

引文格式:赵凯,王殿新,甄常亮,等. 钢渣淬冷粒化研究现状及进展[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(4): 33-40.

ZHAO Kai, WANG Dianxin, ZHEN Changliang, et al. Research status and progress of quenching granulation of steel slag [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(4): 33-40.

钢渣淬冷粒化研究现状及进展

赵凯, 王殿新, 甄常亮, 张巧荣, 陈伟, 张玉柱

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北唐山 063210)

[摘要] 全国每年新增钢渣排放量在1亿t以上, 利用率仅为10%~20%, 转炉液态钢渣中有“渣、铁、热”等丰富资源, 简单堆存或者填埋造成了极大浪费。目前的钢渣粒化主流技术主要有热闷法、风淬粒化法、滚筒法等, 其均基于钢渣粒化和游离氧化钙(f-CaO)的消解开发, 便于后续的破碎筛分磁选, 以得到渣钢、磁选粉和尾渣。这些方法虽在一定程度上解决了其他方法存在的投资大、占地多、污染重等问题, 但依然存在钢渣资源利用不完全、体积安定性风险、磨矿成本高、铁含量高等问题, 笔者提出采用改质重构与水气两相混合流体淬冷粒化技术相结合的方法处理钢渣, 该方法向液态钢渣中加入酸性熔剂和还原剂进行改质, 利用气体的高运动速度和水的高导热性将液态钢渣迅速冷却成固体状颗粒, 降低了钢渣纤维化的情况, 兼顾重构渣的粒化与余热回收效率。提铁后的尾渣在粒度分级后可用于建材制备、土壤改质及微晶玻璃、陶瓷材料领域, 但目前该方法还处于研究阶段, 不够成熟, 后期还需在高性能钢渣粒化材料制备、环保利用与资源化、钢渣深度加工发展方面进行深入研究。

[关键词] 钢渣; 双介质淬冷粒化; 改质重构; 铁回收; 余热回收; 资源化利用

[中图分类号] TF09; X756 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)04-0033-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.04.004

我国是钢铁工业大国, 据2022年统计数据显示, 我国粗钢产量达10.18亿t, 占世界粗钢产量的54%左右, 居全球首位。粗钢生产过程中会产生大量钢渣, 产渣率约占粗钢产量的8%~15%^[1], 即目前全国每年新增钢渣排放量在1亿t以上, 钢渣存量逾10亿t。钢渣的利用效率成为制约钢铁企业碳减排的关键因素。现阶段, 钢渣利用率仅为10%~20%, 若大量的钢渣不进行及时处理而随意堆放或填埋, 不仅污染环境, 还因未能充分回收利用其中的余热、有价金属而造成资源浪费。因此, 研发钢渣有价元素与显热全量资源化技术, 可极大提升钢渣的

综合利用水平, 显著降低温室气体及SO₂、NO_x等污染气体的排放强度, 对降低环境负荷及资源消耗, 实现钢铁制造流程节能降耗, 保障钢铁工业的健康可持续发展具有重大意义^[2-5]。

液态钢渣“渣、铁、热”全量资源化回收的关键是实现液态钢渣提铁尾渣资源化性能调控与全量利用, 并实现基于转炉冶炼应用场景的工业转化。本文全面分析了钢渣资源化利用现状, 针对目前钢渣粒化技术的应用难点, 提出了双介质淬冷粒化新技术。该技术采用气-水两相混合流体对重构渣进行高速淬冷粒化处理, 不仅可以提升重构渣的资源化性能, 还能有效降低环境污染, 为钢渣的资源化利用提供了新思路。

1 钢渣综合利用现状

1.1 钢渣资源化利用途径

钢渣中全铁含量约为10%~20%, 钢渣密度一般为3.1~3.6 g·cm⁻³, 钢渣的压碎值为20.4%~30.8%, 结构致密, 抗压性和耐磨性较好^[6]。钢渣由

[收稿日期] 2024-01-26

[第一作者] 赵凯(1981—), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 主要从事冶金固废处理与资源优化方面的研究工作。

[通信作者] 甄常亮(1983—), 男, 河北唐山人, 博士, 高级工程师, 主要从事炼铁工艺优化及钢铁工业节能减排技术方面的研究工作。

[基金项目] 中央引导地方科技发展资金资助项目(226Z3802G); 河北省科技厅中央引导地方项目(236Z3806G)。

多种矿物组成,具有较高的化学活性,高效的吸附能力和资源重利用性。钢渣中金属铁含量在 3% ~ 8% 之间,通过后续处理工艺可使渣铁分离,分类回

收循环利用^[7]。我国部分钢厂钢渣的化学成分见表 1^[8]。

表 1 我国部分钢铁厂钢渣的化学成分

Table 1 Chemical composition of steel slag from some steel plants in China %

不同企业钢渣	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅
宝钢转炉钢渣	39.3	10.9	31.2	2.2	10.1	2.3	1.6
马钢转炉钢渣	45.1	11.4	24.3	2.1	3.7	2.1	2.0
唐钢转炉钢渣	46.9	12.4	24.8	1.5	7.8	1.4	0.9
广钢转炉钢渣	40.2	14.2	23.9	6.2	3.2	5.7	0.9
济钢转炉钢渣	39.5	18.1	18.7	4.8	8.8	2.2	0.5

基于转炉钢渣的基本特性,国内外钢铁企业均在探索钢渣利用价值和途径^[9-10](图 1、图 2),不同处理阶段的产物对应不同的利用途径,主要包括:作为钢铁冶炼工序原料循环利用,如高炉喷吹煤粉催化剂^[11];钢渣具有较好的胶凝性,可用作建筑材料、水泥、混凝土等^[12];钢渣中 Ca、Si、Fe、Mg、P、Mn 等元素是农作物生长不可或缺的营养成分,可将处理之后符合毒素浸出标准的钢渣应用于农业生产^[13-14];在环境领域,钢渣可用于污水处理、烟气脱硫、中和酸性土壤^[15-16];钢渣可作为功能材料,如微晶玻璃、装修用的陶瓷材料、金属除锈原料、橡胶填料^[17-18];钢渣还可用于水利工程、CO₂ 固定剂、光催化剂等领域^[19]。

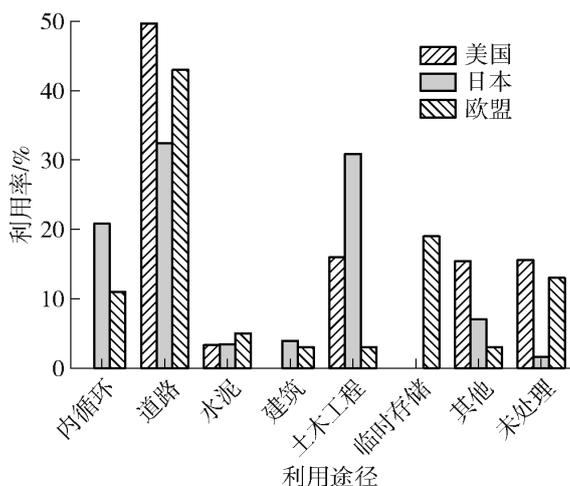


图 1 国外钢渣利用情况

Fig. 1 Utilization of steel slag abroad

1.2 钢渣处理工艺对比

钢渣的矿物组成受化学成分、生成条件和粒化冷却工艺的影响,而物理性能则与成分、矿物组成及冷却粒化方式等有关^[20]。目前钢渣处理主流工艺

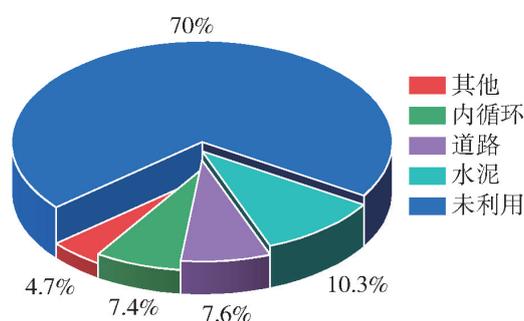


图 2 国内钢渣利用情况

Fig. 2 Domestic steel slag utilization situation

主要包括热闷法、风淬粒化法、滚筒法等^[21-23],经处理后的钢渣有更广泛的应用价值,可取代投资大、占地多、污染重、处理效果差的热泼法、箱泼法、浅盘热泼法、水淬法等。上述钢渣处理工艺参数对比分析见表 2^[24]。

1.3 钢渣处理工艺中的不足

钢渣处理工艺作为钢渣资源化利用的“第一步”,对后续处理工序有直接的影响,但在实际应用过程中现有钢渣处理工艺均存在一定的不足。

1) 闷渣处理后钢渣中仍残存一定比例游离氧化钙(f-CaO)和游离氧化镁(f-MgO)等物质,遇水发生水化反应,生成 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂,导致体积膨胀,使得钢渣在建材化过程中开裂,造成体积安定性风险。

2) 钢渣中含有较高含量的 RO 相(CaO、FeO、MgO、MnO 等二价金属氧化物相的统称),与其他物相相比,具有致密、坚硬、可磨性较差等特点,使得制备钢渣微粉的磨矿成本高,降低了利用经济性,且该物质不具有活性,导致钢渣作为建材时活性低,不能进行大比例或全量掺加。

表2 钢渣处理工艺参数对比分析

Table 2 Comparative analysis of steel slag treatment process parameters

钢渣处理方法	盘泼法	热泼法	热焖法	风淬法	水淬法	滚筒法
处理周期	较长	长(>24 h)	长(10~12 h)	短(约6 t/min)	短(约2 t/min)	短(约35 min)
处理渣状态	液态	均可	均可	液态	液态	液态
渣粒度/mm	>5	0~500	<20	≤5	≤5	5~10
渣均匀性	差	差	较差	好	好	好
钢渣稳定性	差	差	好	好	好	好
钢渣分离	差	差	好	好	好	好
可靠性	好	好	好	较好	差	差
占地面积	较大	大	较大	小	较大	小
环境污染	较大	大	小	较大	较大	小
投资	高	低	较低	较低	高	高
运行费用	高	低	低	低	低	较高
渣处理率/%	100	100	100	40~60	≤50	30

3) 基本消除体积安定性风险的钢渣微粉由于其吸水性较强,作为水泥或混凝土添加料时会缩短硬化时间,同时由于铁含量高,用量受到限制,在水泥混凝土应用领域替代水泥量的掺量最高仅15%左右,导致每年仍有大量钢渣不能及时消纳利用。

4) 破碎磁选通常可以将部分Fe、Fe₃O₄回收,而FeO和Fe₂O₃因无磁性而无法选取,同时含铁钢渣磨选粒度越细则粉磨的电耗成本亦会大幅增加。因此,铁元素的赋存状态对磁选粉的铁品位及回收效益影响至关重要,目前主流的钢渣处理工艺均未考虑对钢渣铁元素价态进行调控。

2 熔渣淬冷粒化工艺研究现状

熔渣处理过程中需要对熔渣进行冷却处理,传统处理工艺均以水作为冷却介质,处理后的熔渣粒度满足要求,但熔渣的余热大部分被浪费,导致耗能增加,干法粒化技术理论上可有效提高熔渣显热的利用率。

最常见的干式粒化技术是气淬法,目前对气淬的研究大多停留在射流雾化上。龙跃等^[25]对钢渣的粒化和冷却过程进行Fluent模拟,在不同气淬粒化初始条件下,通过分析流场和温度场,发现改变风速对渣粒冷却时间影响很大,且风速与渣粒冷却时间成反比,风速越大,渣粒冷却效果越好。刘楠^[26]、王丽丽等^[27]采用CLSVOF法模拟了超声速气流中液体横向射流雾化,研究不同粒化参数、熔渣物性对

液膜流动行为的影响,分析液柱破碎过程中熔渣液膜形成机理,量纲分析了液膜边缘厚度,为后续熔渣粒化处理工艺提供了理论基础。康月等^[28]研究了气淬粒化过程中熔渣的析晶行为和渣粒性能,发现CdSe量子点的平均堆积密度与熔渣粒径的变化有直接关系,随着粒径的增加,平均堆积密度也不断增加,但当其增加到一定峰值后,呈现减小的变化趋势,渣珠粒径主要集中在0.30~1.0 mm之间,渣珠的抗酸侵蚀能力随粒径的增大而变强,但渣珠承受压力的能力变弱。卢宏伟等^[29]对高炉渣液滴冷却凝固过程进行了数值模拟,发现熔融态渣滴经历了液态冷却、显热释放和凝固冷却阶段,在不考虑过冷度的情况下,数值模拟发现液态渣粒冷却时间较短,而显热释放和凝固冷却耗时较长。

尽管上述学者在实验室得出的数据较好,但目前并未实现工业化应用。若要想充分实现余热的回收,需先将钢渣破碎粒化处理,然后在选择高密度的换热介质与钢渣充分接触换热,进而实现钢渣粒化与余热回收。由于高炉渣比钢渣更易于处理,所以许多学者先用高炉渣对各种干式粒化技术和余热回收工艺进行试验,再应用于钢渣和其他冶金废渣^[30]。

王子兵等^[31]使用空气、水双换热介质,进行液态渣粒气淬余热回收试验,发现系统热效率随着气淬压力的增加,呈现先增加后减小的趋势;系统热效率会随着喷嘴马赫数的增加而提高,但喷嘴马赫数

超过一定值时,系统热效率增速会减缓。万新宇等^[32]通过研究空气流量流速、水流量流速对渣粒化效果影响,发现气淬空气流量过大时,炉渣粒化时会出现大量渣棉;当雾化水加入过多时,炉渣会出现“空心”现象,严重降低炉渣强度和余热回收效率。张俊等^[33]对炉渣不同粒化方式进行试验,研究表明,随着冷淬风量的增大,会出现针状渣和丝状渣,无法获得均匀渣粒尺寸和形态;但采用气水混淬粒化可在较小的鼓风条件下提高液态渣的粒化效果,避免丝状渣和针状渣的产生。由此,气水双介质能明显改善液态渣的粒化效果,降低鼓风动能消耗,雾化水弥补了空气换热效果差的弱点,提高了换热介质的冷却强度,缩短了高温熔渣的冷却凝固时间,从而抑制了粒化渣的单向延展过程,有效避免了气淬产生的针状和丝状渣,实现熔炼渣和质热协同高效利用。

双介质淬冷粒化在高炉渣领域应用比较成熟,但在钢渣领域却鲜有报道,研究内容甚少,故对钢渣改质重构,使其类似于高炉渣,进而采用与高炉渣类似的处理和利用方式^[34]。机理是向高温熔融态钢渣中分步加入改质剂和还原剂:添加酸性改质熔剂以降低熔渣碱度,去除钢渣中游离的氧化钙、氧化镁,使用碳作为还原剂,还原铁回收铁水,减少熔渣中的铁含量^[35-37]。利用钢渣的显热使改质组分与钢渣发生反应,从而重构钢渣。由此,钢渣资源再利用可采取改质重构与气水双介质淬冷粒化相结合的处理方法。

3 重构钢渣双介质淬冷粒化

3.1 双介质淬冷粒化机理

在保证冶炼生产工艺顺利进行的前提下,需综合考虑钢渣的流动性与黏度,针对其不同特性,选取最合适的钢渣处理工艺,使渣铁分离,最大限度保证钢渣活性,并降低钢渣的不稳定性。结合干法粒化和湿法粒化的特点,通过空气、液态水作为双介质,以气体为载体提供动能,液态水作冷却介质,在气液两相流强大的冲击力、冷却力下,与高温钢渣发生冲击碰撞、撕裂,液态渣流被粉碎成细小液滴,液滴被冷却成渣粒进行二次利用,最终完成钢渣粒化^[38]。气体的高速运动产生的动能将冷却介质雾化水均匀地带入钢渣中,超高速射流雾化水作用在钢渣上,通过辐射和对流的方式,使高温熔渣与气液冷却介质

进行热量交换,使其在瞬间粒化冷却后迅速形成颗粒状固体,这是由于水与气体相比具有更好的导热系数,且水的蒸发过程需要吸收大量热能,雾化水的加入能明显提高对流换热效率,提高粒化渣的凝固速度,从而抑制粒化渣的单向延展过程^[32]。该技术既减少了因气淬产生的钢渣纤维化和环境污染,又降低了冷却水的大量消耗,更符合节能环保的发展需要。

3.2 双介质淬冷粒化工艺流程

图3(b)为熔融钢渣粒化处理新工艺,与传统钢渣处理工艺图3(a)相比,该工艺将转炉钢渣使用保温结构渣包转运并进行在线调质重构^[39],再对电炉加热改质后的熔融钢渣进行双介质淬冷粒化处理,同时进行余热回收。重构后的钢渣具有类似高炉渣的属性,可实现重构渣在水泥建筑行业全量掺加。基于前期钢渣氮气气淬粒化研究,在兼顾重构渣的粒化与余热回收效率的前提下,本文提出采用气-水两相混合流体对重构渣淬冷粒化处理技术。双介质淬冷粒化技术是一种新型的钢渣处理技术,使用空气、液态水两种介质对熔融态钢渣进行淬冷粒化处理,其技术的核心和研发重点在于淬冷工艺参数控制和后续资源化利用。淬冷粒化工艺参数包括换热介质比例、流量和热容等,对钢渣淬冷过程有重要影响。如换热介质比例和流量决定了淬冷速度,而淬冷速度直接影响钢渣的物理和化学性质。一般来说,淬冷速度越快,钢渣的矿物结构越稳定,越有利于后续的资源化利用;热容则影响淬冷介质的热量吸收能力,热容越大则淬冷效果越好。

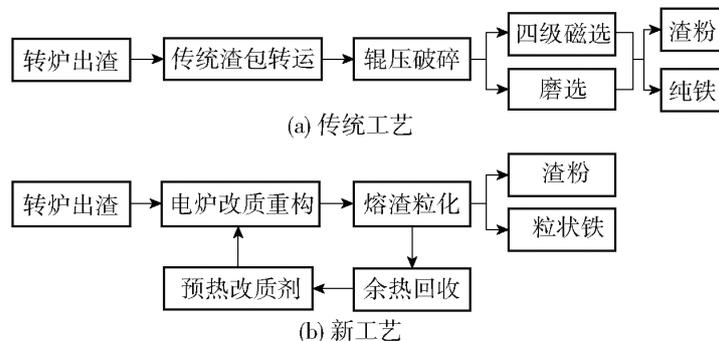


图3 钢渣处理工艺流程

Fig. 3 Steel slag treatment process

双介质淬冷技术可以改善钢渣的物理和化学性质,使其更适合于后续的资源化利用。例如,淬冷后的钢渣可以用作水泥原料、道路建材等。此外,淬冷过程中产生的大量显热也能被回收再利用,进一步

提高资源利用效率。相对于已有的处理工艺:它可以更有效地控制淬冷速度,改善钢渣的性质,提高资源化利用率;可以回收淬冷过程中产生的热量,降低能源消耗;粒化钢渣的同时,使渣铁分离,降低钢渣中的游离氧化钙,实现钢渣中金属料的高效回收,提高尾渣的综合利用率;淬冷粒化过程操作简单,易于实施。但其仍存在一定限制,该技术的核心是通过

开发相应的雾化喷嘴使气、水两相高效混合并形成持续稳定的高压射流对钢渣进行高速淬冷,喷嘴的形状结构将直接影响钢渣粒化的效果,由于喷嘴内部有细小的雾化小孔,也要求液态水保证一定纯净度,防止阻塞孔隙造成设备损坏。双介质淬冷工艺和传统工艺的优缺点对比见表3。

表3 双介质淬冷和传统工艺优缺点对比

Table 3 The advantages and disadvantages of double medium quenching and traditional process are compared

钢渣处理方法	优点	缺点
热泼法	处理速度快,适用范围广,冷却用时短	加速相关设备的损坏,加剧环境污染
热焖法	机械化程度高,渣钢分离好,f-CaO 低	占地面积大,处理时间长、效率低
风淬法	污染小,占地面积小,淬渣粒度均匀、稳定性好	钢渣必须为液态,工艺复杂,噪音大、空气污染严重,冷却凝固速率较慢,易产生针状和丝状渣
水淬法	设备简单,占地面积小,冷却强度高	钢渣处理效率低,余热无法回收,占地面积大、水资源消耗大、易造成环境污染
滚筒法	能够较好的进行渣铁分离,流程简单	余热不能利用,仅适用于液态渣
双介质淬冷法	降低鼓风动能消耗,减少水资源消耗,提高冷却强度,缩短液态渣冷却凝固时间	喷嘴设备易磨损,增加设备成本,钢渣粒化颗粒尺寸不均匀

3.3 双介质粒化技术研究趋势

尽管双介质淬冷粒化技术在一定程度上解决了钢渣处理的问题,但由于钢渣的形态、成分、尺寸差异较大,粒化效果难以保证。在不同风速条件下,液态钢渣的初始条件与造粒、凝固影响规律产生直接作用^[40]。为了进一步提高双介质淬冷粒化技术的效果,在试验中需对多种参数进行优化和调整。例如,通过调整气液比、风速或其他操作条件,以保证颗粒球形度和玻璃体含量,同时可以提高粒化效果;通过改进操作条件、引入预处理环节以及与其他处理方法相结合,以减少处理成本,降低生产过程中的能源消耗和废弃物产生;加强环保措施,采用减排降耗技术和有效的噪声减少措施;完善钢渣成分检测和参数调节等技术实现粒状物料高质量的生产。此外,针对钢渣成分和尺寸差异较大的问题,引入预处理环节,如筛选、磨细等方法,以缩小钢渣颗粒尺寸的差异,从而提高粒化效果。

总之,双介质淬冷粒化技术在处理钢渣方面具有一定的优势,可应用于钢渣的资源化利用、废弃物处理和环保治理等领域,但仍存在诸多问题。针对以上工艺,未来的研究重点应集中在以下几个方面。

1) 高性能钢渣粒化材料的制备。通过对双介

质淬冷粒化技术的发展,可以实现钢渣的高效率粒化制备,将钢渣与其他材料进行复合,制备出多功能、高性能的钢渣粒化材料。

2) 环保利用与资源化。钢渣双介质粒化技术可以有效降低钢铁生产过程中的污染排放,减少环境破坏。通过粒化技术,将钢渣转化为高附加值的材料,既可实现钢渣的资源化利用,又能提高钢铁企业的经济效益。

3) 钢渣深度加工发展。气液两相淬冷粒化技术可以为钢渣深度加工提供保障,开发钢渣中更多的资源价值。通过双介质淬冷粒化技术制备的钢渣颗粒可以作为铸造磨料、建筑材料等。

4 结语及展望

转炉液态钢渣具有“渣、铁、热”等资源,目前的钢渣粒化主流技术主要有热闷法、风淬粒化法、滚筒法等,其虽在一定程度上解决其他方法存在的投资大、占地多、污染重等问题,但依然存在钢渣资源利用不完全、体积安定性风险、磨矿成本高、铁含量高等问题,笔者提出采用改质重构与气水两相混合流体淬冷粒化技术相结合的方法处理钢渣,该方法向液态钢渣中加入酸性熔剂和还原剂,利用气体的高

运动速度和水的高导热性将液态钢渣迅速冷却成固体状颗粒,降低了钢渣纤维化的情况。

1)将双介质淬冷粒化技术与钢渣调质技术相结合,既能改善钢渣成分,降低钢渣中CaO、MgO等游离成分,又能提高粒化颗粒的球形度,降低颗粒粒径,从而实现钢渣的高效、环保利用。

2)钢渣气液两相流粒化工艺具有多项优点:粒化效果好,能够兼顾钢渣品质及余热回收,最大程度实现熔渣的资源化利用,节能减排;熔渣在气动力作用下粒化成小液滴,比表面积增加,换热效果增强;粒化过程对粉尘起到捕集和沉降作用,有利于环境保护。同时,该工艺消耗的能源低,环境污染小,可实现钢铁固废的二次利用。

3)钢渣双介质淬冷粒化技术在处理高温熔渣工艺上具有良好的应用前景,但该技术并不完善,必须加强技术研究和改进才能全面推广,实现经济效益和环境效益的最大化。

[参考文献]

- [1] ZHANG Zelong, CHEN Lingen, YANG Bo, et al. Thermodynamic analysis and optimization of an air Brayton cycle for recovering waste heat of blast furnace slag [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90: 742 – 748.
- [2] 周继程, 酆秀萍, 上官方钦, 等. 钢铁制造流程能源转换机制与能源利用效率分析[J]. *钢铁*, 2019, 54(4): 73.
ZHOU Jicheng, LI Xiuping, SHANGGUAN Fangqin, et al. Analysis of energy conversion mechanism and energy utilization efficiency in steel manufacturing process [J]. *Steel*, 2019, 54(4): 73.
- [3] 郜学, 尚海霞. 中国钢铁工业“十二五”节能成就和“十三五”展望[J]. *钢铁*, 2017, 52(7): 9.
GAO Xue, SHANG Haixia. China's iron and steel industry's 12th Five-Year energy-saving achievements and 13th Five-Year outlook [J]. *Iron & Steel*, 2017, 52(7): 9.
- [4] ZHAO Qing, LIU Chengjun, MEI Xiaohui, et al. Research progress of steel slag-based carbon sequestration [J/OL]. *Fundamental Research*, 2022 – 10 – 17. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.09.023>.
- [5] 殷瑞钰. 论钢厂制造过程中能量流行为和能量流网络的构建[J]. *钢铁*, 2010, 45(4): 1.
YIN Ruiyu. On the construction of energy flow network and energy flow behavior in the manufacturing process of steel mills [J]. *Iron & Steel*, 2010, 45(4): 1.
- [6] 于克旭, 周征, 宋宝莹. 钢渣磁选产品选别工艺设计及生产实践[J]. *金属矿山*, 2010(1): 175 – 177, 182.
YU Kexu, ZHOU Zheng, SONG Baoying. Steel slag magnetic separation product selection process design and production practice [J]. *Metal mine*, 2010(1): 175 – 177, 182.
- [7] 陈振中. 钢渣利用现状及回收工艺研究[J]. *四川冶金*, 2022, 44(03): 33 – 35, 40.
CHEN Zhenzhong. Research on the utilization status and recovery process of steel slag [J]. *Sichuan Metallurgy*, 2022, 44(03): 33 – 35, 40.
- [8] HAN F, WU L. *Comprehensive Utilization Technology of Steel Slag: Chapter6[M]//Industrial Solid Waste Recycling in Western China*. Springer, Singapore, 2019: 305 – 356.
- [9] HAYASHI A, ASAOKA S, WATANABE T, et al. Mechanism of suppression of sulfide ion in seawater using steelmaking slag [J]. *ISIJ International*, 2014, 54(7): 1741 – 1748.
- [10] GUO J, BAO Y, WANG M. Steel slag in China: treatment, recycling, and management [J]. *Waste Management*, 2018, 78: 318 – 330.
- [11] Suguna Soumya Varanasi, Venu Madhava Rao More, M. Bhaskar Venkata Rao. Recycling ladle furnace slag as flux in steelmaking: a review [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2019, 5: 449 – 462.
- [12] JIANG Y, AHMAD M R, CHEN B. Properties of magnesium phosphate cement containing steel slag powder [J]. *Construction And Building Material*, 2019, 195: 140 – 147.
- [13] GAO Jintao, LI Shiqi, ZHANG Yanting. Process of re-resourcing of converter slag [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2011, 18(12): 32 – 39.
- [14] Yogesh Nathuji Dhoble, Sirajuddin Ahmed. Review on the innovative uses of steel slag for waste minimization [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20: 1373 – 1382.
- [15] 徐露, 范鼎东, 夏能伟, 等. 钢渣微粉用于烧结烟气干法脱硫的试验研究[J]. *烧结球团*, 2015, 49(3): 48 – 52.
XU Lu, FAN Dingdong, XIA Nengwei, et al. Experimental study on dry desulfurization of sintering flue gas by steel slag powder [J]. *Sintered pellets*, 2015, 49(3): 48 – 52.
- [16] 魏贤. 钢渣对不同轮作制度酸性土壤改良效果及其安全性评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
WEI Xian. Effects and safety evaluation of steel slag on acidic soil improvement in different rotation systems [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [17] Carlos Andres, Cardenas Balaguera, Maryory Astrid Gomez Botero. Characterization of steel slag for the production of chemically bonded phosphate ceramics (CBPC) [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 1 – 11.
- [18] ZHANG Yi, YI Zhifeng, WANG Jingshi, et al. Sub-50 nm amorphous iron phosphate dehydrate nanoplates fabricated via liquid exfoliation from recycled steelmaking phosphate slag [J]. *Materials Letters*, 2018, 233: 290 – 293.
- [19] WANG Zhanjun, SOHN JI. A review on reclamation and reutilization of ironmaking and steelmaking slags [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2019, 5: 127 – 140.

- [20] 饶磊. 转炉钢渣成分、结构及性能内在规律及其应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
RAO Lei. Intrinsic law and application of composition, structure and properties of converter steel slag [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2020.
- [21] 王新风. 钢渣处理与综合利用探析[J]. 低碳世界, 2021, 11(6): 305-306.
WANG Xinfeng. Steel slag treatment and comprehensive utilization [J]. Low carbon world, 2021, 11(6): 305-306.
- [22] 苏兴文, 李晓阳, 刘镭. 鞍钢鲅鱼圈钢厂钢渣短流程处理的应用与实践[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集, 2011: 864-868.
SU Xingwen, LI Xiaoyang, LIU Lei. Application and Practice of short process treatment of steel slag in bayuquan steel plant of angang [C]//Thesis Collection of the Eighth(2011) China Iron and Steel Annual Conference, 2011: 864-868.
- [23] 王少宁, 龙跃, 张玉柱, 等. 钢渣处理方法的比较分析及综合利用[J]. 炼钢, 2010, 26(2): 75-78.
WANG Shaoning, LONG Yue, ZHANG Yuzhu, etc. Comparative analysis and comprehensive utilization of steel slag treatment methods[J]. Steelmaking, 2010, 26(2): 75-78.
- [24] 王吉凤, 付恒毅, 闫晓彤, 等. 钢渣综合利用研究现状[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 77-82.
WANG Jifeng, FU Hengyi, YAN Xiaotong, et al. Research status of comprehensive utilization of steel slag [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(6): 77-82.
- [25] 龙跃, 蔡振雷, 张玉柱, 等. 液态钢渣气淬粒化过程数值模拟[J]. 上海金属, 2013, 35(6): 38-42.
LONG Yue, CAI Zhenlei, ZHANG Yuzhu, et al. Numerical simulation of gas quenching granulation process of liquid steel slag[J]. Shanghai Metal, 2013, 35(6): 38-42.
- [26] 刘楠. 超声速气流中液体横向射流一次雾化的实验与大涡模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
LIU Nan. Experimental and large eddy simulation study on primary atomization of liquid transverse jet in supersonic airflow [D]. changsha: National University of Defense Science and Technology, 2015.
- [27] 王丽丽, 张玉柱, 龙跃, 等. 气淬粒化高炉熔渣液膜流动特性数值模拟[J]. 过程工程学报, 2020, 20(8): 887-895.
WANG Lili, ZHANG Yuzhu, LONG Yue, etc. Numerical simulation of liquid film flow characteristics of gas-quenched granulated blast furnace slag[J]. Process Engineering, 2020, 20(8): 887-895.
- [28] 康月, 刘超, 张玉柱, 等. 气淬法制备高炉渣玻璃微珠的性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 202-206.
KANG Yue, LIU Chao, ZHANG Yuzhu, et al. Properties of blast furnace slag glass microspheres prepared by gas quenching method [J]. Journal of Northeast University (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 202-206.
- [29] 卢宏伟, 李俊国, 张玉柱. 气淬渣滴冷却过程数值模拟研究[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(3): 28-33.
LU Hongwei, LI Junguo, ZHANG Yuzhu. Numerical simulation of gas quenching slag droplet cooling process [J]. Steel Vanadium Titanium, 2012, 33(3): 28-33.
- [30] 戴晓天, 齐渊洪, 张春霞. 熔融钢铁渣干式粒化和显热回收技术的进展[J]. 钢铁研究学报, 2008(7): 1-6.
DAI Xiaotian, QI Yuanhong, ZHANG Chunxia. Advances in dry granulation and sensible heat recovery of molten steel slag [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008(7): 1-6.
- [31] 王子兵, 刘跃, 张玉柱, 等. 高炉熔渣气淬粒化热量回收试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(4): 93-98.
WANG Zibing, LIU Yue, ZHANG Yuzhu, et al. Experimental study on heat recovery of gas quenching granulation of blast furnace slag [J]. Vanadium and titanium steel, 2018, 39(4): 93-98.
- [32] 万新宇, 严定鏊, 高建军, 等. 高炉渣气-水混淬干法粒化及余热回收扩大试验研究[J]. 炼铁, 2020, 39(4): 8-12.
WAN Xinyu, YAN Dingliu, GAO Jianjun, etc. Expanded experimental study on dry granulation and waste heat recovery of blast furnace slag by gas-water mixed quenching [J]. Ironmaking, 2020, 39(4): 8-12.
- [33] 居殿春, 邱家用, 徐敏人, 等. 碳对含钛高炉渣钠化反应热力学及钠化率的影响[J]. 钢铁, 2018, 53(1): 88.
JU Dianchun, QIU Jiayong, XU Minren, et al. Effect of carbon on the thermodynamics of sodiation reaction and sodiation rate of titanium-bearing blast furnace slag [J]. Steel, 2018, 53(1): 88.
- [34] 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.
ZHANG Jun, YAN Dingliu, QI Yuanhong, et al. Analysis of difficulties in the treatment and utilization of iron and steel smelting slag [J]. Iron & steel, 2020, 55(1): 1-5.
- [35] 王德永, 李勇, 刘建, 等. 钢渣中同时回收铁和磷的资源化利用新思路[J]. 中国冶金, 2011, 21(8): 50.
WANG Deyong, LI Yong, LIU Jian, et al. New ideas for resource utilization of iron and phosphorus from steel slag [J]. China Metallurgy, 2011, 21(8): 50.
- [36] 刘杰, 赵东明, 李建军, 等. 鞍钢高炉低镁渣冶炼技术研究与应用[J]. 钢铁, 2018, 53(3): 22.
LIU Jie, ZHAO Dongming, LI Jianjun, et al. Research and application of low magnesium slag smelting technology in blast furnace of Ansteel [J]. Iron & Steel, 2018, 53(3): 22.
- [37] 甄常亮, 程翠花, 张巧荣, 等. “两步法”重构钢渣物相变化特征及黏度调控机制[J]. 钢铁, 2023, 58(6): 1-13.
ZHEN Changliang, CHENG Cuihua, ZHANG Qiaorong, et al. “Two-step” reconstruction of steel slag phase change characteristics and viscosity regulation mechanism [J]. Steel, 2023, 58(6): 1-13.
- [38] 戴晓天, 齐渊洪, 张春霞, 等. 高炉渣急冷干式粒化处理工

艺分析[J]. 钢铁研究学报, 2007(5): 14-19.

DAI Xiaotian, QI Yuanhong, ZHANG Chunxia, etc. Analysis of blast furnace slag quenching dry granulation process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007(5): 14-19.

- [39] 孙磊, 张玉柱, 甄常亮, 等. 壁面结构对渣包保温行为的影响与效果评价[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(2): 138-148.
SUN Lei, ZHANG Yuzhu, ZHEN Changliang, et al. Effect of wall structure on thermal insulation behavior of slag ladle and its

effect evaluation[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(2): 138-148.

- [40] 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.
LIU Yuanjiong, SHI Jinming, MA Guojun, et al. Analysis and design of steel slag air quenching process parameters based on CFD[J]. Steelmaking, 2021, 37(4): 74-80.

Research status and progress of quenching granulation of steel slag

ZHAO Kai, WANG Dianxin, ZHEN Changliang, ZHANG Qiaorong, CHEN Wei, ZHANG Yuzhu

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: The annual new steel slag discharge in China is more than 100 million tons, and the utilization rate is only 10% ~ 20%. There are abundant resources such as “slag, iron and heat” in the liquid steel slag of converter, which causes great waste by simple storage or landfill. At present, the mainstream technologies of steel slag granulation mainly include hot stuffy method, air quenching granulation method, drum method, etc., which are all based on the development of steel slag granulation and free calcium oxide (f-CaO) digestion, which is convenient for subsequent crushing, screening and magnetic separation to obtain slag steel, magnetic separation powder and tailings. Although these methods have solved the problems of large investment, large land occupation and heavy pollution in other methods to a certain extent, there are still some problems such as incomplete utilization of steel slag resources, risk of volume stability, high grinding cost and high iron content. The author proposes to use the combination of modified reconstruction and gas-water two-phase mixed fluid quenching granulation technology to treat steel slag. This method adds acid flux and reducing agent to liquid steel slag, and uses the high speed of gas and the high thermal conductivity of water to quickly cool the liquid steel slag into solid particles, which reduces the fibrosis of steel slag and takes into account the granulation of reconstructed slag and the efficiency of waste heat recovery. The tailings after iron extraction can be used in the fields of building materials preparation, soil modification, glass-ceramic and ceramic materials after particle size classification. However, this method is still in the research stage and not mature enough. In the later stage, it is necessary to carry out in-depth research on the preparation of high-performance steel slag granulation materials, environmental protection utilization and resource utilization, and the development of steel slag deep processing.

Key words: steel slag; double medium quenching granulation; quality reconstruction; iron recovery; waste heat recovery; resource utilization