转底炉金属化产品综合利用途径与经济性探讨

张献鹏，尹鑫平，马 丁，郭秀键，罗 磊
（重庆赛迪热工环保工程技术有限公司，重庆 401122）

摘要：鉴于转底炉工艺在含铁含锌尘泥资源化利用中的关键作用，本文结合生产数据与理论分析，系统阐述转底炉金属化球团及筛下粉的综合利用途径。筛下粉可通过烧结配料、冷压成型（CBI）及转炉 OG 泥改性实现高效回收；金属化球团返回高炉时，需管控配比以规避残锌对高炉的影响，铁水沟/鱼雷罐直投技术可突破锌循环限制并提升铁水产能；在炼钢应用中，需依据钢种质量要求优化配入策略，借助转炉吹炼与炉外精炼耦合工艺，使产品钢水的含硫量满足目标钢种要求，同时采用 ITmk3 工艺需通过校企协同攻关突破技术瓶颈以推进国产化进程。全流程成本分析表明，转底炉金属化产品返转炉和烧结路径的吨钢成本较传统路径降低约 47.7%，而返高炉和烧结路径的吨钢成本降低约 29.1%。本文结论可为转底炉工艺提质增效及金属化产品多路径协同消纳提供理论与技术支撑。

关键词：转底炉；金属化产品；资源化利用；经济性分析
中图分类号：TF46.6；X757 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764（2026）02－0015－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.024

Discussion of comprehensive utilization pathways and economic efficiency of metallized products from rotary hearth furnace

ZHANG Xianpeng, YIN Xinping, MA Ding, GUO Xiujian, LUO Lei
(Chongqing CISDI Thermal & Environmental Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: In view of the key function of the Rotary Hearth Furnace (RHF) process in the resource utilization of iron and zinc bearing dust sludge, in this paper, based on production data and theoretical analysis, the comprehensive utilization pathways for metallized pellets and undersize fines from RHF are systematically elaborated. The undersize fines can be efficiently recovered through sintering mixture proportioning, cold briquetting (CBI), and modification of converter OG sludge. When metallized pellets are returned to the blast furnace, the proportion must be controlled to mitigate the impact of residual zinc on the blast furnace. Direct injection technology via iron troughs/torpedo ladles can overcome the limitations of zinc circulation and enhance hot metal productivity. In steelmaking applications, it is required to optimize the proportioning strategy according to the quality requirements of the steel grade, and to make the sulfur content of the molten steel meet the specifications of the target steel grade by leveraging the coupled process of converter blowing and secondary refining. Meanwhile, the adoption of the ITmk3 process requires breakthroughs in technological bottlenecks through university-industry collaboration to advance its localization. A full-process cost analysis indicates that, compared to the traditional route, the cost per ton of steel is reduced by approximately 47.7% when metallized products from the rotary hearth furnace are routed to the converter and sintering, while the reduction is about 29.1% when routed to the blast furnace and sintering. The findings of this paper can provide theoretical and technical support for improving the quality and efficiency of the rotary hearth furnace process and facilitating the multi-path collaborative consumption of metallized products.

收稿日期：2025－04－07；**修回日期**：2025－06－05
基金项目：重庆市技术创新与应用发展项目（CSTB2024TIAD-KPX0070）
作者简介：张献鹏（1995—），男，工程师，从事冶金固废资源化技术方面的研究工作。

Key words: rotary hearth furnace; metallized products; resource utilization; economic analysis

据行业统计数据显示，2024年全国粗钢产量达10.05亿吨[1]，传统长流程钢厂每年产生的含铁含锌尘泥总量约0.35亿吨(按吨钢固废产率3.5%计)[2]。在“双碳”战略与《“十四五”循环经济发展规划》政策驱动下，“固废不出厂”已成为钢铁企业绿色转型的核心目标。转底炉(RHF)工艺作为煤基直接还原技术的创新应用，通过“尘泥资源化—金属回收—二次物料返生产”的闭路循环体系，为钢铁行业破解固废治理难题提供了系统性解决方案。

当前，转底炉主要针对钢铁生产过程中产生的含铁含锌固危废进行高效处理，涵盖高炉重力灰、瓦斯灰、转炉OG泥、转炉干法除尘灰及电炉灰等典型尘泥[3]，同时可拓展至钒钛磁铁矿、红土镍矿、铜渣等复合共生矿的资源化利用[4]。其核心机理基于碳气化反应驱动的多金属梯度还原过程[5]：首先将尘泥与黏结剂按比例混合成球并干燥，随后布入转底炉床；在煤气燃烧形成的1 200 ℃高温环境中，生球内部碳源发生气化反应，建立强还原气氛。在此条件下，低沸点金属被还原为气态单质，随烟气以粉尘形式回收；铁氧化物则逐步还原为金属铁，最终产出高附加值金属化产品。该工艺通过铁锌高效分离与固废闭环利用，实现了尘泥中金属元素的梯级回收，已成为大型联合钢铁企业处理含铁含锌尘泥的首选绿色技术路线[6]。

转底炉金属化产品资源化利用路径已形成多维度研究体系。近年来研究表明，金属化球团可通过高炉[7]、转炉[8]或电炉[9]熔炼实现冶金回用，筛下粉则作为烧结矿原料[10]或冷压球团基料[11]完成循环利用，然而现有研究多聚焦单一工艺环节的适配性分析，并未系统阐述转底炉金属化产品的综合利用途径。本文通过梳理国内转底炉金属化产品利用研究进展，采用多维度分析确立转底炉金属化产品的综合利用路径，为构建转底炉工艺提质增效的标准化实施框架提供理论支撑和实践范例。

1 转底炉金属化产品的综合利用途径

以某钢铁企业年处理能力30万吨转底炉生产线为对象，对比实际生产数据与行业典型案例，分析冶金尘泥高效利用实践。该项目占地约4万平方米，配套原料预处理、配料混合、成型及生球干燥、转底炉还原、烟气净化、成品处理六大工艺系统。项目主要处理高炉旋风灰、高炉布袋灰、炼钢除尘灰、电炉灰等含铁含锌粉尘，混合料化学组分如表1所示。项目通过“分质回收—梯级利用”模式，年产筛下粉3.4万吨、金属化球团15万吨，回收铁素14.3万吨。转底炉筛下粉和金属化球团的综合利用途径如下所述。

表1 混合料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of mixed materials %

TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Zn	C	S
47.70	3.63	8.16	2.78	1.46	2.11	8.47	0.18

1.1 转底炉筛下粉

在转底炉工艺中，由于冷却热应力、还原结构变化及排料机械冲击等作用，转底炉金属化产品会出现粉化现象。某钢铁企业转底炉生产线粉化率情况如表2所示。由表2可知，转底炉金属化产品的平均粉化率约为18.66%。针对粉化现象，转底炉系统设计时一般会配置高效振动筛分装置，将转底炉产品按粒度分级处理。其中，大于5 mm的金属化球团可作为商品外销或返回生产系统循环利用；而粒度小于5 mm的筛下粉料则根据企业生产条件与工艺需求，采取差异化处置策略。① 作为烧结原料直接配入烧结工序，通过优化配矿结构实现资源化利用；② 采用冷压成型工艺将粉料制备为冷压块，提升冶金性能后作为高炉或转炉原料使用；③ 若转底炉系统需处理转炉OG泥，筛下粉可返回至转底炉系统内部对OG泥进行改性处理。

表2 国内某钢铁企业转底炉金属化产品粉化率(质量分数)

Table 2 Powdering rate of metallized products of RHF at a domestic steel enterprise %

取样次数/次	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粉化率	21.3	16.5	16.3	16.5	19.8	21.4	17.9	18.5	19.7

表 3 所示为某钢铁企业转底炉金属化产品筛下粉的主要化学成分，该钢铁企业年产筛下粉约 3.4 万吨。由表 3 可知，筛下粉中全铁质量分数为 64.44%，可实现铁元素回收量达 2.2 万吨，具备较高的经济价值。参照湛江钢铁 2024 年 8 月 29 日欧冶循环平台公示数据，其 w(TFe)为 58% 的筛下粉挂牌基准价为 346.5 元/t，对应经济收益约1 178 万元。此外，筛下粉二元碱度[w(CaO)/w(SiO_2)]约为 1.94，这与梅忠等[12]的研究结论契合，即烧结矿低温还原粉化指数($RDI_{>3.15\ mm}$)的最优区间为 1.79 ~ 2.18。由此可见，筛下粉可参与烧结配料。

表 3　筛下粉主要化学成分(质量分数)

Table 3　Main chemical composition of the undersize powder　　%

TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Zn	S
64.44	4.72	9.16	2.74	2.00	1.05	0.27

高炉入炉原料粒度一般要求 5 ~ 40 mm[13]，筛下粉粒度过细，直接入炉会导致炉料孔隙率下降，引发气流通道堵塞现象，进而影响还原气体在料层内的均匀分布及气固反应动力学条件。如筛下粉不返回烧结配料，则可在转底炉成品系统末端配置冷压成型系统，将筛下粉压制成冷压块。该系统工艺流程：筛下粉与黏结剂经皮带秤按预设比例输送至封闭式刮板机，随后由斗式提升机将混合料垂直输送至混合机，充分混合的物料连续喂入压球机冷固成型，冷压块采取定期外运方式处理。冷压块的应用具备多重优势。一方面可优化炉料粒度组成，改善料柱透气性指数；另一方面可增强物料输送的稳定性，降低储运过程中的粉尘逸散，满足清洁生产规范要求。

此外，筛下粉还可返回转底炉内部与转炉 OG 泥混合，通过转底炉联合处理转炉 OG 泥。转炉 OG 泥的黏性较大、粒度较细[14]，二者混合可改善 OG 泥黏滞状态，减少细颗粒物料在输送环节的堵塞现象；若转底炉同步处理酸性污泥，则筛下粉的碱性成分(CaO、MgO)可有效中和泥浆酸性，促进絮凝，降低含水率。

1.2　转底炉金属化球团

1.2.1　炼铁工序

(1) 金属化球团的理化特性。转底炉工艺以处理钢铁企业除尘灰及污泥为主，入炉混合料的全铁质量分数为 40% ~ 50%。国内某钢铁企业入炉混合料全铁质量分数为 47.7%(表 1)，金属化球团的金属化率如表 4 所示。由表 4 可见，金属化率稳定保持在 65% 以上，平均金属化率为 72.89%。结合表 5 中金属化球团的化学成分可知，全铁质量分数为 66.94%，二元碱度[w(CaO)/w(SiO_2)]约为 2.05。

现有数据表明，金属化球团满足高炉回用要求。相关研究及生产实践[15-16]已证实，提高高炉炉料中金属化球团占比，炉料的预还原金属铁含量升高，其熔点(1 538 ℃)远高于未还原的 FeO(1 370 ℃)，延缓了软化进程，导致软化开始温度升高，且高温下预还原的金属铁易与碳形成 Fe-C 共晶(熔点约为 1 150 ℃)，促进熔融滴落，使滴落温度下降。由于预还原反应降低了炉内直接还原反应量，使软熔过程更集中、软化与熔滴温度区间变窄、软熔带厚度减小、透气性改善，降低了最大压差，进而提高高炉产量，降低燃料比。

(2) 高炉回用实践与锌负荷控制策略。金属化球团返回高炉使用已成为主流，但在生产中发现，金属化球团入炉后，高炉锌负荷会逆向增长[17]，主要归因于金属化球团中残锌元素的富集效应。若金属化球团配比不当，则会出现高炉锌

表 4　国内某钢铁企业转底炉金属化球团金属化率(质量分数)

Table 4　Metallization rate of the metallized pellets of RHF at a domestic steel enterprise　　%

取样次数/次	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粉化率	74.44	72.83	71.33	74.26	69.93	67.42	77.05	75.36	73.39

表 5　金属化球团的主要化学成分(质量分数)

Table 5　Main chemical composition of the metallized pellets　　%

TFe	MFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Zn	C	S
66.94	48.28	5.38	11.01	3.92	2.18	0.35	0.46	0.27

负荷上升的问题，故在生产实践中需要核算金属化球团的入炉比。以表5数据为例，参照《高炉炼铁工程设计规范》(GB 50427—2015)第4.1.9条的规定：高炉入炉锌负荷须≤0.15 kg/t(原燃料)。假设高炉仅配加烧结矿[w(TFe)≈56%、w(Zn)≈0.01%]和金属化球团，以此计算金属化球团入炉比如下。

铁素平衡方程：

$$66.94\%m+56\%n=940 \quad (1)$$

锌负荷约束方程：

$$0.35\%m+0.01\%n\leqslant 0.015\%(m+n) \quad (2)$$

式中：m为金属化球团用量，kg/t(铁水)；n为烧结矿用量，kg/t(铁水)。

铁水的w(TFe)为94%，联立方程(1)、(2)求解，可得理论配比：金属化球团用量$m\leqslant 24.61$ kg/t(铁水)、烧结矿用量$n\geqslant 67m$ kg/t(铁水)。金属化球团的最大入炉比为1.47%。年处理能力30万吨的转底炉生产线的金属化球团产量约为15万吨，筛下粉约3.4万吨，转底炉产品共18.4万吨，而年产1 000万吨铁水的钢铁联合企业可消纳金属化球团最大值约24.61万吨，由此可见，高炉能够全部消纳转底炉工艺生产的金属化球团。

(3) 其他优化工艺。金属化球团除可配加至高炉外，还可经高炉铁水沟[18]或鱼雷罐车[19]直接投加至熔融铁水中。此法通过隔离锌元素与高炉本体循环系统，可有效规避锌蒸气对炉衬耐火材料的渗透性侵蚀，同时实现含铁固废的全量化资源利用。此外，在高炉铁水沟配加工艺中，由于密度相对较小(堆密度约为1.2~1.8 t/m^3)[20]，金属化球团会浮于铁水上方，随渣相进入水淬渣处理系统造成铁元素损失。因此还可引入高温压制工艺对金属化球团进行致密化改性：通过热压成型技术[21]制备密度≥5.0 t/m^{3}的致密铁块，其物化特性与常规废钢相近，经热压得到的热压块可直接投入铁水沟熔融，作为废钢替代品参与铁水调质过程，既避免了渣相夹带损失，又可提升铁水产量，优化冶炼成本，进而增强工序经济效益。

1.2.2 炼钢工序

(1) 金属化球团成分控制与炼钢适配性。由表5可知，金属化球团中含硫量为0.27%。当含硫量超过《炼钢工程设计规范》(GB 50439—2015)第5.2.4条的规定：装料废钢中硫、磷总量不能超过0.1%。冶金热力学研究[22]表明，硫元素在钢液中存在偏析倾向，当含硫量超过临界阈值时，硫易与铁形成低熔点共晶物(Fe-FeS)，在热加工过程中引发晶界弱化，导致热脆现象，实际生产中建议优先选用低灰分焦粉以控制硫源输入[23]。

转底炉金属化球团中脉石含量直接影响炼钢过程的渣系调控及能源效率。金属化球团的成型工艺主要分为圆盘造球法与对辊压球法，黏结剂体系的选择直接决定球团的矿物组成。国内某钢铁企业采用有机黏结剂制备金属化球团，在转底炉还原过程中有机黏结剂完全热解挥发，避免了杂质残留，降低了脉石含量；而使用膨润土黏结剂制备金属化球团，由于膨润土(以硅铝酸盐为主)在高温还原过程中难以分解，导致硅铝酸盐杂质的引入，会增加金属化球团中脉石含量，所得金属化球团脉石含量较高[24]。返回转炉使用时，由于脉石含量增加，渣处理负荷与辅料消耗会相应增加；返回电炉使用时，渣相导电性降低导致电弧炉冶炼电阻增大，进而增大电耗[25]。钢铁企业须基于目标钢种含硫量控制标准及冶炼工序能耗限额，灵活选择转底炉工序成球方式以及金属化球团配入路径。

(2) 工业实践与前沿技术。国内某钢铁企业为控制硫源输入，在转底炉配料过程中，采用高炉布袋灰与高炉重力灰作为复合碳源。基于两者含碳量分别为16%和24%(干基)的物料特性，构建无需外配还原剂的低碳冶金原料体系。为降低金属化球团中SiO_2、Al_2O_3等脉石组分含量，采用压制成型工艺，成型压力控制约为40 MPa，所得球团抗压强度约为1 400 N/P。同时，依据冶炼钢种对含硫量的要求，对转炉添加转底炉金属化球团的占比进行验证。添加金属化球团后钢水含硫量变化如表6所示。由表6可知，相较于未添加金属化球团，添加金属化球团后钢水的含硫量显著上升。为进一步降低转底炉吹炼钢水中含硫量，采用LF炉外精炼或LF+VD串联的方式实施深度脱硫，最终获得的钢水含硫量满足冶炼钢种的要

表 6　添加金属化球团钢水含硫量变化(质量分数)

Table 6　Variation of sulfur content in molten steel with addition of metallized pellets　　%

金属化球团添加量/($kg \cdot t^{-1}$)	铁水量/t	含硫量				
		金属化球团	铁水	转炉钢水	精炼钢水	钢种要求
0	210	0	0.002 2	0.008 4	0.001 4	≤0.002
5	210	0.31	0.001 8	0.035 6	0.005 2	≤0.010

求。工艺路径优化后，冶炼周期维持在常规工艺水平，但通过金属化球团带入的有效铁元素使吨钢铁料消耗量降低，实现了硫控制与经济指标的双重优化。

此外，为进一步降低转底炉金属化球团中脉石与硫含量，学界已针对性开发粒铁工艺，即 ITmk3 工艺，此工艺是美国米德兰公司(Midrex)和日本神户钢铁(Kobe Steel)联合开发[26]，其创新点在于对转底炉热工制度的优化升级：将常规工艺的还原温度区间(约 1 200 ℃)提升至 1 350 ~ 1 450 ℃高温环境[27]。在此条件下，金属化球团在转底炉还原过程中发生局部熔融，铁氧化物被深度还原为金属铁并聚集成粒度大于 5 mm 的致密粒铁，同时脉石组分熔融形成低铁渣相，通过渣－金界面张力差异实现铁与脉石的高效分离，得到的产品含硫量及脉石含量较低，从而满足特殊钢种冶炼对入炉原料的要求[28]。当前，粒铁工艺在国内还未大规模工业应用，未来还需突破工艺技术瓶颈，通过校企协同攻关加速工艺装备的国产化进程。

2　冶炼经济性

转底炉金属化产品在钢铁主工艺中的循环利用模式已通过理论分析与工业实践验证其可行性。该工艺路径可显著降低燃料比[29]及钢铁料消耗。国内某钢铁企业的应用案例表明，将金属化球团添加至主工艺后，其经济性表现可通过全流程成本建模进行量化评估。参考罗磊等[30]提出的生产成本体系(吨产品总成本为 595 元/t，含原料成本为 298 元/t)及行业基准数据[31]，得到金属化球团、筛下粉与铁矿粉在不同工艺路径下的吨钢水综合成本对比如图 1 所示。

根据图 1 数据，进一步推导出转底炉产品返回至钢铁主工艺的加权成本。在不同返回路径下，

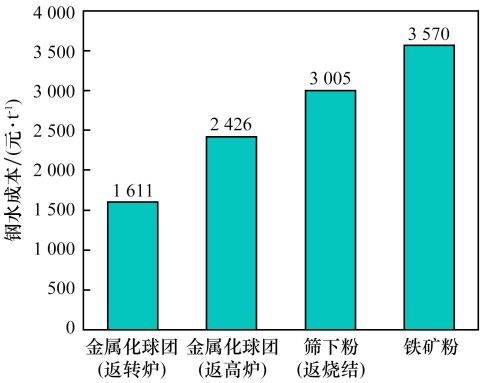


图 1　不同工艺路径的吨钢水综合成本

Fig. 1　The comprehensive cost per tonne of molten steel for different process routes

转底炉金属化产品的吨钢水全成本存在差异。当金属化球团 100% 返回高炉时，转底炉金属化产品吨钢成本为 2 532 元/t；而 100% 返回转炉时，成本降至 1 868 元/t；混合路径(33% 返转炉、67% 返高炉)的综合成本为 2 311 元/t。相比之下，传统铁矿粉直接冶炼路径的吨钢成本高达 3 570 元/t。由此可见，金属化球团返转炉和筛下粉返烧结路径的成本优势最为突出，较铁矿粉直接路径降低 47.7%，该成本差异主要因为转底炉金属化产品制造成本低于铁矿粉价格(61.5% 铁品位的 PB 粉单价为 765 元/t)；同时，金属化球团作为废钢替代品可直接参与转炉熔池反应，避免了烧结和高炉工序的能源消耗，从而显著降低工艺成本；此外，金属化球团及筛下粉的高品位特性可有效提升炼钢工序能效水平。根据全成本冶炼经济性分析可知，转底炉作为兼具冶金功能的环保治理设施，不仅具有较好的环保效益，更依托工艺协同效应可为钢铁企业创造显著的经济价值。

图 2 所示汇总了转底炉金属化产品的常规应用途径。综合以上结论，转底炉工艺通过“环保治理—资源循环—成本优化”三位一体的协同机制，为钢铁行业提供固废资源化系统解决方案。但其

产品利用方式需结合企业生产条件与工序需求，通过构建多技术协同集成的工艺体系，拓展资源化利用路径，最终实现经济效益与环境效益的双效提升。

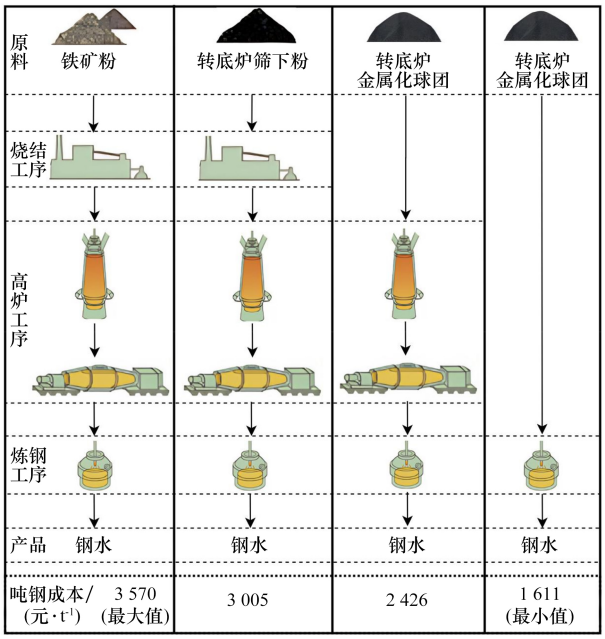


图 2 转底炉金属化产品利用途径与经济成本

Fig. 2 Utilization pathways and economic costs of metallized products from RHF

3 结 论

转底炉工艺在含铁含锌尘泥资源化利用领域展现出显著优势，其通过碳气化反应驱动的梯度还原机制，实现了铁、锌高效分离与固废闭环处理。本文通过系统分析转底炉金属化球团及其筛下粉的综合利用路径，结合生产实践与理论分析，得出以下结论：

（1）转底炉金属化产品筛下粉利用途径多元。筛下粉(粒度 <5 mm)可通过烧结配料、冷压成型及 OG 泥改性实现高效回收。筛下粉全铁质量分数高、碱度适宜，可适配烧结工艺。冷压成型工艺可优化筛下粉冶金性能，提升入炉透气性并降低粉尘逸散，而作为 OG 泥改性剂则能改善物料黏滞性，进一步拓宽其应用场景。

（2）转底炉金属化球团在炼铁中的应用成熟但需精准管控。配矿时需综合考虑金属化球团配比，防止残锌引发的高炉锌负荷超标。此外，铁水沟/鱼雷罐直投，丰富了金属化球团的利用方式，一方面可规避锌循环富集问题，另一方面能降低铁损并提升铁水产量。

（3）转底炉金属化球团在炼钢中的应用需结合目标钢种质量要求灵活调整配入策略，同时需兼顾含硫量与脉石含量。ITmk3 粒铁工艺作为转底炉工艺升级的方向，需突破工艺技术瓶颈，通过校企协同攻关加速工艺装备国产化进程。

（4）转底炉金属化产品返回主工艺冶炼经济优势明显。全流程成本模型表明，转底炉金属化产品返主工艺可显著降低吨钢综合成本，返转炉和烧结路径成本较传统铁矿粉路径降低 47.7%，返高炉和烧结路径成本降低 29.1%。

参考文献：

[1] 殷瑞钰,上官方钦,崔志峰. 钢铁行业低碳发展对策研究:回顾与展望[J]. 中国冶金,2025,35(3):1 - 15.
YIN Ruiyu, SHANGGUAN Fangqin, CUI Zhifeng. Research on low-carbon development strategies in steel industry: Review and prospect[J]. China Metallurgy, 2025,35(3):1 - 15.

[2] 苏长永,李新宇,林严,等. 钢铁行业固废绿色低碳高质量发展路径[J]. 烧结球团,2022,47(6):1 - 7.
SU Changyong, LI Xinyu, LIN Yan, et al. Green, low-carbon and high-quality development route of solid waste in the iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(6):1 - 7.

[3] 罗磊,雍海泉. 转底炉工艺对高炉生产的影响[J]. 工业加热,2017,46(5):17 - 18;23.
LUO Lei,YONG Haiquan. Effect of rotary hearth furnace technology on blast furnace production[J]. Industrial Heating,2017,46(5):17 - 18;23.

[4] 顾静. 低品位复合矿直接还原—熔分工艺实验及能耗研究[D]. 北京:北京科技大学,2021.
GU Jing. Experiment and energy consumption analysis of direct reduction & melting separation process for low-grade composite iron ore[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2021.

[5] 李勇,罗磊. 转底炉物料平衡及热平衡计算分析[J]. 工业加热,2024,53(11):53 - 57.
LI Yong, LUO Lei. Calculation and analysis of material balance and heat balance of rotary hearth furnace[J]. Industrial Heating,2024,53(11):53 - 57.

[6] 罗宝龙,郭灵巧,罗磊. 转底炉资源化处理钢厂含铁含锌除尘灰的技术发展现状[J]. 工业加热,2024,53(11):1 - 5.
LUO Baolong, GUO Lingqiao, LUO Lei. Technological advancements in the resource recovery of iron-and zinc-bearing steelmaking dust through rotary hearth furnace processing[J]. Industrial Heating,2024,53(11):1 - 5.

[7] 郭大磊,张庆喜,肖志新,等. 武钢转底炉生产金属化球团矿的特点及高炉操作对策[J]. 炼铁,2023,42(6):16 - 20.
GUO Dalei, ZHANG Qingxi, XIAO Zhixin, et al. Characteristics of metallized pellets produced by WISCO rotary hearth furnace and BF co-operational measures[J]. Ironmaking,2023,42(6):16 - 20.

[8] 郭秀键,罗宝龙,赵忠宇,等. 金属化球团抗压强度的影响因素分析及资源化利用[J]. 烧结球团,2023,48(4):59 - 64;109.
GUO Xiujian, LUO Baolong, ZHAO Zhongyu, et al. Analysis on influencing factors of compressive strength of metallized pellets and resource utilization[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(4):59 - 64;109.

[9] 蔡雅娟,施军贤,陈宏,等. 金属化球团在电炉炼钢的应用试验[J]. 山东冶金,2022,44(6):40 - 42.
CAI Yajuan,SHI Junxian,CHEN Hong,et al. Application test of metallized pellets in electric furnace steelmaking[J]. Shandong Metallurgy,2022,44(6):40 - 42.

[10] 杨春善,任明欣. 日照钢铁固废尘泥处理实践[J]. 钢铁,2019,54(4):83 - 91;98.
YANG Chunshan, REN Mingxin. Practice of waste dust mud treatment in Rizhao steel[J]. Iron and Steel,2019,54(4):83 - 91;98.

[11] 毕超凡,王鑫,万新,等. 除尘灰冷压块在高炉应用中的研究[J]. 冶金管理,2019(9):14 - 15.
BI Chaofan, WANG Xin, WAN Xin, et al. Study on application of dust cold pressing block in blast furnace[J]. China Steel Focus,2019(9):14 - 15.

[12] 梅忠,朱云杰. 烧结矿二元碱度对低温还原粉化性能的影响[J]. 河北冶金,2019(4):7 - 11.
MEI Zhong,ZHU Yunjie. Effects of binary alkalinity on rdi property[J]. Hebei Metallurgy,2019(4):7 - 11.

[13] 包燕平,冯捷. 钢铁冶金学教程[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
BAO Yanping, FENG Jie. Course of iron and steel metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.

[14] 刘自民,饶磊,桂满城,等. 马钢含铁尘泥综合利用研究与实践[J]. 中国冶金,2018,28(9):71 - 76.
LIU Zimin,RAO Lei,GUI Mancheng,et al. Research and practice of comprehensive utilization of Fe-containing dust in Masteel[J]. China Metallurgy,2018,28(9):71 - 76.

[15] 王笃暘. 金属化球团的理论与实践(上)[J]. 烧结球团,1981(4):13 - 25.
WANG Duyang. Theory and practice of metallized pellets (Part I)[J]. Sintering and Pelletizing,1981(4):13 - 25.

[16] 张旭孝,韩宏亮,姜曦. 高炉添加金属化球团炉料的冶金性能试验[J]. 中国冶金,2015,25(5):15 - 18.
ZHANG Xuxiao,HAN Hongliang,JIANG Xi. Experiment on metallurgical properties of blast furnace burden containing metalized pellets[J]. China Metallurgy,2015,25(5):15 - 18.

[17] 章苇玲,牛长胜,王亚锋. 湛钢高炉配加金属化球团冶炼实践[J]. 炼铁,2019,38(4):27 - 29.
ZHANG Weiling, NlU Changsheng, WANG Yafeng. Smelting practice of charging metallized pellet in Zhanjiang steel's BF[J]. Ironmaking,2019,38(4):27 - 29.

[18] 林文康,周敏,唐渡江,等. 一种高效使用转底炉金属化球团的方法和系统:CN115125348B[P]. 2024 - 04 - 19.
LIN Wenkang, ZHOU Min, TANG Dujiang, et al. A method and system for efficient utilization of metalized pellets in a rotary hearth furnace: CN115125348B[P]. 2024 - 04 - 19.

[19] 谢俊波,牛长胜,金奕. 鱼雷罐加金属化球团对铁水温度的影响[J]. 冶金能源,2020,39(5):14 - 16;45.
XIE Junbo, NIU Changsheng, JIN Yi. Effect of taking metallized pellets into torpedo tank on the temperature of molten iron[J]. Energy for Metallurgical Industry,2020,39(5):14 - 16;45.

[20] 蔡大为,陈青月,潘建,等. 金属化炉料的高炉低碳冶炼研究现状[J]. 中国冶金,2024,34(2):9 - 20.
CAI Dawei, CHEN Qingyue, PAN Jian, et al. Research status of low carbon smelting for metallized burden in blast furnace[J]. China Metallurgy,2024,34(2):9 - 20.

[21] 周顺成. 转底炉工艺生产热压块试验及设计方案

[J]. 炼铁,2022,41(3):58 – 62.
ZHOU Shuncheng. Pilot test and design solution of rotary hearth furnace process for producing HBI[J]. Ironmaking,2022,41(3):58 – 62.

[22] 刘艳,刘志林,张成伟. 钢中硫化物及其异相界面的价电子结构对热脆的影响[J]. 中国科学 E 辑:工程科学 材料科学,2004,34(11):1207 – 1221.
LIU Yan, LIU Zhilin, ZHANG Chengwei. Effect of valence electron structure of sulfide and its heterogeneous interface in steel on thermal brittleness[J]. Science in China,Ser E,2004,34(11):1207 – 1221.

[23] 张毅,曾晖,梁栋,等. 转底炉冶炼珠铁硫、磷杂质元素控制研究[J]. 山东冶金,2016,38(6):40 – 43.
ZHANG Yi,ZENG Hui,LIANG Dong,et al. Study on the control of S and P impurity elements in the smelting process of rotary hearth furnace[J]. Shandong Metallurgy,2016,38(6):40 – 43.

[24] 李兰辉,陈雷,曹艳,等. 金属化球团在电炉工序连续吃入的工艺[J]. 山西冶金,2024,47(12):247 – 249.
LI Lanhui, CHEN Lei, CAO Yan, et al. The process of continuous feeding of metalized pellets in the electric furnace process[J]. Shanxi Metallurgy, 2024, 47(12): 247 – 249.

[25] 万凌云,袁守谦,张保军,等. 金属化球团的电炉熔分研究[J]. 工业加热,2014,43(1):64 – 66.
WAN Lingyun, YUAN Shouqian, ZHANG Baojun, et al. The investigation of metalized pellets smelting-separating in EAF[J]. Industrial Heating,2014,43(1):64 – 66.

[26] 张伟,王再义,张宁,等. ITmk3 工艺的技术特点及应用前景[J]. 鞍钢技术,2010(5):10 – 14.
ZHANG Wei, WANG Zaiyi, ZHANG Ning, et al. Technical characteristics and application prospect of ITmk3 process[J]. Angang Technology,2010(5):10 – 14.

[27] 唐恩. 转底炉处理含铁固废制备粒铁的基础研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
TANG En. Fundamental research to obtain nugget iron from iron-bearing solid waste through rotary hearth furnace[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2019.

[28] 张颖异,师学峰,齐渊洪,等. ITmk3 的工艺特点和商业应用现状[J]. 中国有色冶金,2014,43(2):17 – 21;36.
ZHANG Yingyi, SHI Xuefeng, QI Yuanhong, et al. Characteristics and commercial application of ITmk3 process[J]. China Nonferrous Metallurgy,2014,43(2):17 – 21;36.

[29] 田仕友. 转底炉产品金属化球团用作高炉原料的分析和计算[J]. 工业加热,2022,51(12):13 – 16.
TIAN Shiyou. Analysis and calculation of DRI pellets from RHF as BF raw material[J]. Industrial Heating, 2022,51(12):13 – 16.

[30] 罗磊,郭灵巧. 转底炉助力钢铁企业实现绿色制造[J]. 工业加热,2021,50(11):59 – 62.
LUO Lei,GUO Lingqiao. Rotary hearth furnace helps iron and steel enterprises achieve green manufacturing[J]. Industrial Heating,2021,50(11):59 – 62.

[31] 阮清华,白苗苗. 我国长流程炼钢与短流程炼钢成本比较[J]. 中国钢铁业,2019(10):58 – 60.
RUAN Qinghua,BAI Miaomiao. Cost comparison between long-process steelmaking and short-process steelmaking in China[J]. China Steel,2019(10):58 – 60.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国 – 知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。