

钢渣的一次处理技术及综合利用研究进展

刁江¹, 谷文凤^{1,2}, 陶浩然¹, 禹华芳³, 李鸿义¹, 谢兵¹

1. 重庆大学 材料与科学学院, 钒钛冶金及新材料重庆市重点实验室, 重庆 400044;

2. Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai 9808577, Japan;

3. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083

摘要:【目的】研究钢渣一次处理技术、回收利用方式和管理现状,深入分析钢渣利用率低的原因,并剖析钢渣利用面临的挑战。【研究现状】综述主流钢渣一次处理技术的工作原理及特点,包括热闷法、热泼法、滚筒法、水淬法、风淬法;总结钢渣在钢铁行业、水泥和建筑行业、微晶玻璃和陶瓷生产、污水处理、农业化肥生产、功能材料方面的综合利用现状;总结在选择钢渣的一次处理工艺时,必须综合考虑如钢渣的利用途径、节能环保要求以及投资效益等众多因素,钢渣的一次处理技术在国内外钢铁企业中的应用呈现多样化特征。【结论与展望】虽然钢渣在建材、农业、污水处理、陶瓷等领域已有一定程度的应用,但距大规模、高附加值的应用还相差甚远;发展高利用率、多极化的钢渣一次处理技术,加大钢渣综合利用,是钢渣一次处理技术领域的关键。

关键词: 钢渣; 一次处理; 综合利用; 热闷法; 滚筒法; 热泼法

中图分类号: TB4; TQ324.8

文献标志码: A

引用格式:

刁江, 谷文凤, 陶浩然, 等. 钢渣的一次处理技术及综合利用研究进展[J]. 中国粉体技术, 2025, 31(3): 168-178.

DIAO Jiang, GU Wenfeng, TAO Haoran, et al. Research progress on primary treatment technology and comprehensive utilization of steel slag[J]. China Powder Science and Technology, 2025, 31(3): 168-178.

钢渣的资源化利用彰显着现代钢铁产业技术的显著提升。包括美国、欧盟和日本在内的发达国家与地区,钢渣的回收再利用率已超过九成,实现了钢渣资源的排用平衡^[1]。中国每年产生的钢渣总量超过了1.5亿t,然而综合利用率仅为30%^[1]。当下,全国累计产生的钢渣总量已超过18亿t,堆存占用的土地面积达到20多万亩。不仅加剧了环境污染的问题,同时带来的安全隐患日趋明显。为了减少对土地资源的占用及避免对生态环境的破坏,亟须推动钢渣的科学合理利用^[2-3]。

钢渣一次处理的主要目的是将熔融钢渣转变成满足特定尺寸需求的常温块状渣,进而利于后续钢渣的二次处理。钢渣的一次处理技术是影响后续综合利用的关键,将直接影响钢渣的粒度、组成、活性、酸度和碱度等物理化学性质^[2-3]。在选择适宜的处理技术时,须全面考量众多因素,包括钢渣的潜在应用领域、节能环保的要求与处理成本等。鉴于炼钢设备、生产工艺、钢渣的物理化学特性和钢渣应用领域的多样性,国内外钢铁企业在选择钢渣一次处理技术时存在差异^[4]。目前,普遍采用的一次处理技术主要有热闷工艺、热泼工艺和滚筒工艺。此外,风淬粒化和水淬工艺等也在工业中实现部分运用^[4]。各种工艺都有优势与不足,因此,在选择适当的一次处理工艺时,须要综合考虑钢渣的特性、最终应用需求、节能和环保等多方面因素。

目前,钢渣在中国的应用主要集中在选铁等冶金工业内循环回收利用,热态钢渣经一次处理和多级破碎后,磁选出返炼钢的渣钢、返烧结的磁选粉和建材化利用的尾渣^[3-4]。河沙采挖禁令导致混凝土用料短缺,扩大钢渣在建筑和建材制品领域的应用是可预见的趋势,也是处理巨量堆存钢渣的重点方

收稿日期: 2024-09-03, 修回日期: 2024-10-23, 上线日期: 2025-03-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 51974047; 重庆英才计划项目, 编号: cstc2022ycjh-lgzxm0003。

第一作者简介: 刁江(1982—), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 重庆市英才青年拔尖人才, 研究方向为冶金物理化学。

E-mail: diaojiang@163.com。

向,然而,由于钢渣具有安定性不良、易磨性差、活性低等特点,因此在建材领域的实际利用远低于预期。本文中旨在研究钢渣一次处理技术、回收利用方式和管理现状,深入分析钢渣利用率低的原因,并剖析钢渣利用面临的挑战。最后,从环保的角度分析钢渣利用和管理的预期变化,旨在为钢铁企业全种类全流程高效率、环保化实现钢渣的产品化处理提供参考。

1 钢渣的主要一次处理技术

1.1 热闷法

热闷法是当前国内应用最为广泛的钢渣处理技术,其历史可以追溯至上世纪。1992年,中冶建筑研究总院与合作单位首次研制了第1代钢渣热闷处理技术^[5]。该技术主要用于处理转炉钢渣,工艺流程为将高温钢渣倾倒入特制的热闷池内,通过喷水冷却和加盖保压来控制池内的压力^[5]。目前,经过不断地改良和优化,该技术已被广泛采用,是当下具有最佳经济效益的钢渣处理手段^[6]。

钢渣热闷处理的主要原理是利用钢渣的余热,通过喷洒冷却水对热态钢渣进行冷却,使得钢渣在物理和化学共同作用下发生体积膨胀^[6]。在急速冷却阶段,由于温度骤降,因此钢渣内部会产生热应力,致使钢渣表面产生裂纹而破碎。在热态钢渣与冷却水接触时,会释放大量的过饱和蒸汽,促使钢渣中的游离氧化钙($f\text{-CaO}$)和游离氧化镁($f\text{-MgO}$)转化为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,使得钢渣体积发生膨胀而破碎粉化^[4-5]。在降温过程中,钢渣中大量的 $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_4$ 会因相变引发的应力变化,使钢渣产生裂纹,体积膨胀率可达到10%^[5]。除此之外,冷却过程中 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 发生分解,生成的 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_4$ 和 $f\text{-CaO}$,也会导致钢渣的体积发生膨胀^[6-7]。在热应力与化学反应引发的膨胀力共同作用下,钢渣发生裂解和粉化,最终形成易于回收和再利用的钢渣小颗粒,同时有效降低了不稳定物相的含量^[6]。

热闷工艺对热态钢渣的流动性和碱度要求较低,工艺简单,操作难度相对较低,并且机械化程度较高^[4]。处理后的钢渣胶凝活性较强, $f\text{-CaO}$ 质量含量较低,然而,热闷具有工艺处理周期长、处理效率较低、机械损耗大、尾渣的粒度不均匀的特点,且辊压设备长期在高温下工作容易损坏。目前的钢渣热闷处理效果还不够稳定,在处理后的钢渣应用于建材行业时,会引起混凝土破坏性膨胀,仍然制约着目前钢渣的资源化利用^[4,7]。

在目前的钢渣热闷处理过程中,仅在前中期热闷罐内能够维持目标压力,后期钢渣温度较低,喷水无法产生足够的蒸汽来维持压力;而在高温钢渣辊压破碎时,须要通过喷少量水蒸发来降低渣温,这部分蒸汽目前未进行利用,因此,将钢渣辊压破碎阶段的蒸汽利用与热闷也值得研究^[7]。当前,钢渣固碳研究较多,可将热闷工艺与钢渣固碳技术结合,在热闷过程中通入 CO_2 ,与蒸汽共同消解钢渣中的 $f\text{-CaO}$,并且热闷后期无蒸汽时, CO_2 也可继续消解钢渣中的 $f\text{-CaO}$ 。

1.2 热泼法

热泼法是国内应用较多的一种钢渣处理技术,德国、加拿大、英国和印度等国家的钢渣处理工艺也以热泼法为主^[6-7]。热泼法有箱式和渣场热泼2种工艺。渣场热泼法为将钢渣倾倒在渣场,喷水冷却,使钢渣在热应力的作用下裂解粉化,并消解钢渣中的 $f\text{-CaO}$ 和 $f\text{-MgO}$ ^[4]。由于渣场热泼具有水耗大、占地面积广、处理效率较低、环境问题显著等特点,因此现代转炉炼钢企业通常选用箱式热泼工艺。箱式热泼工艺的具体操作步骤如下:将高温熔融钢渣装入渣罐,并运送至炉渣处理区域^[7]。将熔融钢渣均匀倒入耐高温的渣箱内,经过时间为8~45 h的冷却水集中喷淋、冷却,最终,钢渣经滤水处理后置于渣场,以备进一步处理^[6]。日本新日铁公司(Nippon Steel Corporation)研发的浅盘法与热泼法较为相似,流程是先将钢渣倒入渣盘上,冷却到200℃左右后倒入冷水池中,再次冷却后进行打捞及后续处理^[4]。

热泼是钢渣一次性处理中的一种过渡,最初由太原钢铁集团有限公司等钢铁企业采用^[6]。热泼法对钢渣流动性要求低,处理量大,操作简单且投资建设费用较低,但是环境污染显著,设施建设和运作的成本高,潜在的安全风险高等都是限制其在钢渣处理领域推广应用的主要原因。此外,处理后的钢渣的胶凝活性较低,原因是在钢渣缓慢冷却过程中, $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 会转变为 $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$,胶凝活性降低,同时钢渣中的 $f\text{-CaO}$ 和 $f\text{-MgO}$ 的分解和转化效果不佳,进一步加剧了使用难度^[7-8]。对于大型转炉炼钢企业,热泼工艺通常被视为钢渣处理中的辅助手段,如在滚筒法处理热态钢渣过程中,渣罐上部有异物或底

部仍遗留大量金属铁等问题时,热泼工艺被作为一种紧急处理方法使用^[9]。

1.3 滚筒法

滚筒法由石川岛播磨重工业公司(现名为IHI Corporation)和住友金属工业公司(Sumitomo Metal Industries)在20世纪80年代初联合首次提出^[4, 10]。滚筒法首先将钢渣以一定流量倾倒入滚筒内,钢渣瞬间受到冲击、破裂;在离心力的作用下,破裂的钢渣被甩向收集器,在冷却室内与空气进行热交换^[10]。1984年,日高精机株式会社(Nihon Kodenki Keiki, Ltd.)设计出双滚筒联动系统,进一步优化了滚筒工艺的处理流程^[4, 10]。双滚筒联动系统由2个相对旋转的滚筒组成,熔融钢渣在2个滚筒间被挤压和破碎,同时钢渣与滚筒内的冷却剂发生热交换,最终将蒸汽输送至余热锅炉^[10-11]。经过多次试验,该工艺实现了40%的热回收率,在处理后的钢渣颗粒中,玻璃相质量分数高达80%,然而,如果定期清除附着在滚筒内的钢渣,会导致热交换效率显著下降^[11]。

1998年,宝山钢铁公司(Baosteel Corporation,以下称宝钢)成功建设并运营了全球首个滚筒工艺处理熔融钢渣的工业化系统及装备^[11]。经生产实践,该技术具有排放低、工作环境整洁以及处理效率高、显著特点,能够有效降低基础设施建设投入、设备维修成本及日常生产运营费用^[11-12]。处理后的钢渣颗粒具有粒径均匀,安定性较好,可直接应用到多个领域^[12]。

在滚筒法处理钢渣过程中,熔融钢渣直接接触喷淋的冷却水,可能引发剧烈的爆炸,不仅会严重损坏设备,还会增加处理成本。由于滚筒法对于待处理的熔融钢渣要求其具备良好的流动性,因此存在一定限制,无法完全应对转炉产生的钢渣^[12-13]。

1.4 水淬法

20世纪70年代,新日铁公司(Nippon Steel Corporation)首次研发出水淬法钢渣处理技术^[14]。该工艺的核心机制是在高压水流的冲击作用下,熔融钢渣被破碎、粒化,同时,熔融钢渣与水接触产生应力集中,导致钢渣被裂解和粉化^[14]。处理后的钢渣颗粒粒径小,适用于再烧结或建材领域,如混凝土骨料或建筑用砂^[14]。1970年,马鞍山钢铁公司(Maanshan Iron & Steel Co., Ltd.,以下简称鞍钢)首次使用该工艺以后,水淬法在许多钢铁制造流程中得到广泛应用,尤其是在济南钢铁集团的新转炉钢渣处理生产线上^[15]。

水淬法的优点包括操作简便、效率高、对环境影响较小、设备成本低、占地少等,然而,该方法也存在一定安全隐患,如爆炸等风险^[15]。此外,随着炼钢技术的发展,特别是溅渣护炉技术的应用,熔融钢渣的黏度增加,流动性下降,直接影响了水淬法的处理效率,因此,目前水淬法在钢渣处理领域已很少被使用。

1.5 风淬法

风淬法,又称钢渣的风淬粒化技术,是利用气体介质(如压缩空气、氧气、氮气或高压蒸汽)对钢渣进行快速粒化并冷却的工艺,同时借助热交换设备回收气体介质,实现部分热量回收^[16]。此方法通过将熔融钢渣以适当速度从渣罐中倾倒,利用粒化装置喷射的高压气流冲击熔融钢渣,促使钢渣破碎,并最终实现粒化^[16-17]。

20世纪70年代末,三菱重工业公司(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)与长野工业公司(Tadano Utilities, Ltd.)合作建立示范工厂,探究风淬法处理熔融钢渣及余热回收^[16]。20世纪80年代初,首台工业废渣风淬处理设备被推行^[4]。1988年,鞍钢研发出同种粒化技术,并成功取得专利权;1991年,国内首条风淬粒化技术处理熔融钢渣的生产线建成;2007年,鞍钢建立了中国最大规模的钢渣风淬粒化处理生产线,热态钢渣处理量占钢渣总质量的40%~70%^[17-18]。

风淬法可实现熔融钢渣的高效粒化,粒度小且分布均匀^[19]。与其他处理工艺相比,风淬法处理后的钢渣颗粒硬度更高,但是结构内应力显著,在一定时间内可能会形成时效相变与结构重组^[19-20]。此外,风淬法工艺流程简单高效,能实现钢渣显热的有效回收,同时钢渣内 f -CaO含量低,对水资源的损耗少^[20]。总体来说,该方法只适用于处理流动性较好的熔融钢渣,无法处理黏度高的钢渣以及固态钢渣,此外,操作现场噪声问题较为突出^[21-22]。

2 钢渣的综合利用现状

2.1 在钢铁行业内循环利用

钢渣在钢铁行业内的应用主要包括转炉炼钢造渣、电炉钢水热兑、高炉熔剂以及烧结生产等。钢渣中质量分数为15%~30%的 Fe_xO 能够作为转炉化渣剂加以回收利用^[2,4]。在转炉冶炼初期,渣中 FeO 的含量被显著提高,加快石灰的熔解速度,促进熔融钢渣快速成渣,从而有利于快速脱磷^[23]。成渣速率的加快在有效改善转炉内衬的侵蚀,同时,在吹炼中期,在碳的还原作用下,钢渣中的 Fe_xO 能够最终转移至钢水中^[23-24]。这不仅有利于钢渣中铁的回收,同时降低了转炉炼钢过程中铁料的消耗,此外,高碱度钢渣中富含的 CaO 、 MgO 等能够在一定程度上替代石灰和白云石,从而减少造渣料的使用^[24]。转炉钢渣中适量加入 BaCO_3 和 Fe_2O_3 等化合物,能显著增强钢渣的脱磷能力,可在铁水预处理阶段,作为脱硅剂或脱磷剂使用^[24]。转炉渣作为熔剂,不仅化渣快,脱硅率高,并且泡沫渣的高度适宜,成本上也具有明显优势^[24]。

宝钢首先研发出电炉热兑熔融钢渣的技术,显著提升了泡沫渣的埋弧效果^[25]。在产量为70 t的直流电炉中加入质量为5~15 t的熔融钢渣,效果相当于添加等量的铁水,缩短废钢冶炼时间的同时,大幅降低了电能消耗,提高了经济效益,且显著提升了电炉的生产效率^[25]。将钢渣颗粒与废钢混合用于电炉冶炼,能够显著降低石灰消耗,并在生产低磷优质钢材时改善电炉的脱磷操作。电炉热兑熔融钢渣对节能减排有着无法忽视的积极意义和显著的效果。

经过破碎、磁选等处理回收钢渣中的金属铁后,尾渣具有碱度高等特性,可作为石灰石的替代品,用于高炉冶炼,从而降低烧结矿和石灰的使用量^[26]。具体替代比例应基于炼铁和炼钢流程的综合经济效益,并特别注意钢渣中磷含量对炼铁的潜在影响。低磷钢渣可作为高炉和化铁炉的熔剂材料,有助于回收利用钢渣中的钢粒和 Fe_2O_3 ^[26]。

尽管在烧结生产中,钢渣的应用时有争议,但不失为一种有效的钢渣利用手段。钢渣的熔点较低,能在较低温度下快速形成黏结相,从而提升了烧结矿的强度^[27]。1998年,宝钢在烧结矿中首次添加钢渣,至2001年,每年应用在烧结消耗中的钢渣量超15万t,有效减少了熔剂使用量,降低了成本^[28]。钢渣中富含 CaO 、 MgO 和 MnO 等氧化物, CaO 的质量分数可达40%~50%^[28-29]。钢渣中的Fe元素通过烧结工艺亦可实现再利用。鞍钢的生产实践结果显示,钢渣的使用可以改善烧结料层的透气性,同时增加烧结矿成品率,优化烧结机效率,并改善烧结矿的冶金性能,显著降低烧结矿制造成本^[29]。目前,钢渣在钢铁行业内循环利用量非常有限,并且对钢渣中P、S等的含量有严格限制,同时钢渣的组分含量波动大,给钢渣在钢铁行业内循环利用带来一定困难^[29]。

2.2 在水泥和建筑行业中的利用

目前,在水泥、建筑、路桥建设等建筑领域中的应用是钢渣实现大规模利用的主要途径^[2]。钢渣的化学成分与硅酸盐水泥相当,钢渣中含有的硅酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)、硅酸二钙($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)和其他具有胶凝性能的矿物相,水化过程与硅酸盐水泥相似^[29]。将处理后的钢渣作为原料,添加适量的辅助材料和石膏研磨,可以制备出具有水硬性的钢渣水泥。钢渣水泥的生产过程包括破碎、磁性分选、干燥、定量混合、研磨和包装等步骤^[30]。当下生产的钢渣水泥可应用于民用建筑和工业建筑中,如梁、板、楼梯、工业建筑设备基础等^[29-30]。钢渣水泥具有轻微膨胀和优异的抗渗透性,适用于防水混凝土工程^[30]。

基于建筑行业的技术发展与进步,在21世纪的建筑领域,优质混凝土或将占据结构材料的主导地位,复合掺合料技术能够显著利用各种材料的优点,是实现钢渣大宗利用的有效途径^[31]。掺合钢渣粉(或复合钢渣粉)的混凝土早期强度增长缓慢,后期强度的增长较为迅速,改善了混凝土的弯曲强度、耐磨性和脆性^[31]。钢渣微粉优化了混凝土孔隙结构,提高混凝土的抗渗性能和抗碳化能力,也一定程度上降低氯离子的扩散速度^[32]。钢渣粉的使用还能改善混凝土的工作性能,降低混凝土坍落度经时损失,使其更易于振捣^[33]。研究发现,使用超细钢渣微粉部分替代水泥在油田固井中使用能显著降低成本,且操作简单^[33-34]。

钢渣在道路与桥梁建设中的应用历史悠久。1937年,钢渣首次被用于公路铺设,随后,1979年在道

路建设中开始使用钢渣。自20世纪50年代起,中国开始探索钢渣作为路基填充材料的应用,1976年,山西省简子沟编组站的实践表明,这一方法效果显著^[34]。在中国经济快速发展的背景下,高速公路和桥梁建设需求剧增,钢渣作为基础材料展现出明显优势^[35-36]。钢渣作为路基材料使用,一方面,能够固化地基附近的土壤,提高基础负载能力,节省成本^[36];另一方面,钢渣作为非黏性粗料散体材料,具有承载能力良好、抗渗透性和抗冻性能好的特点,适用于寒冷地区的道路建设^[34]。此外,钢渣具有压实度高、水稳定性好、强度高特点,能有效分散和调节路面压力,在提高地基承载能力,减少路基沉降的同时,可以实现应力扩散和固结排水^[37]。

总的来说,国内钢渣研究起步较晚,处理工艺相对落后,导致钢渣水化活性较低, f -CaO含量较高,稳定性较低,极大地限制了钢渣在建材领域的应用。同时,针对含重金属或放射性物质的钢渣的在建材领域的应用,须严格按照《建筑材料用工业废渣放射性物质限制标准》(GB 6763—1986)执行。尽管目前钢渣在建筑材料中的应用面临众多挑战,但优势仍旧不可忽视^[37]。钢渣中存在的 f -CaO和 f -MgO造成钢渣的稳定性不良,金属铁的存在使钢渣研磨过程复杂并增加能耗,同时可能引发锈蚀,钢渣的组成多样性增加了应用难度,特别是 f -CaO含量的差异^[35-37]。总体看来,钢渣的处理和应用须要克服这些挑战,但在建筑材料中的应用潜力仍然巨大。

2.3 在微晶玻璃和陶瓷生产中的应用

传统陶瓷的原料通常为黏土、长石、石英和其他矿物,与钢渣的化学成分相似,因此钢渣可作为制备陶瓷产品的原料^[38]。在利用钢渣制造微晶玻璃方面,国际上已有多项研究成果。如研究者^[39]利用钢渣成功生产了富含CaO的微晶玻璃,相较普通玻璃,展现出更好的耐磨性和耐腐蚀性;研发出了可用于墙面装饰或作为地面瓷砖的透明及彩色的玻璃陶瓷。我国在钢渣微晶玻璃的技术上也取得了突破性的进展,成功制备出了具有光滑表面的钢渣微晶玻璃,硬度可达700 HV^[40-41],具有耐磨性优越、抗酸碱腐蚀能力及抗温变性能强等特性,在极端环境下表现优异,适用于高端建筑装饰^[40-41]。

裴立宅等^[42]采用冶金渣为原料,通过熔融法制备出CaO-Al₂O₃-SiO₂体系的玻璃陶瓷。具有化学稳定性卓越、吸水率低、抗弯强度高特性^[42]。白云鄂博尾矿、钢渣中存在残余的Fe、Nb、萤石和稀土,与粉煤灰以一定质量比例混合后,得到满足微晶玻璃需求的基本成分的原料,可以制备出微晶玻璃^[38-39,42],最终成功制备的纳米级微晶玻璃复合管材,同时具备金属性能和玻璃陶瓷的性能^[43]。此外,以还原性钢渣为基础材料,通过烧结技术可制备出色彩丰富、纹理清晰的微晶玻璃花岗岩,在该工艺中钢渣的使用量可占原料质量分数的50%^[44]。邢苓瑞等^[45]将钢渣、煤矸石和炉渣在特定条件下混合,制备出钙长石全固废陶瓷,抗折强度达58.59 MPa。

目前,陶瓷产品需求量大,利用钢渣制备微晶玻璃和陶瓷产品能降低生产成本,同时解决固体废弃物难以大规模利用的问题,具有重要的现实意义,然而,钢渣成分复杂,杂质离子的种类和含量可能会影响陶瓷的制备工艺和性能,在一定程度上限制了其应用。近年来,我国在利用钢渣制备性能优异的陶瓷产品方面取得了长足进步,今后应积极发展制备陶瓷产品的新技术,实现利用制备陶瓷产品的产业化应用。

2.4 在污水处理中的应用

钢渣具有比表面积大、疏松多孔等特性,吸附性能良好,同时,钢渣的密度高,容易与水分离,因此在废水处理中的利用备受关注^[46]。未经处理的钢渣在废水处理中的吸附效率较低,是一方面钢渣的部分成分导致钢渣表面活性低,另一方面是某些预处理方法导致钢渣表面致密,孔隙率低,从而导致吸附效率低^[43]。为了提高吸附效率,通常会对钢渣进行改性,无机、复合和高温活化改性是钢渣改性的3种基本方法^[46]。无机改性是指用酸、碱、盐等无机试剂对钢渣进行改性;复合改性是指将钢渣与其他吸附材料混合;高温活化改性是指在高温条件下对钢渣进行处理,以达到改性的目的。近年来,利用钢渣处理矿山废水、工业废水和染料废水等各种废水的研究有较大进展,特别是在处理含有P、Ni、Cr及As等有毒物质的废水时,钢渣表现尤为出色^[47-48]。经改性处理后的钢渣处理废水的吸附效率加快,含Cr的重金属废水经钢渣一次吸附处理便可达到排放标准的要求。此外,钢渣在较大的pH范围内均表现出较高的重金属离子吸附能力^[47]。

钢渣具有密度高的特性,在水中可以快速沉降,能够通过物理沉淀技术,最终实现钢渣和废水的固液分离,不仅能显著缩短处理时间,还有效降低了处理成本^[48]。与其他吸附材料相比,钢渣在稳定性和安全性方面表现突出^[48]。钢渣的使用过程中不会对其他矿物质资源或生物资源产生负面影响,不仅促进了资源的回收利用,还为矿产资源保护做出了积极贡献,有效避免了露天开采和煅烧固化过程中可能引发的环境问题^[49]。

钢渣中含有一定量的P,使用钢渣处理废水时存在P释放的潜在风险。同时,针对钢渣中可能存在的重金属等物质也需进一步无害化处理。目前研究中,改性钢渣仅针对处理废水中的单一污染物,而废水中的污染物通常复杂多样,它们之间存在相互影响的可能性,从而降低吸附效率,因此,要实现钢渣在废水处理工业领域的应用,须要进一步研究钢渣对废水中各种污染物的吸附,使得处理后的废水能达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)。

2.5 在农业化肥生产中的应用

钢渣中富含的Ca、Si、P等营养元素,利于植物生长,同时高温煅烧增加了这些元素在钢渣中的溶解度,更容易被植物吸收,因此,钢渣可以成为一种优质矿物肥料^[2, 4]。西方发达国家在利用钢渣制造肥料的研究起步较早,在这一领域积累了丰富的实践经验,并积极推动钢渣在肥料生产中的应用^[10]。德国将钢渣肥料视为提升土壤肥力的主要举措之一。在日本,钢渣中的硅酸盐成分已被广泛认定为常用的肥料来源^[2, 10]。目前,钢渣在农业上的应用主要围绕硅肥和磷肥的生产,同时,钢渣微量元素肥料也实现部分生产利用,以满足植物的不同营养需求^[6]。

Si元素是构成土壤的核心元素之一,利于作物生长,同时可增强作物的抗病能力^[10]。钢渣中富含Si元素,其有效Si质量分数可达10%~35%;使用钢渣作为硅肥原料,可改善土壤缺硅的状况,促进作物生长^[10]。研究表明,利用钢渣合成的硅肥能够显著提高水稻的产量,增产量可达12%~15.5%^[50]。王晓军等^[50]研究了钢渣硅肥对白菜生长和抗病性的影响,研究结果表明,钢渣促进了白菜的生长,降低了白菜的病害发生率。

在冶炼中、高磷铁水的过程中,未添加萤石条件下,初期产生的含磷钢渣可以作为磷肥原料回收利用^[51]。钢渣磷肥主要有效成分包括 $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2$ 和 CaSiO_3 的固溶体,同时富含Mg、Fe、Mn等多种矿物质元素。钢渣磷肥中 P_2O_5 的浓度通常超过10 mol/L,值得注意的是,在弱酸性环境中,钢渣中的P能够被溶解,从而被植物有效吸收和利用^[10, 51]。总体看来,钢渣在肥料生产中的应用,不仅充分利用了工业副产品,还为提高土壤肥力和作物产量提供了新的解决方案,促进了资源的循环利用和环境保护。

长期使用钢渣制备的化肥可能会产生不良副作用,如土壤变硬或重金属污染。对此,研究人员通过钢渣和锰渣混合制成肥料,改善了酸性土壤,促进了作物生长,并且几乎不含重金属成分,有助于保护土壤^[52]。此外,钢渣的成分和性质因产地和处理工艺而异,因此,选择适当种类和数量的钢渣至关重要,钢渣的过量使用会带来特定的负面影响。今后,将钢渣用作肥料和土壤改良剂时,必须进行预处理、间歇使用或与其他物质结合使用,以减少钢渣的负面影响。

2.6 在功能材料方面的应用

钢渣因含铁量高、耐磨、抗压性能好,适宜用作喷砂磨料使用。研究表明,喷砂后的船体或工件表面清洁度等完全满足工业涂装的要求。且钢渣的硬度大,可循环使用,具有显著的成本优势,可有效改善钢渣堆放造成的环境问题^[53]。细粒度的钢渣尾料和喷砂处理后的钢渣还可回收用作水泥原料^[53]。钢渣磨料的经济价值是用作建材的细粒度尾料数倍,大幅提高了产品附加值。易承波等^[54]研究了钢渣作为船体喷砂除锈磨料的可行性,认为钢渣作为一种除锈材料,效果好,而且价格低廉,作为喷砂磨料应具有巨大的应用前景。陈广言等^[55]采用风淬钢渣进行钢渣喷砂试验,分别研究喷吹压力、喷吹时间与喷吹距离对试样表面光洁度和粗糙度的影响,并与其他常用磨料的效果进行对比。结果表明,风淬钢渣作为磨料能够满足工业清理和涂装需求,实现钢渣资源的有效利用。Gu等^[19-20]基于气淬处理技术处理液态钢渣,制备出钢渣型非金属喷砂磨料,物理、化学性质研究表明,其能达到喷砂磨料的各项标准。

以钢渣微粉为原材料可制备湿法脱硫技术的钢渣基改性脱硫剂、钢渣脱硫脱硝介孔材料和催化功

能材料,可直接降低企业脱硫脱硝的成本,实现环境减负、企业增效,但耐磨性对钢渣消耗量的影响显著^[56-57]。同时,介孔材料的形貌特性会直接影响钢渣的比表面积和烟气的流动性,进而影响脱硫和脱硝效率^[57]。

钢渣成分波动较大,且可能含部分重金属元素,如V、Cr、As以及Pb等,且重金属含量差异较大^[2, 10]。目前研究表明,钢渣中微量元素成分较少,但在作为功能材料时,尤其作为喷砂磨料使用时,须根据《涂覆涂料前钢材表面处理喷射清理用非金属磨料的技术要求》(GB/T 17850.6—2011)对各项标准及安全性进行评估。

3 结语

钢渣具有产量大、利用率低的特点,大量钢渣露天堆放,占用土地,存在重金属渗入土壤的安全隐患。虽然钢渣在建材、农业、污水处理、陶瓷等领域已有一定程度的应用,但距大规模、高附加值的应用还相差甚远。合理利用钢渣资源能够缓解自然资源的依赖,减轻固体废弃物对土地的压力,以及减少碳排放等环境问题,对钢铁行业的可持续发展具有深远的意义。尽管我国在钢渣处理和综合利用领域已取得大量研究成果,但由于钢渣产量逐年增加且综合利用技术发展不均,因此导致钢渣综合利用难以改善。此外,缺乏大规模工业化和高附加值的利用方式也是一个亟待解决的重要问题。

在当前的发展趋势中,我国的钢铁产业须紧跟时代潮流,高度重视熔融钢渣的显热的回收利用,以应对钢渣处理技术面临的挑战。这不仅是确保钢铁产业实现绿色、健康与可持续发展的核心策略,也是推动钢铁产业长远发展的关键基石。钢渣的应用范围已经从传统的工程填埋拓展到了生产水泥、制作建筑材料等多个领域。尽管如此,尚未找到一种有效的策略来实现钢渣的大规模资源循环利用。综上所述,发展高利用率、多极化的钢渣一次处理技术,加大钢渣综合利用,始终是钢铁冶金领域的关键课题,也将为我国在发展绿色工业体系打下稳固的基础。

利益冲突声明 (Conflict of Interests)

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

作者贡献 (Authors' Contributions)

谷文凤、刁江、禹华芳拟定综述论文写作大纲及主要内容,谷文凤和陶浩然进行了文献调研并撰写论文初稿,刁江、禹华芳、李鸿义及谢兵参与了多次论文修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The outline and main content of the review were prepared by GU Wenfeng, DIAO Jiang, and YU Huafang. GU Wenfeng and TAO Haoran conducted literature research and wrote the initial draft of the paper. DIAO Jiang, YU Huafang, LI Hongyi, and XIE Bing participated in paper revisions for multiple times. All authors have read the final version of the paper and consented to its submission.

参考文献 (References)

- [1] LIU C Y, GAO X, UEDA S, et al. Composition changes of inclusions by reaction with slag and refractory: a review [J]. ISIJ International, 2020, 60(9): 1835-1848.
- [2] 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.
- [3] GU W F, DIAO J, LAI Z Q, et al. Effect of MgO on phase structure and evolution of steelmaking slag during cooling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2024, 55(4): 2568-2579.
- [4] 谷文凤. 液态钢渣风淬过程飞行动力学与凝固换热规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
GU W F. Study on flight dynamics and solidification heat transfer law of liquid steel slag during air quenching [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [5] XUE K, WANG J J, ZHU X P, et al. Energy and exergy analysis of waste heat recovery from pressurized hot smothering

- steel slag by solar organic Rankine cycle[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(19): 10241-10250.
- [6] 刘云鹏, 庞凌, 邹莹雪. 热闷和热泼钢渣砂的体积稳定性研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(6): 1113-1117.
- LIU Y P, PANG L, ZOU Y X. Study on volume stability of hot stuff and hot splash steel slag sand[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2020, 44(6): 1113-1117.
- [7] GREGSON C, BROOKER R A, KOHN S C, et al. Thermodynamic and kinetic controls on phase stability and incorporation of water in larnite (β - Ca_2SiO_4): implications for calcium silicate inclusions in diamonds[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2024, 179(9): 82.
- [8] ZHU Z Q, GAO X, UEDA S, et al. Contribution of mineralogical phases on alkaline dissolution behavior of steelmaking slag[J]. *ISIJ International*, 2019, 59(10): 1908-1916.
- [9] MARTINS A C P, FRANCO DE CARVALHO J M, COSTA L C B, et al. Steel slags in cement-based composites: an ultimate review on characterization, applications and performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123265.
- [10] GAO W H, ZHOU W T, LYU X J, et al. Comprehensive utilization of steel slag: a review[J]. *Powder Technology*, 2023, 422: 118449.
- [11] MATSUURA H, YANG X, LI G Q, et al. Recycling of ironmaking and steelmaking slags in Japan and China[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(4): 739-749.
- [12] 曹志栋, 谢良德. 宝钢滚筒法液态钢渣处理装置及生产实绩[J]. *宝钢技术*, 2001(3): 1-3.
- CAO Z D, XIE L D. Facility for liquid slag treatment by rotary cylinder and its production results at baosteel[J]. *Bao Steel Technology*, 2001(3): 1-3.
- [13] LIU X B, ZHANG C, YU H N, et al. Research on the properties of steel slag with different preparation processes[J]. *Materials*, 2024, 17(7): 1555.
- [14] 肖双林, 陈荣全, 谷孝保. 应用水淬法处理韶钢120 t转炉钢渣[J]. *材料研究与应用*, 2010, 4(4): 561-563.
- XIAO S L, CHEN R Q, GU X B. The application and study of water quenching process used for treating slag at the 120 t converter of CSG[J]. *Materials Research and Application*, 2010, 4(4): 561-563.
- [15] 李斌, 力乙鹏, 王晨霞, 等. 水淬钢渣混凝土应力-应变全曲线试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(8): 163-169.
- LI B, LI Y P, WANG C X, et al. Experimental study on stress-strain curve of granulated steel slag concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(8): 163-169.
- [16] WANG H, ZHANG W, WANG C, et al. Research on making micro-beads by gas quenching from re-melted modified BOF steelmaking slag[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2020, 47(4): 432-436.
- [17] WANG L L, ZHANG Y Z, KE H B, et al. Experimental investigation on granulation characteristics and waste heat recovery of molten slag in gas quenching dry granulation technique[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 184: 116295.
- [18] WANG L L, ZHANG Y Z, LONG Y, et al. Simulation of primary breakup of molten slag in the gas quenching dry granulation process[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181: 115850.
- [19] GU W F, DIAO J, JIANG L Y, et al. Phase development in steelmaking slags during a gas quenching granulation process[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112504.
- [20] GU W F, DIAO J, HU R X, et al. Solidification and heat transfer of molten steel slag particles during air quenching process[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2023, 30(9): 1834-1842.
- [21] LIU C, KANG Y, ZHANG Y Z, et al. Granulation effect analysis of gas quenching blast furnace slag with different basicities[J]. *Coatings*, 2020, 10(4): 372.
- [22] 吴跃东, 彭犇, 吴龙, 等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J]. *环境工程*, 2021, 39(1): 161-165.
- WU Y D, PENG B, WU L, et al. Review on global development of treatment and utilization of steel slag[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 161-165.
- [23] 王晓斌. 40万 t/a 转炉钢渣蒸汽陈化处理生产线[J]. *起重运输机械*, 2020(7): 91-98.
- WANG X B. 400 000 t/a steam aging treatment line for converter steel slag[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2020(7): 91-98.

- [24] ALEX T C, MUCSI G, VENUGOPALAN T, et al. BOF steel slag: critical assessment and integrated approach for utilization[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2021, 7(4): 1407-1424.
- [25] FISHER L V, BARRON A R. The recycling and reuse of steelmaking slags: a review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146: 244-255.
- [26] 俞海明, 解英明, 陈跃军, 等. 70吨电炉热兑转炉液态钢渣的工艺实践[J]. *新疆钢铁*, 2012(2): 7-9.
YU H M, XIE Y M, CHEN Y J, et al. Process practice of hot liquid slag from BOF charging into 70 t EAF[J]. *Xinjiang Iron and Steel*, 2012(2): 7-9.
- [27] SAINI S, SINGH K. Recycling of steel slag as a flux for submerged arc welding and its effects on chemistry and performance of welds[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(3): 1165-1177.
- [28] MA M L, YANG H, BAI B, et al. Preparation and mechanism of silicate-based sintering material from large amount of steel slag[J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(12): 125503.
- [29] WANG Z J, SOHN I. A review on reclamation and reutilization of ironmaking and steelmaking slags[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2019, 5(1): 127-140.
- [30] SHU K Q, SASAKI K. Occurrence of steel converter slag and its high value-added conversion for environmental restoration in China: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 373: 133876.
- [31] BAALAMURUGAN J, GANESH KUMAR V, CHANDRASEKARAN S, et al. Utilization of induction furnace steel slag in concrete as coarse aggregate for gamma radiation shielding[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 369: 561-568.
- [32] LI Z S, LI J C, SPOONER S, et al. Basic oxygen steelmaking slag: formation, reaction, and energy and material recovery[J]. *Steel Research International*, 2022, 93(3): 2100167.
- [33] JIAO W X, SHA A M, LIU Z Z, et al. Utilization of steel slags to produce thermal conductive asphalt concretes for snow melting pavements[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121197.
- [34] 史以栋, 胡中磊. 钢渣在江苏油田固井中的应用研究[J]. *内蒙古石油化工*, 2011, 37(13): 116-119.
SHI Y D, HU Z L. Study on application of steel slag in cementing in Jiangsu Oilfield[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2011, 37(13): 116-119.
- [35] WANG H L, QIAN J S, LIU J, et al. Wear resistance analysis of steel slag aggregates based on morphology characteristics[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 40: 133649.
- [36] YAO D, YU H N, CHEN X, et al. Effect of surface modification on properties of steel slag aggregate and mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 402: 133058.
- [37] KEDAR H N, PATEL S, SHIROL S S. Bulk utilization of steel slag - fly ash composite: a sustainable alternative for use as road construction materials[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023, 9(1): 21.
- [38] ZHAO D, SHEN W, WANG Y, et al. Direct use of original granular steel slag to prepare multi-phased clinker: sintering mechanism and properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 390: 131575.
- [39] ZHU X P, HUO Y D, ZHAO R M, et al. One-step microcrystalline glass preparation using smelting slag from waste automobile three-way catalysts through iron collection[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(22): 11723.
- [40] TAN W J, SUN T, MA F K, et al. Molecular dynamics simulation and viscosity analysis of red mud-steel slag glass-ceramics[J]. *Materials*, 2023, 16(22): 7200.
- [41] LI C W, ZHANG P P, ZENG L H, et al. Study on preparation of glass-ceramics from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash and chromium slag[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 68: 106080.
- [42] 裴立宅, 肖汉宁. 钢铁工业废渣制备玻璃陶瓷的研究[J]. *现代技术陶瓷*, 2004, 25(1): 10-13.
PEI L Z, XIAO H N. Preparation of glass-ceramics using iron and steel slag[J]. *Advanced Ceramics*, 2004, 25(1): 10-13.
- [43] CHEN H, LI B W, ZHAO M, et al. Lanthanum modification of crystalline phases and residual glass in augite glass ceramics produced with industrial solid wastes[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2019, 524: 119638.
- [44] OUYANG S L, ZHANG Y X, CHEN Y X, et al. Preparation of glass-ceramics using chromium-containing stainless steel slag: crystal structure and solidification of heavy metal chromium[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1964.
- [45] 邢岑瑞, 马远, 李宇. 不同CaO源固废对钙长石全固废陶瓷矿相和性能的影响[J]. *有色金属科学与工程*, 2021, 12(1): 39-48.
XING Q R, MA Y, LI Y. Effect of CaO sources derived from different solid waste on the minerals and properties of pre-

- pared anorthite ceramics[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2021, 12(1): 39-48.
- [46] SHI C H, WANG X C, ZHOU S, et al. Mechanism, application, influencing factors and environmental benefit assessment of steel slag in removing pollutants from water: a review[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 47: 102666.
- [47] KENNEDY A M, ARIAS-PAÍĆ M. Application of powdered steel slag for more sustainable removal of metals from impaired waters[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 38: 101599.
- [48] ROYCHAND R, KUMAR PRAMANIK B, ZHANG G M, et al. Recycling steel slag from municipal wastewater treatment plants into concrete applications: a step towards circular economy[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 152: 104533.
- [49] PLAZA L, CASTELLOTE M, NEVSHUPA R, et al. High-capacity adsorbents from stainless steel slag for the control of dye pollutants in water[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(19): 23896-23910.
- [50] 王晓军, 高洪生, 张磊, 等. 钢渣硅肥在白菜种植中的应用[J]. *北方园艺*, 2018(22): 18-22.
- WANG X J, GAO H S, ZHANG L, et al. Application of slag calcium silicate fertilizer in Chinese cabbage planting[J]. *Northern Horticulture*, 2018(22): 18-22.
- [51] GAO D, WANG F P, WANG Y T, et al. Sustainable utilization of steel slag from traditional industry and agriculture to catalysis[J]. *Sustainability*, 2020, 12(21): 9295.
- [52] DAS S, GALGO S J, ALAM M A, et al. Recycling of ferrous slag in agriculture: potentials and challenges[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(8): 1247-1281.
- [53] BARATI M, JAHANSHAHI S. Granulation and heat recovery from metallurgical slags[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2020, 6(2): 191-206.
- [54] 易承波, 欧阳东, 鲁刘磊. 钢渣作船体喷砂除锈磨料的可行性研究[J]. *表面技术*, 2010, 39(4): 91-93, 105.
- YI C B, OUYANG D, LU L L. The study on feasibility of steel slag abrasive used in shot peening derusting in hull[J]. *Surface Technology*, 2010, 39(4): 91-93, 105.
- [55] 陈广言, 饶磊. 风碎渣用于喷砂磨料的试验研究[J]. *冶金标准化与质量*, 2016, 5: 56-60.
- CHEN G Y, RAO L. Experimental study on the use of wind crushed slag as sandblasting abrasive [J]. *Metallurgical Standardization and Quality*, 2016, 5:56-60
- [56] 李希军. 钢渣脱硫脱硝介孔材料和催化功能材料制备研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- LI X J. Study on preparation of mesoporous materials and catalytic functional materials for desulfurization and denitrification of steel slag[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [57] 顾恒星, 金焰, 陈华, 等. 钢渣微粉改性碱活性炭的烟气脱硝性能研究[C]//2017年首届全国冶金固废资源利用学术会议. 香港中医学会、教育研究基金会, 2017.
- GU H X, JIN Y, CHEN H, et al. Study on the flue gas denitrification performance of steel slag micro powder modified alkali activated carbon [C]//The First National Conference on the Utilization of Metallurgical Solid Waste Resources in 2017. Hong Kong Chinese Medicine Association, Education Research Foundation, 2017.

Research progress on primary treatment technology and comprehensive utilization of steel slag

DIAO Jiang¹, GU Wenfeng^{1,2}, TAO Haoran¹, YU Huafang³, LI Hongyi¹, XIE Bing¹

1. Chongqing Key Laboratory of Vanadium-Titanium Metallurgy and Advanced Materials,

College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai 9808577, Japan;

3. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Abstract

Significance The choice of primary treatment technology for steel slag has a significant impact on its subsequent processing and utilization. This paper briefly outlines the primary treatment technologies and comprehensive utilization methods for steel slag,

providing a review of their working principles, advantages, and disadvantages. Technologies such as the hot-braising process, rotating drum process, and hot-pouring process are discussed. Given the current state of steel slag utilization, this paper also summarizes the challenges restricting its application and proposes improvement technologies and strategies for steel slag recycling.

Progress When selecting primary treatment methods, multiple factors should be considered, including its potential uses, energy conservation, environmental impacts, and economic benefits. The diverse applications of the primary treatment technologies for steel slag in major steel mills worldwide result from the differences in steelmaking equipment, processes, the physico-chemical properties of the slag, and its utilization in later stages. In China, steel slag is primarily used in metallurgical industry, particularly for iron beneficiation. After hot steel slag undergoes primary treatment and multi-stage crushing, magnetic separation is used to recover slag steel from the steel slag for steelmaking, recover magnetic separation powder for sintering, and tailings for building material utilization. As a result of the increasing scarcity of river sand due to mining restrictions, steel slag as building materials in construction is expected to increase, which could help address the large stockpiles of steel slag.

Conclusions and Prospects China faces large production quantities but low utilization rates for steel slag with large amounts stored in open piles, occupying land and posing environmental risks such as heavy metal leaching. Although steel slag has been used in various sectors, including construction, agriculture, wastewater treatment, and ceramics, it remains largely underutilized in large-scale, high-value applications. Maximizing the use of steel slag can reduce China's dependence on natural resources, reduce solid waste pressures, and mitigate carbon emissions, thus advancing the sustainable development in steel industry. Despite progress in steel slag research, comprehensive utilization of steel slag is hindered by the rising production rates and insufficient technological improvements, leading to annual declines in its utilization rate. Furthermore, the lack of large-scale industrialization and high-value applications remains a crucial concern. In the future, it is essential to focus on the recovery and utilization of sensible heat of molten steel slag, which is key to addressing the technological challenges and advancing the steel industry towards greener and more sustainable operations. Steel slag applications have expanded beyond traditional landfills to cement production and construction materials. Nevertheless, an effective strategy for large-scale recycling remains a challenge. Therefore, developing efficient, diversified primary treatment technologies and enhancing comprehensive utilization represent key issues in iron and steel metallurgy. This progress will provide a solid foundation for China's green industrial development.

Keywords: steel slag; primary treatment technology; comprehensive utilization; hot-braising process; rotating drum process; hot-pouring process

(责任编辑:武秀娟)