

引用格式: 王一雍, 范智禹. 钢渣处理技术研究进展与应用现状[J]. 有色设备, 2025, 39(6): 1-9.

WANG Yiyong, FAN Zhiyu. Research progress and application status of steel slag treatment and resource utilization[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 1-9.

钢渣处理技术研究进展与应用现状

王一雍, 范智禹*

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁鞍山 114051)

[摘要] 钢渣是钢铁生产过程中产生的副产物,其处理与利用技术的发展受到广泛关注。鉴于钢铁工业绿色、可持续发展的重要性,寻找一种高效、清洁的钢渣处理技术,提高钢渣的利用率尤为重要。为此,本文从钢渣一次处理和二次处理综述现有工艺的原理、研究进展和应用现状,并展望现有研究在工业生产中面临的困境、挑战及前景。一次处理中,第四代熔融钢渣高效罐式有压热闷处理技术与装备,已广泛应用于国内外大型钢铁公司,国内市场占有率达90%以上,钢渣处理率高达99%;二次处理中,采用电磁分离技术,与未设置磁场相比,回收渣铁含量增加了1倍。本文旨在为钢渣处理与资源化利用的后续深入研究提供参考。

[关键词] 钢渣; 一次处理; 二次处理; 有压热闷; 固废回收与利用; 电磁分离

[中图分类号] TF09 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)06-0001-09

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.001

0 引言

随着工业的快速发展,全球对钢铁需求量逐年增加^[1]。根据世界钢铁协会统计,世界粗钢年产量呈增长趋势,2024年世界粗钢产量达18.85亿t。中国是全球最大的钢铁生产国,2024年粗钢产量达

10.05亿t,占全球总产量的53.3%,统计数据如图1所示^[2]。钢渣是钢铁冶炼过程中产生的主要副产物,可以分为转炉钢渣、电炉钢渣和精炼钢渣。依据矿石原料品位和钢铁冶炼工艺的不同,产出的钢渣量、成分及其含量也会出现一定波动。目前每生产1t钢将产生0.1~0.15t钢渣,其主要化学成分有

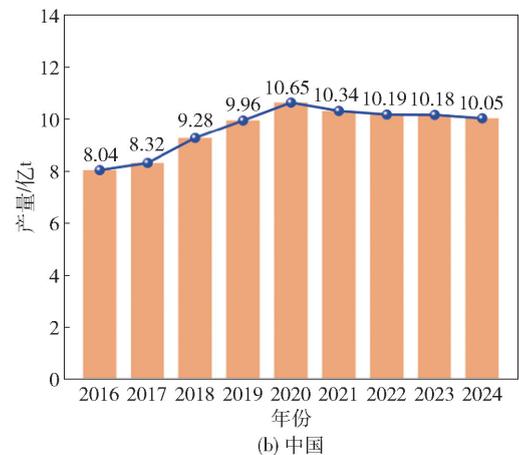
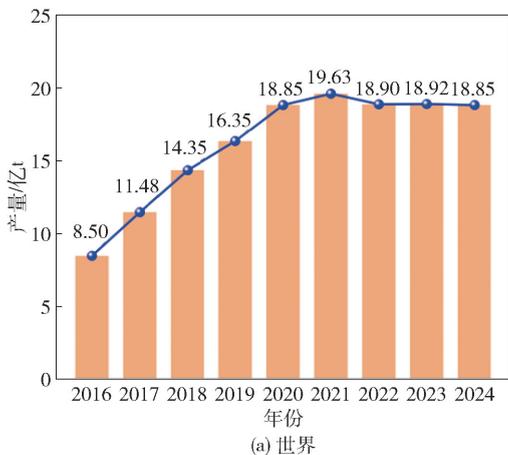


图1 世界与中国的粗钢年产量

Fig. 1 Annual crude steel production in the world and China

[收稿日期] 2025-10-09

[基金项目] 国家自然科学基金(U23A20610)。

[第一作者] 王一雍(1980—),男,辽宁鞍山人,博士生导师,教授,研究方向为冶金资源综合利用。

[通信作者] 范智禹(1997—),男,辽宁鞍山人,博士研究生,研究方向为冶金固废回收利用。

Ca、Fe、Al、Mg、Si、Mn 和 P 等^[3]。

钢渣虽属于冶金废弃物,但同样被认为是一种有价值、低成本的重要资源,目前已广泛应用到诸多领域^[4]。日本对钢渣的利用技术比较领先,年利用率高达 98%;欧洲的年利用率为 85%~95%;美国的年利用率为 65%~90%^[5-6];中国每年钢渣产量约 1.2 亿 t,但利用率却不足 40%,远低于其他国家,未被利用的钢渣主要以堆存和填埋的方式处置^[7]。大量钢渣堆存不仅占用土地资源,其所含有的重金属离子可能会渗透至土壤和地下水中,对生态环境和人类健康构成严重威胁。此外,露天堆存钢渣易产生大量粉尘,造成空气污染^[8]。

自 2020 年中国明确提出“双碳”目标以来,钢铁行业积极响应,遵循以“低消耗、低污染、低碳排”为核心的发展路线^[9]。为落实环境安全问题与钢铁工业的绿色、可持续发展,开发高效、清洁的钢渣处理与利用技术逐渐受到研究者的密切关注。因此,本文从钢渣一次处理和二次处理两类工艺出发,综述现有技术的原理、研究进展和应用现状,并分析现有研究在工业生产中面临的困境和挑战以及展望前景,旨在为今后钢渣综合利用研究提供有价值的参考。

1 钢渣的物化性质

众所周知,钢渣中的元素主要以固溶体形式存在于硅酸二钙、硅酸三钙、方铁矿、钛酸铁二钙和石灰中,分别为 $\beta\text{-Ca}_2(\text{Si}, \text{P})\text{O}_4$ 、 $(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe})_3\text{SiO}_5$ 、 $(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe})\text{O}$ 、 $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_5$ - $\text{Ca}(\text{Si}, \text{Ti})\text{O}_3$ 和 $(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe})\text{O}$ ^[10]。钢渣的矿物学特性受铁矿石、煤炭等原料化学组分、熔剂种类以及冶炼温度的影响^[11]。因此,钢渣性质与地域分布以及前端炼钢工艺相关。

1.1 钢渣性质与原料的关系

不同产地的铁矿石与煤炭具备独特的化学成分特征。磁铁矿、赤铁矿(来自澳大利亚、巴西)冶炼后钢渣金属铁含量较高,而褐铁矿、菱铁矿(来自中国)会引入更多杂质。如采用高硅铁矿炼铁得到的生铁,在炼钢时需要加入大量石灰,最终生成的钢渣中 CaO 含量高,碱度高、渣量大。若采用高磷铁矿石的区域,其钢渣中磷含量相对较高,易形成特定含磷化合物,进而改变渣系的碱度,并影响后续资源化利用途径。此外,煤炭原料与冶金焦炭成分息息相

关,如焦炭的硫分和灰分,同样影响着炼钢后钢渣的性质。

1.2 钢渣性质与熔辅料的关系

炼钢熔剂决定了钢渣中 CaO、MgO 等主要组分的含量及其比例关系。即使不同钢铁企业在处理成分相近的原料时,其在熔剂配比的细微差异,也会导致钢渣矿物组成出现显著区别。此外,特种钢生产过程中所添加的合金元素一部分进入钢渣,形成特殊的合金元素富集相,从而使钢渣在组分回收与处置方式上呈现明显差异。

1.3 钢渣性质与前端炼钢工艺的关系

炼钢工艺主要采用转炉炼钢和电炉炼钢。转炉钢渣来源于铁水氧化精炼过程中,铁水中的硅、锰、磷、硫等元素被大量氧化,与加入的石灰等熔剂反应生成以硅酸钙为主的矿物相,碱度通常较高。电炉钢渣以废钢为主要原料,冶炼过程更侧重于废钢的熔化和碳含量的控制,其钢渣成分波动较大,富含氧化铁,并可能含有从废钢中带来的铜、锌、锡等残余元素,矿物组成复杂。然而,即使采用一种工艺,出钢温度、吹氧强度、熔剂添加时间与添加量等操作参数均会影响钢渣中矿物的晶粒大小、分布以及各相的含量等物化性质。

2 钢渣一次处理工艺

一次处理工艺对钢渣矿物学特性具有较大的影响,如快速和缓慢冷却均会产生复杂的晶体或非晶态结构^[12]。钢渣一次处理工艺常采用水淬、风淬、热闷和滚筒^[13]。

2.1 水淬处理工艺

水淬法是由日本新日铁公司于 20 世纪 70 年代开发的一种钢渣处理技术,我国马鞍山钢铁公司于 1970 年首次引入该技术^[14]。该技术首先是将液态钢渣缓慢倒入渣池,此时水通过粒化器使水流快速喷出形成水幕,对连续下落的高温熔渣进行急冷与切割,使钢渣分散、凝固和粒化^[15];急冷过程中,基于钢渣组分膨胀系数存在差异,高温熔渣遇水产生不均匀的收缩应力而破裂,当温度降至 525 ℃ 时,钢渣中的硅酸二钙(Ca_2SiO_4)会由 $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 相转变为 $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 相,进一步引起钢渣自粉化、渣铁分离^[16];最后,水可返回到沉淀池和集水池循环利用,产生的蒸汽回收或有组织排放。其工艺流程如图 2 所示。

钢渣的水淬处理工艺流程简单、冷却速度快,处

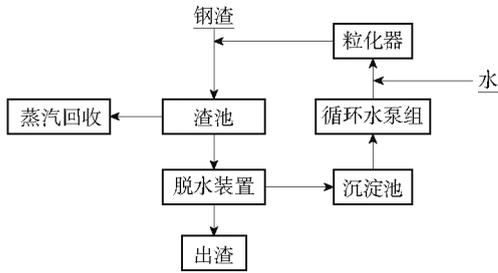


图2 钢渣水淬处理工艺流程

Fig. 2 Process flow of water quenching treatment of steel slag

理后的钢渣具有良好的胶凝性能、粒度小。但该工艺的缺点是对钢渣的流动性要求较高,钢渣须呈液态,处理效率低,颗粒不均匀,生产操作不当,容易发生爆炸,且严重污染环境,已逐渐被风淬法、热闷法等替代^[17]。

2.2 风淬处理工艺

风淬法是日本三菱重工和钢管公司福山钢厂于20世纪70年代开发的一种钢渣处理技术。我国于1991年建成首条风淬法生产线,2007年鞍钢建成国内最大规模的风淬钢渣处理线,其处理量占钢渣总量的40%~70%^[18]。该技术系统基本构成包括液态钢渣溜槽、风口装置和风机系统,其工艺流程如图3所示。首先,将液态钢渣缓慢倒入渣池的过程中,压缩空气通过粒化器使气流快速喷出,对连续下落的液态钢渣冲击切割成分散粒化的细小液滴,滴落注水的渣池后快速冷却形成风淬钢渣,最后从池底出渣,产生的蒸汽回收或有组织排放,水则返回沉淀池和集水池循环利用^[19]。

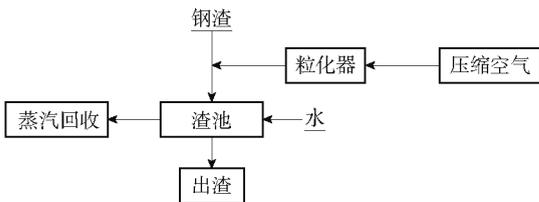


图3 钢渣风淬处理工艺流程

Fig. 3 Process flow of air quenching treatment of steel slag

影响钢渣风淬工艺的主要因素有气流风速、气流出口方向和渣池空间结构等^[20]。刘源洞等^[21]基于有限元模拟分析了气流风速和粒化室布局对钢渣风淬工艺的影响。研究结果表明:当粒化室空间结构不变,钢渣颗粒的分布范围和空间停留时长随气

流速度的增大而增加,且对流换热效果更充分;当气流出口、渣槽出口与竖直方向夹角成 60° ,气流出口距池底7m,此时的气流风速 100 m/s ,小于 3 mm 粒径的渣粒在 3 s 内表层即可凝固,钢渣颗粒的落地范围在 $20\sim 35\text{ m}$ 。

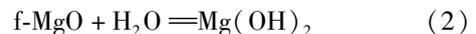
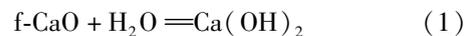
钢渣的风淬处理工艺流程简单,处理后的钢渣颗粒较细,粒度小于 5 mm 的含量达95%以上,颗粒均匀且有利于渣铁分离,用水量少。压缩空气对钢渣具有较强的氧化作用,减少钢渣的不稳定相。但该工艺的缺点是对钢渣的流动性要求较高,处理效率低,处理后的钢渣中 $f\text{-CaO}$ 含量较高,设备噪声和灰尘大,容易对环境造成污染^[22]。针对风淬钢渣稳定差的问题,饶磊等^[23]向钢渣风淬处理工艺的高温液态钢渣中掺入5%的粉煤灰,发现改性后风淬钢渣中的硅酸二钙、铁酸钙和镁蔷薇辉石含量增加,金属 Fe 、 RO 相和 $f\text{-CaO}$ 含量降低,比表面积增加了22.4%,提高了风淬钢渣的易磨性。Wang等^[24]研究发现,向钢渣风淬处理工艺的高温液态钢渣中掺入高炉渣的最佳配比约为15%,可使钢渣的稳定性和非晶含量显著提高, $f\text{-CaO}$ 的最大去除率在80%以上,无定形相含量高达95%。

2.3 热闷处理工艺

热闷法是中冶建筑研究总院有限公司于20世纪90年代开发的钢渣处理技术^[25]。热闷法主要包括池式热闷和罐式有压热闷。

2.3.1 池式热闷

池式热闷工艺流程如图4所示。首先,将液态钢渣倒入热闷池,加盖后采用间歇式喷水,通常需要热闷 $8\sim 12\text{ h}$,基于高温产生的水蒸汽与钢渣中游离氧化钙($f\text{-CaO}$)和游离氧化镁($f\text{-MgO}$)反应(反应式(1)和(2)),发生体积膨胀使钢渣碎裂自粉化。循环水泵组将水供至热闷池,经由热闷池回水装置返回到沉淀池,闷渣过程产生的蒸汽回收,或有组织排放。最后,待钢渣温度降至 $60\text{ }^\circ\text{C}$,揭盖取渣^[26]。



钢渣常作为水泥、混凝土和陶瓷的原料组分^[27-29]。由于钢渣中硅酸二钙和硅酸三钙的晶粒致密粗大,易引起胶凝材料水硬化速度较慢,导致钢渣产品的力学性能变差^[30]。此外,钢渣中大量的 $f\text{-CaO}$ 和 $f\text{-MgO}$ 会导致胶凝材料试样膨胀开裂,从而引起严重的安定性问题^[31]。因此,如何提高钢渣

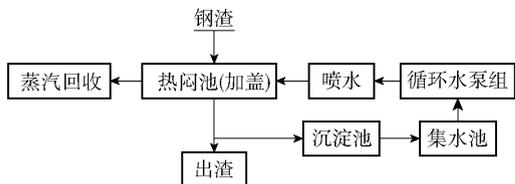


图 4 钢渣池式热闷处理工艺流程

Fig. 4 Process flow of hot stuffiness treatment of steel slag pool-type

胶凝材料的稳定性和安定性,是其作为建筑材料的研究热点。王文林等^[32]研究发现,水泥熟料的 7 d 膨胀率为 0.034%,当掺入未热闷处理的钢渣时,膨胀率分别增加 155.9% 和 311.8%,而掺入经过 1 MPa 热闷 1 h 后的钢渣,膨胀率分别降低 77.0% 和 89.3%。

钢渣的池式热闷处理工艺流程简单、效率高,对环境污染小,处理后的钢渣活性和安定性较好, f-CaO 和 f-MgO 含量小于 3%,浸水膨胀率低于 2%,钢渣粒度小于 20 mm 的含量达 60% 以上,尤其是对高碱度钢渣处理效果更好,在我国的应用程度较高。但池式热闷工艺处理钢渣的周期长、粒度均匀性较差^[33]。

随着池式热闷工艺的发展,底水池式热闷工艺逐渐受到关注。目前,鞍钢投用的国内首套反向浸水设备,改变了传统的喷淋方式,通过从底部给水,优化了蒸汽与钢渣的接触效率,进一步提升了金属回收率和分解效果。该工艺与传统池式热闷的主体工艺流程相同,是将闷渣时的注水方式由池顶部打水改进为池底部注水^[34]。该工艺的技术原理是,当前期注入少量的水遇到高温钢渣变成水蒸汽时,水蒸汽上行继续升温,并对渣层起到熏蒸的作用;后期池底增大注水量,至浸盖渣层高度约 100 mm 以上,转变为沸腾水煮,致使钢渣快速破碎。f-CaO 和 f-MgO 与水的反应时间远大于传统池式热闷,解决了钢渣闷不透和颗粒大等问题,处理周期大幅缩短,效率提高 30% 以上,钢渣自粉化效果更好^[35]。

2.3.2 罐式有压热闷

在钢渣常压池式热闷工艺的基础上,研发了钢渣辊压破碎-余热有压热闷新工艺^[36],其工艺流程如图 5 所示。钢渣经由渣罐倾翻机倒入辊压破碎机,表面喷水破碎后的钢渣温度需控制在 200~800℃,粒度小于 300 mm,随后运至卧式压力罐内进行喷水热闷,基于冷却收缩应力和产生 0.2~0.4 MPa 的水

蒸汽压力,实现快速消解钢渣中 f-CaO 和 f-MgO,使钢渣自粉化、渣铁分离,并提高钢渣的安定性,闷渣过程产生的蒸汽回收或有组织排放,待钢渣温度降至 100℃,打开罐门取渣^[37]。

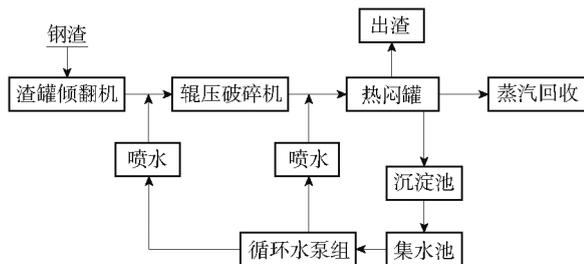


图 5 钢渣罐式热闷处理工艺流程

Fig. 5 Process flow of hot stuffiness treatment of steel slag tank-type

当前,第四代熔融钢渣高效罐式有压热闷处理技术与装备已广泛应用于国内外大型钢铁公司,国内市场占有率达 90% 以上^[38]。例如,珠海中冶环保建筑材料有限公司投资 9 000 万元建成一条年处理能力 50 万 t 的钢渣罐式有压热闷生产线^[39];河南济源钢铁(集团)有限公司投资 5 000 万元建成生产线,自投运以来钢渣处理率高达 99%,与原有工艺相比,钢渣经分选后公司每年可多回收 7 000 t 金属铁^[40]。

罐式有压热闷处理工艺对钢渣的温度和流动性适应性强,对环境污染小,处理后的钢渣活性和安定性较好,渣铁分离效果良好, f-CaO 含量小于 2%,浸水膨胀率低于 2%,钢渣粒度小于 20 mm 的含量达 70% 以上。此外,该工艺在较高压力下进行,使水蒸汽的渗透压变大,加快了反应速率,与第三代钢渣的池式热闷工艺相比,运行周期大幅缩短。但该工艺投资和运行成本高,对操作要求更为严苛^[41]。

2.4 滚筒处理工艺

滚筒法钢渣处理技术最初由苏联乌拉尔钢铁研究院研制,并于 20 世纪 80 年代初由日本石川岛播磨重工业公司和住友金属工业公司联合改进。我国宝钢于 1995 年引进该技术,并于 1998 年建成了世界上第一台滚筒法处理液态钢渣的工业化装置,后续不断迭代发展至第五代技术^[42]。宝武集团是主要应用企业,已拥有 30 余台设备,滚筒装置日均钢渣处理量达 322 t,最高日处理 34 炉次。

滚筒处理技术原理是将液态钢渣在密闭圆筒中进行旋转处理,在工艺介质和喷水冷却的共同作用

下,实现钢渣的凝固和碎化、渣铁分离,其工艺流程如图6所示。首先将钢渣运至侧翻装置内,然后倒入转动滚筒的同时喷水处理,基于水化、旋转以及颗粒相互碰撞的作用使钢渣冷却膨胀形成粒化渣,最终从滚筒尾部排出,水可返回至沉淀池和集水池循环利用,产生的灰尘通过净化塔回收处理^[43]。

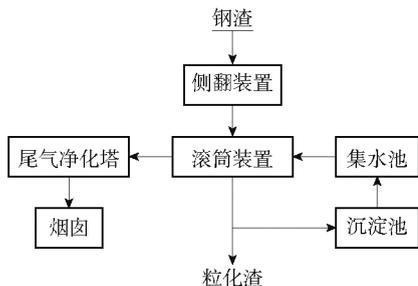


图6 钢渣滚筒处理工艺流程

Fig.6 Process flow of drum treatment of steel slag

钢渣的滚筒处理工艺流程短,装置体积小,渣铁分离效果好,处理后的钢渣活性和安定性较好,钢渣呈颗粒状,粒度小于10 mm的含量达80%以上^[44]。李云云等^[45]研究发现,滚筒法和热闷法处理后的钢渣化学成分及物相组成相似,但滚筒渣比热闷渣中CaO含量高,而f-CaO含量却较低。但该工艺的缺点是对钢渣的流动性要求较高,处理效率低,设备结构复杂且维修难度大,运行成本高^[46]。

2.5 小结

目前的钢渣一次处理工艺主要采用水淬、风淬、热闷和滚筒。其中,水淬和风淬处理工艺流程简洁,冷却速度快,但处理过程是敞开的,产生的大量烟尘和水蒸汽不利于回收或有组织的排放,容易造成环境污染。尽管这两种处理工艺成熟、运行可靠,但也逐渐被其他更具优势的处理技术所替代。热闷法在我国应用较为广泛,但常压池式热闷技术的处理周期较长,有时存在钢渣闷不透和颗粒大的现象,底水池式热闷法的出现解决此类问题。辊压破碎-余热有压热闷技术因其处理后的钢渣活性和安定性更好、粒度更小,较传统的热闷技术具有处理周期更短,且钢渣余热易回收等优势,已被逐渐推广应用。滚筒法和热闷法处理后的钢渣化学成分及物相组成相似,但滚筒法对钢渣的流动性要求高,且处理效率较低。

3 钢渣二次处理工艺

钢渣一次处理是将高温熔融钢渣通过预处理变

成常温颗粒钢渣,而二次处理是在一次处理的基础上,对钢渣进行破碎、筛分、分选等操作,主要目的是回收其中的铁资源,并使尾渣稳定化、资源化,满足建材等领域的利用要求^[47]。主要设备包括破碎设备(如颚式破碎机、圆锥破碎机、反击式破碎机、棒磨机)、筛分设备(如固定筛、液压翻转筛、振动筛)及分选设备(如重选机、磁选机、浮选机)。目前,钢渣分选常采用磁选法,主要的磁选设备有电磁除铁器、永磁滚筒皮带机、筒式磁选机^[48]。磁选颗粒受力原理如图7所示。

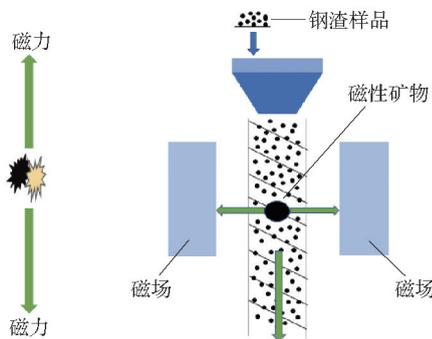


图7 磁选颗粒受力原理示意

Fig.7 Schematic diagram of the principle of magnetic separation of particles

3.1 传统处理工艺

钢渣二次处理工艺主要采用干法处理和湿法处理。干法处理工艺是将粒度小于100 mm的钢渣原料进行破碎、研磨和筛分,随后通过磁选机分选出高品位渣钢和非磁性尾渣,磁感应强度通常大于200 mT。钢渣的湿法处理与干法处理相似,钢渣原料经湿法破碎、研磨后进行筛分,筛分设备设有喷水装置,水压通常大于0.3 MPa,此外增加了由浓缩池和过滤机构成水处理系统,水的循环利用率大于80%^[49]。钢渣的干法与湿法处理工艺流程如图8所示。

Lan等^[50]提出了一种优化钢渣磁选工艺的方法,通过测定磁选过程可分离出的最大磁铁矿量,估算出最终磁性铁的回收率,并根据粒度分布情况改进磁选过程,从而提高磁性铁的回收率。为避免湿法处理引起的钢渣活性组分水化,可采用矿物分离法分离惰性组分^[51]。Hou等^[52]针对磁力团聚导致磁选效果差、活性低的问题,研发出以空气流态化为进料方式的新型干式磁选机。该设备基于材料磁性的可调节磁场强度,通过磁网分离单个颗粒,同时增

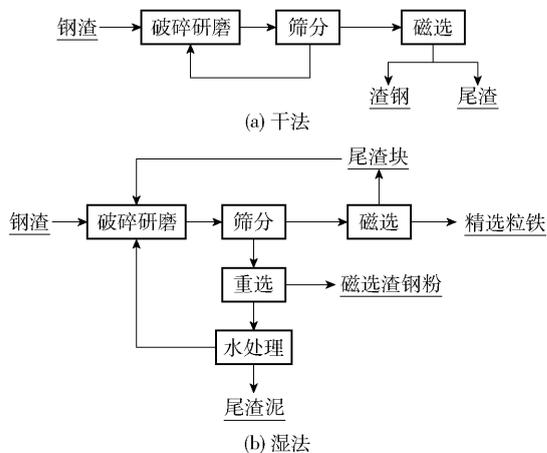


图 8 干法和湿法处理工艺流程

Fig. 8 Dry and wet processing flow

强机械和超声波复合振动,有效分离钢渣中的惰性与活性矿物,磁性产品中的铁品位提高了 6.88%。

3.2 电磁处理工艺

传统的钢渣二次处理提取铁资源的工艺流程复杂,分离与回收效率有待提高。若要更大程度回收铁资源,需将钢渣破碎至更细的粒度^[53]。而电磁分离是一种高效的金属熔体净化技术,基于金属熔体和非金属熔体物理性质(黏度、密度、电导率、表面张力等)的差异,以及在搅拌过程中产生重力和洛伦兹力的作用,可实现两相介质的分离^[54]。胡绍洋^[55]采用电磁分离技术回收液态钢渣中的金属液滴,有效促进了金属液滴间的融合,当设置旋转磁场为 20 A、25 Hz 和行波磁场为 20 A、10 Hz 时,与未设置磁场相比,从钢渣中回收渣铁含量增加了 1 倍。

3.3 小结

钢渣二次处理工艺主要包括干法与湿法,通过破碎、研磨、筛分及磁选回收铁资源。为了提升铁回收率,通常优化磁选工艺、引入空气流态化干式磁选机等方式。但传统方法因工艺流程复杂且效率有限,常需将钢渣破碎至更细粒度以强化铁回收;而新兴的电磁分离技术则利用金属与非金属熔体的物理性质差异,在电磁场作用下显著促进了金属液滴的融合与回收,展现出良好的应用前景。

4 结论与展望

4.1 结论

钢铁工业的绿色、可持续发展,很大程度取决于钢铁生产过程的清洁化水平以及钢铁工业对社会和

环境负面影响的管控能力。随着全球对钢铁的需求逐年增加,必然产生大量的钢渣副产物。欧美与日本等国的钢渣利用率很高,而我国的利用率不足 40%,主要以堆存和填埋的方式处置。因此,开发高效、清洁的钢渣处理技术,优化其利用途径与提高利用率迫在眉睫。

1) 钢渣性质与原料地区分布以及前端炼钢工艺有关。钢渣的一次和二次处理对其深度利用有着重要关联,核心目标是实现钢渣的快速稳定化与金属铁的高效回收。

2) 目前钢渣一次处理工艺主要采用水淬、风淬、热闷和滚筒,其中第四代熔融钢渣高效罐式有压热闷处理技术与装备已广泛应用于国内外大型钢铁企业,国内市场占有率达 90% 以上,钢渣处理率高达 99%。

3) 二次处理是对钢渣进行破碎、筛分、分选等操作,传统的二次处理工艺对钢渣的分离与回收效果欠佳,常引入新材料和智能技术以改进装置。目前电磁分离被认为是一种高效的金属熔体净化技术,与未设置磁场相比,回收渣铁含量增加了 1 倍。

4.2 展望

钢渣处理存在的主要问题包括:在技术层面,钢渣的组分复杂、活性与安定性差,导致处理成本高、产品性能不稳定,现有的钢渣处理技术各有优劣,均存在自身的局限性;在环保层面,传统的钢渣处理工艺存在粉尘、蒸汽和重金属浸出等环境风险;在经济层面,钢渣的处理成本较高,尤其因二次处理的产业链不完善,导致高附加值的钢渣产品开发不足,经济效益偏低。

1) 技术层面。未来钢渣处理将从粗放处理向精细化发展,如增加压力监测和动态调节阀,实现钢渣在热闷过程中的精准控制,避免出现红渣和冷却不均等现象。此外,通过工艺优化与多学科的交叉创新,深化智能化、系统化、绿色化,推动“无人工厂”技术,如引入智能分选、过程调控等数字化工具增强钢渣处理效率与精度,实现处理过程的全装备化和净化。

2) 系统层面。钢渣处理可嵌入钢铁生产的全流程,如将钢渣余热回收利用与炼钢工序耦合,通过闭环提升整体效益。

3) 政策层面。需完善绿色标准,如钢渣在基建项目中的使用标准、建立碳积分交易机制,构建“技

术-经济-政策”协同创新的框架,助力钢渣从大宗固废向战略资源的转型,为钢铁行业绿色、可持续发展提供完善的体系。

[参考文献]

- [1] Kermeli K, Edelenbosch O Y, Crijns-Graus W, et al. Improving material projections in Integrated Assessment Models: the use of a stock-based versus a flow-based approach for the iron and steel industry[J]. *Energy*, 2022, 239: 122434.
- [2] World Steel Association. World steel in figures 2024[R]. Brussels: World Steel Association, 2024.
- [3] Yu X, Chu J, Wu S, et al. Production of biocement using steel slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 383: 131365.
- [4] Fisher L V, Barron A R. The recycling and reuse of steel-making slags—A review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146: 244–255.
- [5] Nippon Slag Association. Production and uses of steel slag in Japan[R]. Tokyo: Nippon Slag Association, 2021.
- [6] O'Connor J, Nguyen T B T, Honeyands T, et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419: 126478.
- [7] Rui Y, Qian C, Zhang X, et al. Different carbon treatments for steel slag powder and their subsequent effects on properties of cement-based materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132407.
- [8] Gao W, Zhou W, Lyu X, et al. Comprehensive utilization of steel slag: A review[J]. *Powder Technology*, 2023, 422: 118449.
- [9] 崔心宇, 那贤昭. 钢渣资源化技术及展望[J]. *中国冶金*, 2024, 34(10): 16–25.
- [10] Mochizuki Y, Tsubouchi N, Sugawara K. Separation of valuable elements from steel making slag by chlorination [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 158: 104815.
- [11] Yildirim I Z, Prezzi M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag[J]. *Advances in civil engineering*, 2011, 2011(1): 463638.
- [12] Tossavainen M, Engstrom F, Yang Q, et al. Characteristics of steel slag under different cooling conditions[J]. *Waste management*, 2007, 27(10): 1335–1344.
- [13] 李明阳. 钢渣处理工艺的设计思路[J]. *中国冶金*, 2014, 24(5): 1–4.
- [14] 胡绍洋, 戴晓天, 那贤昭. 钢渣的处理工艺及综合利用[J]. *铸造技术*, 2019, 40(2): 220–224.
- [15] 谢良怀. 钢渣水淬工艺技术与效益[J]. *钢铁*, 1987(8): 67–71.
- [16] 罗万平, 雷玉办, 郑玉龙, 等. 真空碳热还原温度对电炉钢渣自粉化的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2024, 44(5): 428–435.
- [17] 陈森. 转炉钢渣水淬工艺与设计问题的探讨[J]. *武钢技术*, 1982(4): 51–58.
- [18] JojiAndo, 鲍梅颖. 氧气顶吹转炉炉渣风淬粒化和热回收系统的开发[J]. *冶金能源*, 1985(5): 54–56.
- [19] 朱剑波, 王帆, 沈奥林, 等. 风淬钢渣利用现状及资源化发展趋势[J]. *建筑技术开发*, 2020, 47(23): 133–135.
- [20] 周文. 一种液态钢渣风淬用喷管的数值模拟[J]. *中国战略新兴产业*, 2018(40): 162–163.
- [21] 刘源洞, 史晋铭, 马国军, 等. 基于CFD的钢渣风淬工艺参数分析与设计[J]. *炼钢*, 2021, 37(4): 74–80.
- [22] 王占英, 聂永强. 转炉钢渣处理风淬工艺的探讨[J]. *河北冶金*, 1995(6): 53–55,47.
- [23] 饶磊, 吴六顺, 周云, 等. 高温改性及风淬处理对钢渣易磨性影响的工业性试验研究[J]. *炼钢*, 2017, 33(6): 73–77.
- [24] Wang H, Liu C, Xing H W, et al. High-temperature modification and air-quenching granulation of steel slag [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2022, 29(5): 783–792.
- [25] 佟帅, 李晨晓, 王书恒, 等. 钢渣处理工艺及综合利用分析[J]. *冶金能源*, 2020, 39(6): 3–7.
- [26] 高本恒, 郝以党, 张淑苓, 等. 转炉钢渣资源化处理及热闷生产工艺应用实例研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(11): 99–101,79.
- [27] Liu J, Yu B, Wang Q. Application of steel slag in cement treated aggregate base course[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269: 121733.
- [28] Liu Z, Zeng H, Wang F. Development of high performance carbonatable concrete for steel slag valorization[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123317.
- [29] Wu Q, Huang Z. Preparation and performance of lightweight porous ceramics using metallurgical steel slag[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(18): 25169–25176.
- [30] Pang L, Liao S, Wang D, et al. Influence of steel slag fineness on the hydration of cement-steel slag composite pastes[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 57: 104866.
- [31] Zhang H, Dong J, Wei C. Material properties of cement doped with carbonated steel slag through the slurry carbon-

- ation process: Effect and quantitative model[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(3): 1681–1690.
- [32] 王文林, 曹蕾, 顾红霞, 等. 钢渣热焖工艺及其对水泥性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(5): 1578–1584.
- [33] 于洋. 钢渣处理及资源化利用技术现状与展望[J]. 冶金动力, 2023(2): 115–118.
- [34] 李丁丁, 黄锁虎. 底水闷渣工艺在钢渣预处理中的应用[J]. 冶金与材料, 2025, 45(2): 73–75.
- [35] 夏杰生. 底水法钢渣热焖技术受青睐[N]. 中国冶金报, 2023-09-21(005).
- [36] 郝以党, 张宇, 张淑苓, 等. 钢渣稳定化处理及高价值资源化技术及应用[C]. 中冶建筑研究总院有限公司, 2014: 328–342.
- [37] 么瑞轩, 谢建军, 孙宇佳. 钢渣辊压破碎-余热有压热闷工艺与设备浅析[J]. 河北冶金, 2025(4): 86–90.
- [38] 庄剑恒, 朴星君, 王冠. 我国钢渣特性与主要处理方法及资源化利用现状[J]. 冶金标准化与质量, 2024, 62(1): 32–36.
- [39] 田广银, 张凌燕. 钢渣热焖技术分析与应用实践[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 126–128.
- [40] 王申. 熔融钢渣有压热闷及显热回收工艺研究[D]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2012.
- [41] 郭文斌, 刘志远, 王重君, 等. 转炉钢渣辊压破碎-有压热闷处理工艺的应用实践[J]. 宽厚板, 2023, 29(1): 17–21.
- [42] 李嵩. BSSF 滚筒法钢渣处理技术发展现状研究[J]. 环境工程, 2013, 31(3): 113–115.
- [43] 刘钰天, 沈恒根, 晏维华, 等. BSSF 滚筒法液态钢渣水淬尾气净化工艺的分析[J]. 环境工程, 2011, 29(4): 78–81, 89.
- [44] 胡治春. 解析钢渣滚筒原理与尾渣综合利用的关系[J]. 中国高新技术企业, 2013(13): 97–99, 58.
- [45] 李云云, 倪文, 李佳, 等. 滚筒渣与热闷渣基础性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(12): 132–139.
- [46] 王会刚, 吴龙, 彭森, 等. 中外钢渣一次处理技术特点及进展[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5025–5031.
- [47] 张燕涛. 一种高效经济的钢渣二次处理工艺浅析[J]. 科技风, 2016(2): 116.
- [48] 程志洪. 钢渣二次加工处理技术优化[J]. 山东冶金, 2016, 38(5): 53–54, 60.
- [49] 刘平, 王益平, 冯双红. 钢渣二次处理线设计实践[J]. 宝钢技术, 2019(2): 34–37.
- [50] Lan Y, Liu Q, Meng F, et al. Optimization of magnetic separation process for iron recovery from steel slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24(2): 165–170.
- [51] Hou K X, Zhan H. Magnetic separation characteristics of steel slag powder in a fluidized dry magnetic network separator[J]. AIP Advances, 2024, 14(7): 075128.
- [52] Hou X, Wu S, Wang X, et al. An air-fluidized magnetic separator and its separation performance for steel slag[J]. AIP Advances, 2024, 14(3): 035302.
- [53] 何腊梅, 胡燕. 钢渣在炼钢生产中的循环利用[J]. 钢铁技术, 2013(4): 3.
- [54] 任忠鸣, 雷作胜, 李传军, 等. 电磁冶金技术研究新进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 583–600.
- [55] 胡绍洋. 电磁分离液态钢渣中金属液滴的实验研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2018.

Research progress and application status of steel slag treatment and resource utilization

WANG Yiyong, FAN Zhiyu*

(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Steel slag is the main by-product in the steelmaking process, and the development of its treatment and utilization technology has received widespread attention. Given the importance of green and sustainable development in the steel industry, it is particularly important to find an efficient and clean comprehensive utilization technology for steel slag. Based on above, this paper reviews the principles, research progress, and application status of existing processes from three aspects: primary treatment,

secondary treatment, and resource utilization of steel slag. It also looks forward to the difficulties, challenges, and prospects faced by current research in industrial production. In primary treatment, the fourth-generation high-efficiency pressurized tank-based thermal quenching technology and equipment for molten steel slag have been widely adopted by major steel companies both domestically and internationally, achieving a domestic market share of over 90% and a slag treatment rate of up to 99%. In secondary treatment, electromagnetic separation technology is employed, which doubles the recovery rate of slag iron content, compared to systems without a magnetic field. The paper aims to provide a reference for further in-depth research on steel slag treatment and resource utilization.

Keywords: steel slag; primary treatment; secondary treatment; pressurized tank-based thermal quenching; solid waste recycling and utilization; electromagnetic separation ▲

国家发展改革委：鼓励大型氧化铝、铜冶炼骨干企业 实施兼并重组提升规模化、集团化水平

2025年12月26日,国家发展改革委产业发展司发表文章《大力推动传统产业优化提升》。文章系统总结了“十四五”时期我国传统产业发展取得的显著成效,明确了“十五五”时期传统产业优化提升的目标和工作着力点,持续深入抓好贯彻落实。

文章指出,对氧化铝、铜冶炼等强资源约束型产业,关键在于强化管理、优化布局。强资源约束型产业是国民经济的基础性产业,在经济建设、国防建设等诸多领域具有重要作用。一段时间以来,各地发展氧化铝、铜冶炼等强资源约束型产业意愿强烈。“十五五”时期,要坚持全国一盘棋,立足各地区产业基础、资源禀赋、环境承载力的客观差异,构建因地制宜、突出特色的生产力空间布局。完善重大项目论证机制,推动地方论证前主动对接国家产业调控要求,防止盲目投资和无序建设。鼓励大型骨干企业实施兼并重组,提升规模化、集团化水平,提高产业竞争力。加力支持骨干企业技术攻关,提升全产业链技术优势。推进新一轮找矿突破战略行动,优化海外矿产资源勘查开发合作。完善回收利用体系,分品类推动废弃物循环利用。

文章提到,对新能源汽车、锂电池、光伏等“新三样”产业,关键在于规范秩序、创新引领。“新三样”产业是我国在激烈市场竞争下培育出的优势产业,是我国外贸高质量发展的新引擎,在全球绿色产业变革中彰显了中国力量,但也面临市场竞争失序、核心优势还不牢固等问题挑战。“十五五”时期,要综合整治“内卷式”竞争,维护公平竞争环境,提高行业集中度,打造全球技术领先高地。规范市场竞争秩序,深入实施公平竞争审查制度,加强价格监测、质量检查,防止低价无序竞争;加强供应链治理,保障中小企业款项支付,营造行业互利共赢良好生态;加大技术创新力度,巩固技术领先优势;加强宏观调控,坚持用市场化、法治化手段推动落后低效产能退出;强化行业自律,发挥行业协会作用,引导企业培育差异化竞争优势,弘扬企业家精神。

资料来源:中国有色网