

双碳目标下钢渣处理技术综述及展望

郝以党¹, 王会刚¹, 吴龙¹, 邱桂博^{2,3}, 岳昌盛¹, 彭犇¹

(1. 中冶节能环保有限责任公司, 北京 100088; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 3. 湛江中冶环保运营管理有限公司, 广东 湛江 524076)

摘要:这是一篇冶金工程领域的论文。作为炼钢过程中产生的一种固体废弃物, 钢渣具有产量大、温度高、化学组成复杂和安定性不良等特点。我国钢渣的资源化利用率低于30%, 造成钢渣所含有的价资源的浪费, 大量钢渣的堆存也会占用大量的土地, 造成土壤和水体的污染。钢渣的资源化利用和其处理技术密切相关, 基于此本文对钢渣的一次处理工艺, 如有压热闷法、常压池式热闷法、滚筒法等进行了简单介绍, 重点对钢渣还原提铁、以钢渣为原料制备高附加值材料和高温钢渣余热回收的研究进行了综述分析, 指出钢渣的资源化利用不仅包括物质的回收和利用, 也包括钢渣所含热能的回收。在“双碳”目标下, 应该关注并加强熔融钢渣中金属铁、尾渣和热能的全量化回收和利用, 才能真正助力“双碳”目标的实现。

关键词: 钢渣; 处理利用; “双碳”目标; 提铁; 改性; 余热回收

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.06.011

中图分类号: TD989; TF09 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 06-0067-07

引用格式: 郝以党, 王会刚, 吴龙, 等. 双碳目标下钢渣处理技术综述及展望[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6): 67-73.

HAO Yidang, WANG Huigang, WU Long, et al. Summary and prospect of steel slag treatment technology at the “double carbon” goal[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(6): 67-73.

作为钢铁生产大国, 我国2021年粗钢产量超过10亿t。钢渣是炼钢过程中排出的一种主要固体废弃物, 其产生量占粗钢产量的12%左右^[1-2], 所以, 去年钢渣产出量超过1.2亿t。钢渣所蕴含的价值越来越被研究者和企业所认知, 但与发达国家相比, 我国钢渣资源化利用率很低, 不到30%^[3-4], 导致我国钢渣累计堆弃量超过10亿t, 占地达数十万亩, 严重污染土壤及水系。2018年1月1日国家开始对固体废物排放征收环保税, 其中钢渣征收25元/t, 这对于钢铁企业来说是很大的负担。

钢渣中含有5%~10%的金属铁, 20%~30%的铁氧化物, 约40%的CaO, 10%~20%的SiO₂, 主要包括硅酸二钙、硅酸三钙、橄榄石等物相,

具有铁、硅酸钙胶凝材料资源回收价值^[5-9]。钢渣处理利用存在渣铁分离难和稳定性差两方面难题^[10-11]。针对上述问题, 国内在用的钢渣处理技术主要有压热闷法^[12-18]、常压池式热闷法^[19-20]、滚筒法^[21-24]等, 但这些技术仅考虑了钢渣中存在的金属铁和尾渣的回收及利用, 并没有考虑钢渣作为热能的载体对其进行热的回收, 也没有关注钢渣中铁氧化物中铁素的回收。因此, 钢渣作为尾渣、金属铁和热能的载体, 实现钢渣的全量综合利用不仅包括物质的回收, 更应包括热能的回收。

1 钢渣处理技术现状

现有的主流钢渣处理技术主要包括有压热闷、常压热闷和滚筒法, 下面进行简单介绍。

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178265, 52178264)

作者简介: 郝以党(1975-), 男, 正高级工程师, 主要从事冶金固废处理及资源化利用的科技研发与技术推广。

通信作者: 王会刚(1987-), 男, 研究生, 主要从事固废处理及资源化利用的研发工作。

1.1 钢渣罐式有压热闷技术

钢渣罐式有压热闷技术^[2, 6-31]主要包括钢渣辊压冷却粒化和有压热闷两个过程。钢渣辊压冷却粒化是通过打水冷却和机械破碎,使得高温钢渣快速冷却并粒化,为后续有压热闷工序创造适当的温度和粒度条件。有压热闷过程是把一定温度和粒度的钢渣倒进密闭罐,然后向密闭罐内打水,通过钢渣自身的余热使打入密闭罐内的水蒸发产生高温高压的饱和水蒸气,这可以使钢渣中所含的游离氧化钙($f\text{-CaO}$)快速反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,消除尾渣安定性不良的缺点。同时是实现钢渣的渣铁分离和进一步降温。钢渣罐式有压热闷处理工艺流程见图1,即钢渣经由渣罐倾翻车倒进破碎床,同时进行辊压破碎和打水冷却作业,完成钢渣的粒化和降温工作。破碎降温后的钢渣运至热闷区的压力设备内,密闭后进行打水作业。液态水遇到高温钢渣变成水蒸气,从而产生较高的压力,使钢渣中 $f\text{-CaO}$ 快速消解,完成钢渣的稳定化处理,并使钢渣粉化,完成渣铁分离。

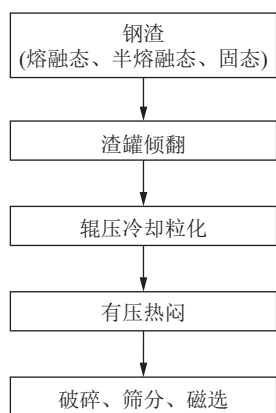


图1 钢渣罐式有压热闷工艺流程

Fig.1 Process flow of steel slag tank type pressurized hot stuffy

1.2 钢渣常压池式热闷技术

钢渣池式热闷工艺^[32-34]是将 $400\sim 1\,650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的钢渣分批次倒进热闷池后,采用搅拌机械对钢渣进行搅拌,之后装置盖对热闷池进行密闭,最后通过控制系统向热闷池打水进行钢渣热闷。该工艺类似于在密闭环境下对钢渣进行热泼并喷水,这样既可以使钢渣因为温度应力而碎裂,降低钢渣粒度,又可以消解钢渣中 $f\text{-CaO}$,提高钢渣尾渣稳定性,利于后续建材化利用。池式热闷周期 $8\sim 12\text{ h}$,装置内温度降至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,打开装置盖,用挖掘机将钢渣铲出后进行后续的筛分、磁选,获

得渣钢、磁选粉和安定性合格的尾渣。该工艺对钢渣物理状态也没有要求,熔融态、半熔融态和固态均可。但是该工艺热闷周期长,热闷压力低,导致生产效率较低;处理后钢渣粒度分布范围广。

1.3 钢渣滚筒粒化处理技术

滚筒粒化处理技术^[22-35]是将流动性良好的钢渣通过渣罐经由渣槽进入滚筒内,液态钢渣在水和机械力的作用下冷却粒化,然后运输至渣场进行磁选回收废钢,工艺流程见图2。由于该工艺需要钢渣具有良好的流动性,即钢渣温度高,含有的热量多,打水冷却过程中产生大量的蒸汽,但这些蒸汽可以从滚筒底部放空,所以也不会引发爆炸,安全可靠。由于用水量大,大部分尘泥沉底,所以滚筒法处理钢渣产生的尾气含尘量低,相比于其它处理方法可减少对环境的污染。该工艺最大的不足是只能处理流动性良好的钢渣,无法对固态甚至是半熔融态的钢渣进行处理;另外,该工艺技术含量高,设备复杂,投资和运行成本均较高。

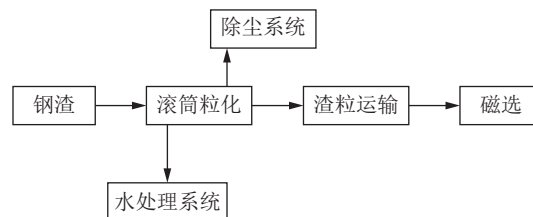


图2 滚筒法钢渣处理工艺流程

Fig.2 Process flow of steel slag treatment by drum method

从以上现在应用的钢渣处理技术可以看出,其处理的主要目的均是实现钢渣中金属铁和尾渣分离及利用。其共性是热态钢渣按照一定的方式进行冷却、粒化,处理过程主要是以物理法为主。尽管上述处理技术已经实现了工业化的生产运营以及推广应用,但是“双碳”背景下,如何最大程度上实现高温熔融钢渣中金属铁、尾渣和热能的回收,是急需并且必须突破的技术。综合国内外相关文献,本文认为同时实现上述三方面应用的钢渣处理技术主要从以下三个方向进行研究和突破,主要包括(1)熔融钢渣提铁,即利用钢渣自身热量,通过外加还原剂实现钢渣中铁的还原;(2)熔融钢渣调质改性制备高附加值材料,即利用钢渣自身热量,以目标产品为基础,通过添加改性剂,实现高附加值材料的制备,如高品

质胶凝材料、微晶玻璃等；（3）高温钢渣余热回收，即通过物理或化学手段实现钢渣所含热能的回收，同时回收钢渣尾渣。

2 钢渣处理技术展望

2.1 熔融钢渣提铁技术

钢渣中的铁元素主要以铁氧化物和金属铁两种形式存在，全铁含量大于 20%。目前采用的破碎、筛分、磁选的物理方法仅能回收钢渣中部分铁元素，大部分的铁元素仍存在尾渣内未能有效的回收，存在着巨大资源浪费问题。因此，如何提取氧化物中的铁是需要解决的难题，急需熔融钢渣提铁技术的突破。

2.1.1 钢渣中铁元素还原机理

在转炉炼钢过程中，钢渣中 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 可以通过式化学方程式（1）～（3）被金属铁（MFe）还原为 FeO ，所以，钢渣中的含铁相基本为 FeO ，少量存在 Fe_3O_4 。

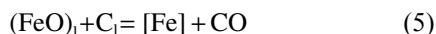
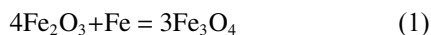
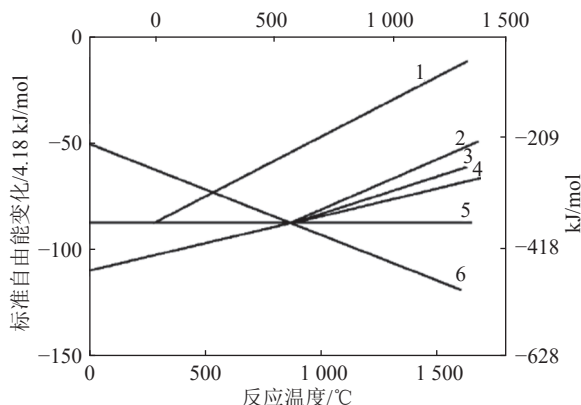


图 3 给出了含铁氧化物和 C 在不同温度下的生成自由能，即铁的 Ellingham^[36]。图 3 的结果表明从理论上讲，钢渣中铁氧化物在大于 900 °C 的高温条件下铁氧化物可以被还原成金属铁，即通



1— $4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2 = 6\text{Fe}_2\text{O}_3$; 2— $6\text{FeO} + \text{O}_2 = 2\text{Fe}_3\text{O}_4$; 3— $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$;
4— $2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$; 5— $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$; 6— $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$

图 3 铁的 Ellingham
Fig.3 Ellingham of Fe

过化学方程式（4）和（6）的反应 FeO 被碳还原为 MFe ^[37]。

2.1.2 钢渣提铁研究

殷素红等^[38]以煤粉等为还原剂分别对马钢、韶钢和宝钢的钢渣进行还原提铁研究。实验在 1 500 °C 的温度条件下进行，当单纯采用煤粉作为还原剂的情况下，只有马钢钢渣能够熔融，这主要是马钢钢渣熔点低于韶钢和宝钢钢渣。研究认为对于熔点低的钢渣，在还原提铁实验中可进一步降低熔融温度。为了降低钢渣熔点同时调控钢渣的化学组成，采用含有还原物质又含有改性物质的煤矸石对钢渣进行还原改性。结果表明马钢、韶钢和宝钢的钢渣都可以熔融，同时钢渣的化学组成也得到调整。主要是煤矸石中 SiO_2 含量较高，降低了钢渣的碱度，从而降低了钢渣的熔点，有利于反应的进行。

苍大强教授等^[39]研究了钢渣碱度对金属铁回收的影响。具体实验过程如下：首先将钢渣破碎成直径约 5 mm 颗粒，将钢渣和还原剂、调质剂等进行混匀，将混匀后的物料放置于（ $\Phi 70 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ ）的 MgO 坩埚中，然后将坩埚移置于硅钼棒井式炉中，升温至 1 550 °C 并保温 5 min。实验完成后将熔渣倒出并自然冷却至室温，然后进行渣铁分离。结果表明随着钢渣碱度的增大，铁回收率及金属化率呈先升后降的趋势，当碱度为 1.1 时，铁的回收率和金属化率达到较大，分别为 95.8% 和 99.2%。

孙树杉教授等^[40]采用 30 kg 电极炉进行熔融钢渣还原提铁实验。实验过程焦炭、煤粉为钢渣还原剂，粉煤灰、铝矾土以及石英砂等酸性材料为钢渣的调质剂。实验用电极炉和获得的金属铁，通过该实验证明了钢渣中铁元素还原沉积的可行性。

2.2 调质改性制备高附加值材料

熔融钢渣的调质改性目的主要是利用钢渣自身热量，以目标产品成分为基础，通过改性剂的加入，实现利用钢渣自身热量和外加调制剂的加入制备出高附加值产品。熔融钢渣的调质改性后的钢渣多用于制备胶凝材料，也可以用于制备微晶玻璃等高附加值产品^[41-42]。

2.2.1 制备胶凝材料

由于钢渣中含有大量的类似水泥熟料的矿物，如硅酸三钙、硅酸二钙等，提铁后的尾渣大

多用于制备胶凝材料,如钢铁渣复合粉等产品。但由于钢渣中含有较多的非活性物质如 RO 相、橄榄石等,且硅酸三钙、硅酸二钙等高活性物料含量低,导致其早期胶凝性远低于硅酸盐水泥熟料。因而,研究人员在熔态条件下对钢渣构成进行调整,改善钢渣的矿物组成,提高钢渣的早期强度,以利于高性能胶凝材料的制备。

李建新等^[43]对熔融态下重构钢渣的胶凝性进行了研究。在炼钢转炉排渣的同时,将一定比例的电炉还原渣和煤渣加入到渣罐中,利用熔融钢渣的余热对钢渣的组成和结构进行在线重构。结果表明,重构处理明显降低了钢渣中 f-CaO 的含量,改善了钢渣的易磨性和压蒸安定性,使钢渣粉的 28 d 活性指数提高了 10%~20%。

胡天麒等^[44]通过在熔融态钢渣中加入改性材料和还原剂进行重熔,获得早期强度较高的钢渣。

2.2.2 制备微晶玻璃

微晶玻璃又称玻璃陶瓷,是将特定组成的基础玻璃,在加热过程中通过控制晶化而制得的一类含有大量微晶相及玻璃相的多晶固体材料。微晶玻璃的性能指标往往优于同类玻璃和陶瓷,其中 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系微晶玻璃是研究得较为深入的一类微晶玻璃。钢渣中含有较多的钙硅铝氧化物,从成分上讲和 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系微晶玻璃较为接近。

苍大强等^[45]以钢渣为原料进行了微晶玻璃的制备实验。分别制备了碱度(CaO/SiO₂ 质量比)为 0.5、0.6 和 0.7 的微晶玻璃,并研究了在不同热处理条件下三种微晶玻璃的结构与性能的变化规律。研究结果表明微晶玻璃的力学强度主要受基础玻璃烧结性能和内部晶体组织结构的影响。在充分提高微晶玻璃烧结性能、控制析晶的基础上,是能够获得优于天然石材性能的钢渣微晶玻璃。此外,研究结果还表明随着热处理温度的升高或晶化保温时间的延长,辉石/黄长石比例降低,说明高温条件有利于黄长石晶体的生长。上述结果表明,在满足成分要求的基础上,为提高辉石相在微晶玻璃中的比例,应尽量采用低温热处理工艺。即通过调控手段的改变,可以制备出性能优良的微晶玻璃制品。

2.3 高温钢渣余热回收

目前,国内外文献报道的钢渣余热回收按能量回收方式可以分为物理法和化学法,物理法主

要有风淬法余热回收、双内冷转筒粒化热能回收、机械搅拌法余热回收、“连铸—连轧”干式粒化和余热锅炉熔渣热能回收、离心法余热回收等工艺^[46],化学法主要有甲烷循环反应、甲烷重整制氢、煤气化制煤气等工艺。但上述工艺仅停留在实验室阶段或是运行几年后由于各种原因而停滞。

近年来钢渣余热回收研究的也不少,如 2015 年,日本学者^[47]在实验室条件和半工业化条件下分别研究了高温钢渣余热回收效果。其主要思路是熔融钢渣先经双辊挤压和破碎后,再经立式炉窑进行余热回收。半工业化的实验结果表明,4.8 t 钢渣,当初始温度为 1 100 ℃,鼓风流量为 7 200 Nm³/h,得到的热空气温度可达 700 ℃。若以实际使用温度超过 140 ℃ 热量回收,则相对于熔融炉渣总热量的相对值的热量回收率为 43%。2021 年,张添华等^[48]对 1 150 ℃ 左右的粒化钢渣进行了鼓风余热回收研究,1 150 ℃ 的钢渣 2~5 t 在鼓风流量为 7 800~26 000 Nm³/h 条件下进行余热回收,较优条件下得到的钢渣余热回收率达 70% 以上。尽管上述实验半工业化的实验结果较好,但是到目前为止还未真正实现工业化。但是从余热回收工艺也可以看出,要想实现余热的回收,首先需要将钢渣进行粒化,然后再采用合适的换热介质与钢渣进行充分换热,从而达到钢渣余热回收的目的。如现在的熔融钢渣罐式有压热闷工艺,通过钢渣与水换热,获得具有一定温度和压力的水蒸气来实现钢渣余热的回收。在“双碳”目标下,高温钢渣余热回收必将是未来钢渣处理利用的重要方向。

3 结论及展望

钢渣是金属铁、尾渣和热能的载体,钢渣的资源化利用和其处理技术密切相关。在“双碳”背景下,应重点关注并加强熔融钢渣中金属铁、尾渣和热能的全量化回收和利用,加强钢渣处理新技术研发,如熔融钢渣还原提铁、制备高附加值材料和余热回收等技术,以期实现钢渣最大资源化利用,促进节能降碳,助力“碳达峰、碳中和”目标的实现。

参考文献:

- [1] 刘仕业,王占军,彭桦,等.高炉渣对钢渣改性的物理化学基础研究[J].工程科学学报,2018,40(5):557-564.

- LIU S Y, WANG Z J, PENG B, et al. Fundamental research on the physics and chemistry of steelmaking slag modified with hot blast furnace slag[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5):557-564.
- [2] 朱金伟, 王凡, 任洪岩, 等. 钢渣作为湿法脱硫吸收剂的实验研究[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(3):205-209.
- ZHU J W, WANG F, REN H Y, et al. Experimental study on steel slag used as wet flue gas desulfurization absorbent[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2011, 1(3):205-209.
- [3] 刘国威, 朱李俊, 金强, 等. 钢渣沥青混凝土研究进展[J]. 矿产综合利用, 2016(2):11-16.
- LIU G W, ZHU L J, JIN Q, et al. Research progress of steel slag asphalt concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016(2):11-16.
- [4] 王会刚, 吴龙, 彭犇, 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.
- WANG H G, WU L, PENG B, et al. Characteristics and research progress of steel slag primary treatment technology at home and abroad[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13):5025-5031.
- [5] 吴燕开, 胡锐, 赵位莹, 等. 钢渣粉固化淤泥质水泥土强度特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15):306-311.
- WU Y K, HU R, ZHAO W Y, et al. Study on strength characteristic of muddy cement soil stabilized by steel slag powder[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(15):306-311.
- [6] 周朝刚, 杨会泽, 艾立群, 等. 转炉含磷钢渣循环利用技术的研究现状及展望[J]. 钢铁, 2021, 56(2):22-39.
- ZHOU C G, YANG H Z, AI L Q, et al. Research status and prospect of recycling technology of converter slag containing phosphorus[J]. Iron & Steel, 2021, 56(2):22-39.
- [7] 苏严, 刘淑贤, 徐平安, 等. 钢渣易磨性研究现状[J]. 矿产综合利用, 2022(3): 95-99.
- SU Y, LIU S X, XU P A, et al. Research status of the grindability of steel slag [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3): 95-99.
- [8] 郭辉. 转炉钢渣中铁的还原回收及制备高胶凝性水淬渣的方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- GUO H. Iron recovery and preparation of water-quenched slag with high cementitious performance from BOF slag by means of reduction[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [9] 郭丽霞. 废旧钢渣在道路工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- GUO L X. Research of application of steel slag on road construction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [10] 高本恒, 郝以党, 张淑苓, 等. 钢渣综合利用现状及发展趋势[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 776-779.
- GAO B H, HAO Y D, ZHANG S L, et al. Development trend and comprehensive utilization of steel slag[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(S1): 776-779.
- [11] 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.
- HU S Y, DAI X T, NA X Z. Treatment process and comprehensive utilization of steel slag[J]. Foundry Technology, 2019, 40(2):220-224.
- [12] 彭犇, 邱桂博, 王晟, 等. 钢渣有压热闷爆炸原因分析及防控措施[J]. 环境工程, 2018, 36(11):158-161+146.
- PENG B, QIU G B, WANG S, et al. Explosion cause analysis and control measures of steel slags under self-pyrolytic slaking with pressure[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(11):158-161+146.
- [13] 张健, 祝妍熙, 张宇, 等. 钢渣有压热闷工艺蒸汽捕集净化系统探讨[J]. 中国冶金, 2016, 26(4):62-64.
- ZHANG J, ZHU Y X, ZHANG Y, et al. Discussion on dust steam catcher purification system for hot stuffy with pressure of molten slag[J]. China Metallurgy, 2016, 26(4):62-64.
- [14] 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.
- GAO B H, HAO Y D, ZHANG S L, et al. The application of convert steel slag resource utilization and the hot stuffy process[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(11):99-101+79.
- [15] 周溪滢. 钢渣生态工业园的设计与实践[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- ZHOU X Y. The design and practice of steel-slag eco-industrial park[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [16] 吴龙, 孙健, 胡天麒, 等. 一种钢渣余热有压热闷可燃气体安全防控装置及方法: CN105039614A[P]. 2015-11-11.
- WU L, SUN J, HU T Q, et al. A kind of steel slag waste heat pressurized heat boring combustible gas safety prevention and control device and method: CN105039614A[P]. 2015-11-11.
- [17] 吴龙, 孙健, 胡天麒, 等. 一种钢渣余热有压热闷可燃气体安全防控装置: CN204981915U[P]. 2016-01-20.
- WU L, SUN J, HU T Q, et al. A kind of steel slag waste heat pressurized heat boring combustible gas safety prevention and control device: CN204981915U[P]. 2016-01-20.
- [18] 陈荣凯, 刘坤. 钢渣有压热闷磁选工艺的海外应用分析[J]. 炼钢, 2018, 34(6):75-78.
- CHEN K R, LIU K. Analysis and application of steel slag hot stuffing with pressure and magnetic separation purification process in overseas projects[J]. Steelmaking, 2018, 34(6):75-78.
- [19] 黄丽, 徐杰. 浅谈钢渣热闷的现状与发展[J]. 工业加热, 2016, 45(4):68-70.
- HUANG L, XU J. The status and development of steel slag hot stew method[J]. Industrial Heating, 2016, 45(4):68-70.
- [20] 钱强. 新型热闷钢渣综合利用分析[J]. 鞍钢技术, 2019(2):7-9+16.
- QIAN Q. Analysis on comprehensive utilization of new type of

- hot steaming steel slag[J]. Angang Technology, 2019(2):7-9+16.
- [21] 杨刚, 蒋兴浩, 张健, 等. 宝钢 BSSF 法处理的钢渣综合利用方向分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(S1):835-836+772.
- YANG G, JIANG X H, ZHANG J, et al. Analysis of trend of comprehensive utilization of steel slag treated BSSF method in Bao Steel[J]. Industrial Construction, 2010, 40(S1):835-836+772.
- [22] 王有龙, 胡治春, 金焰, 等. 宝钢滚筒型渣处理装置用钢球磨损分析[J]. 钢铁研究, 2012, 40(2):50-55.
- WANG Y L, HU Z C, JIN Y, et al. Wear analysis of steel ball in rotary drum-type slag treatment at Baosteel[J]. Research on Iron and Steel, 2012, 40(2):50-55.
- [23] 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.
- LIU Y T, SHEN H G, YAN W H, et al. The analysis of purification process of the gas from steel slag water quenching by BSSF roller method[J]. Environmental Engineering, 2011, 29(4):78-81+89.
- [24] 王军峰. 项目管理在滚筒连续化生产技术提升研究中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- WANG J F. The application of project management in roller continuous production technology promotion research[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [25] 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.
- WANG S. The Process research on hot stuffy with pressure and sensible heat recovery of the molten slag[D]. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, 2012.
- [26] 孙明明. 冶金钢渣风淬回收工艺排风系统的研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- SUN M M. Research on air ventilation system of air quenched recycling process for metallurgical slag[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [27] 胡东风, 仵增瑞. 转炉钢渣风碎技术在石钢 30t 转炉的应用[J]. 河北冶金, 1997(1):36-40.
- HU D F, WU Z R. Application of slag wind-crushing technology of 30-ton converter of Shijiazhuang iron and steel plant[J]. Hebei Metallurgy, 1997(1):36-40.
- [28] 叶斌. 转炉钢渣气碎工艺技术及产业化[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- YE B. Gas blowing grinding technology of BOF slag and its industrialization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
- [29] 李明阳. 钢渣处理工艺的设计思路[J]. 中国冶金, 2014, 24(5):1-4.
- LI M Y. Design conception of steelmaking slag utilization process[J]. China Metallurgy, 2014, 24(5):1-4.
- [30] 许建雄, 范永明, 李泽平, 等. 钢渣热闷工艺及装备研究[J]. 包钢科技, 2019, 45(1):37-41.
- XU J X, FAN Y M, LI Z P, et al. Study on technology and equipment of hot tight covering for steel slag[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2019, 45(1):37-41.
- [31] 王延兵, 宋善龙, 范永平. 一种钢渣有压热闷处理新技术[J]. 环境工程, 2014, 32(S1):664-666.
- WANG Y B, SONG S L, FAN Y P. The new techniques of rolling and crushing and pressure hot stuffy steel slag[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(S1):664-666.
- [32] 李术川, 陈晓曦, 刘明亮. 环境友好型钢渣热闷技术的设计和生实践[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(7): 90-93.
- LI S C, CHEN X X, LIU M L. Design and production practice of environment-friendly hot pressing technology of steel slag [J]. Environmental pollution and Prevention, 2014, 32(S1): 664-666.
- [33] 朱桂林, 孙树杉, 范永平, 等. 一种熔融钢渣热闷处理方法: CN101397595[P]. 2009-04-01.
- ZHU G L, SUN S S, FAN Y P, et al. A hot smothering treatment method for molten steel slag: CN101397595[P]. 2009-04-01.
- [34] 柴轶凡, 彭军, 安胜利. 钢渣综合利用及钢渣热闷技术概述[J]. 内蒙古科技大学学报, 2012, 31(3):250-253.
- CHAI Y F, PENG J, AN S L. Overview of comprehensive utilization of steel slag and hot pressing technology of steel slag[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012, 31(3):250-253.
- [35] 吴康, 郑毅, 杨和平, 等. 梅钢转炉上应用滚筒处理钢渣的研究[J]. 中国冶金, 2011, 21(10):11-14.
- WU K, ZHENG Y, YANG H P, et al. Study of BSSF slag in the converter of Meishan steelmaking plant[J]. China Metallurgy, 2011, 21(10):11-14.
- [36] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 75.
- HUANG X H. Principles of iron and steel metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 75.
- [37] 潘晓, 陈文海, 刘锐. 钢渣直接还原铁在转炉中的应用试验[J]. 硅谷, 2013, 6(13): 136+133.
- PAN X, CHEN W H, LIU R. Application test of steel slag direct reduction iron in converter[J]. Silicon Valley, 2013, 6(13): 136+133.
- [38] 殷素红, 郭辉, 余其俊, 等. 还原铁法重构钢渣及其矿物组成[J]. 硅酸盐学报, 2013, 29(7):966-971.
- YIN S H, GUO H, YU Q J, et al. Reconstruction of steel slag by reduced iron method and its mineral composition[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 29(7):966-971.
- [39] 杨志杰, 李宇, 苍大强, 等. AlO 含量对提铁后的钢渣及粉煤灰微晶玻璃结构与性能的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12):4631-4636.
- YANG Z J, LI Y, CANG D Q, et al. Effect of AlO content on the structure and properties of steel slag and fly ash glass ceramics after iron extraction[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(12):4631-4636.
- [40] 张艺伯, 朱桂林, 孙树杉, 等. 重熔还原法处理转炉钢渣

研究[J]. 环境工程, 2014, 41(7):111-114.

ZHANG Y B, ZHU G L, SUN S S, et al. Study on treatment of converter steel slag by remelting reduction method[J]. Environmental Engineering, 2014, 41(7):111-114.

[41] 梁晓杰, 叶正茂, 常钧. 碳酸化钢渣复合胶凝材料早期水化活性[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(2):226-233.

LIANG X J, YE Z M, CHANG J. Early hydration activity of carbonated steel slag composite cementitious material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(2):226-233.

[42] 赵贵州, 李宇, 代文彬, 等. 采用一步烧结法的钢渣基微晶玻璃制备机理[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(12):3288-3294.

ZHAO G Z, LI Y, DAI W B, et al. Preparation mechanism of steel slag based glass ceramics by one-step sintering[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(12):3288-3294.

[43] 李建新, 韦江雄, 赵三银, 等. 重构钢渣的胶凝性分析[J]. 水泥, 2010(10):16-19.

LI J X, WEI J X, ZHAO S Y, et al. Cementitious analysis of reconstituted steel slag[J]. Cement, 2010(10):16-19

[44] 胡天麒, 杨景玲, 朱桂林, 等. 重熔改性后钢渣成分与胶凝性能的研究[J]. 中国钢铁业, 2013(4):19-21.

HU T Q, YANG J L, ZHU G L, et al. Study on composition

and cementitious properties of steel slag after remelting modification[J]. China Steel Industry, 2013(4):19-21.

[45] 代文彬, 李宇, 苍大强. 热处理过程对钢渣微晶玻璃结构和性能的影响规律[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(11):966-971.

DAI W B, LI Y, CANG D Q. Effect of heat treatment on structure and properties of steel slag glass ceramics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(11):966-971.

[46] 张宇, 张健, 张天有, 等. 钢渣处理与余热回收技术的分析[J]. 中国冶金, 2014, 24(8):33-37.

ZHANG Y, ZHANG J, ZHANG T Y, et al. Analysis of steel slag treatment and waste heat recovery technology[J]. China Metallurgical, 2014, 24(8):33-37.

[47] SHIGAKI N, TOBO H, OZAWA S, et al. Heat recovery process from packed bed of hot slag plates[J]. ISIJ International, 2015, 55(10):2258-2265.

[48] ZHANG T H, QIU G B, WANG H G, et al. In-suit industrial tests of the highly efficient recovery of waste heat and reutilization of the hot steel slag[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2021, 9:3955-3962.

Summary and Prospect of Steel Slag Treatment Technology at the “Double Carbon” Goal

HAO Yidang¹, WANG Huigang¹, WU Long¹, QIU Guibo^{2,3}, YUE Changsheng¹, PENG Ben¹
(1.State Key Laboratory of Iron and Steel Industry Environmental Protection, Energy Conservation and Environment Protection Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China; 2.Central Research Institute of Building and Construction, Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China; 3.Zhanjiang Environmental Protection Operation Management Co., Ltd., MCC Group, Zhanjiang 524076, Guangdong, China)

Abstract: This is an article in the field of metallurgical engineering. As a solid waste produced in the process of steelmaking, the steel slag has the characteristics of large output, high temperature, complex chemical composition and poor stability. The resource utilization rate of steel slag in China is less than 30%, resulting in the waste of valuable resources contained in steel slag. The stockpiling of a large number of steel slag will also occupy a large amount of land and cause soil and water pollution. The resource utilization of steel slag is closely related to its treatment technology. Based on this, this paper briefly introduces the primary treatment processes of steel slags, such as pressurized hot stuffy method, the atmospheric tank hot stuffy method, the drum method, etc., and focuses on the reduction and iron extraction of steel slag, the preparation of high value-added materials with steel slag as raw materials, and the waste heat recovery of high-temperature steel slag. It is pointed out that the resource utilization of steel slag not only includes the recovery and utilization of materials, but also the recovery of heat energy contained in steel slag. At the goal of "double carbon", we should pay attention to and strengthen the full quantitative recovery and utilization of metal iron, tailings and heat energy in molten steel slag, so as to truly help achieve the goal of "double carbon".

Keywords: Steel slag; Treatment and utilization; "Double carbon" goal; Iron recovery; Modification; Waste heat recovery