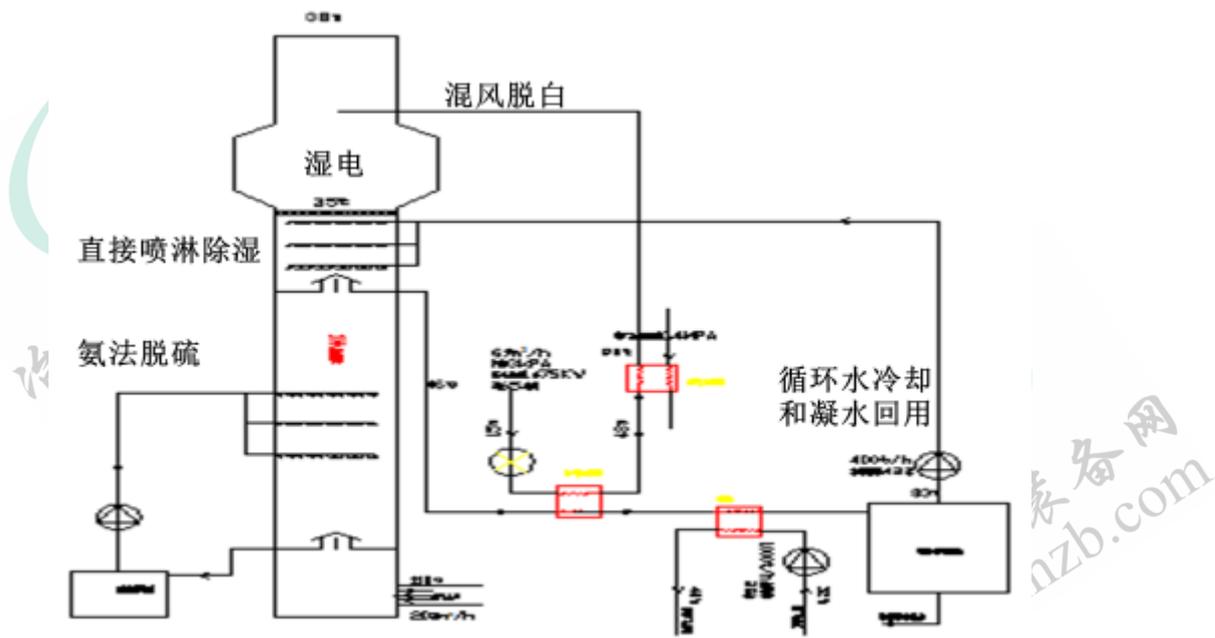


图 1 75、100 吨燃煤锅炉废气除湿脱白深度净化工艺流程

1.1 排烟四季无白

只需用肉眼观察，就可以发现改造后的排烟无白雾，即使冬季零下十几度也无白雾，参考现场照片 2，而且操作灵活，循环水流量、蒸汽加热都可以调节，运行成本很低。排烟无白很重要，无需检测也就不存在造假，监管部门和百姓用眼睛看就可以监督。也是因为这一点，2018 年底重污染天气，多家企业都被要求停限产时，该企业获得了停限产、环保督察豁免待遇，换句话说，废气排放达到这样的水平，企业无需为雾霾等大气重污染停限产，这就为企业的正常生产运营不受环保排放干扰创造了条件。



图 2 75、100 吨燃煤锅炉脱白改造后排烟四季无白

1.2 超洁净排放

通过长期在线监测，改造后排烟达到了超洁净排放，颗粒物 $\sim 2\text{mg}/\text{m}^3$ 、二氧化硫 $\sim 1\text{mg}/\text{m}^3$ ，氮氧化物 $\sim 20\text{mg}/\text{m}^3$ ，特别是排放烟气含湿量冬季只有3%、其它季节也在5%以下，可以根据需要，将排烟湿度降低到大气湿度，脱白深度净化后污染物排放浓度已经比烧天然气排烟还干净，这对于没有天然气来源、来源不足、或能源成本高的用户，增加了能源种类的选择灵活性，特别重要的是，这也证明我国包括散煤燃烧在内，煤炭清洁高效利用是可以实现的，甚至有效益，雾霾重污染频发的地方政府，可以在用煤、甚至用劣质煤的情况下，兼顾解决大气重污染和发展经济的矛盾，不必非要急于进行能源结构调整。

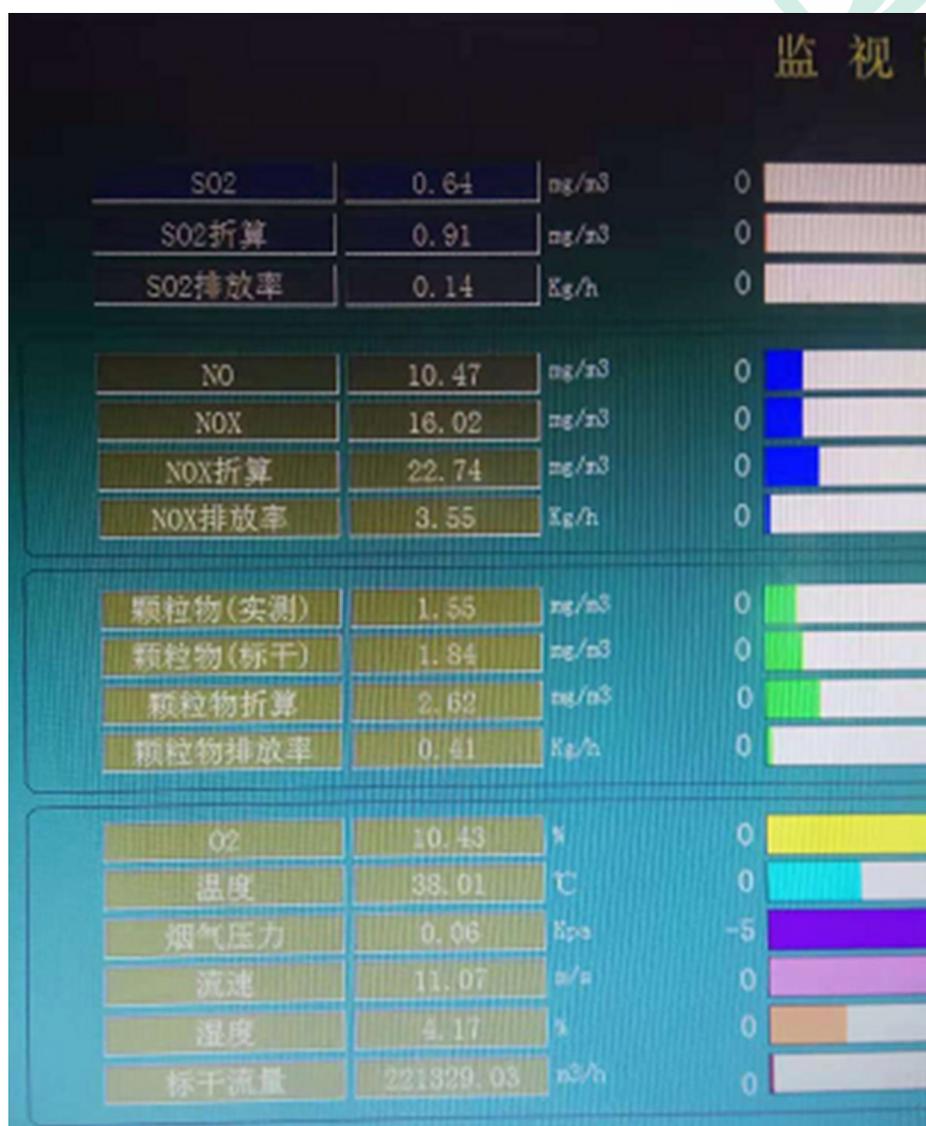


图 3 75、100 吨燃煤锅炉烟气超洁净排放

1.3 减少溶解盐排放

超低排放后白烟主要是水蒸汽、还是有污染物，已经成为我国大气雾霾治理技术选择的三叉路口。

我们对烟气冷凝水进行了采样和检测，凝水中溶解盐含量从 5480 降低到 271mg/L，如图 4 所示，去除率 95%，COD、重金属等其它污染物浓度也都有所减少。这做证据之一，证明超低排放后的白烟不是干净的水蒸汽，残留 70 余种污染物，更关键的是，现在的超低排放在线监测不测溶解性颗粒物，废气除湿脱白、深度净化是我国大气治理解决雾霾的必由之路，也是对超低排放标准、监测漏洞一个必不可少的补丁措施，而且凝水质接近新水，可以不处理、或简单处理后顶替新水回用，更重要的启示是，实现超低排放的工艺设备不必像电力行业那么复杂，完全可以用简单实用技术实现，以降低投资和成本。

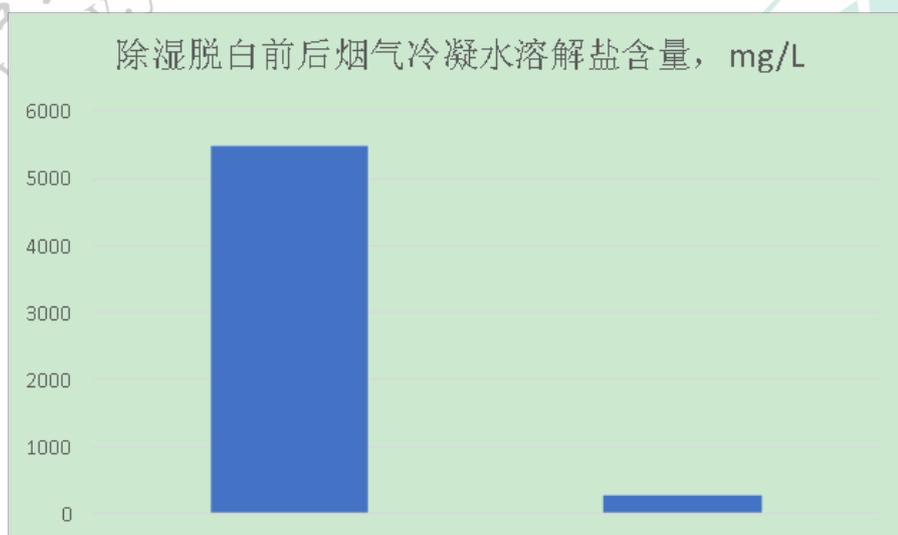


图 4 燃煤锅炉烟气脱白前后凝水溶解盐变化

2 废气、废水、废渣、废热的协同治理

案例实践证明，各种废气可以通过打补丁、走旁通的方式实现超低排放，并且除湿脱白阻隔了废水污染物向大气转移，可以利用废气中的余热和残余氧协同治理废水，减少废水排放量和循环利用成本，废渣则可以转化为废水、废气的治理，参考图 5。

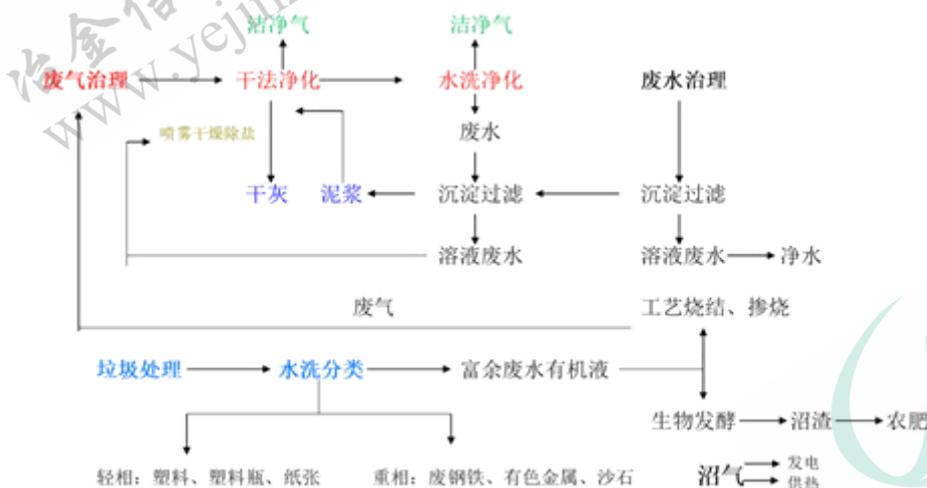


图 5 废气、废水、垃圾、废热的协同治理工艺路线

2.1 废气超低排放技术选择

我国电力行业已经实现了废气超低排放，目前正在推进钢铁、焦化等非电行业超低排放，实现重点行业、最终实现包括餐饮油烟在内的所有人为排放废气的超低排放，非电行业实现超低排放采用什么技术，需要不断实践探索和优化提高。从案例看出，增加烟气除湿脱白深度净化不仅与超低排放不矛盾，反过来可以大幅简化超低排放的工艺流程和设备选择。利用原有设备打补丁、或旁通方式改造是可行的，比如除尘，只需增加喷淋洗涤就可以协同达到 10、5mg/m³，需要的话，在喷淋后增加湿电。喷淋冷凝具有深度脱硫效果，脱硝采用氧化脱硝，实现低温脱硫脱硝除尘脱白超洁净排放一体化，有条件时还可以选用干法脱硫脱硝除尘一体化技术，以节能降低成本。

2.1.1 除湿脱白

各种烟气净化优先采用干法、半干法有其优势，没有循环水系统，也不必过于强调干法，因为干法虽然不增加烟气水份，但不能去除原始烟气中水蒸汽，难以实现低温余热极限回收，而多数烟气原始水份含量可达 5-70%，比如烧结机头烟气含水分 10%、焦炉烟道气含水分 20%、高炉冲渣、转炉焖渣、连铸二冷蒸汽含水分 70%，采用喷淋除水蒸汽的同时，可以实现除尘、脱硫、脱硝的超低排放和低温余热全热回收。

2.1.2 总量减排

通过工序内、工序间、甚至企业间系统优化，将本系统的、相临系统的烟气相互循环利用，通过减少烟气排放总量减少污染物排放总量，节能和资源回收利用，最终可以减排二氧化碳，实现排烟近零排放。

3 焦化企业如何进行废气废水废渣废热的协同治理

这里以焦化企业为例，从焦化废水开始，探讨如何进行协同治理。

3.1 焦化废水的来源和种类

焦化废水是指煤炼焦、煤气净化、化工产品回收和化工产品精制过程中产生的废水，属于有毒有害、难降解的高浓度有机废水。按照平均每生产 1 吨焦炭产生 1.5 吨废水估算，我国焦化行业每年产生焦化废水产生量超过 6 亿吨，经过蒸氨等预处理、生化处理后，在湿熄焦、或高炉转炉渣处理中利用，或进一步深度处理在做为循环水的补充水，最终均以水蒸汽形式排入大气。焦化废水主要来源于炼焦煤中的水分，是煤在高温干馏过程中随煤气溢出，在煤气冷却、净化过程中产生的。焦化废水主

要包括以下种类：

脱硫废液：焦炉煤气和烟道气脱硫过程中产生的废水

剩余氨水：桥管荒煤气氨水喷淋降温后，分离出焦油渣和焦油后的焦炉荒煤气冷凝液，是焦化废水最主要的部分，也是成分极其复杂、含有几十种污染物的世界上最难处理废水

其它焦化废水：化产废水、循环冷却系统排污水、除尘废水、生活废水等。

3.2 低成本无害化处理技术途径

独立焦化企业可以采用图 6 所示的低成本处理途径，简单介绍如下：

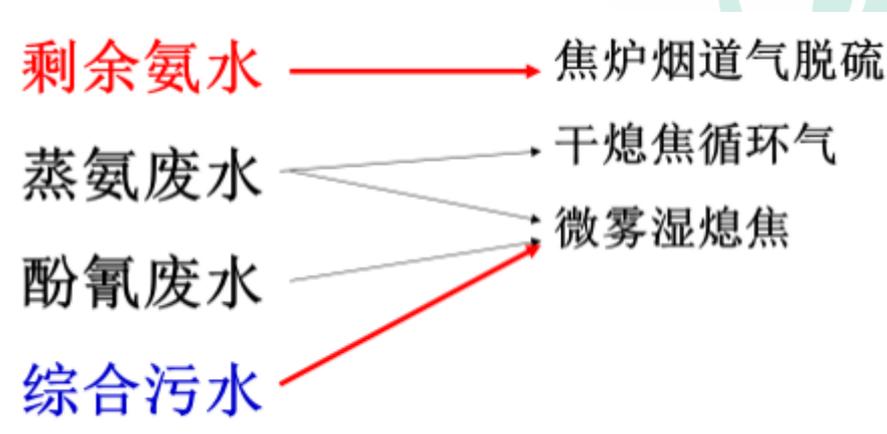


图 6 独立焦化企业焦化废水低成本无害化处理途径

3.2.1 剩余氨水用于烟道气脱硫脱硝

剩余氨水在蒸氨前引出，预处理除油和悬浮颗粒物后，喷入到烟道气中，利用剩余氨水中的氨脱除硫化物，氮氧化物首先通过低氮燃烧减量，再通过低温氧化，通过碱液吸收，最后用循环水喷淋冷凝除湿，回收烟气中的凝水直接回用、至少可以大幅简化水处理流程和成本。相当于一次性投资，解决了除尘、脱硫、脱硝、脱白、焦化废水处理等多个问题，闲置出来的废水处理设施可用于处理生活污水为城市服务，此项应为首选技术。

3.2.2 在干熄焦循环气中处理

干熄焦锅炉出口循环氮气还有 150-170℃ 余热，将蒸氨废水喷入循环氮气中，利用余热热解酚氰类 COD 污染物，再喷淋回收凝水，残余有机污染利用红焦余热彻底热解，低成本处理蒸氨废水，又不降低干熄焦蒸汽产量。此项改造可以旁通布置，对于干熄焦运行不会产生影响，改造实施容易。

3.2.3 微雾湿熄焦中处理废水

我国还有一些湿熄焦系统，属于国家淘汰技术，熄焦后焦炭有红焦的同时，水份仍高可达 10%，降低焦炭售价和强度，特别是环保开始要求熄焦循环水须进行处理后才能回用，熄焦产生的大量白雾也需要除湿脱白，又需增加投资和成本。我们在研究利用现有湿焦车、熄焦塔的情况下进行局部改造，改变熄焦的喷水方式，通过焦车底部向红焦内喷细水雾，实现喷焦化废水（蒸氨废水、浓盐水）水 100% 蒸发，低成本少投资处理焦化废水，焦炭含水接近干熄焦，排蒸汽温度高可以回收余热，最后喷淋回收凝水，不需要处理循环水。

焦化废水在钢联企业的低成本处理途径如图 7 所示，有更多的选择途径，首选应该是高炉渣处理，特别是综合污水处理厂的浓盐水，结合高炉渣处理工艺改进行废水处理。世界上高炉渣主要处理技术是采用水冲渣，水冲渣的问题很多，粒渣水分高 15-25%，还得烘干，处理吨渣消耗吨水，其中大部分通过蒸汽上天，通过高炉冲渣水回收余热仅有渣余热的 10%，余热品质低、回收利用问题多、冲渣蒸汽需要消白。

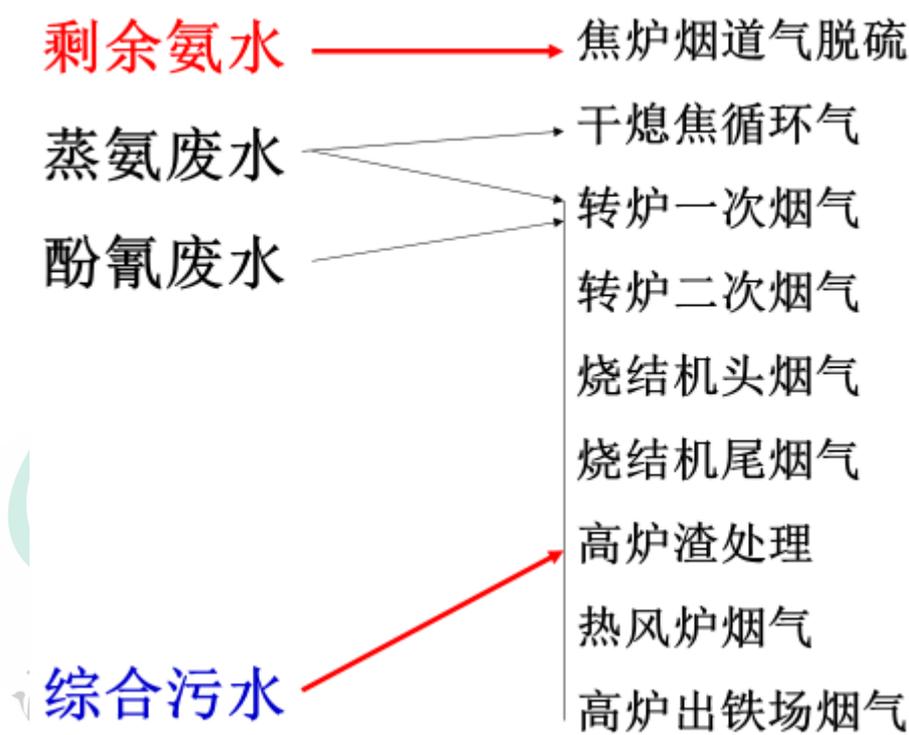


图 7 焦化废水在钢铁联合企业的低成本处理途径

我们在研发采用喷雾干燥技术进行高温熔渣粒化，处理焦化废水的同时，没有循环排水，高炉渣含水率低，排烟温度高，便于回收利用，最后通过喷淋回收凝水、低温余热。此项改造可以利用现有的干渣处理系统改造，原水冲渣系统完整保留，用户无风险、改造时间短。

3.3 参考案例

近几年，国内多家公司进行了焦化废水低成本处理和回用的研究和实践，简要分享两个。

3.3.1 剩余氨水用于烟道气脱硫

用户 4.3 米焦炉用剩余氨水进行烟道气脱硫除尘改造，以解决烟道气脱硫和除尘，同时处理利用了剩余氨水，不用外购脱硫剂、也无需处理脱硫产物，还节省了焦化废水蒸氨、生化处理成本。排放烟气达到了颗粒物、二氧化硫超低指标。系统自 2016 年起一直在运行，需要增加脱硝和喷淋除湿脱白、回收凝水的升级提高。

3.3.2 转炉除尘半干法处理焦化生化出水

用户三座 180 吨炼钢转炉半干法一次除尘系统中处理和利用焦化废水的工艺流程如图 8 所示，将焦化生化出水通过水泵和管道输送到炼钢厂的蓄水池，除尘蒸发冷却塔的供水泵增加一路焦化生化水供水，原供水管路保留，两者切换使用，优先处理利用焦化废水和综合污水处理厂中水。企业采用这种方式，最终低成本实现的全公司废水零排放，收到地方环保部门的赞扬。

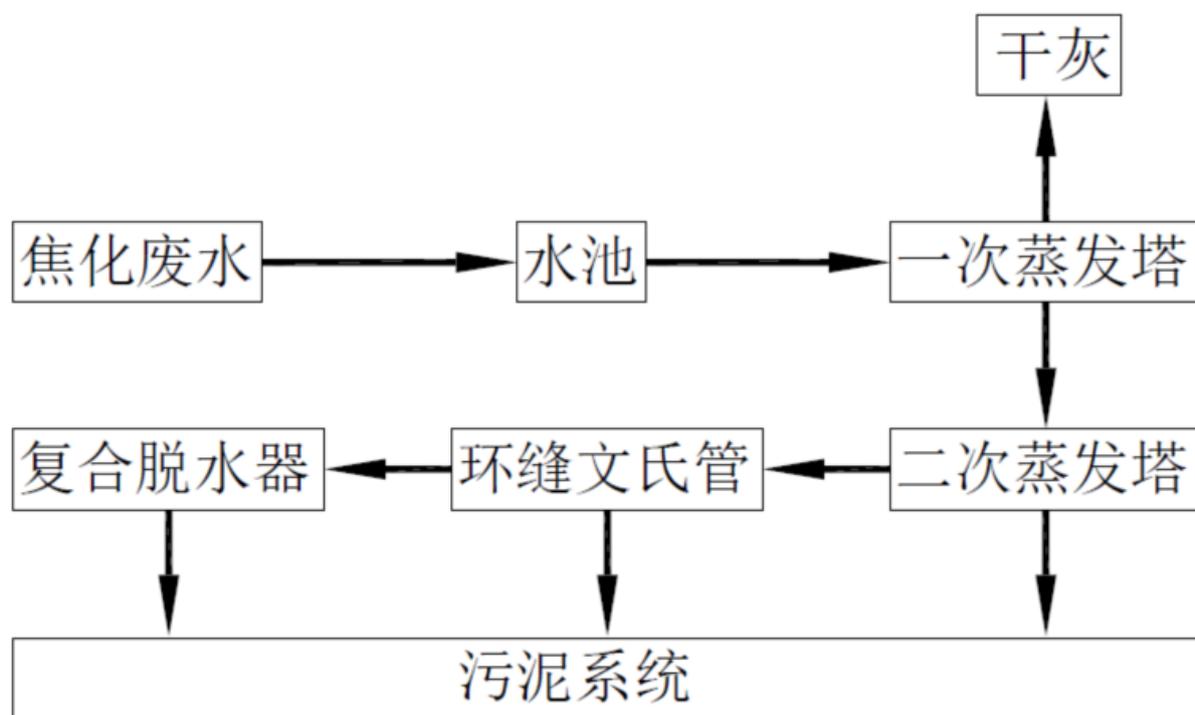


图 8 转炉一次半干法除尘系统处理利用焦化废水工艺流程

转炉吹炼期间用双流体喷枪将焦化废水雾化为细水雾，与转炉高温烟气接触后瞬间闪蒸为干蒸汽，用蒸发冷却塔出口设定温度自动调节喷水量，以确保 100% 蒸发。转炉粉尘含有的生石灰粉等碱性成分会中和焦化废水中的酸性成分，并迅速被喷雾干燥成盐，随粗干灰一起去除。焦化废水中的有机成分、氰化物等有害成分会被高温烟气热解、热氧化成二氧化碳、氮气和水分。

与干法不同，半干法有二次蒸发洗涤、环缝文氏管洗涤等多级洗涤，可以将残余有机、有害成分

洗涤吸收到循环排水中，通过循环水稀释和中和吸收，确保污染物不转移到大气中。

项目从2016年10月开始一直使用，分别通过了企业环保、地方环保、第三方检测，实现了整个企业的低成本“废水零排放”。下步升级目标是通过干灰和泥浆造球直接回转炉，实现转炉除尘浊循环水处理系统的停用，以降低成本。

3.4 利用烟气处理废水的原理

研究表明，采用高温热解和热氧化焚烧后再急冷的方式^[3]处理焦化废水等有机、有毒、含盐废水能最彻底地实现废水的无害化，属于焦化废水深度处理的方法之一，而采用燃料焚烧，除了焚烧炉外，还要配备余热回收利用、急冷、除尘、脱硝、脱硫等设备，设备投资、运行成本均高。利用各种高温、含氧烟气消纳和处理焦化废水同步解决了运行成本和投资高的难题，主要相关反应参考如下反应式^[1]：

- 1) 酚： $C_6H_6O + 7O_2 = 6CO_2 \uparrow + 3H_2O + \Delta Q$
- 2) 苯： $C_6H_6 + 15/2O_2 = 6CO_2 \uparrow + 3H_2O + \Delta Q$
- 3) 氨： $2NH_3 + 7/2O_2 = 2NO_2 \uparrow + 3H_2O + \Delta Q$
- 4) 硫化氢： $2H_2S + 3O_2 = 2SO_2 \uparrow + 3H_2O + \Delta Q$
- 5) 氰化氢： $2HCN + 9/2O_2 = 2CO_2 \uparrow + 2NO_2 + 3H_2O + \Delta Q$
- 6) 硫酸铵、硫酸钠等盐类：喷雾干燥分离

前两个反应可以实现焦化废水主要有机污染成分的无害化，有研究表明，反应式3)和5)的主要反应产物部分为氮气，也能实现了有毒成分无害化。退一步讲，就算是生成 SO_2 、 NO_2 ，由于易溶于水，被除尘循环水洗涤吸收后会与废水中的碱性成分发生反应，生成固体、或液态盐实现无害化。焦化废水被喷入转炉一次烟气后，有四个主要去向：放散烟气、回收煤气、干灰、污水和污泥。干灰、污水和污泥都是企业内部循环不外排，转炉煤气会进入后步燃烧，唯一可能转移排入大气的途径只有放散烟气。多个项目检测结果证明，采用多级自循环清水洗涤净化可确保焦化废水中的有机有毒成分不外排。

4 人为排烟为什么必须进行除湿脱白？

人为排放烟气是否需要除湿脱白还有争议，有人认为白雾就是水蒸汽，不含污染物，除湿脱白仅仅是为了美容没有必要；认为电力行业实现了超低排放，下步治理重点是钢铁、焦化等非电行业超低排放，要放过水分，还有一个原因是除湿脱白投资和运行成本都高，增加负担不值得。越来越多的、不同研究人员的大量检测结果都证明，这些都是错误的。国情决定，我国超低排放标准规范和在线监测的漏洞就是没有控制人为排放烟气中的水分，排烟除湿脱白是我国大气治理的必由之路，也是成本最低的漏洞补丁。为什么我国人为排放烟气必须进行除湿脱白？至少有以下原因：

4.1 节水

且不论是否是雾霾原因，排入大气的水分首先是不可忽视的、廉价的、优质的非常规水源，初步估算我国每年排烟带入大气水分高达 160 亿吨，年人均 10 吨。按照行业排放量，最大的还是电力，燃煤发电开式冷却塔年排放 90 亿吨、湿法脱硫 20 亿吨，所以排烟除湿脱白首先还必须从燃煤发电开始。其余依次是钢铁 15 亿吨、焦化 6 亿吨、天然气燃烧 3 亿吨，还有煤化工、有色金属、垃圾焚烧、农村生物质燃烧等。

4.2 节能

排入大气水分主要含低温潜热，虽然余热品位不高、但总量巨大，对于燃煤发电而言，相当于燃煤一半的热量浪费上天了。所以，有节能专家认为，中国大气污染严重的根源不仅是产业结构偏重，而主要是能源效率太低，能效提高了，雾霾自然就没有的。这方面最值得推广的就是国家发改委、住建部鼓励发展的余热暖民工程，把上天的余热回收用于居民采暖。

4.3 超低排放

国情决定，我国排烟必须进行超低排放，但采取什么技术路线就需要不断优化。实践证明直接喷淋除湿脱白可以低投资低成本实现超低排放，对非电行业，特别是中小企业，除湿脱白应该是实现超低排放的首选辅助技术。

6 结论与建议

1. 包括散烧煤、农村烧柴草等各种废气，都可以采用补丁式、旁通式改造，以低成本实现烟气超洁净（超低 + 脱白）排放
2. 废水通过利用烟气处理，可以实现水份和余热的低成本资源化回用，降低废气超低排放的投资和成本
3. 原有废水处理设施后可以用于城市生活污水处理，减少城市污水提标的投资和成本，实现企业、城市零排水，包括零排汽。

参考文献

- [1] 孟令和，焦化废水无公害焚烧处理技术的探讨，冶金环境保护，2006 年 5 期，P69
- [2] 操卫平等，利用炼钢转炉烟气治理焦化废水，工业水处理，2005，Nov. 11, P74
- [3] 光辉，王建超，承钢焦化废水无害化利用技术研究，世界金属导报，2011 年 11 月 1 日，第 22

版

[4] 张笑冰, 焦化厂废水回用于转炉除尘水系统的可行性研究, 中国精细化工协会第五届水处理化学品行业年会论文集, 2009年7月

[5] 程志久等, 烟道气处理焦化剩余氨水和全部焦化废水的方法, 中国发明专利申请公开说明书, 申请号: 98101337.6

[6] 丑明等, 以煤气为热源的焚烧法处理焦化污水工艺方法及焚烧装置, 中国发明专利申请公开说明书, 申请号: 01114013.5

[7] 李志峰等, 利用转炉高温烟气催化热解焦化废水的研究与应用, 2014年全国冶金能源环保会议论文集

[8] 苏国留 刘文东 魏久鸿 刘晨, 转炉半干法除尘消纳处理焦化废水的原理与应用, 2014年青岛冶金节水会议论文集



提高炉渣活度在微粉生产技术中的应用

吕凌云

(云南省曲靖呈钢钢铁集团公司炼铁厂)

摘要: 呈钢高炉渣为水渣,是微粉生产的主要原料,为进一步提高微粉活性指数,改善微粉质量,高炉采取了提高炉渣活性度的措施,为微粉生产创造了良好条件,并取得了较好的效果。

关键词: 高炉渣;活性指数;微粉生产

1 引言

水渣是呈钢高炉生产的副产品之一,是微粉生产的主要原料,生产的矿渣微粉可作为水泥添加剂,在提高水泥强度的同时,还可降低水泥生产成本 20 元/吨,因此,矿渣微粉市场前景十分广阔;为充分利用水渣资源,呈钢自建了微粉厂,主要原料为自产水渣,使用较为经济,在创造经济效益的同时,减少了环境污染,意义十分重大。

2 呈钢微粉生产工艺流程

高炉熔渣经过从水冷渣沟喷出的高压水进行水淬,形成细粒水渣进入沉淀池,再采用抓斗吊车将水渣抓到贮渣槽滤水,由汽车运输到微粉厂,其工艺流程如下:

高炉→水渣沟→沉淀池→水渣槽→汽车运输→水渣堆场→皮带机→原料仓→磨机→布袋收粉器→刮板输送机→成品粉料罐车输送→用户

3 呈钢微粉生产情况

数据显示,2020 年 9 月到 2021 年 1 月,所生产的矿渣微粉活性指数偏低,7 天活性指数为 62.20—66.60%,28 天活性指数为 97.60—98.40%,活性指数偏低,无法满足水泥用户对微粉质量的要求,7 天及 28 天活性指数见表 1:

表 1

| 月份 | 7 天活性指数 % | 28 天活性指数 % |
|------------|-----------|------------|
| 2020 年 9 月 | 62.20 | 97.60 |
| 10 | 62.90 | 98.60 |
| 11 | 65.10 | 99.80 |
| 12 | 64.40 | 96.50 |
| 2021 年 1 月 | 66.60 | 98.40 |

为提高微粉质量，满足用户需求，使 7 天活性指数 >70%，28 天活性指数 >100%，通过查找原因，并采取相应措施，微粉质量活性指数得到较大提升，达到了预期效果。

4 提微粉活性度的措施

通过理论分析，提高微粉活性指数，需要从使用原料入手，调整高炉渣的成份结构，提高炉渣活性质量系数 K ，而高炉渣活性质量系数 $K = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{TiO}_2$ ，从式中看出，增加渣中 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 含量，降低渣中渣中 SiO_2 、 MnO 、 TiO_2 含量，均可提高炉渣活性质量系数 K ，为此，主要采取措施如下：

1、控制合适的炉渣碱度：炉渣碱度 $= \text{CaO} / \text{SiO}_2$ ，炉渣碱度低， CaO 含量相对减少， SiO_2 含量相对增加，对提高炉渣活性质量系数不利，适当提高炉渣碱度， CaO 含量相对增加， SiO_2 含量相对减少，在满足高炉脱 [S] 需要的同时，充分发挥 CaO 活性作用，提高了炉渣活性质量系数；

2、优化烧结矿配料结构：使用高碱度烧结矿，烧结碱度控制在 2.2 倍—2.5 倍，采取低硅烧结的措施，烧结矿中 CaO 含量 10.50%—12.00%， SiO_2 含量 4.80%—5.20%；

3、提高炉渣中 Al_2O_3 ：随着炉渣中 Al_2O_3 的上升，炉渣活性度增加，但当 Al_2O_3 大于 15.00% 时，炉渣粘度增加较快，流动性变差，不利于炉渣结构的优化，提高炉渣中 Al_2O_3 时，应考虑不影响高炉生产对炉渣性能的需求，控制炉渣中 Al_2O_3 不大于 15.00%。呈钢高炉使用的进口球团矿主要有三种：瑞典球团矿 Al_2O_3 为 0.29%，乌克兰球团矿 Al_2O_3 为 0.39%，巴西球团矿 Al_2O_3 为 2.45%，在炉料结构选配中，优先使用 Al_2O_3 较高的巴西球团矿，巴西球团矿使用比例由 8% 提高到 15%，炉渣流动性良好，既满足了高炉生产需要，又提高了炉渣活性度；

4、降低高炉渣 MnO ：高炉渣中 MnO 升高，炉渣活性度降低，在高炉用料结构中，凌云球团矿 MnO 为 1.43%，瑞典球团矿 MnO 为 0.05%，乌克兰球团矿 MnO 为 0.03%，巴西球团矿 MnO 为 0.08%，在日常生产过程中，将凌云球团矿使用比例由 10% 逐步降到 5%，最后取消了凌云球团矿的使用，降低炉渣中 MnO 含量；

5、炉渣中 MgO 含量的控制：增加炉渣中 MgO ，可提高炉渣活性质量系数，且 MgO 含量升高，炉渣流动性改善，便于优化炉渣结构，但因白云石配矿成本高，不利于降低炼铁生产成本，以炉渣中 MgO 稳定在 7.50% 左右调整白云石用量；呈钢矿石成份见表 2：

表 2

| 矿石名称 | CaO | SiO ₂ | MgO | MnO | Al ₂ O ₃ |
|--------|------|------------------|------|------|--------------------------------|
| 瑞典球团矿 | 0.50 | 2.56 | 0.55 | 0.05 | 0.29 |
| 乌克兰球团矿 | 0.46 | 5.23 | 0.54 | 0.03 | 0.39 |
| 巴西球团矿 | 1.70 | 2.82 | 0.15 | 0.37 | 2.45 |
| 凌云球团矿 | 1.83 | 8.75 | 0.59 | 1.26 | 1.00 |

通过以上措施,炉渣Al₂O₃含量从11.31%逐步上到14.36%,炉渣中MnO含量由0.90%降到0.70%左右;炉渣碱度由1.18倍--1.19倍提升到1.20倍--1.21倍,炉渣活性质量系数由1.64提升到1.73,最高时达到1.85,为提高微粉质量创造了良好条件,其数据见表3:

表3

| 日期 | 活性系数 k | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | MnO | TiO ₂ | R ₂ |
|----------|--------|-------|------------------|--------------------------------|------|------|------------------|----------------|
| 2020年9月 | 1.69 | 40.11 | 33.09 | 11.31 | 7.54 | 0.82 | 1.01 | 1.21 |
| 10月 | 1.66 | 40.90 | 34.49 | 11.83 | 7.58 | 0.90 | 0.90 | 1.19 |
| 11月 | 1.69 | 40.02 | 33.64 | 12.66 | 7.90 | 0.85 | 1.25 | 1.19 |
| 12月 | 1.64 | 40.49 | 33.78 | 11.53 | 7.31 | 0.76 | 1.64 | 1.19 |
| 2021年1月3 | 1.64 | 40.37 | 34.15 | 12.40 | 6.74 | 0.72 | 1.46 | 1.18 |
| 2月 | 1.65 | 40.35 | 34.03 | 12.39 | 6.60 | 0.68 | 1.22 | 1.19 |
| 3月 | 1.67 | 40.76 | 34.00 | 12.90 | 6.38 | 0.73 | 1.32 | 1.20 |
| 4月 | 1.69 | 40.69 | 33.65 | 14.00 | 5.70 | 0.71 | 1.43 | 1.21 |
| 5月 | 1.73 | 40.08 | 33.22 | 14.36 | 7.11 | 0.69 | 1.64 | 1.21 |

5 炉渣活性系数 k 提高后微粉生产情况

炉渣活性系数 k 提高后,微粉质量有较大改善,7天活性指数由62.20--66.60%提高到72.50--75.00%,28天活性指数由97.60--98.40%提高到102.90--106.60%,其数据见表4:

表4

| 月份 | 7天活性指数 % | 28天活性指数 % |
|---------|----------|-----------|
| 2021年1月 | 66.60 | 98.40 |
| 2 | 72.50 | 102.90 |
| 3 | 73.30 | 105.50 |
| 4 | 75.00 | 106.60 |
| 5 | 72.30 | 106.20 |

从表中看出:当高炉渣质量活性系数由1.64倍提高到1.73倍(最好时达1.85倍)后,在其它生产条件不变的情况下,微粉活性指数迅速提升,特别是2021年4月和5月,炉渣中Al₂O₃值提高到14.00%--14.36%,微粉28天活性指数高达105--106%,效果尤为显著。

6 结论

1、提高微粉活性指数的方法有很多,如在矿渣中加入高活性度的添加剂,如活性石灰、粉煤灰等,

可增加微粉的易磨性，提高微粉的产量，但会造成生产成本的升高，微粉活性指数上升效果不是很明显，质量指标仍然达不到要求，高炉水渣作为微粉生产的主要原料，提高其活性质量指数，是提高微粉活性指数的重要途径；

2、呈钢微粉生产使用的是自产水渣，具有较大的成本优势，在不影响高炉生产的前提下，可根据微粉生产的需要，调整高炉用料结构，提高矿渣活性度系数，以达到微粉提高活性指数的需求，具有较大的灵活性，这是其它微粉企业不可比拟的优越条件；

3、生产实践证明，提高炉渣活性度系数后，微粉7天活性指数和28天活性指数均有大幅度提升，效果明显，特别是28天活性指数达到105—106%，完全满足S95级水泥添加的需要；

4、提高炉渣活性系数，重要的是调整炉渣成份结构，在条件允许的情况下，提高渣中CaO、MgO、Al₂O₃、降低渣中SiO₂、MnO、TiO₂等措施，均可提高炉渣活性质量系数，满足微粉生产提高活性指数的需求。



龙钢微负压点火系统改造实践

宁春明 翟玉兵

(陕钢集团龙钢公司 炼铁厂)

摘要：本文主要介绍龙钢公司 400 m²烧结机安装微负压点火装置，降低炉膛负压，提高煤气利用，使燃料充分燃烧，同时增加空气预热系统，从而降低煤气消耗，提升烧结矿产量的生产实践。

关键词：龙钢；烧结微负压；空气预热；自动控制

1 前言

400m²烧结机投产于2010年，是龙钢公司烧结系统大型化发展的第二步。其设计利用系数为1.25t/m²·h，在2018年之前，400m²烧结机利用系数最高达到1.35 t/m²·h，点火用转炉煤气消耗指标长期在15m³/t以上，在2019年至2020年之间，随着主抽风机运行模式调整、烧结机台车栏板加高（750mm-900mm）、二混逆流衬板改造以及烧结原料结构持续优化等一系列工艺提升措施的落实，烧结机利用系数达到1.53t/m²·h并逐步稳定，工艺变化不仅带来的是产能的提升，同时烧结机能耗指标、质量指标均有长足进步，在同行业生产工艺指标排行中逐步挤入前列。

煤气消耗量居高不下成为重点要攻关研究的课题，烧结生产以风为纲，其原理是通过料面点火，继而在抽风作用下风力透过料面自上而下运行带动火焰向下逐步深入，所以台车上的原料必须具备一定的透气性，而这个首要条件是由点火完毕之前的工艺干预决定的。如果初始负压过高，不仅会造成煤气的浪费，更重要的是过大的风量会将原料颗粒间隙的空气瞬间抽空，使料层紧缩压实，合理的料层透气性受到破坏，最终制约烧结机产能的发挥。

理想的微负压点火工艺的实现是烧结工序工艺管控人员一直以来的共同奋斗目标，其既是烧结发展的工艺瓶颈同时也是降耗提产的巨大契机，炼铁厂烧结工序工艺管理人员，将烧结理论与现场实际设备相结合，成立攻关小组，向这个题目发起挑战。

2 现状分析

2.1 目前台车点火负压达不到零压或微负压的理想状态，实际生产过程中，随着原料结构的变化，通过调节风箱翻板控制点火负压效果不明显，点火负压随着原料结构和生产条件的变化，点火负压-17Kp，炉膛压力在-4~2KPa之间波动，导致点火温度波动频繁，人员调整频繁，影响过程稳定。当炉膛压力下降至-2KPa时，保证煤气安全的情况下，必须增加煤气消耗量，但点火料面出现过熔状态，影响透气性，降低产量；当负压在正压状态时，火焰外喷，保证煤气安全的情况下，出点火炉料面出现发黄，点火不足，返矿量加大。

2.2 点火器下风箱翻板容易堵塞，每次检修都有堵塞现象发生，影响点火效果及抽风面积的稳定。烧结机点火器下部 1#2#3# 风箱隔板和其它风箱隔板与台车体底部均有 5cm 左右的间距，1#2#3# 风箱与其他风箱串风，形成了一个整体抽风空间，在用前 3 个风箱翻板控制点火负压时，负压几乎无明显变化，根本起不到调节点火负压的作用，翻板关闭量大时容易造成翻板处堵塞，点火负压达不到理想状态，造成点火料面不均匀和煤气浪费。

2.3 风箱磨损严重，更换周期较短，每三个月就出现破损漏风现象。

2.4 操作人员水平不一，操作过程存在差异，在交接班过程中容易出现不统一的调整；且人员在操作过程中不精心，布料操作出现欠料、压料等现象，造成料层透气性不均匀，炉膛压力出现波动。现场调研发现不少操作工忽视点火负压对烧结料层温度和负压的影响，操作工对点火负压严重影响烧结生产缺乏认知，不认为高点火负压会给烧结的产、质量和能耗造成严重损失；在日常操作中，操作工不经常去调节点火负压的 1 号、2 号、3 号风箱的闸门。

2.5 烧结矿质量的影响

对于高负压点火，料层透气性差，当烧结时间结束时，会出现未参与烧结的散料，返矿量增加，卸料温度过高，对皮带寿命造成影响。烧节点火负压低时，混合料料层结构松散，透气性好，因此垂直燃烧速度快，使得烧结终点前移，在生产过程中通常会提高烧结机车速，从而使得点火时间又相应地缩短，最终导致表层烧结矿强度差，易破碎，返矿率增加；

2.6 微负压可行性分析

从烧结工艺理论的惯性出发，起初的攻关方向定在了配料返矿润湿和台车布料疏松，随后在生产过程中和检修期间先后采取了配料热水引流、返矿加水管改造和台车疏料器布局改造等措施，经过跟踪，台车混合料 $> 3\text{mm}$ 比例较前有些许提升，但实际生产负压、废气温度等关键参数的变化并不是很明显。结合 400m^2 和 450m^2 烧结机 1#~3# 风箱的负压参数对比，确定了影响生产提升的这最后一公里的方向。

微负压点火是烧结工艺中极为重要的一环，其主要理论是基于烧结气体动力学而来，实际措施主要是通过通过对点火炉下方的 1#~3# 风箱风量和负压的合理分配、控制使点火炉内部形成 $-10\sim-50\text{Pa}$ 的微负压。点火负压过低，点火炉火焰内收，冷空气从点火炉四周吸入，降低炉膛温度，台车两侧点火效果差；点火燃料的可燃成分过早地被吸入料层，表层点火热量不足，抽入过多风量破坏原始料层透气性，增加料层阻力，增加进入风箱支管的灰量。点火负压过高，点火炉火焰外扑（向台车外扩散），点火炉的燃烧产物不能全部抽入料层，浪费能源，且烧损台车栏板。

3 微负压点火改造方案

3.1 对风箱间隔板进行改造提升

采用浮动式风箱隔板代替原有的隔板，利用弹性原理使密封时刻紧贴台车体底部，使1#~3#风箱各自分离形成独立风箱，同时台车静滑道也采用动密封技术，实现了风箱之间不串风、不漏风，在改善整体密封效果的同时有效实现风门、风量和负压的独立精准控制。如图1。



图1 风箱隔板改造

3.2 微负压装置改造

在原有风箱上增设倒U形旁通管道并加装球形阀，实现风料分离，确保风料双行互不干涉，原有风箱基础对风箱与大烟道连接弯管进行缩放处理，减少透风量，独特的倒U形风量调节器设计根据负压控制要求实现自动调整风量大小，避免生产过程中人为参与，不能及时调整带来的负压忽高忽低，全程稳定负压变化。如图2。（见下页图2）

3.3 风箱内部顺篦条装置改造

原风箱翻板全开，以风管球形阀控制风量，同时利用双层卸灰的密封原理控制物料放散过程不漏风，并增加放散物料的风管篦条顺行装置，彻底解决风管卸料不畅、易堵塞问题。



图2 微负压装置

4 改造实施后效果

2021年1月14日至1月20日400 m²烧结机进行了为期6天的计划检修，利用此次检修实施了今年降本增效项目之一烧结微负压点火技术改造，现将改造的技术方案和改造后的效果及改造后运行过程存在问题进行说明。

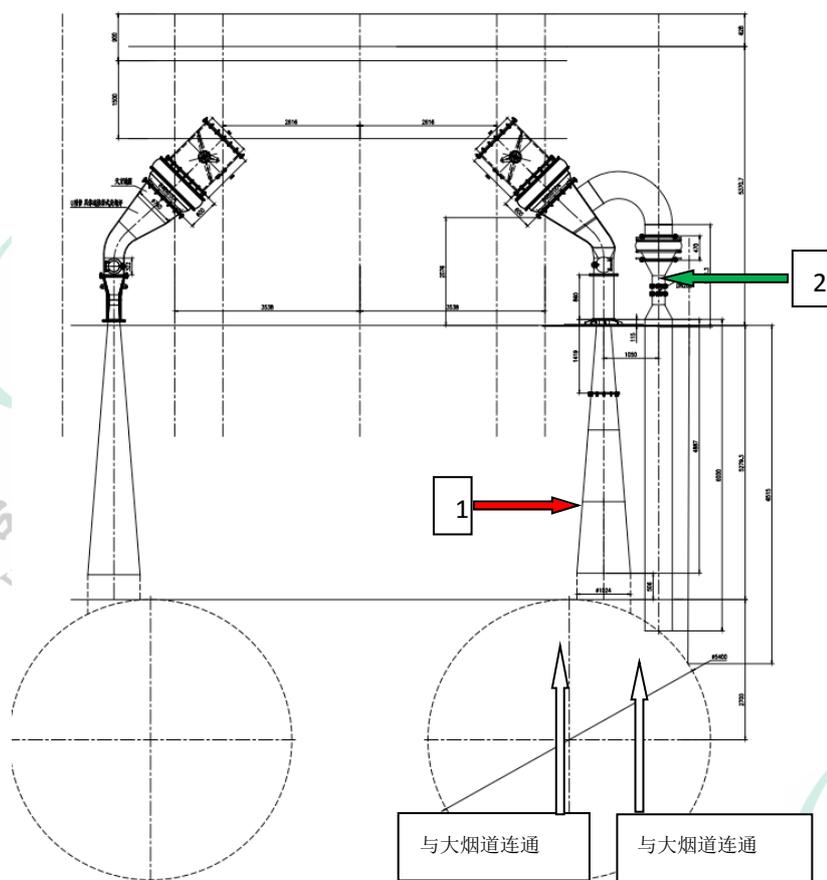


图3

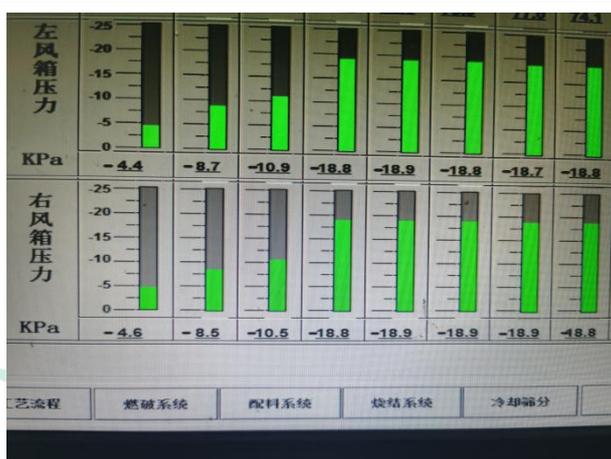
1号所示位置与大烟道连通，主要作用为台车产生的细料、返矿放料。

2号所示位置下部有电动蝶阀，主要作用为调节风量。

改造前：400 m²烧结机煤气单耗 2020 年完成 14.38m³/t，平均每小时用量 6641m³。

改造后：1 月 20 日改造完开机后通过近两周的运行数据对比，煤气单耗完成 11.36m³/t，平均每小时用量 4806m³，较 2020 年度下降 3.02m³/t。

| 400 m ² 烧结机煤气单耗比较 | | | | | | | | |
|------------------------------|----------------------|------|-------|-------|----------|----------|-----------|----------|
| | 2020 年度后 3 个月运行情况 | | | | 检修前第 1 周 | 检修前第 2 周 | 检修周后第 1 周 | 检修后第 2 周 |
| | 2020 年度 | 10 月 | 11 月 | 12 月 | 1.1-1.7 | 1.8-1.14 | 1.22-1.28 | 1.29-2.3 |
| 单耗 | 14.38 | 15.7 | 15.32 | 19.58 | 21.35 | 24.58 | 11.73 | 11.36 |
| 小时流量 | 6641 | 7352 | 7463 | 8675 | 7658 | 8313 | 5256 | 4806 |
| 与 2020 年度比较 | 检修后单耗与 12 月对比 | | | | | | -7.85 | -8.22 |
| | 检修后小时流量与 12 月对比小时节约量 | | | | | | -2402 | -3869 |



改造前，前 3 号风箱与后部风箱之间来回串风，前 3 号风箱负压与后部风箱负压之间差别不大，通过改造提升，前 3 号炉膛负压由前期的 -18kPa 变更为 -4.6kPa，-8.5kPa，-10.5kPa，达到微负压状态。

5 其他方面改造

5.1 大烟道连通改造

龙钢三台烧结机目前均采用双烟道模式运行，运行过程中两侧废气温度和负压不同程度存在偏差情况导致抽风系统不够稳定，进而导致两侧风量不一致，影响料面点火与抽风平衡，对此对大烟道采用每间隔 10 米用特制钢管进行连接，以达到平衡风量的目的。如图 4（见下页图 4）

通过改造后烧结机烟道温度，负压得到平衡，炉膛负压维持在合理范围，同时风箱卡堵问题得到解决，上料量提升 10t/h 左右，两侧主抽电流得到平衡，对台车由于受热不均带来的台车跑偏问题得到大幅改善。



图 4 大烟道连通改造

| 微负压点火、大烟道连通 | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|------------------------|------------------------|---------|---------|---------|-------|--------|---------|
| | 前 3 号风箱负压 kp | 煤气流量 m ³ /h | 空气流量 m ³ /h | 炉膛负压 kp | 废气温度 | < 5mm % | 强度 % | 平均粒径 | 主抽电流变化 |
| 改造前 | 19 | 8500 | 8500 | -4 | 138/126 | 1.989 | 79.65 | 20.67% | 420/390 |
| 改造后 | 4 | 4000 | 5000 | -1 | 135/132 | 1.965 | 79.71 | 21.17% | 408/402 |

5.2 空气预热系统改造

1) 在点火炉保温段设置助燃空气预热器，利用烧结矿的辐射热量预热助燃空气，提高高炉煤气燃烧温度、减少点火煤气消耗。

2) 原点火段烧嘴、烧嘴前阀门、支管、支管阀门、钢结构、预制梁和侧墙预制块均利旧，只是新增保温段钢结构、空气换热器、保温段侧墙预制块、空气换热器上手动蝶阀、管路。

3) 空气预热器管路设置旁通，保证在空气预热器不工作时，不中断烧结机助燃空气供应。

4) 助燃空气鼓风机及空气流程。点火炉烧嘴的助燃空气由鼓风机集中供风，鼓风机出来的空气经管道输送至空气分配器、空气预热器、点火炉空气总管、点火炉各烧嘴。

预热系统改造后，空气温度由 42℃ 上升至 120℃，达到预期目标，同时煤气节约量 2-3m³/t。

6 结语

(1) 龙钢微负压改造 400 m³ 烧结机采用转炉煤气做点火燃料，通过微负压点火系统改造、大烟道连通、热风点火，使转炉煤气达到最好的利用率，同时增加微负压自动控制系统更加促进了微负压控制的精细化

(2) 通过实施微负压点火自动化控制、大烟道连通技术后，主抽风量得到平衡，台车点火效果提升、料层透气性增加明显，产量得到提升，固燃消耗、返矿率随之下降，同时主抽电流平衡后，节约了电量。

参考文献

- [1] 山西兴达科技出版《现代烧结生产实用技术》冯二莲 李飞 刘继强 编著 2018.9
- [2] 冶金工业出版社《铁矿石烧结生产实用技术》许满兴 何国强 张天启 廖继勇 编著；2019.8
- [3] 化学工业出版社《烧结矿生产》徐海芳 主编 2013.1

酸洗废液资源化回收与利用

王晓晖

(河钢集团邯钢公司 河北 邯郸 056015)

摘要: 采用冷轧盐酸酸洗废液为主要原料,加入氧化剂氯酸钠、稳定剂磷酸钠,在常压下进行氧化、水解、聚合反应,制备出聚合氯化铁絮凝剂。分别采用自制的聚合氯化铁(PFC)与购买的聚合硫酸铁(PFS)对低浊度河水作了对比性试验,数据显示自制的聚合氯化铁絮凝效果更好。

关键词: 钢材酸洗废液; 回收与利用; 絮凝剂

轧钢构件表面预处理一般采用盐酸或硫酸进行酸洗,酸洗可清除轧制过程中产生在钢材表面的氧化铁,提高钢材表面质量^[1]。盐酸酸洗比硫酸酸洗速度快,钢材表面质量好,成本低,因此,许多冷轧钢带厂选用盐酸进行酸洗,从而产生大量的盐酸酸洗废液,由于酸洗液会对环境造成严重污染,目前已被列为危险废物进行管理^[2-3]。盐酸酸洗废液的组成主要是氯化氢、氯化亚铁和水等,一般含氯化亚铁、氯化氢质量分数分别为10%~14%、3%~4^[4],若直接排放将造成严重的环境污染,传统酸洗废液的处理多采用焙烧回收盐酸法或酸碱中和法^[5],优点是工艺简单,盐酸回收率高;缺点是投资大,能耗高,设备腐蚀严重,有研究发现盐酸酸洗液是一种廉价的制备絮凝剂的原料,在此我们研究以其为主要原料合成絮凝剂的工艺条件。

本实验采用冷轧盐酸酸洗废液为主要原料制备一种高浓度稳定性聚合氯化铁絮凝剂,其有效成分为 Fe^{3+} ,浓度15%左右,pH值2.1以上;密度1.3g/ml以上,各项指标优于标准要求;采用与外购的聚合硫酸铁(PFS)对比,在相同剂量时,使用自制的聚合氯化铁(PFC),处理低浊度河水形成矾花密实沉降速度快,絮凝效果更好,絮凝效果可提高20%~50%。

1 试验部分

1.1 产品理化指标的测定

(1) Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 含量的测定

在酸性溶液中,用氯化亚锡将三价铁还原为二价铁。过量的氯化亚锡用氯化汞予以除去,然后用重铬酸钾标准溶液滴定。

测定钢铁盐酸酸洗废液中的总铁量,同时测定出 Fe^{2+} 量,二者相减得 Fe^{3+} 量。从而计算出 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 含量。反复测定多次,取其平均值。测得钢铁盐酸酸洗废液中的 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 含量分别为1.9%、6.8%。

(2) 盐基度测定

盐基度又称碱化度,表示羟基(OH)在物质分子中所占的比例,它是关系到产品稳定性及混凝

性能的重要技术指标。

在试样中加入定量盐酸溶液，再加氟化钾掩蔽铁，然后用氢氧化钠标准溶液滴定。

(3) pH 值的测定

pH 计用 pH=4.00、pH=6.86 的标准缓冲溶液定位后，将 1% 的试样溶液倒入烧杯，将饱和的甘汞电极和玻璃电极浸入被测溶液中，至 pH 值稳定时读数。

(4) 密度的测度

密度计：刻度值为 0.001 g/cm^3 ；恒温水浴：可控制温度；温度计：分度值为 1°C ；量筒：250—500 mL。将聚铁试样注入清洁、干燥的量筒内，不得有气泡。将量筒置于恒温水浴中，待温度恒定后，将密度计缓缓地放入试样中，待稳定后，读出密度计弯月面下缘的刻度，即为试样的密度。

(5) 絮凝效果评价

使用程控混凝试验搅拌机进行混凝实验，温度设定为室温。分别将适宜碱化度、聚合温度和陈化时间下制取的聚合氯化铁等剂量加入到一定量的废水中，通过程控混凝试验搅拌机进行混凝实验，利用快速消解法测定处理后废水的 COD，用浊度计测量浊度，观察自制聚合氯化铁絮凝剂对废水处理的效果。

COD 去除率以百分比计，其计算公式如下：

$$\eta = (\text{COD}_1 - \text{COD}_2) / \text{COD}_1 \times 100\%$$

式中： COD_1 是处理前化学需氧量的数值，单位 mg / L ；

COD_2 是处理后化学需氧量的数值，单位 mg / L ；

浊度由浊度计直接读出，浊度去除率以百分比计

计算方法如下：

$$\eta = (\text{处理前的浊度} - \text{处理后的浊度}) / \text{处理前的浊度} \times 100\%$$

1.2 聚合氯化铁溶液的制备

1.2.1 FeCl_2 溶液的制备

本实验采用冷轧盐酸酸洗废液为主要原料，选用废铁屑、氧化铁皮作为还原剂，首先取一定量的废铁屑、氧化铁皮，采用 10% 的盐酸溶液来清理表面铁锈，恒温水浴中加热促进反应速度，水浴温度控制在 90°C ，恒温加热 30min 后将铁屑、氧化铁皮用清水洗净。然后将清理过铁锈的铁屑、氧化铁皮加入至钢铁酸洗废液中，铁屑、氧化铁皮要过量，铁把溶液中的 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} ，整个溶液变成 FeCl_2 溶液，测得溶液的 Fe^{2+} 浓度为 12.23%。

1.2.2 聚合氯化铁溶液的制备

将得到的氯化亚铁溶液静置沉淀，取上清液 FeCl_2 100mL 于 250mL 烧杯中，加入适量盐酸及稳定剂磷酸钠，放在电磁搅拌器上，调至中速搅拌，并迅速加入 NaClO_3 ，每隔 10min（反应时间太短则反应不均匀，不宜测定），直至反应 40min 为止。氧化反应是整个反应过程中的主反应，聚合反应是整个反应的最终反应， Fe^{2+} 在强氧化剂的作用下被完全氧化成 Fe^{3+} ，同时，引发剧烈的聚合反应。聚合氯化铁絮凝剂制备在常温常压下进行。

2 结果与讨论

2.1 反应时间对 Fe^{2+} 氧化效率的影响

量取 100mL 酸洗废液于 250mL 烧杯中，加入适量盐酸，放在电磁搅拌器上，调至中速搅拌，并迅速加入 NaClO_3 ，每隔 10min（反应时间太短则反应不均匀，不宜测定）测试一次，直至反应 40min 为止。测定结果见表 1。

表 1 反应时间对氧化效率的影响

| 反应时间 / min | 10 | 20 | 30 | 40 |
|----------------------------|------|------|------|------|
| 剩余 Fe^{2+} 含量 / % | 0.16 | 0.14 | 0.1 | 0.09 |
| 氧化效率 / % | 98.7 | 98.8 | 99.2 | 99.3 |

由表 1 可知：氧化效率由 10min 时 98.7% 到 40min 时 99.3%，增长速度是缓慢的，总的来说时间变化对氧化效率的影响不大，为保证试验效果，最优化设计选择 30min 为宜。

2.2 反应温度对 Fe^{2+} 氧化效率的影响

量取两份 100mL 酸洗废液于 250mL 烧杯中，分别加入浓盐酸（保证当温度在 100°C 时，不会因盐酸挥发，使盐酸量不足而产生沉淀）。

表 2 反应温度对氧化率的影响

| 温度 / $^\circ\text{C}$ | 25 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 剩余 Fe^{2+} 含量 / % | 1.01 | 0.89 | 0.27 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.10 | 0.11 |
| 氧化效率 / % | 92 | 92.9 | 97.8 | 99.2 | 99.2 | 99.2 | 99.2 | 99.2 |

由表 2 可以看出随着温度的升高氧化率随之增加，但温度增加到 60°C 以上后氧化率不再变化，因此试验温度在 50-60 为宜。

2.3 聚合氯化铁（PFC）的性能指标

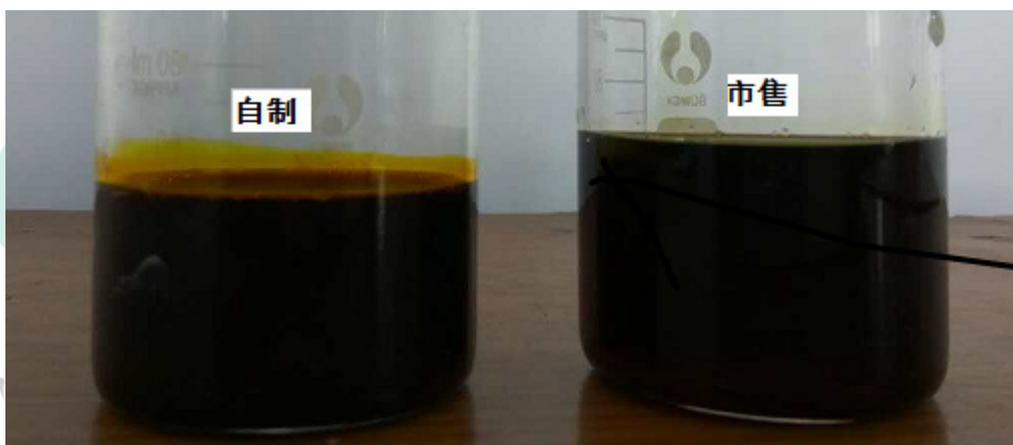


图 1 自制与市售产品外观对比图

表 3 聚合氯化铁 (PFC) 的性能指标对比

| 项目 | 测定数值 | 指标 |
|---|---------|------------|
| 外观 | 棕褐色粘稠液体 | 棕褐色溶液 |
| 密度 (20) / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1.31 | ≥ 1.2 |
| 盐基度 % | 12.11 | 9-14 |
| pH 值 | 2.16 | ≥ 2.0 |
| 全铁含量 % | 15.42 | ≥ 10 |

由图 1 可知自制絮凝剂外观为棕褐色粘稠样液体，与目前邯钢水处理厂使用的外购产品外观基本一致，通过性能测定指标对比其性能指标在标准范围内。

2.4 PFC 与 PFS 对低浊度河水的混凝处理效果

低浊度水一般是指浊度在 30 度以下的江河、水库水。采用自制的聚合氯化铁 (PFC) 与购买的聚合硫酸铁 (PFS) 对邯钢西区净化车间的低浊度河水作了对比性试验，其处理结果见图 2。

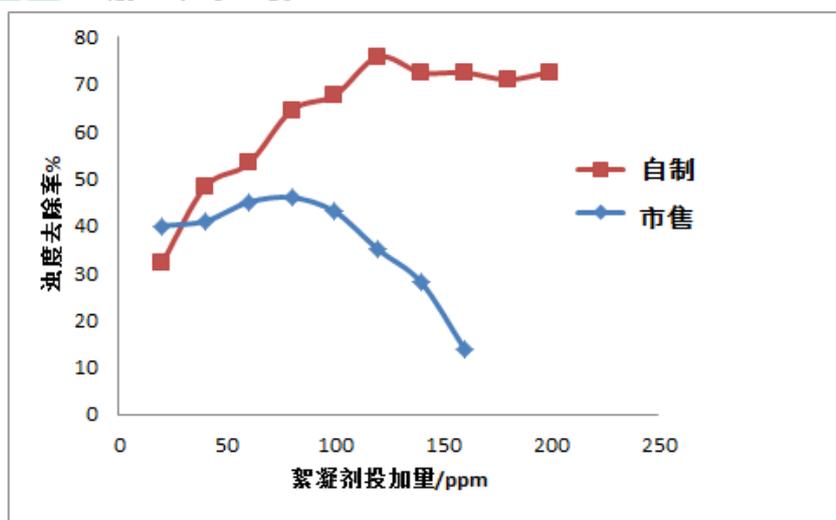


图 2 PFC 与 PFS 对低浊度河水浊度去除率对比

模拟水样的浊度为 6.6NTU。由图 2 可以看出：通过聚合氯化铁与聚合硫酸铁的对比性试验，在相同剂量时，使用聚合氯化铁形成矾花密实沉降速度快，絮凝效果更好，其絮凝效果可提高 20% ~ 50%，而要处理到相同的浊度时，聚合硫酸铁产生的矾花碎且不沉淀絮凝效果差，所以随着投加量的增加，水质的浊度没有下降反而上升了，采用自制聚合氯化铁絮凝剂比聚合硫酸铁更适合低浊度水的处理。

3 结论

1. 试验采用冷轧厂酸洗废液为原料加入氧化剂氯酸钠、稳定剂磷酸钠，在常压下进行氧化、水解、聚合反应，可成功制备出聚合氯化铁絮凝剂。
2. 反应时间在 30min，反应温度 60℃时 Fe^{2+} 具有较高的氧化率，自制絮凝剂外观为棕褐色粘稠样液体，与目前邯钢水处理厂使用的外购产品外观基本一致。
3. 采用自制的聚合氯化铁（PFC）与聚合硫酸铁（PFS）对邯钢西区净化车间的低浊度河水作了对比性试验，数据显示聚合氯化铁絮凝效果更好。

参考文献

- [1] 付智娟. 钢铁酸洗废液的资源化处理方法 [J]. 广东化工, 2011, 38(11): 85-86.
- [2] 高成章, 田孜强. 对酸洗工艺段酸洗介质的分析比较 [J]. 一重技术, 1996(3): 80-81.
- [3] 郑隆鳌, 刘文夫. 钢铁酸洗废液的处理技术及其评价 [J]. 钢铁研究, 1997, 25(1): 58-62.
- [4] 张永刚, 赵西往, 靳晓霞. 钢铁酸洗废液资源化的膜处理技术 [J]. 工业水处理, 2006, 26(12): 18-20.
- [5] 汤兵, 朱又春, 刘奕玲等. 钢材酸洗废液资源化与无害化技术 [J]. 工业水处理, 2005, 25(7): 29-31.

某钢铁厂除尘灰综合利用提取次氧化锌环境影响分析

林吓宁

(福建省金皇环保科技有限公司 福建 福州 350002)

摘要: 钢铁企业冶炼过程产生大量除尘灰,若不加以有效处理,将对厂区及周边环境造成污染。现有大部分钢铁厂将除尘灰作为原料返回烧结系统,但除尘灰中 K、Na、Cl、Zn 等元素富集危害烧结炼铁生产。综合利用钢铁厂除尘灰提取次氧化锌技术,可以将除尘灰变废为宝,作为二次资源来利用。该文根据实际案例,阐述某钢铁厂除尘灰综合利用提取次氧化锌工艺流程,分析该类型项目生产过程产污环节及环境影响。

关键词: 除尘灰; 回转窑; 高温氧化还原; 产污环节; 环境影响

1 概述

我国是钢铁生产大国,2018 年中国粗钢产量创历史新高,且创近三年最快增速。我国的钢铁企业冶金流程主要集中于烧结—高炉—转炉—轧钢长流程生产,在烧结、高炉炼铁、转炉及电炉炼钢等工序均可产生大量粉尘及其副产品,统称为除尘灰,产量约为钢铁产量的 1% ~ 3%。除尘灰在干燥的气候条件下会形成扬尘,若不加以有效处理,将对厂区及周边环境造成污染。

根据调查,现有大部分钢铁厂将除尘灰作为原料返回烧结系统,但除尘灰中 K、Na、Cl、Zn 等元素富集危害烧结炼铁生产,造成烧结台车糊蓖条,风机叶片挂泥,除尘器效率降低,烟尘污染加重,设备维护量加大。如果能对除尘灰合理开发和利用,不但可以防止产生二次污染,有效改善周边环境,而且还能变废为宝,作为二次资源来利用。在钢铁企业,近些年越来越多人关注及研究除尘灰的综合利用。

氧化锌作为工业原料,广泛应用于塑料、硅酸盐制品、合成橡胶、润滑油、油漆涂料、药膏、粘合剂、食品、电池、阻燃剂等产品的制作中,已成为国民经济建设中不可缺少的重要基础化工原料和新型材料。综合利用钢铁厂除尘灰提取次氧化锌,低品位的次氧化锌经过专业厂家精提炼后应用于氧化锌市场,既为钢铁企业解决了难题,又可以取得较好的经济效益。但是,在钢铁厂除尘灰提取次氧化锌项目的实施运行中,也不可避免存在污染物排放,产生环境影响。

2 除尘灰提取次氧化锌概述

以福建某钢铁厂为例,阐述除尘灰综合利用提取次氧化锌工艺过程及产污环节分析。

2.1 除尘灰的主要成分

根据福建省地质测试研究中心对某钢铁企业高炉除尘灰的检测报告，除尘灰的主要成分见表 1。

表 1 除尘灰混合物主要成分

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 除尘灰 | 成分 | Zn | Ni | Fe | Mn | Cd | S | Cu | Pb |
| | 测值 /% | 10.50 | 0.411 | 26.53 | 0.18 | 0.03 | 0.51 | 0.041 | 0.32 |
| 混合 | 成分 | Mg | Al | Si | Bi | Sn | Cr | Ca | O |
| | 测值 /% | 0.902 | 2.14 | 3.01 | 0.673 | 0.133 | 0.033 | 3.55 | 15.4 |

2.2 次氧化锌的主要成分

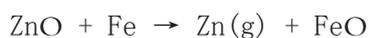
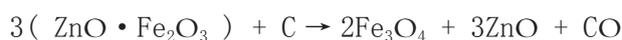
根据该企业除尘灰提取的次氧化锌检测报告，次氧化锌的主要成分见表 2。

表 2 次氧化锌主要成分

| | | | | |
|-------|-------|------|--------------------------------|-------|
| 成分 | ZnO | PbO | Fe ₂ O ₃ | Cd |
| 测值 /% | 55.51 | 2.90 | 3.44 | 0.105 |

2.3 除尘灰提取次氧化锌工艺

高炉除尘灰提取次氧化锌目前效果较好的方法有两种，分别为湿法工艺和火法工艺。目前国内次氧化锌生产以火法工艺为主（约占总量 80% 以上），湿法为辅。福建某钢铁厂利用火法工艺提取次氧化锌，具体工艺如下：某企业采用回转窑烟化法提取次氧化锌，焦粉作为煅烧原料。除尘灰与焦粉按一定配比混合后，通过皮带输送机进入回转窑内进行高温煅烧。当窑体缓慢转动时，炉料翻转滚动，向窑头高温端移动，在高温作用下（回转窑内温度可达到 1000℃ ~ 1100℃），物料中的锌经还原挥发成单质锌（Zn）；同时在窑尾负压风机的作用下，锌挥发物随烟气向窑尾移动，移动过程中被空气中的氧氧化成 ZnO。原料中的锌经过氧化还原反应，以氧化锌的形式富集于烟气中，当烟气温度下降到一定程度时，锌气态氧化物又凝结成固相并在布袋中被截留下来（即产品次氧化锌）。回转窑内反应主要为：





从回转窑尾部出来的烟气高达 800℃ ~ 900℃。回转窑产生烟气经“重力沉降 + 烟道冷却 + 布袋收尘 + 脱硝 + 脱硫”净化处理后，经烟囱高空排放。烟道冷却和布袋除尘器收集的尘灰为次氧化锌产品。

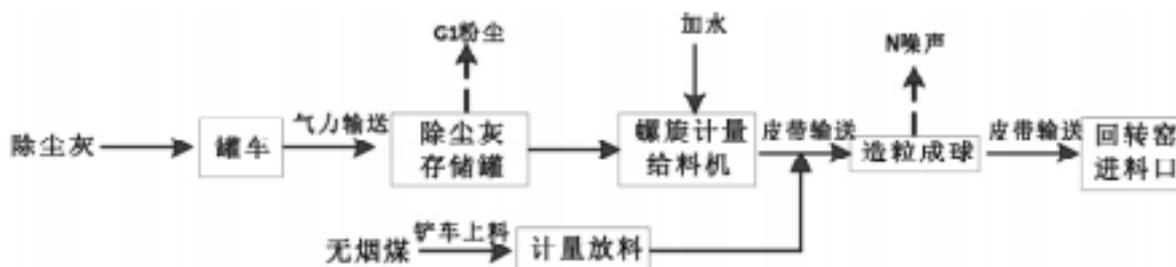


图 1 进料、配料及加料工艺流程

2.4 产污环节分析

从福建某钢铁厂利用火法工艺提取次氧化锌工艺流程图可见，该类项目主要产污环节来自进料、配料过程和回转窑运行过程。该类项目主要污染物产生情况见表 3。

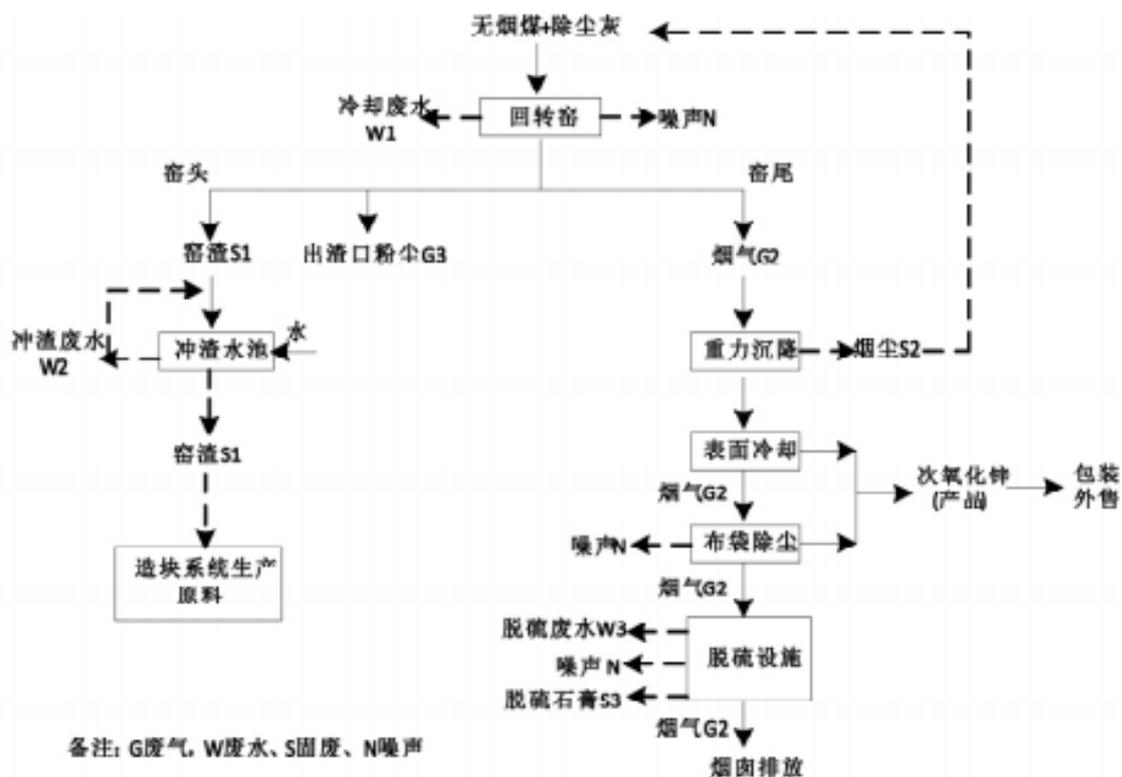


图 2 次氧化锌提取工艺流程图

表3 污染物产生情况

| 污染物类别 | 产污环节 | 污染物主要因子 |
|-------|-------------------|--|
| 废气 | G1 除尘灰卸料过程 | 粉尘 |
| | G2 回转窑燃烧粉煤 | SO ₂ 、NO _x 、烟尘、Cd、Pb、Cr、Ni 等 |
| | G3 窑头出渣过程 | 烟尘、Cd、Pb、铬、镍等 |
| 废水 | W1 回转窑烟道间接冷却水 | 清净水 |
| | W2 冲渣水 | pH、SS、Zn、Ni 等 |
| | W3 脱硫废水 | pH、COD、SS 等 |
| 固废 | S1 窑头出渣 | Fe、Si、Ca、Zn、Ni 等 |
| | S2 脱硫石膏 | 亚硫酸钙、硫酸钙等 |
| 噪声 | 水泵、引风机、除尘器等设备运行过程 | |

2. 4. 1 废气

(1) 除尘灰卸料粉尘。除尘灰采用储罐存储，卸料过程将有粉尘产生，主要为除尘灰粉尘。

(2) 回转窑煅烧烟气。回转窑燃烧粉煤过程，烟气中主要污染物为烟尘、SO₂、NO_x、镉、铬、铅、镍等。

(3) 出渣口粉尘排放。挥发后窑渣从窑头排出进入窑渣池，出渣过程有废气产生，主要污染物为粉尘、镉、铬、铅、镍等。

2. 4. 2 废水

该类项目废水主要来自窑渣在渣池中水淬过程产生的冲渣废水及脱硫系统产生的脱硫废水。

2. 4. 3 固体废物

该类项目产生的固体废物主要有回转窑水淬渣、脱硫石膏等，均可综合利用。

3 除尘灰提取次氧化锌产生的环境影响

除尘灰提取次氧化锌既为钢铁企业解决了难题，又可实现资源综合利用，但在生产过程中不可避免会产生环境影响。本文以福建某钢铁厂火法提取次氧化锌工艺为例，根据产污环节分析该类型项目在投产运行期间产生的环境影响。

3.1 环境空气影响

(1) 除尘灰卸料粉尘影响

除尘灰采用储罐存储，卸料过程将有粉尘产生，主要为除尘灰粉尘。储罐顶部配套建设除尘设施，卸料粉尘经除尘器净化后通过排气筒排放。

(2) 回转窑煅烧烟气影响

回转窑煅烧烟气为该类型项目主要废气排放源，烟气中主要污染物为烟尘、SO₂、NO_x、镉、铬、铅、镍，烟气采用“重力沉降室 + 烟道冷却 + 布袋收尘 + 脱硫工艺”处理后，经烟囱高空排放，并按规范要求安装在线监测系统。

(3) 出渣口粉尘排放

窑头排渣过程将有废气产生，主要污染物为粉尘、镉、铬、铅、镍等。窑头应设置集气除尘设施，出渣粉尘经除尘器净化后通过排气筒排放。综上，除尘灰提取次氧化锌过程各股废气采取相应防治措施后，可实现达标排放。

3.2 地表水影响

该类项目废水主要来自窑渣在渣池中水淬过程产生的冲渣废水及脱硫系统产生的脱硫废水，一般情况下废水循环使用不外排，对地表水不会产生影响。

3.3 地下水影响

水淬渣池的冲渣废水、烟气脱硫循环水池循环水若发生渗漏，将对地下水造成不利影响，因此，应做好地下水防渗措施。

3.4 固废影响

该类项目产生的固体废物主要有回转窑水淬渣、脱硫石膏等，均可综合利用。

3.5 声环境影响

该类项目主要噪声影响来自回转窑、引风机、配料混料机及各类泵等设备运行过程产生的噪声。

为此，应优先选用先进的低噪声、低振动设备，对主要噪声设备进行减振、隔声、消声等处理，降低工程运行对声环境的影响。

3.6 土壤环境影响

该类项目投产运营后，废气中的粉尘排放对厂区周围土壤环境会产生 Ni、Pb 等重金属的累积影响。因此，应确保各股废气稳定达标排放。

4 结论

现有大部分钢铁厂将除尘灰作为原料返回烧结系统，但除尘灰中 K、Na、Cl、Zn 等元素富集危害烧结炼铁生产，造成烧结台车糊蓖条，风机叶片挂泥，除尘器效率降低，烟尘污染加重，设备维护量加大。因此，钢铁厂配套建设除尘灰综合利用项目是非常必要的。

钢铁厂除尘灰综合利用提取次氧化锌，有效解决了钢铁生产过程产生的除尘灰，实现固体废物综合利用，可以取得较好的经济效益。但在项目生产过程中不可避免地存在环境影响，工程实施过程应注重回转窑烟气排放控制措施，按规范要求安装在线监测系统。为有效降低环境污染，项目实施前应积极开展环境影响评价，对大气环境、水环境、声环境及固体废弃物环境等方面的污染提出可行有效的防治措施，从而实现环境效益、经济效益和社会效益相协调。

参考文献

- [1] 杨逢庭，赵树民，徐国庆，等．高炉除尘灰的综合利用[J]．山东冶金，2015，37(1)：48—49.
- [2] 杨少红．高炉煤气干法除尘灰提锌技术的应用[J]．涟钢科技与管理，2017(3)：16—18.
- [3] 胡佛明，宋凯伟，施得旸，等．高炉除尘灰加工处理技术研究与发展[J]．矿产综合利用，2015(10)：11—15.
- [4] 刘德军，郝博，马光宇．炼铁除尘灰再利用方法研究[J]．鞍钢技术，2012(2)：9—14.
- [5] 环境影响评价技术导则—总纲：HJ2.1—2016[S]．

烧结配加高炉瓦斯灰替代燃料降低 NO_x 排放实践

裴元东^{1,2} 吴胜利¹ 张俊杰² 盛建华² 张巧玉² 周晓冬²

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院 北京 100083; 2. 中天钢铁集团有限公司 江苏 常州 213000)

摘要: NO_x 治理是烧结超低排放攻关的重点, 从源头上削减 NO_x 有助于减轻烧结后续末端处理的压力 and 提升治理水平。高炉瓦斯灰通常作为固废返回烧结使用, 其具有含 N 量为 0.15% ~ 0.35%、粒度基本均小于 0.5 mm 的特征。针对源头控制 NO_x 排放, 开展了烧结配加高炉瓦斯灰对 NO_x 排放影响的研究。结果表明: 烧结配加 2.0% ~ 2.5% 的瓦斯灰替代约 0.7% ~ 1.0% 的燃料, 有助于降低 NO_x 排放质量浓度(脱硝入口数据)约 20 ~ 70 mg /Nm³; NO_x 降低幅度的大小受瓦斯灰中含 N 量、催化剂, 以及瓦斯灰形成 P 形球团颗粒质量分数等因素的影响。

关键词: 烧结; NO_x; 瓦斯灰; 球团形状

烧结 NO_x 排放约占钢铁行业 NO_x 排放的 50%^[1], 降低烧结 NO_x 排放是当前烧结环保攻关的重点。随着烧结超低排放对 NO_x 质量浓度降到 < 50mg/Nm³ 的要求逐步落实, 各烧结厂基本均开始筹建活性炭、SCR 等末端治理工艺予以应对。若能从源头上减少 NO_x 排放, 则有助于缓解后续末端处理 NO_x 的压力, 同时提升烧结 NO_x 的控制水平^[2]。事实上, 大工业烧结机废气中 NO_x 质量浓度在 200 ~ 400mg /Nm³ 的较大范围内波动。由于 NO_x 受烧结原燃料和工艺参数的影响较大, 因此明晰影响 NO_x 排放因素对于在实际生产中的具体操作调整有显著价值。

烧结过程中 90% 以上的 NO_x 来源于燃料, 即燃料型 NO_x 是烧结排放 NO_x 的主要成分; 燃料的用量、含 N 量、粒度、赋存状态和添加剂加入与否等均对烧结 NO_x 排放有影响^[3-5]。就燃料粒度对 NO_x 的影响而言, 前人开展过较多工作: 中南大学潘建研究表明, 在完全燃烧条件下, 焦粉粒度为 0.5 ~ 5 mm 时, 燃料 N 的转化率较高, 接近 95%, 而 - 0.5 mm 和 + 5 mm 粒级焦粉的燃料 N 转化率均低于前述粒级, 分别为 80% 和 70% 左右^[6]; 宝钢在生产实践中基于控制 NO_x 提出减少焦粉中 > 3 mm 尤其是 > 5 mm 的占比^[7]; 安工大实验室研究表明, 提高燃料中 - 3 mm 的占比有助于降低 NO_x 的排放^[8]。高炉瓦斯灰作为含 C 和 Fe 的固废, 大多情况下返回烧结使用。前人研究过瓦斯灰对烧结矿质量和有害元素方面的影响, 但未有对烧结使用瓦斯灰影响 NO_x 排放的报道。

本文以中天烧结机工业实践为基础, 通过分析烧结配加瓦斯灰前后烧结 NO_x 排放的变化, 阐述了瓦斯灰影响烧结 NO_x 排放的规律, 期望能为后人从源头上减少烧结 NO_x 排放提供参考。

1 瓦斯灰的基本特征

对中天烧结用瓦斯灰的含 N 量进行了测试, 并与焦粉和无烟煤的含 N 量进行对比, 对多个不同批次的样品进行测试比较, 如表 1 所示。

表 1 瓦斯灰和燃料的含 N 量比较(质量分数) %

| 项目 | 含 N 量 | 含 N 量 | 含 N 量 |
|--------------------|-------|-------|-------|
| 瓦斯灰 | 0.32 | 0.35 | 0.15 |
| 瓦斯灰按等 C 折算成 焦粉后 | 0.85 | 0.93 | 0.40 |
| 焦粉 | 0.97 | 0.92 | 0.90 |
| 无烟煤 | 1.00 | 0.99 | — |

由表 1 可知, 瓦斯灰含 N 量在 0.15% ~ 0.35% 之间, 而焦粉和无烟煤基本为 0.9% ~ 1.0%。分析认为, 瓦斯灰的含 N 量受燃料(焦炭和喷吹煤)在高炉内的燃烧过程和停留时间等因素影响, 故表现出一定的波动。按瓦斯灰含 C 量 30%, 焦粉含 C 量 80% 计, 则按等 C 折算后, 瓦斯灰含 N 量也较焦粉低, 尤其在瓦斯灰含 N 量为 0.15% 时, 折算成焦粉后含 N 量仅在 0.4%。

瓦斯灰和燃料的粒度对比见表 2。由表 2 可知, 瓦斯灰粒度基本在 < 0.5 mm 以内, 明显较焦粉粒度为细。

表 2 瓦斯灰和燃料的粒度比较(质量分数)

| 项目 | >8 mm | 8~5 mm | 5~3 mm | 3~1 mm | 1~0.5 mm | <0.5 mm |
|-----|-------|--------|--------|--------|----------|---------|
| 瓦斯灰 | — | — | — | 0.20 | 2.89 | 96.91 |
| 焦粉 | 2.33 | 10.88 | 9.57 | 28.61 | 17.78 | 30.82 |

2 烧结配加瓦斯灰对 NO_x 排放的影响

2.1 混匀矿料堆配加瓦斯灰对 NO_x 排放的影响

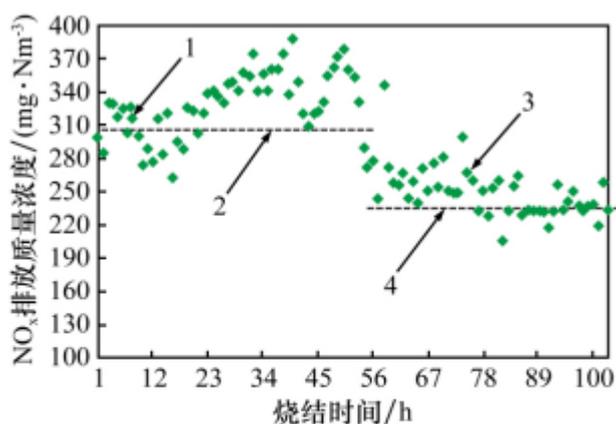
中天烧结在料堆中间歇式配加高炉瓦斯灰, 如表 3 所示为烧结混匀矿配比的变化。根据表 3, 结合相关计算可知, 在配加 3% 的瓦斯灰后(折算混合料比例 2.5%), 保证烧结料的总 C 量, 焦粉的配比从 4.4% 降低到 3.4%, 降低了 1%。

表 3 烧结混匀矿配比变化(质量分数)

| 物料 | 高返 | 扬迪粉 | PB 粉 | 巴西混合粉 | 瓦斯灰 | 纽曼粉 | MAC 粉 | 铁泊 | 污泥杂料 |
|-----|----|-----|------|-------|-----|-----|-------|----|------|
| 配加前 | 20 | 20 | 20 | 20 | — | 7 | 10 | — | 3 |
| 配加后 | 18 | 18 | 12 | 22 | 3 | 14 | 9 | 4 | — |

混匀矿料堆配加瓦斯灰前后烧结过程 NO_x 排放变化(脱硝入口数据)见图 1。由图 1 可知: 烧结配加瓦斯灰后, NO_x 排放呈现显著降低趋势, 整体上有助于降低 NO_x 质量浓度约 $70 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

其主要原因可能为：一方面，瓦斯灰的含 N 量相对较低，即使在折算等 C 量条件后，贡献的含 N 量仍低于原先全部使用焦粉贡献的含 N 量；另一方面，瓦斯灰的粒度较小，基本为 -0.5mm 水平（表 2），计算可知配加瓦斯灰后烧结总燃料中 -0.5mm 粒度占比增大了近 60%，而 $+0.5\text{mm}$ 粒度占比均有所减少。特别细粒度的燃料可能 NO_x 的转化率相对较低，最终造成 NO_x 排放减少。



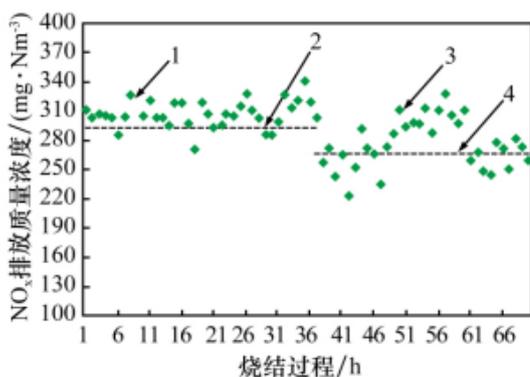
1—配加前测量值；2—配加前平均值；

3—配加后测量值；4—配加后平均值。

图 1 混匀矿料堆配加瓦斯灰前后烧结过程 NO_x 排放质量浓度变化

2.2 烧结直配瓦斯灰对 NO_x 的影响

直配瓦斯灰（采用 2% 的瓦斯灰搭配 3.7% 的燃料，替代原先 4.4% 的无烟煤）前、后的烧结过程 NO_x 排放变化（脱硝入口数据）见图 2。从图 2 可知：烧结配加瓦斯灰后， NO_x 质量浓度降低约 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，整体上配加瓦斯灰后 NO_x 的降幅较之前低。分析认为，这可能与瓦斯灰含 N 量变化、瓦斯灰替代无烟煤的占比略低等有关。



1—配加前测量值；2—配加前平均值；

3—配加后测量值；4—配加后平均值。

图 2 烧结在直配瓦斯灰前后 NO_x 排放质量浓度的变化

2.3 烧结配加瓦斯灰影响 NO_x 排放的机理分析

2.3.1 瓦斯灰含 N 量对 NO_x 的影响

前人研究表明高炉瓦斯灰中的 C 主要来源于焦炭^[9-10]。分析认为：在高炉炉内焦炭磨损破碎、熔损反应等导致小颗粒形成而被煤气带出过程当中，焦炭中的部分 N 在高温过程中可能已释放出，在还原气氛下以 N_2 形式进入煤气。因此，瓦斯灰表现出等 C 条件下含 N 量低的特征，或者说 N/C 值一般较焦炭或焦粉的 N/C 要低；从测试结果看，瓦斯灰的 N 和 C 质量分数以 0.15% 和 0.3% 计时，N/C 值仅为 0.5，远低于燃料。当然，由于 N 去掉的比例有波动，则瓦斯灰含 N 量存在波动。最终，瓦斯灰替代燃料后 NO_x 的降幅也有所波动。

2.3.2 瓦斯灰粒度对 NO_x 的影响

燃料粒度是影响 NO_x 排放的重要因素。就烧结燃料参与制粒过程而言，较细的瓦斯灰在制粒中的分布形态必然与较粗的焦粉有所不同。根据图 3 所示对燃料 4 种形态的划分，分析认为瓦斯灰在制粒过程中形成的更多应该是球团形（P 形）结构，而该形态下 NO_x 的转化率相对于其他形态如 S 和 S' 形的转化率要低^[11]；同时，较小粒度的瓦斯灰在烧结过程中也易于与其他大粒度燃料所生成的 NO_x 发生还原反应，最终促使 NO_x 排放减少。当然，由于配加瓦斯灰后生成 P 形结构的数量难确定，因此，这也是最终配加瓦斯灰后 NO_x 降幅波动的一大原因。

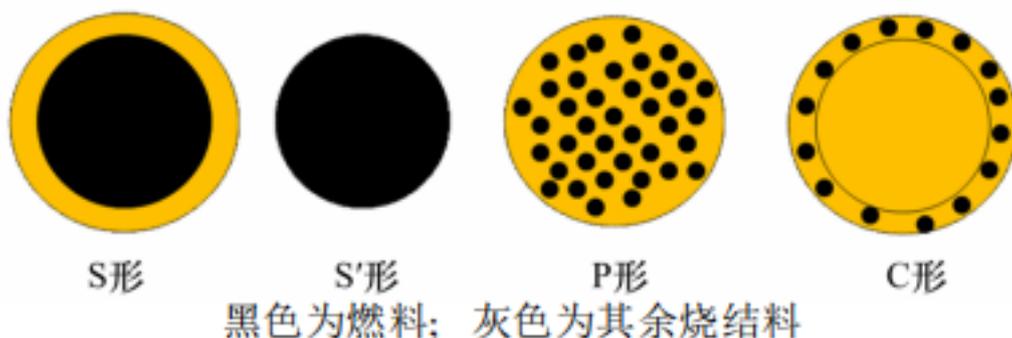


图 3 烧结燃料的几种赋存状态

2.3.3 瓦斯灰中催化剂对 NO_x 的影响

瓦斯灰中同时含有铁氧化物和碱金属，前人研究表明，二者的存在均对 NO_x 的生成起抑制作用^[12]。则在瓦斯灰替代部分燃料后，有助于 NO_x 排放的降低。

因此，在瓦斯灰替代部分烧结燃料后，在上述因素的共同作用下，最终促进了烧结 NO_x 排放量的减少。

3 结论

烧结配加瓦斯灰替代部分燃料,在贡献含C量基本稳定的条件下,有助于降低 NO_x 排放。配加2.0%~2.5%的瓦斯灰替代约0.7%~1.0%的焦粉,有助于降低 NO_x 排放(脱硝入口数据)约20~70 mg/Nm^3 ; NO_x 降低幅度的大小受瓦斯灰中含N量、催化剂,以及瓦斯灰形成P形球团颗粒质量分数等因素所影响。

参考文献

- [1] 苏家栋,李咸伟,范晓慧. 烧结过程中 NO_x 减排技术研究进展[J]. 烧结球团, 2013, 38(6): 41—44; 54.
- [2] 张洪亮,施琦,龙红明,等. 烧结烟气中氮氧化物脱除工艺分析[J]. 钢铁, 2017, 52(5): 100—106.
- [3] 吴胜利,张永忠,苏博,等. 影响烧结工艺过程 NO_x 排放质量浓度的主要因素解析[J]. 工程科学学报, 2017(5): 693—701.
- [4] 甘牧原,吴丹伟,韦振宁,等. 碱土元素改性燃料对其燃烧 NO_x 减排研究[J]. 烧结球团, 2019, 44(6): 43—46.
- [5] 聂绍昌. 新钢烧结生产 NO_x 排放规律及减排措施[J]. 烧结球团, 2018, 43(4): 73—77.
- [6] 潘建. 铁矿烧结烟气减量排放基础理论与工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [7] 张典波,周茂军,王跃飞. 宝钢烧结烟气 NO_x 过程减排技术[J]. 炼铁, 2015, 34(6): 47—51.
- [8] 朱梦飞,李东升,谢运强,等. 燃料特性对铁矿烧结过程 NO_x 排放行为的影响[J]. 烧结球团, 2019, 44(2): 58—62, 68.
- [9] 代兵,姜曦,王运国,等. 本钢新1号高炉降低瓦斯灰碳含量攻关[J]. 中国冶金, 2017(1): 73—76.
- [10] 孙健,陈辉,武建龙. 高炉瓦斯灰含碳来源及降低瓦斯灰碳含量研究[C] // 北京金属学会第八届冶金年会论文集. 北京: 北京金属学会, 2014: 62—67.
- [11] 吴胜利,候超刚,张国良,等. 焦粉颗粒赋存状态对烧结过程 NO_x 排放的影响研究[C] // 第十五届全国大高炉炼铁学术年会论文集. 乌鲁木齐: 中国金属学会炼铁分会, 2014: 924—930.
- [12] 周昊,刘瑞鹏,刘子豪,等. 碱金属对焦炭燃烧过程中 NO_x 释放的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1160—1164.

钢渣辊压破碎—有压热焖工艺应用实践

滕树满¹ 滕海灏²

(1. 广西柳州钢铁集团有限公司 广西柳州 545002; 2. 重庆大学材料科学与工程学院 重庆 400044)

摘要:介绍了防城港钢铁基地(简称防钢)钢渣处理,其采用国际领先的“辊压破碎—有压热焖”工艺,采取两连跨式工艺布置、合理的处理工艺流程以及 BOO 建设模式,降低了处理成本,实现了钢渣固废 100% 资源化利用。

关键词: 钢渣; 有压热焖技术; 两连跨式布置; 固废资源化利用

0 引言

广西柳州钢铁集团有限公司在防城港新建千万吨级钢铁基地(简称防钢),其中炼钢系统一期建设 4 座 210 t 转炉,年产钢 920 万 t。防钢钢渣处理从实施节能减排、循环经济、着力建设资源节约型和环境友好型的角度出发,针对国内现有钢渣处理工艺存在的问题,采用钢渣“辊压破碎—有压热焖”工艺,新建转炉钢渣、脱硫渣和铸余渣处理线,每年可处理转炉钢渣 120 万 t、脱硫渣 20 万 t、铸余渣 20 万 t,实现了钢渣固废 100% 资源化利用,具有较好的经济效益和显著的环境效益。

1 钢渣有压热焖工艺

钢渣热焖法是利用钢渣余热,在有盖容器内加入冷水产生蒸汽使钢渣中游离氧化钙($f - CaO$)、氧化镁($f - MgO$)得到消解,通过热胀冷缩达到渣钢分离以实现钢渣的回收与利用的工艺^[1]。由中冶某节能环保公司新研发的钢渣有压热焖工艺工作压力 0.2 ~ 0.4 MPa,比常压池式热焖工艺压力提高 100 ~ 200 倍,从而增大了水蒸气渗透压,加快了水蒸气与钢渣中游离氧化钙、氧化镁的反应速率,热焖周期由 22 h 缩短至 2.5 ~ 3h^[2]。同时该工艺在处理钢渣整个过程基本都是在密闭体系下进行,和现有钢渣处理工艺相比,洁净化程度更高、更环保。

新钢渣有压热焖工艺分为“辊压破碎”和“有压热焖”两个工序。“辊压破碎”工序主要是完成熔融钢渣的快速冷却、破碎(此阶段处理时间约 20 ~ 30min),可将熔融钢渣的温度由约 1600 °C 冷却至 600 °C 左右,粒度破碎至 300mm 以下;“有压热焖”工序主要是完成经辊压破碎后钢渣的稳定化处理(此阶段处理时间约 2.5 ~ 3h),处理后钢渣的稳定性良好,浸水膨胀率小于 2%,从而实现钢渣固废 100% 资源化利用。

新钢渣有压热焖工艺与现有钢渣热焖工艺相比,主要具有以下优势^[3-5]: ①热焖周期短,处理效率高,尾渣的稳定性更好; ②热焖后的钢渣粉化率高,小于 20 mm 粒级达到 70% 以上; 粒度均匀,最大粒度小于 300 mm,有利于后续钢渣加工磁选,钢渣处理费用显著降低; ③自动化水平高,劳动

定员少；④洁净化程度高，利于环境保护，对钢渣处理厂房腐蚀小，厂房维护费用低；⑤钢渣有压热焖过程中产生的带压蒸汽可综合利用。

2 两连跨式工艺布置

本处理线布置于防钢一炼钢南侧，便于通过过跨车将转炉钢渣直接运送至钢渣一次处理主厂房内。处理线主要由钢渣一次处理系统、二次处理系统（含中转堆场，棒磨、筛分、磁选系统，成品库等）及配套的公辅设施组成。钢渣一次处理系统采用两连跨式工艺布置，一跨布置脱硫渣带罐打水区、铸余渣热泼区、转炉渣液态渣罐调运区；二跨布置转炉渣热焖区及出渣上料区，详见图 1 所示。

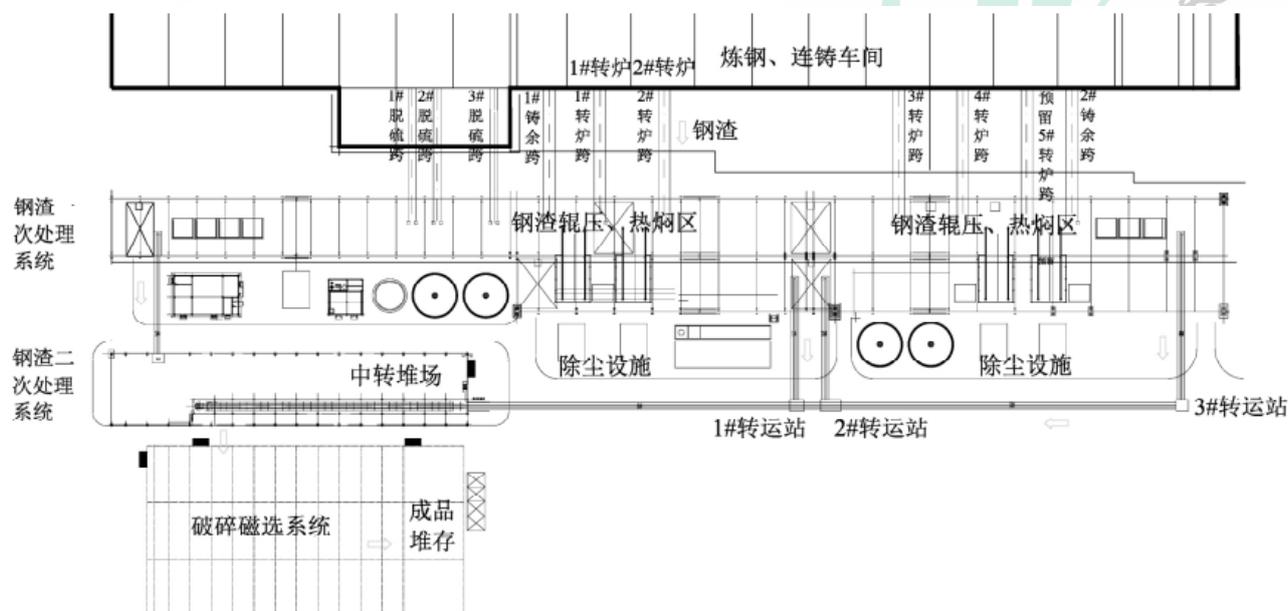


图 1 钢渣热焖处理线工艺布置

相较于单跨布置模式，两连跨布置具有以下优势：

(1) 单跨模式缺点：①为满足龙门钩距统一要求，需采用直径近 7 m 的立式热焖罐，造价昂贵；若采用可变钩距，生产可靠性难以保证；②因 1#、2# 转炉距 3#、4#、5#（预留）转炉较远，若 1#、2# 转炉对应的渣罐倾翻机或者辊压破碎机出现故障，吊运液态渣罐时需越过热焖及卸料区（每罐卸料需 6 min），行车需避让、交叉作业，整个生产线处于行车交叉相互避让的不利状态。

(2) 两联跨方案优点：①液态出渣一跨实现 4 台转炉共用 3 套倾翻辊压破碎设备（预留 1 套设备），每套倾翻辊压破碎设备出现故障均可用其它 2 套倾翻辊压破碎设备进行处理，2 台铸造起重机的相互备用，液态渣罐可及时吊运到渣罐倾翻机上作业，保证液态渣罐及时返回炼钢区；②固态出渣二跨设置 2 台套 100 / 32 t 铸造起重机，龙门钩距匹配中间渣罐，2 台铸造起重机的相互备用，采用小直径立式热焖罐，节省投资。

3 工艺流程

转炉渣、脱硫渣、铸余渣分别送至转炉钢渣热焖处理线、脱硫渣处理线、铸余渣处理线进行一次处理，处理后的渣送至二次处理区域进行棒磨破碎、磁选收集，实现了钢渣的全部固废资源化利用。处理线设施布置紧凑，流程合理、物流顺畅。

3.1 转炉钢渣一次处理工艺流程

转炉钢渣一次处理工艺流程：熔融钢渣倒入 20m³ 渣罐内，通过炉下过跨车运至一次处理主厂房→将渣罐放置于渣罐倾翻机上→渣罐倾翻机运送渣罐至预定倒渣区进行倾翻倒渣（倒渣完毕后，再将其运至起始位置，由行车将空渣罐吊起，返回炼钢车间接渣）→辊压破碎机多次破碎钢渣→辊压破碎机启动推渣作业，将钢渣卸入到固态渣罐中→接渣车接渣后，运行至预定位置，由钢渣跨行车将其吊运至有压热焖罐中热焖→行车将热焖后的渣罐运至卸料区的受料槽格筛筛分→块度大于 150 mm 的钢渣落至地面，由电磁起重机选出废钢并返回炼钢车间，余下钢渣倒入铸余渣池；小于 150 mm 的钢渣通过振动给料机均匀给料至带式输送机，送至钢渣转运堆场。转炉钢渣辊压—热焖一次处理工艺流程如图 2 所示。

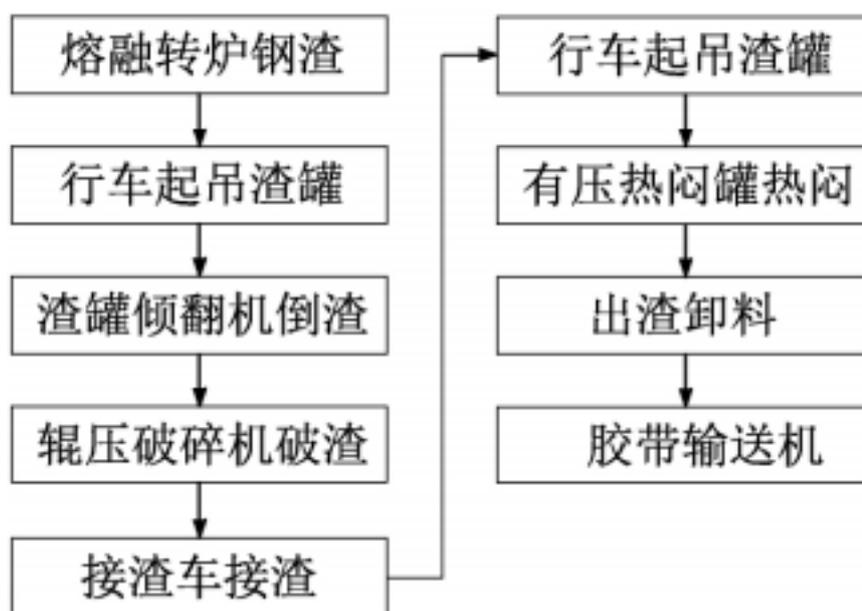


图 2 转炉钢渣辊压—热焖一次处理工艺流程

3.2 脱硫渣带罐打水工艺流程

脱硫渣由渣罐车送至钢渣一次处理车间后，由铸造桥式起重机将其调至脱硫渣带罐打水工位进行带罐打水（18～24 h）。冷却后的脱硫渣通过铸造桥式起重机倾翻至脱硫渣热泼场，用吊车电磁吸盘将渣铁块吸出放返回重新冶炼，其余渣用车倒运、经胶带机运至钢渣二次处理区域的堆场。脱硫渣带罐打水工艺流程如图 3 所示。

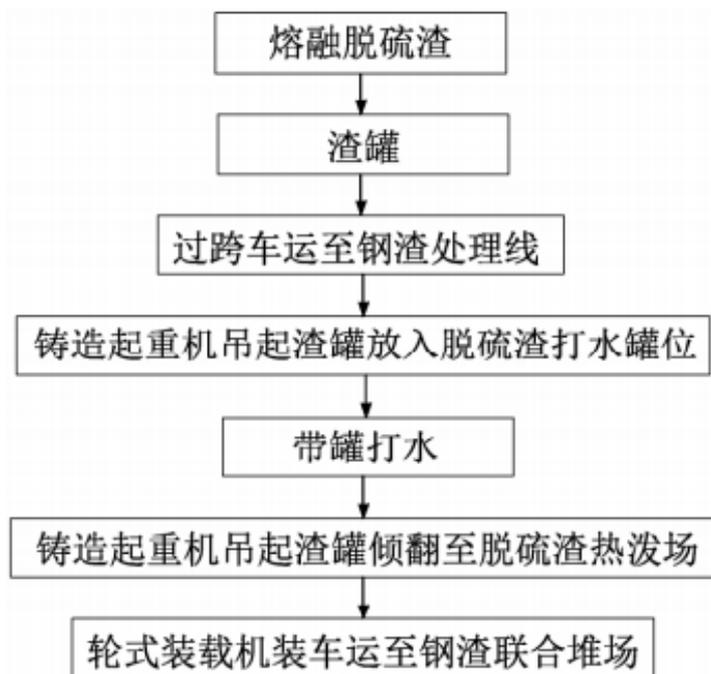


图 3 脱硫渣带罐打水工艺流程

3.3 铸余渣处理工艺流程

铸余渣由渣罐车送至连铸渣一次处理区域后，桥式起重机将渣罐倾翻到铸余渣热泼场，进行封闭打水降尘（处理时间大于 12 h），采用旋转集气罩打水工艺。打水结束后利用液压锤破碎其中的大砣渣，电磁吸盘磁选出其中的大块废钢，剩余铸余渣由轮式装载机出渣经胶带输送机运送至钢渣二次处理区域的堆场。铸余渣处理工艺流程如图 4 所示。

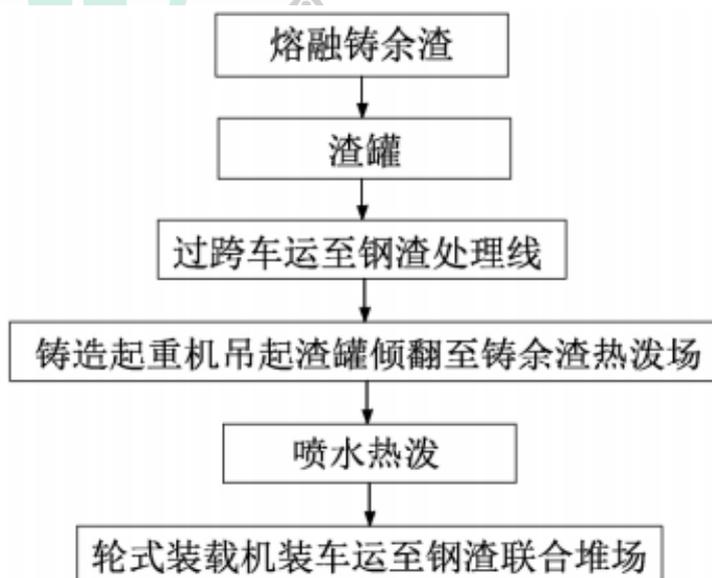


图 4 铸余渣处理工艺流程

3.4 钢渣二次处理工艺流程

经一次处理的转炉渣、脱硫渣、铸余渣送到钢渣二次处理堆场存放、晾水，由铲车铲运到受料槽，经皮带机运至一次筛分室，筛分后筛上物经皮带运至一次棒磨机棒磨；棒磨后钢渣进入二次筛分室，筛上物返回二次处理堆场再次循环，在返回皮带上设有带式除铁器，选出块状废钢。二次筛分筛下物与一次筛分筛下物汇总进入缓存仓，经皮带送入一次磁选室磁选；一次磁选后尾渣经皮带运至尾渣成品仓，一次磁选的磁性料经转运后进入磁性料缓存仓，经仓下皮带送入二次棒磨机棒磨；棒磨后转运至二次磁选室再次磁选；二次磁选后的磁性料（铁精粉）经皮带运至磁性料成品仓；尾渣经皮带运至尾渣成品仓。钢渣二次处理工艺流程如图 5 所示。

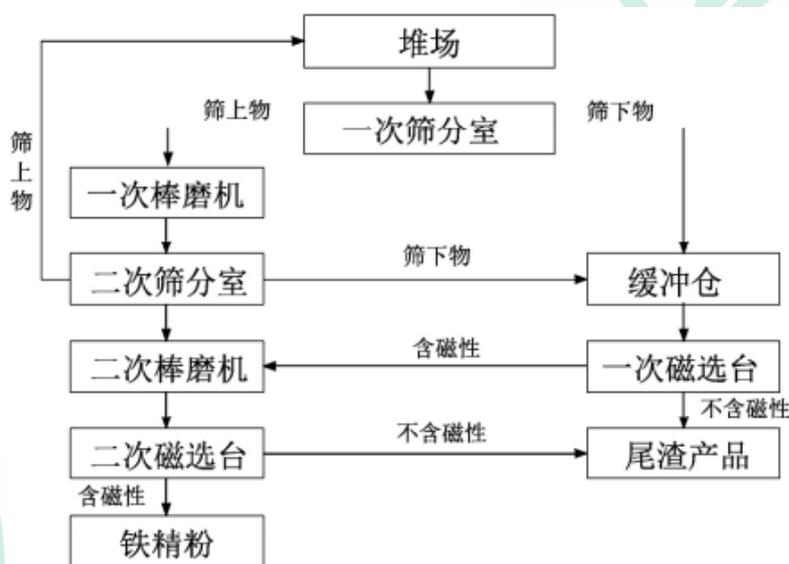


图 5 钢渣二次处理工艺流程

本处理线主要工艺设备有：由中冶某节能环保公司自主研发的渣罐倾翻机、辊压破碎机、接渣车和压热焖罐及相应的行车、破碎磁选、皮带输送机和配套的风气水电等设施。

4 投资与效益

4.1 项目投资

本处理线采用 BOO 模式建设。该模式可减缓业主建设资金压力，同时通过引进外部先进工艺技术与管理操作团队，可解决防城港基地钢渣处理技术与人力资源不足等问题，促进企业管理水平的提高。本处理线建设总投资约 3.2 亿元。投资范围包括：120 万 t/a 转炉钢渣辊压破碎—（立式余热）有压热焖处理系统（含主厂房）、20 万 t/a 脱硫渣处理系统、20 万 t/a 铸余渣处理系统、3 种渣的二次处理系统（含棒磨车间、磁选筛分站、棚化堆场）及相应的配套等设施。

4. 2 项目效益

(1) 经济效益。本处理线采用国际领先的“辊压破碎—有压热焖”工艺，与现有热焖工艺比，设备自动化程度高，热焖周期短，钢渣处理效率高；有压热焖后的钢渣粉化率高，小于 20 mm 粒级达到 70% 以上，粒度均匀，最大粒度小于 300mm，利于后续钢渣加工磁选，可显著降低处理线生产成本。回收得到约 6% 的渣钢返回转炉冶炼使用，有效降低了炼钢成本；同时可回收大于 15% 的磁选粉（铁精粉）；余下的尾渣可供应水泥厂、混凝土搅拌站、道路施工、建材制砖等使用，尾渣市场前景良好，提高了尾渣的附加值。以磁选粉 250 元 /t、尾渣 20 元 /t 的市场价格计，处理线年销售收入约 8 900 万元（未考虑回收 6% 的渣钢产值），年利润大于 4500 万元，经济效益良好。

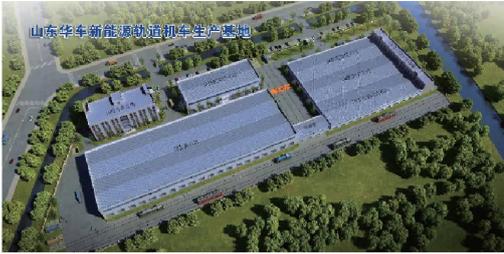
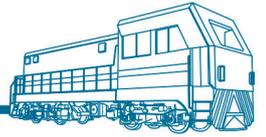
(2) 环保效益。该处理线的环境效益是多方面的。首先，热焖周期短，处理效率高，尾渣的稳定性好，浸水膨胀率小于 2%，从而实现了钢渣 100% 资源化利用、尾渣“零”库存，也减少了尾渣积压堆放而占用土地。每利用 1 t 尾渣，可减少约 0.8t 沙石开采，保护了山林土壤，对环境保护意义重大^[6]。其次，生产区域实现生产线除尘设备全覆盖，洁净化程度高，对钢渣处理厂房的腐蚀小。此外，项目采用国内自主研发的辊压破碎机破碎钢渣，设备能耗更低，效率更高。最后，有压热焖过程中所产的带压蒸汽可用综合利用，降低了企业生产能耗。

5 结论

防钢渣处理采用国际领先的“辊压破碎—有压热焖”工艺技术，采取两连跨式工艺布置、合理的工艺流程以及 BOO 建设模式，提高了生产效率，降低了生产成本。每年可有效处理转炉钢渣 120 万 t，脱硫渣 20 万 t，铸余渣 20 万 t，处理后回收的渣钢和磁选粉可返回冶炼系统回收使用，尾渣稳定性良好，浸水膨胀率小于 2%，可作为建材供水泥厂或进行深加工综合利用，实现钢渣固废 100% 资源化利用，经济效益和社会效益显著。

参考文献

- [1] 徐雪峰. 罐式热焖法在电炉钢渣处理中的应用 [J]. 钢铁, 1997(2): 69—72.
- [2] 张俊, 严定鏊, 齐渊洪, 等. 钢铁冶炼渣的处理利用难点分析 [J]. 钢铁, 2020, 55(1): 1—5.
- [3] 黄丽, 徐杰. 浅谈钢渣热焖的现状与发展 [J]. 工业加热, 2016, 45(4): 68—70.
- [4] 刘玉民, 王兰, 王玉. 钢渣混合料用作道路基层材料工程应用研究 [J]. 中外公路, 2018, 38(5): 209—213.
- [5] 唐祁峰, 敖进清, 蒋睿. 攀枝花某转炉钢渣的热焖工艺及磁选试验研究 [J]. 非金属矿, 2019, 42(2): 9—11.
- [6] 章瑞平. 本钢钢渣热焖处理工艺的生产实践 [J]. 本钢技术, 2013(3): 5—8, 39.



— 国内首台新型智能轨道电动机车 —

山东华车能源科技有限公司始创于2003年8月5日，主要从事铁路内燃机车、车辆维修及保运业务。公司下设五个项目部，两处大修基地，总部位于山东半岛南翼、黄海之滨的日照市高新区，总占地面积约70亩，注册资金1亿元。2016年8月12日，公司基于自主研发的《新型智能轨道电动机车项目》基础上，结合产学研一体化要求，促进产业结构转型升级战略而成立了具有科研开发、生产制造、产品销售、维修服务为一体的综合性高新技术企业。现具备年承接机车大中修150余台套，新型智能轨道电动机车改造、新造100余台套的生产能力，规模处于行业龙头。

公司主要研发生产大功率HCD1500型、2500型、5000型新型智能电动轨道牵引机车、地铁专用检修车、多种铁路线路维修、检测车辆、大中型养路机械、轻轨、轨道平车、旅游观光车及检修、检测专业设备。

山东华车能源科技有限公司以“绿色节能、德才立信，创新超越，同创华车”的核心经营理念，本着“养修并重、优质保运”的服务理念愿与相关运输企业互助双赢、携手并进，共创企业发展的美好明天。

专业成就行业领先

新型智能 轨道电动机车



专业优势

SDHCET

专利

01 拥有自主研发的蓄电式电动轨道机车控制系统以及蓄电式轨道机车同轴电机传动系统知识产权技术

节能

02 万公里耗电不足10万度
节能率达到90%

环保

03 运行噪音小、无尾气排放
每台车年均可减少20万升柴油消耗，减少637吨二氧化碳及其它有害气体排放节能环保

智能

04 智能驻车充电装置；遥控驾驶（无人驾驶）；智能防火系统；智能运输管理系统

高效

05 模块化结构、易维护维修，维护费用比传统内燃机车可降低60%。

舒适

06 远离粉尘噪音；四季恒温空调；360度全景界面

开启智能电动机车新时代

座机：0633-5816666

手机：18263376666 17763337301 17763337300

地址：山东省日照市高新区山海四路与日照北路交汇处



冶金信息装备网是面向全国冶金行业，以实现行业内的技术交流及供求信息共享为目的的行业网站。通过与各级行业协会、设计院、研究院、钢铁厂、冶金类高校、制造商的广泛合作，整合冶金行业上下游价值链，在技术和装备领域提供一个可交流的信息平台。

冶金信息装备网整合冶金行业上下游价值链，为广大企业用户提供最快的资讯、最权威、最及时的新技术新设备信息，致力于提升整个行业电子商务的应用水平和降低网络营销的成本，打造冶金人自己的网站。

冶金信息装备网一切以客户为中心
以提升客户价值提高客户满意度为出发点



- 网站 www.yejinzb.com
- 微信公众号 [yejinzb00](https://www.yejinzb.com)

十大服务体系

- 01 信息服务
- 02 会员服务
- 03 期刊专辑
- 04 会议会展
- 05 实体企业
- 06 团体标准
- 07 行业培训
- 08 特聘专家
- 09 废旧物质
- 10 短视频服务

专注信息服务 搭建合作平台 推动强强联合 引领互链产业



地址：河北省石家庄市裕华区长江道壹號D座 1704
手机：15031180999 15176145333
客服：0311-88357930 传真：0311-69129356
邮箱：yejinzb@163.com
网址：www.yejinzb.com