绿色低碳

转炉渣高值化循环利用技术创新与实践探索

程欣丽[1],孙乾[2],李岩[2],葛振栋[1],武晓霞[2],张良[1]
(1. 山东蓝天科技发展集团有限公司,山东 济南 271104;
2. 山东钢铁股份有限公司,山东 济南 271104)

摘要: 我国转炉渣年产生量呈增长态势,但45%仍采用传统堆存方式,引发土壤污染事件,环境与经济压力显著。介绍了国内钢厂内部循环体系如智能留渣闭环控制系统、梯度供氧脱磷工艺,铁水预处理及钢包渣补充材料等应用,可将转炉渣金属铁回收率稳定在80%~83%,但仍面临成分波动(ω(CaO)为32%~49%)、处理成本高(85~120元/t渣)及质量安全风险等挑战。未来需向精准化、低成本方向发展,助力钢铁行业绿色转型。

关键词: 转炉渣;高值化利用;循环技术;综合利用;绿色转型
中图分类号: TF769 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)01-0012-07
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 01. 002

Innovation and Practical Exploration of High-value Recycling Technology for Converter Slag

CHENG Xinli[1], SUN Qian[2], LI Yan[2], GE Zhendong[1], WU Xiaoxia[2], ZHANG Liang[1]
(1. Shandong Blue Sky Science and Technology Development Group Co., Ltd., Jinan 271104, Shandong, China; 2. Shandong Iron & Steel Co., Ltd., Jinan 271104, Shandong, China)

Abstract: The annual production volume of converter slag in China is increasing, but 45% of it is still adopted by the traditional stockpiling method, which leads to soil pollution incidents and significant environmental and economic pressures. To adress these issues, internal recycling systems in domestic steel mills, such as the intelligent slag retention closed-loop control system, the gradient oxygen-supply dephosphorization process, hot metal pretreatment, and ladle slag supplementary materials were introduced. These technologies achieved a stable recovery rate of metal iron from converter slag at 80%~83%. However, the system still faces challenges such as compositional fluctuations (ω(CaO) ranging from 32% to 49%), high processing costs(85~120 yuan/t slag), and associated quality and safety risks. Future efforts should focus on advancing precision-oriented and cost-effective approaches to support the green transformation of the steel industry.

Key words: converter slag; high-value utilization; recycling technology; comprehensive utilization; green transformation

钢铁行业作为国民经济的支柱产业,在生产过程中产生的转炉渣已成为亟待解决的大宗工业固废。2020—2024年,我国转炉渣年产生量从2.6亿t增长至3.1亿t,年均增长率达4.1%,传统堆存方式占比虽有所下降,但仍达42%,不仅占用大量土地(每万t堆存需330 m²),还因重金属(如Cr、Zn)浸出引发年均28起土壤污染事件,环境治理成本高昂。在此背景下,“十四五”以来国家密集出台政

程欣丽,助理工程师,2020年毕业于山东师范大学化学工程与工艺专业。E-mail:462203159@qq. com
通讯作者:孙乾,硕士,工程师,2018年毕业于西安建筑科技大学冶金工程专业。E-mail:sunqian0630@qq. com

策，明确2025年钢渣综合利用率需突破80%，地方政府亦通过考核机制、补贴政策等推动技术落地，转炉渣资源化利用已成为行业绿色转型的核心任务[1-2]。

本文聚焦转炉渣高值化循环利用，系统研究其基本特性，深入分析钢厂内部循环技术，结合国内外典型应用案例总结实践经验，并剖析当前面临的成分波动、处理成本高、质量安全风险等瓶颈，旨在构建适配不同场景的转炉渣资源化技术体系，为钢铁企业提供降本增效路径，助力实现“双碳”目标与资源循环型社会建设，兼具环境、经济与社会效益。

1 转炉渣资源循环利用的现状与趋势

1.1 转炉渣产生与处置现状

近年来，我国转炉渣产生量持续攀升，表1为2020—2024年我国转炉渣产生与堆存情况。由表1可知，2024年转炉渣产生量达3.1亿t，较2020年增长约19.2%。尽管综合利用率从2020年的48%提升至2024年的58%，但仍有42%的转炉渣采用露天堆存，单次治理费用可达数百万元，对生态与经济造成双重压力[3-4]。

表1 2020—2024年我国转炉渣产生与堆存情况

Table 1 Generation and Stockpiling of Converter Slag in China from the Year 2020 to 2024

年份	转炉渣产生量/亿t	堆存占比/%	综合利用率/%
2020	2.6	52	48
2021	2.7	50	50
2022	2.8	48	52
2023	2.9	45	55
2024	3.1	42	58

1.2 政策驱动下的循环利用要求

国家层面，《“十四五”大宗固体废弃物综合利用实施方案》《钢铁行业低碳行动方案》等政策明确了转炉渣利用的量化目标与技术方向。地方层面，加大推动企业技术投入。表2为部分省份转炉渣资源化利用政策与成效（2024年）[3-6]，由表2看出，河北、山东、江苏、山西等省均加大推动企业技术投入。

表2 部分省份转炉渣资源化利用政策与成效（2024年）

Table 2 Policies and Effects of Converter Slag Resource Utilization in Selected Provinces（Year of 2024）

省份	政策措施	实施成效
河北	厂内循环率≥60%考核	推动28家企业完成技术改造
山东	15%设备购置补贴	撬动10亿元企业投资
江苏	企业所得税“三免三减半”	惠及17家重点企业
山西	设立5 000万元专项基金	支持12个示范项目建设

1.3 行业技术发展趋势

2020—2024年，转炉渣技术研发投入复合增长率达35%，专利申请量从187项增至389项，呈现精细化处理与多元化应用特征[6-7]。精细化处理方面，金属铁回收率从65%提升至82%，山钢集团引入磁选设备后年增效益超1.2亿元；应用领域方面，从2020年的77%转炉渣集中用于冶金回用，拓展至2024年的40%用于建筑材料等非冶金领域。京津冀市政工程中高性能混凝土骨料应用年增超40%。表3为2020—2025年山钢集团转炉渣厂内循环经济效益变化情况，预计2025年厂内循环经济效益将达450亿元，较2020年增长125%[7-9]。

表3 2020—2025年山钢集团转炉渣厂内循环经济效益变化情况

Table 3 Changes in Economic Benefits of Converter Slag Internal Circulation in Shandong Iron and Steel Group from the Year 2020 to 2025

年份	厂内循环经济效益/亿元	较上年增长率/%
2020	200	
2021	260	30
2022	338	30
2023	405	约20
2024	429	约6
2025	450	约5

2 转炉渣的基本特性

2.1 化学成分与矿物组成特征

转炉渣化学成分呈现动态变化。以山钢集团为例，表4为2020—2024年山钢集团典型转炉渣主要化学成分变化情况。由表4可见，2020—2024年转炉渣中CaO含量从38.2%提升至43.8%，FeO含量则由18.7%下降至13.5%。这与智能造渣模型和顶底复吹技术的优化应用密切相关，计算得出石灰利用率提高15%。统计发现，地域差异导致P_2O_5含量差异显著，2024年华北地区企业转炉渣P_2O_5平均含量达3.0%，华南地区仅为1.5%，这种差

异直接影响资源化路径，高CaO含量渣适宜作为烧结熔剂，可降低烧结工序成本6~9元/t，而高磷渣需预处理脱磷以防钢水回磷[9-10]。

表4 2020—2024年山钢集团典型转炉渣主要化学成分变化情况（质量分数）

Table 4 Changes in Main Chemical Compositions of Typical Converter Slag in Shandong Iron and Steel Group from the Year 2020 to 2024（Mass Fraction） %

年份	CaO	FeO	SiO_2	P_2O_5
2020	38.2	18.7	16.5	1.6
2021	39.8	16.9	17.2	1.8
2022	41.3	15.1	16.8	2.1
2023	42.5	14.3	16.3	2.3
2024	43.8	13.5	16.1	2.5

表5为2020—2024年山钢集团转炉渣主要矿物相含量变化情况。由表5可以看出，2024年转炉渣中硅酸二钙（C_2S）和硅酸三钙（C_3S）合计占比达45.5%，其中C_2S含量从2020年的23.6%提升至2024年的29.2%；铁酸钙（CF）与RO相合计占比约26%，CF含量每增加1%，渣体比磁化系数提高5%，有利于磁选回收金属铁。钙镁橄榄石（CMS）含量从2020年的5.2%上升至2024年的9.0%，其在1 600 ℃高温下对碱性炉衬的侵蚀速率较传统材料降低38%，为新型耐火材料开发提供更优质原料[11-12]。

表5 2020—2024年山钢集团转炉渣主要矿物相含量变化情况（质量分数）

Table 5 Changes in Main Mineral Phase Contents of Converter Slag in Shandong Iron and Steel Group from the Year 2020 to 2024（Mass Fraction） %

年份	C_2S	C_3S	CF	RO相	CMS
2020	23.6	16.1	12.3	12.7	5.2
2021	25.3	15.9	13.1	11.8	6.5
2022	26.8	15.7	13.8	11.2	7.3
2023	27.4	15.8	14.2	10.8	8.1
2024	29.2	16.3	14.5	11.5	9.0

2.2 物理性质演变

转炉渣物理性质与处理工艺关联紧密，图1为不同处理工艺对转炉渣物理性质的影响。热焖处理使转炉渣-10 mm粒级占比提升至78%后，进一步降低了后续粉磨能耗，其平均密度从3.15 g/cm³下降至2.98 g/cm³，莫氏硬度从5.2降至4.6，机械性能改善更有利于建筑骨料应用。山钢集团优化开发的急冷处理技术使转炉渣玻璃体含量提升至35%，显著增强胶凝活性，为高性能矿物掺合料制备提供更广阔途径。

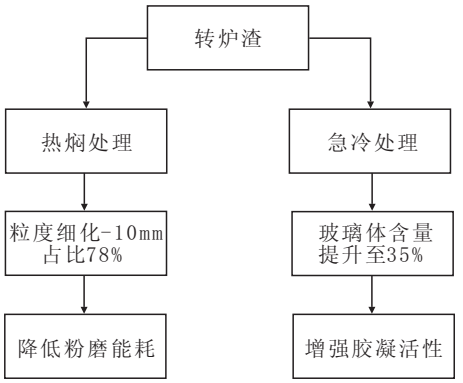


图1 不同处理工艺对转炉渣物理性质的影响

Fig. 1 Effects of Different Treatment Processes on Physical Properties of Converter Slag

3 钢厂内部转炉渣循环利用技术

3.1 作为冶金原料返回转炉

近年，转炉渣返回转炉技术实现了质的飞跃。宝钢集团开发了智能留渣闭环控制系统，将红外光谱在线分析仪与机械臂出渣装置联动，可在30 s内完成渣样成分检测并自动调整留渣量。2024年数据显示，该系统使留渣量稳定在（10±0.6）%（较2020年人工控制时的波动范围缩小70%），石灰消耗从45 kg/t钢降至30 kg/t钢，按年产800万t钢计算，年节约成本超2.1亿元。

在高氧化渣脱磷技术方面，鞍钢集团开发了梯度供氧脱磷工艺，将转炉供氧阶段分为三个区间：初期以2.5 $Nm^3/(t \cdot min)$的供氧强度快速升温，中期降至1.8 $Nm^3/(t \cdot min)$维持FeO含量在38%左右，末期再提升至2.2 $Nm^3/(t \cdot min)$强化脱磷反应。配套的双喷粉装置可同步向熔池喷吹石灰粉与转炉渣粉，显著提升了炉渣脱磷效率，磷分配比稳定在130以上。

表6为鞍钢集团留渣操作技术应用效果[13-14]。由表6可知，鞍钢集团应用留渣操作技术后，留渣率稳定至10%，石灰消耗降至30 kg/t钢，脱磷率提升至83%，吨钢成本节约达22元。因脱磷效率提升，钢水终点磷含量稳定控制在（0.014±0.002）%，超低

磷钢冶炼合格率从65%提升至92%，年减少因磷含量超标导致的废品损失超3 500万元。

表6 鞍钢集团留渣操作技术应用效果[13-14]

Table 6 Application Effects of Slag Retention Operation Technology in Ansteel Group [13-14]

年份	留渣量/%	石灰消耗/（kg/t钢）	脱磷率/%	节约成本/（元/t钢）
2020		45	72	
2021	8	40	75	10
2022	9	36	78	14
2023	10	32	80	18
2024	10	30	83	22

首钢集团近年来在绿色炼钢、资源循环利用技术研发上投入较大，积极探索新技术在炼钢过程中的应用。首钢集团将微波预处理技术引入转炉渣回用流程，通过2 450 MHz微波照射转炉渣3 min，使渣中f-CaO活性提升25%，返回转炉后可替代12%的生石灰，进一步降低原料消耗。2024年工业试验表明，该技术使吨钢冶炼时间缩短2 min，转炉作业率提高3%[14-15]。

3.2 用于铁水预处理

转炉渣在铁水预处理工序中的应用，因技术适配性的提升而扩大了应用场景。多级破碎-磁选联动系统优化了转炉渣粒度与纯度，配合双搅拌模式及温度窗口精准控制技术，既提升了脱硫效果，又减少铁损，显著优化铁水预处理环节的经济性与稳定性。河钢集团将转炉渣先经冲击式破碎机破碎至10 mm以下，再通过三辊磁选机分选金属铁，剩余渣料经气流分级，0~5 mm粒级占比可达85%。处理后的转炉渣与电石按7∶3的比例混合制成脱硫剂，在120 t铁水罐中采用“底吹氮气+顶吹氩气”的双搅拌模式，搅拌强度控制在0.06 $m^3/(t\cdot min)$。

表7为河钢集团转炉渣用于铁水脱硫的效果[16-18]。由表7可以看出，河钢集团转炉渣用于铁水脱硫实践中，转炉渣0~5 mm粒度占比逐步提升至85%，脱硫效率提高到65%，金属收得率实现了从无到1.6%的增长，计算得出年减少铁损约2 200 t。

表7 河钢集团转炉渣用于铁水脱硫的效果[16-18]

Table 7 Effects of Converter Slag on Hot Metal Desulfurization in Hebei Iron and Steel Group[16-18]

年份	转炉渣粒度（0~5 mm）占比/%	脱硫效率/%	金属收得率提高/%
2020	65	45	0
2021	70	50	0.8
2022	75	56	1.2
2023	80	62	1.5
2024	85	65	1.6

河钢集团脱磷工艺的创新体现在温度窗口精准控制技术上。通过在铁水预处理站安装激光测温仪，将铁水温度稳定在（1 360±10）℃，此温度下转炉渣中FeO的氧化性与CaO脱磷活性形成最佳匹配。配合自主研发的磷含量在线监测传感器，可实时显示脱磷曲线，当磷含量降至0.035%时自动停止反应，避免过度处理造成的铁损增加。

3.3 作为钢包渣的补充材料

转炉渣作为钢包渣补充材料的技术突破，体现在改性处理与过程调控的深度结合。太钢集团不锈钢等特钢生产对钢包渣的质量要求严格，开发了转炉渣预熔改性工艺，提升了钢水质量，有效提高转炉渣作为钢包渣补充材料的性能，优化原材料需求。将转炉渣与镁砂按8∶2比例混合后，在1 500 ℃电弧炉中熔融2 h，使渣中C_2S含量提升至30%，水硬性指标提高40%。

表8为2020—2024年太钢集团转炉渣作为钢包渣补充材料的应用效果[18-19]。

表8 2020—2024年太钢集团转炉渣作为钢包渣补充材料的应用效果

Table 8 Application Effects of Converter Slag as Ladle Slag Supplementary Material in Taiyuan Iron and Steel Group from the Year 2020 to 2024

年份	转炉渣添加比例/%	钢水硫含量降低幅度/%	钢水氧含量降低幅度/%
2020	15	0.005	0.003
2021	17	0.006	0.004
2022	18	0.007	0.004
2023	20	0.008	0.005
2024	20	0.009	0.006

结合表8可知，2020—2024年转炉渣作为钢包渣补充材料时，添加比例从15%逐步提升至20%，钢水硫含量降低幅度从0.005%增至0.009%，氧含量降低幅度从0.003%增至0.006%。改性后的转炉渣按20%比例加入钢包渣，在氩气搅拌功率12 kW的条件下，有效吸附钢水中杂质，持续优化钢水纯净度，为钢材质量提升提供支撑。

沙钢集团在高端钢材生产中，创新应用转炉渣-钢包渣成分匹配技术，通过检测转炉渣的CaO/SiO_2比值，自动计算钢包渣中Al_2O_3的加入量，使钢包渣碱度稳定在2.8±0.2，有效吸附钢水中的Al_2O_3夹杂物。沙钢应用该技术成功生产风电轴承[18-20]，钢中的大型夹杂物（>5 μm）数量从12个/mm²降至5个/mm²，疲劳寿命提高30%。同时，还开发了钢包渣循环再生技术，将使用后的钢包渣经磁选除铁、颚式破碎后，返回转炉作为造渣剂，形成转炉渣-钢包渣-转炉渣的闭环系统[18-19]。

4 转炉渣在钢厂内部循环利用的案例分析

4.1 国内钢厂

（1）沙钢集团

沙钢集团等东部沿海大型钢企近年来持续推进转炉渣全流程资源化利用，2020—2024年累计投入研发资金超3亿元。通过集成留渣操作、高氧化渣脱磷及钢包渣改性技术，形成闭环循环体系。表9为沙钢转炉渣循环利用技术应用效果。

表9 沙钢集团转炉渣循环利用技术应用效果

Table 9 Application Effects of Converter Slag Recycling Technology in Shagang Group

年份	留渣量/%	石灰消耗/（kg/t钢）	终点磷含量/%	循环利用率/%
2020	6.5	42	0.028	58
2021	7.2	36	0.022	65
2022	8.0	31	0.018	71
2023	8.5	29	0.015	76
2024	9.0	28	0.013	80

由表9可知，应用转炉渣循环利用技术后，留渣量提升至2024年的9.0%，石灰消耗降至28 kg/t钢，终点磷含量降至0.013%，通过技术迭代，转炉渣厂内循环利用率提升至80%，远超行业平均水平（58%~65%）[19-20]。一系列指标优化，既体现出留渣操作、高氧化渣脱磷等技术的协同成效，大幅降低冶炼成本，又有效控制钢水磷含量，减少废品损失，推动转炉渣资源化利用水平显著提升。

沙钢集团创新性地将转炉渣制备成钢包渣改质剂，通过磁选-粉磨联合处理，使CaO有效利用率提升至92%。2024年数据显示，钢包渣脱硫效率提高22%，吨钢脱氧剂成本降低18元，计算得知年减少磷损失超8 500 t，全年实现经济效益1.2亿元。

（2）山钢集团

山钢集团采用转炉渣-烧结协同利用技术，将磁选后的转炉渣按8%比例配入烧结料，替代部分石灰石。通过调整混合机转速至12 r/min，使混合料均匀度提至92%。表10为山钢集团转炉渣-烧结协同利用指标统计[21-22]，由表10可以看出，与2020年相比，2024年烧结矿品位提高0.6%，固体燃料消耗降低4 kg/t钢，年节约成本近8 200万元。

表10 山钢集团转炉渣-烧结协同利用指标统计

Table 10 Statistics of Synergistic Utilization Indicators for Converter Slag and Sintering in Shandong Iron and Steel Group

年份	配渣比例/%	固体燃料消耗/（kg/t钢）	烧结矿品位/%	年效益/万元
2020	3	58	57.2	2 300
2021	5	56	57.5	4 500
2022	6	55	57.6	6 200
2023	8	55	57.7	8 000
2024	9	54	57.8	8 200

山钢集团强化资源综合降本，采用转炉渣热焖-磁选-粉磨联合工艺，热焖处理使渣体充分消解，磁选回收金属铁纯度达95%。表11为山钢集团转炉渣热焖-磁选-粉磨技术应用指标及效益统计。由表11看出，该技术应用后，金属铁回收率提升至85%，粉磨后制成的矿渣微粉活性指数提高至79%，年回收铁4.5万t，微粉外销年创效3 800万元[21-22]。

4.2 国外钢企

德国蒂森克虏伯集团等国外先进钢铁集团在转炉渣利用方面采用精细化处理策略。2020年起，该集团建设智能化转炉渣处理中心，采用三段破碎-多级磁选工艺；在铁水预处理环节，研发出转炉渣-电石复合脱硫剂，并且将转炉渣高温改性

表11 山钢转炉渣热焖-磁选-粉磨技术应用指标及效益统计

Table 11 Application Indicators and Benefits Statistics of Converter Slag Hot Disintegrating-Magnetic Separation-Grinding Technology in Shandong Iron and Steel Group

年份	金属铁回收率/%	微粉活性指数/%	年回收铁/万t	微粉外销年创效/万元
2020	68	65	2.1	1 500
2021	73	70	2.8	2 200
2022	79	75	3.5	2 900
2023	84	78	4.2	3 600
2024	85	79	4.5	3 800

处理，用于生产高性能建筑骨料。表12为蒂森克虏伯集团转炉渣循环利用技术关键指标[23-24]。由表12看出，采用上述措施后，金属铁回收率提升至88%，计算年回收金属铁超15万t；脱硫效率较传统工艺提升32%，2024年吨铁脱硫成本降低2.5美元。2024年，生产转炉渣基骨料在欧洲市场占有率达12%，年销售额达8 000万欧元。至2024年底，转炉渣综合利用率达到84%，其中企业内循环占比66%，形成冶金回用-建材利用-资源外销的多元化利用模式[23-24]。

表12 蒂森克虏伯集团转炉渣循环利用技术关键指标[23-24]

Table 12 Key Indicators of Converter Slag Recycling Technology in ThyssenKrupp Group[23-24]

年份	铁回收率/%	脱硫效率提升/%	脱硫成本降低/（美元/吨铁）	综合利用率/%
2020	68			72
2021	75	18	1.2	78
2022	81	25	1.8	80
2023	85	30	2.3	83
2024	88	32	2.5	84

5 转炉渣在钢厂内部高效循环利用面临的挑战

5.1 成分波动与处理成本制约

转炉渣化学成分与矿物组成的动态变化，成为限制其稳定利用的关键因素。表13为2020—2024年国内多类型钢厂转炉渣主要成分波动范围，涵盖华北（河钢、首钢）、华东（沙钢）、华南（宝钢湛江）及山东地区（山钢）等代表性企业，含大型长流程钢厂与中小型钢厂。表13中数据显示，不同钢厂转炉渣中CaO含量波动为32%~49%，FeO含量为11%~26%。这种成分波动导致工艺适配性差，例如高磷转炉渣（P_2O_5含量>2.5%）直接返回转炉时，会使钢水磷含量超标风险增加40%。据中国钢铁工业协会统计，因成分波动导致的生产异常，每年造成的经济损失超8亿元[20-22]。

表13 2020—2024年转炉渣主要成分波动范围

Table 13 Fluctuation Range of Main Composition of Converter Slag from the Year 2020 to 2024

年份	CaO含量/%	FeO含量/%	P_2O_5含量/%
2020	32~45	15~23	1.2~2.0
2021	34~46	14~22	1.3~2.2
2022	36~47	13~24	1.5~2.4
2023	38~48	12~25	1.6~2.6
2024	40~49	11~26	1.8~2.8

处理成本居高不下进一步阻碍了转炉渣循环利用进程。以典型处理流程为例，转炉渣经破碎、磁选、粉磨后用于冶金回用，吨渣处理成本达85~120元。

5.2 质量控制与安全风险

转炉渣循环利用中的质量控制存在多维度挑战。图2为转炉渣循环利用安全与质量风险示意图。

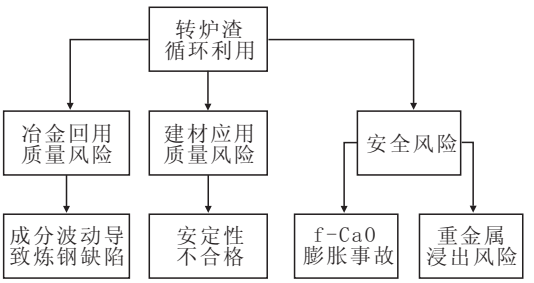


图2 转炉渣循环利用安全与质量风险示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Safety and Quality Risks in Converter Slag Recycling

在冶金回用场景下，2024年行业抽检数据表明，因转炉渣成分波动导致炼钢缺陷（终点成分不合格率）较2023年有所下降，得益于重点企业推进的智能造渣工艺优化，但仍反映行业共性问题。例如，当转炉渣中MgO含量>12%时，炉渣黏度骤

增，导致钢水夹渣缺陷发生率增加23%（略低于2023年），主要因部分企业采用双渣法控制MgO含量（如山西宏达钢铁通过工艺调整将MgO含量控制在8%~11%）。

在建材应用领域，安定性不合格仍是主要问题。2023—2024年市场抽检显示，转炉渣基建材产品安定性合格率提升至78%。合格率提升得益于行业对钢渣掺量的规范（如江苏省钢铁行业协会建议掺量控制在30%以下），但中小型企业因处理工艺简易，产品合格率仍偏低，拉低行业整体水平[22-24]。

安全风险同样不容忽视，未充分消解的转炉渣在循环利用过程中，因f-CaO水化膨胀引发体积不稳定，可能导致钢包穿漏、路面开裂等事故。2020—2024年，全国因转炉渣安定性问题引发的安全事故达17起，造成直接经济损失超5 000万元。此外，转炉渣中重金属（如Cr、Zn）浸出风险，也对环境安全构成潜在威胁[23-24]。

6 结论与展望

当前，我国转炉渣资源化利用已取得阶段性进展，在政策驱动与技术创新的双重作用下，综合利用率从2020年的48%提升至2024年的58%，钢厂内部循环技术体系进一步完善。中国钢铁工业协会2024年11月数据显示，会员企业钢渣利用率达99.27%，头部企业表现突出，如宝武集团武钢转炉渣出渣率超80%，山钢集团莱芜基地实现钢渣100%环保化回用。

通过留渣操作智能化、高氧化渣脱磷、钢包渣闭环回用等技术创新，转炉渣金属铁回收率可稳定在80%~83%，这一水平与滚筒法等主流处理工艺的行业平均回收效率一致。国内外实践表明，“冶金回用-建材拓展-多元外销”的协同模式可最大化资源价值，为行业提供了可复制的路径。但需正视的是，成分波动导致的工艺适配性问题、吨渣85~120元的处理成本压力，以及安定性不合格引发的安全风险，仍是制约转炉渣高值化利用的核心瓶颈。

未来转炉渣循环利用需向精准化、低成本、全链条方向突破。技术层面，应重点研发基于在线成分监测的动态调控系统，结合微波预处理、急冷改性等技术强化成分稳定性，推动处理成本降低20%以上；产业层面，需构建钢厂-科研机构-下游应用协同创新平台，完善从原料标准到产品认证的全流程规范，破解质量安全风险；政策层面，建议扩大专项基金覆盖范围，通过税收优惠引导社会资本投入，力争2025年实现厂内循环经济效益突破450亿元，为钢铁行业绿色转型与“双碳”目标达成提供关键支撑。

参考文献

[1] 刘昕，王仲亮，包燕平. 转炉钢渣资源化利用研究现状与应用展望[J]. 工程科学学报，2024，47(4)：668-672.
[2] 杨爽，张芳. 高炉渣转炉渣协同处理物相演变[J]. 河北冶金，2024，36(3)：64-70.
[3] 孙华康，李晨晓，王书桓，等. 转炉熔渣气化脱磷与循环利用工业试验[J]. 材料与冶金学报，2023，22(3)：218-223.
[4] 常仕琦，张芳，彭军，等. 转炉钢渣应用现状及存在问题[J]. 中国铸造装备与技术，2023，58(6)：30-36.
[5] 汤畅. 含精炼渣全固废胶凝材料协同超细尾砂制备胶结充填材料[D]. 北京：北京科技大学，2023.
[6] 赵晓军，刘强，刘文胜. 转炉钢渣协同处理烧结除尘灰的工艺实践[J]. 冶金标准化与质量，2023，61(5)：54-57.
[7] 贾旭东，陈相国，聂大龙. 转炉钢渣应用于烧结工艺的研究分析[J]. 冶金标准化与质量，2024，62(1)：40-42.
[8] 孙华康，李晨晓，王书桓，等. 转炉石灰石代替石灰造渣炼钢研究现状及展望[J]. 矿产综合利用，2023，22(1)：7-9.
[9] 姚娜，兴超. 转炉炉渣配比对烧结矿性能的影响[J]. 山西冶金，2024，47(3)：3-5.
[10] 王亨，陈志新，唐伟栋，等. 转炉渣强化还原选矿提高镍，钴回收率的研究与应用[J]. 金川科技，2024，32(4)：11-20.
[11] 吴旭峰，王多刚. 碱度对转炉渣中磷富集的影响[J]. 炼钢，2023，39(1)：42-46.
[12] 李晨晓，薛月凯，王书桓，等. 转炉熔渣气化脱磷循环炼钢技术开发及应用[J]. 钢铁，2023，58(7)：64-71.
[13] 王旭. 降低转炉炉渣中氧化铁含量的研究[J]. 山西冶金，2023，46(2)：154-156.
[14] 卢元元. 高炉除尘灰与转炉钢渣协同利用的基础研究[D]. 呼和浩特：内蒙古科技大学，2023.
[15] 蔡坤坤，张朝晖，吕明，等. 转炉吹炼不同阶段炉渣黏流特性变化[J]. 钢铁，2023，58(4)：69-76.
[16] 王书桓，薛月凯，赵定国，等. 转炉熔渣气化脱磷循环炼钢关键技术开发及应用[J]. 中国科技成果，2023，24(19)：69-75.
[17] 张若涵，李潼，姚璐，等. 高温改性对钢渣源钙基吸附剂性能的影响[J]. 辽宁化工，2025，54(2)：241-243.
[18] 陈爱苗，方飞，徐涛. 烧结系统配加转炉钢渣的可行性探讨[J]. 山西冶金，2024，47(11)：196-198.
[19] 胡晓光，邓勇，饶磊，等. 马钢300t转炉钢渣处理技术创与实

（下转第31页）

120986.

[84] Han Z, Zhao J, Wang W, et al. A two-stage method for predicting and scheduling energy in an oxygen/nitrogen system of the steel industry[J]. Control Engineering Practice, 2016, 52: 35-45.

[85] Fernandes D, Matos-Carvalho J P, Fernandes C M, et al. DeepSeek-V3, GPT-4, Phi-4, and LLaMA-3.3 generate correct code for LoRaWAN-related engineering tasks[J]. Electronics, 2025, 14(7): 1428-1451.

[86] Charness G, Jabarian B, List J A. The next generation of experimental research with llms[J]. Nature Human Behaviour, 2025, 9(3): 345-357.

[87] Catoggio E, Guerrieri S, Bonani F. TCAD Modeling of GaN HEMT Output Admittance Dispersion through Trap Rate Equation Green's Functions[J]. Electronics, 2023, 12(11): 2457-2469.

[88] Jones N, Thompson B.The AI revolution is running out of data. What can researchers do?[J]. Nature, 2024, 636(8042): 290-292.

[89] Li M, Zhang Q J, Feng F, et al. A Scalable Knowledge-Based Neural Network Model for GaN HEMTs With Accurate Trapping and Self-Heating Effects Characterization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(9): 3747-3760.

[90] Hauser N, Pennekamp J. Automatically Extracting Hardware Descriptions from PDF Technical Documentation[J]. Journal of Systems Research, 2023, 3(1): 1-21.

[91] Zheng P, Wang H, Sang Z, et al. Smart manufacturingsystems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018(13): 137-150.

[92] Guo L, He Y, Wan C, et al. From cloud manufacturing to cloud-edge collaborative manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 90: 102790.

[93] Li W, Fan H, Cai L, et al. Digital twin-driven proactive-reactive scheduling framework for port multi-equipment under a complex uncertain environment[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2024, 136: 103011.

[94] Ebni M, Hosseini B S M, Qu Q. Digital twin based smart manufacturing: from design to simulation and optimization schema[J]. Procedia Computer Science, 2023, 221: 1216-1225.

[95] Tao F, Qi Q L. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 573: 490-491.

[96] Liu Z H, Wang Y H, Han K, et al. Post-training quantization for vision transformer[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, 34: 28092-28103.

[97] Soni R, Tanmay D, Twinkle, Bhatia M. Digital twin: Intersection of mind and machine [J]. International Journal of Computational Inteligence and IoT, 2019, 2(3): 667-670.

[98] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2405-2415.

[99] Alam K M, El Saddik A.C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems[J]. IEEE Access, 2017(5): 2050-2062.

[100] Azevedo A, Almeida A. Factory templates for digital factories framework[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2011, 27(4): 755-771.

[101] Chakraborty S, Adhikari S, Ganguli R. The role of surrogate models in the development of digital twins of dynamic systems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 90: 662-681.

[102] Liu Y, Chen J. Integrated soft sensor using just-in-time support vector regression and probabilistic analysis for quality prediction of multi-grade processes[J]. Journal of Process Control, 2013, 23(6): 793-804.

（编辑 许营）
修回日期：2025-06-24

（上接第18页）

践[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2024, 34(4): 12-14.

[20] 张佳硕, 王永斌, 彭军, 等. 白云尾矿与转炉渣制备烧结透水砖及性能研究[J]. 中国陶瓷, 2024, 60(2): 60-68.

[21] 郭文斌, 刘志远, 王重君, 等. 转炉钢渣辊压破碎-有压热焖处理工艺的应用实践[J]. 宽厚板, 2023, 29(1): 17-21.

[22] 邱凯. 马钢转炉渣风碎处理及综合利用实践[J]. 冶金动力, 2023, 46(2): 97-100.

[23] 张文娟, 文培成, 朱纪念, 等. 含钴转炉渣非熔融选择性还原回收钴[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(3): 873-885.

[24] 李翔, 汪骏翔, 王鑫, 等. 转炉钢渣和脱磷钢渣中磷的选择性浸出试验研究[J]. 湿法冶金, 2023, 42(4): 359-366.

（编辑 许营）
修回日期：2025-05-10