



中等品位铁矿直接还原炼铁熔分工艺的发展现状及趋势

李 军, 李传民, 刘亚峰, 张 奔, 刘锦文

(中冶京诚信息技术有限公司 北京 100176)

摘要:“十五五”规划期间,碳市场体系会进一步完善,“双碳”目标依然是钢铁行业需要关注的重要问题。气基直接还原铁—电炉流程是生产“绿钢”、降低碳排放的关键技术,但有三个制约因素:一是必须使用高品位矿;二是电炉炼钢控氮非常难,造成高端钢种生产困难;三是我国钢铁生产以长流程为主,其被改造为电炉短流程,会导致已建成的长流程设备闲置与浪费,不利于产业资源的优化配置。本文详细分析气基直接还原炼铁、多种铁矿熔分工艺和熔分炉的发展现状,认为针对中等品位矿的气基直接还原铁—熔分—转炉的绿色低碳冶炼流程,既能发挥出氢冶金绿色低碳优势,又能利旧钢铁厂现有的大量转炉,进而降低钢铁厂的设备改造成本,同时继承转炉的生产经验。转炉钢冶炼,在最终产品方面具有极大的灵活性和适用范围,能源消耗小,产品附加值高。直接还原铁—熔分—转炉的绿色低碳冶炼流程适合作为我国钢铁企业绿色低碳改造的方向,是行业降低碳排放的一条新路径。

关键词: 碳排放; 氢冶金; 中等品位铁矿; 气基直接还原铁; 熔分

中图分类号: TF55

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0001-11

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.036

Development status and trend of direct reduction ironmaking smelting separation process for medium-grade iron ore

LI Jun, LI Chuanmin, LIU Yafeng, ZHANG Ben, LIU Jinwen

(MCC Capital Engineering & Research Incorporation Limited (CERI), Beijing 100176, China)

Abstract: During the 15th Five-Year Plan period, the carbon market system will be further improved, and the “Dual Carbon” goal is still an important issue that the steel industry needs to pay attention to. The gas-based DRI-electric furnace process is a key technology for producing “green steel” and reducing carbon emissions, but there are three constraints: First, high-grade ore must be used; Second, it is very difficult to control nitrogen in electric furnace steelmaking, which makes it difficult to produce high-end steel grades; Third, China’s iron and steel production is dominated by long processes, which are transformed into short processes of electric furnaces, which will lead to idle and waste of long-process equipment that has been built, not conducive to the optimal allocation of industrial resources. The development status of gas-based direct reduction ironmaking, various iron ore smelting separation processes and smelting separation furnaces is analyzed in detail; and it is believed that the green and low-carbon smelting process of gas-based DRI-smelting separation-converter for medium-grade ores cannot only give full play to the green and low-carbon advantages of hydrogen metallurgy, but also benefit the existing large number of converters in old iron and steel plants, thereby reducing the equipment transformation cost of steel plants, and inheriting the production experience of converters. The smelting of converter steel has great flexibility and scope of application in terms of final products, low energy consumption and high added value of products. The green and low-carbon smelting separation process of DRI-smelting separation-converter is suitable as the

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-01-07

基金项目: 上海市科学技术委员会基金资助项目(19DZ2270200&20511107700)

作者简介: 李 军(1985—),男,博士,工程师,从事直接还原炼铁熔分、绿色低碳冶金以及连铸工艺、索氏体线材盐浴等温淬火方面的研究工作。

direction of green and low-carbon transformation of China's iron and steel enterprises and is a new path for the industry to reduce carbon emissions.

Key words: carbon emissions; hydrogen metallurgy; medium-grade iron ore; gas-based DRI; smelting separation

当前,我国粗钢生产主要以长流程为主,产量占全球的比重已超过 50%,吨钢综合能耗(折标煤)约为 545.27 kg^[1-2]。我国生产每吨粗钢的碳排放量高达 1.82~2.20 t,其中高炉炼铁工序的碳排放量占比高达 70%,钢铁生产以化石能源为主的能源结构仍未发生根本性转变^[3-4]。我国碳排放量占全球的比重高达 30%,而钢铁行业的碳排放量占全国碳排放总量的 15%~17%,可知,钢铁行业是实现我国碳减排任务的重点行业^[5-6]。我国已经宣布 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。未来碳市场体系会进一步完善,“双碳”目标依然是钢铁行业需要关注的首要问题。在未来的国际贸易中,产品的碳足迹将成为国际市场和品牌供应链的准入条件^[7]。钢铁行业必须尽快降低碳排放水平,加强碳排放数据管理。

废钢电炉炼钢短流程可以大幅降低碳排放,其吨钢碳排放约为 0.4 t,比长流程降低约 1.42 t。然而,目前电炉炼钢短流程存在两个问题:①废钢资源紧缺,且电炉炼钢的占比较低,仅为 10%左右^[8];②电炉熔池内碳氧反应不足,导致氮的脱除和控制较为困难(电炉炼钢的终点氮体积分数为 0.007%~0.012%,转炉能将氮体积分数控制在 <0.002%) ,这造成高端钢材生产困难^[9]。因此,在废钢供应量充足之前,目前需要发展直接还原及熔融还原炼铁技术,并将其作为实现“碳中和”的路径之一。直接还原铁—电炉流程生产每吨粗钢的碳排放量约为 0.97 t^[10]。然而在实际实施过程中也存在问题:①对铁矿的品位要求苛刻。全球高位品矿约为 2 亿吨,远满足不了全球 20 亿吨的产能。②钢铁生产以长流程为主,转换难度大。同时,电炉的吨钢成本比转炉高约 300 元,钢铁企业的改造积极性较低。

为解决上述问题,同时考虑避免因发展绿色低碳冶炼技术,盲目改造电炉炼钢短流程而浪费已建成的长流程冶炼设施,对于中等品位的铁矿(TFe 质量分数为 63%~67%),本文认为宜采用气基直接还原铁熔分技术生产铁水。该流程既能发挥出

氢冶金的绿色低碳优势,又能利旧长流程工艺中的转炉,从而避免由于控氮困难导致的电炉炼钢工艺无法生产高端汽车钢及无取向电工钢的问题。为此,本文首先对比传统钢铁冶炼工艺流程和未来的绿色低碳钢铁冶炼工艺流程,重点介绍符合我国低碳钢铁工业发展的气基直接还原炼铁工艺,随后介绍不同种类铁矿的熔分工艺和目前熔分电炉工艺的研究现状,以期为同行提供借鉴与参考。

1 钢铁冶炼工艺流程

图 1(a) 是当前我国钢铁冶炼的工艺流程,长流程占到了约 90% 的份额,大型气基直接还原—电炉流程仅有河钢宣钢和宝武湛江的两座采用 HYL 工艺的竖炉工程。对于不同种类铁矿,我国预计可实现碳减排的四种钢铁生产流程如图 1(b) 所示。由图 1(b) 可见,对于低品位铁矿,碳减排路径主要是对长流程工艺的高炉进行富氢喷吹改造;对于中等品位铁矿,在气基直接还原炼铁和转炉炼钢之间加熔分炉是较为适合我国钢铁企业的流程;对于高品位的铁矿,可省略熔分炉工序。

2 气基直接还原炼铁的发展现状

按照工艺特征和产品类型可将非高炉炼铁工艺分为直接还原与熔融还原炼铁^[11]。与高炉工艺相比,直接还原炼铁工艺可减少碳排放 50% 以上^[12]。根据国际铁金属学会预测,2030 年全球 DRI 产量将达 1.86 亿吨,2050 年将达 4.12 亿吨。

直接还原按还原剂可分为气基和煤基直接还原,按炉型可分为竖炉法、固定床法、回转窑法和流化床法。据统计,2022 年气基竖炉生产的 DRI 占总产量的 72.1% (Midrex、HYL、PERED 工艺占比分别为 57.8%、12.1%、2.2%),煤基回转窑法占比约为 27.8%,其余为 0.1%。由于焦炉煤气较为丰富,气基直接还原技术是我国目前重点发展的直接还原技术方向^[13]。我国对气基竖炉技术的工业化应用较少,依然需要对竖炉的内部温度场、气源生产储存、中等品位矿预还原及

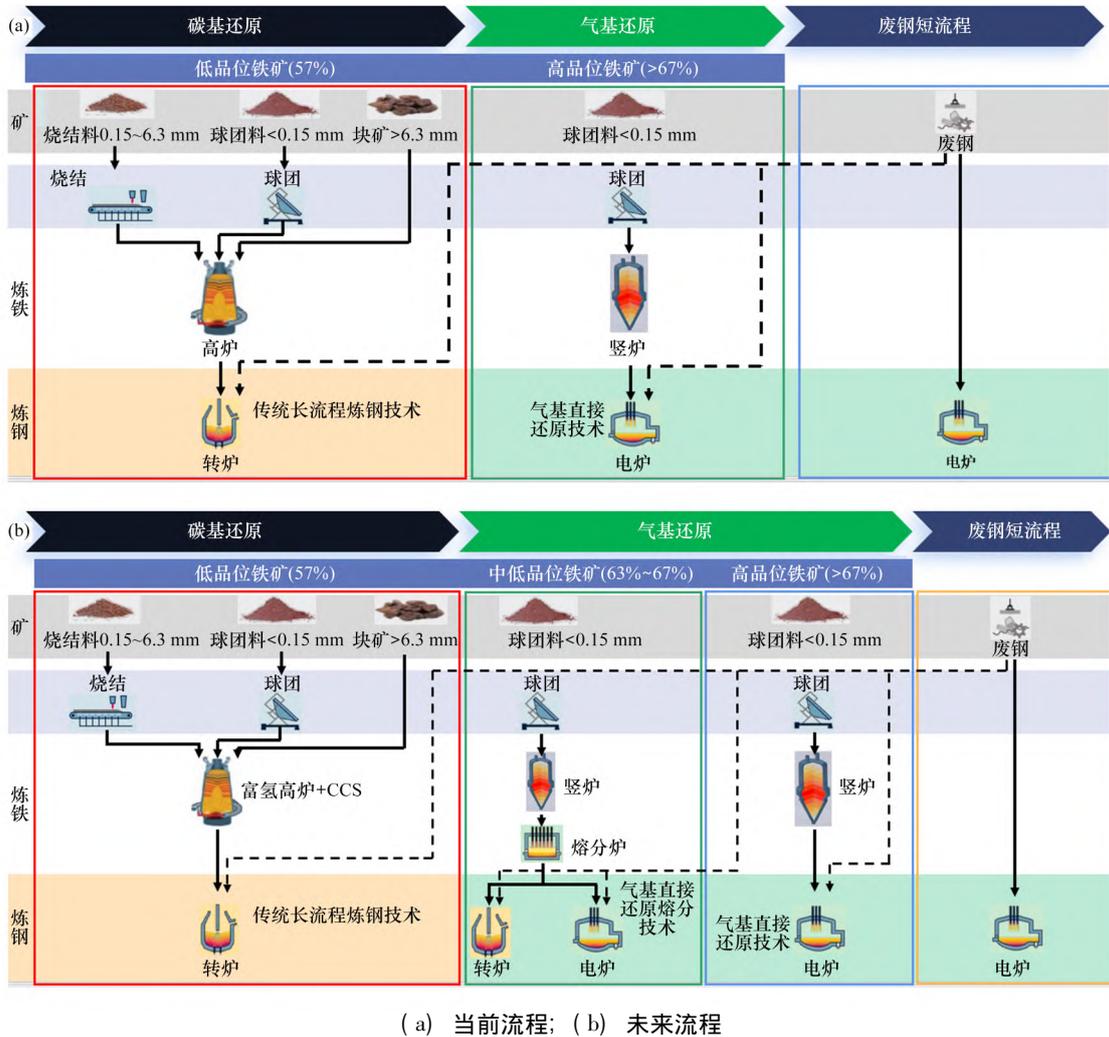


图 1 我国目前的钢铁生产流程和未来可实现碳减排的钢铁生产流程

Fig. 1 Chinese current iron and steel production process and future iron and steel production processes that can achieve carbon emission reduction

熔分等进行深入研究^[14]。

2.1 典型气基竖炉直接还原工艺

气基竖炉直接还原工艺可以使炼铁过程彻底摆脱焦炭,最有可能实现零碳排放,其主导工艺是 Midrex 和 HYL 工艺^[15]。这两种工艺对球团和天然气的要求,以及 HBI(热压铁块)的特性如表 1 所示。由表 1 可以看出,这两种工艺都需要高品

位的球团和低硫的天然气。

2.1.1 Midrex 工艺

Midrex 法的标准流程如图 2 所示。该工艺合成气采用干重整法,氧化剂为 CO,还原气中 $\varphi(\text{H}_2) / \varphi(\text{CO})$ (体积分数比) 约为 1.6,还原气温度约为 850 ~ 900 °C,利用系数约为 4.8 t/(m³·d)。其标准流程的代表性操作指标如表 2 所示。

表 1 Midrex 和 HYL 工艺的原料要求和产品性能

Table 1 Requirements for raw materials and product performance of Midrex and HYL processes

工艺名称	球团矿要求					天然气要求			HBI 特性	
	w(TFe) / %	w(FeO) / %	<5 mm 粒级占比 / %	抗压强度 / (N·P ⁻¹)	耐磨性 / %	压力 / MPa	w(S) / 10 ⁻⁶	金属化率 / %	w(C) / %	<4 mm 粒级占比 / %
Midrex	≥65	≤0.6	≤2.0	≥2 000	≤5	≤1.2	≤1.0	≥93	≥1.50	≤4
HYL	≥65	≤0.7	≤1.0	≥2 000	≤4	≤1.4	≤0.5	≥94	≥0.85	≤5

表3 中国直接还原炼铁项目
Table 3 China direct reduction ironmaking project

公司名称	项目名称	采用工艺	原料气及重整方法	项目进展
中国钢研	1万吨纯氢竖炉直接还原铁示范工程	自主研发	氢气,无重整	2024年1月投入运行
河钢集团 张宣科技	60万吨氢基直接还原铁示范工程	Energiron-ZR 零重整工艺	焦炉煤气,自热重整	2021年开工建设, 2023年5月一期建成
宝钢湛江钢铁	100万吨级氢基竖炉直接还原铁项目	Energiron-ZR 零重整工艺	集成采用多气源(氢气、天然气和焦炉煤气)自热重整	2022年2月15日开工建设, 2023年12月23日投产
中晋太行矿业	30万吨气基竖炉直接还原铁工业化试验装置	PERED工艺	焦炉煤气,水蒸气和二氧化碳重整	2017年开工建设, 当前完成规模化试生产
鞍钢股份鲅鱼圈分公司	1万吨绿氢流化床高效炼铁技术示范项目	自主研发	氢气,无重整	2022年9月27日开工建设,目前正在调试

3 复合矿熔分工艺研究现状

“双碳”背景下,传统气基竖炉工艺使用高品位矿的需求会迅速增加,这造成当前铁矿品位无法满足需求。常见的低品位矿中,铁矿有磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿、菱铁矿等,钛矿有钛磁铁矿、钛铁矿、金红石、石榴石等,镍矿有硫化镍矿、红土镍矿等。这几类低品位矿的利用水平较低,如果能把这部分低品位矿加以利用,将会大大降低我国钢铁工业的炼铁成本。本节介绍几种低品位矿的熔分冶炼方式。

3.1 钒钛磁铁矿熔分工艺

钒钛磁铁矿直接还原—熔分工艺包括煤基与气基直接还原法。研究人员研究了转底炉直接还原—熔分工艺,如:顾静^[22]将钒钛磁铁矿含碳球团,在转底炉中进行直接还原,然后向熔分炉中喷粉渗碳进行深度还原及渣铁分离,最终得到富钛渣和含钒铁水;刘松利^[23]研究了钒钛磁铁矿转底炉直接还原和熔分炉的工艺参数,主要分析了碱度、熔分温度、熔分时间、配碳比等因素对熔分效果的影响。总的来说,灰分导致转底炉和回转窑煤基直接还原产生钛渣的品位较低,并且效率也不高^[24]。

气基竖炉直接还原和熔分工艺已经广泛应用于钒钛磁铁矿冶炼,主要流程是铁精矿粉经造球、氧化焙烧制成氧化球团,随后在竖炉内进行直接还原,然后在熔分炉内深还原,得到含钒、铬的铁水和富钛渣,含钒铁水经转炉吹炼得到钒渣和

半钢^[25]。关于钒钛磁铁矿的直接还原熔分已经有较多研究,主要集中在熔分工艺参数以及不同还原温度和气氛下球团的还原行为和还原膨胀性能^[26]。研究结果表明,适宜的熔分参数:配碳量为1.2~1.4、熔分温度为1500~1625℃、熔分时间为40~50min、碱度为1.1~1.4^[27]。该条件下熔分得到生铁块中铁、钒、铬的收得率和渣中TiO₂的富集效果较高^[28-29]。而高建军等^[30]、洪陆阔等^[31]研究认为提高熔分温度、时间和碱度,对熔分炉中渣铁分离效果更好。

3.2 高磷铁矿熔分工艺

由于熔分炉中氧化还原气氛的可控性,除了钒钛磁铁矿,还可以实现低品位高磷铁矿的高效利用^[32-33]。国内外已经对高磷铁矿的冶炼进行了大量研究,包括浮选、酸浸^[34]、还原焙烧—磁选^[35]和煤基直接还原—磁选^[36-37]等。如肖敏等^[38]研究了高磷铁矿煤基直接还原的最佳工艺条件:焙烧温度控制在970℃,焙烧时间为2.5h。郑福生^[39]提出开发低品位高磷铁矿煤基直接还原—熔分的工艺流程,直接还原铁经磁选分离残碳后进入电炉进行熔分,同时进行留渣脱磷,但其没有给出进一步对高磷铁水进行深脱磷的工艺。张媛媛^[40]研究了高磷铁矿煤基预还原熔分工艺,考察了还原过程中矿物演变和磷的迁移规律,优化了高磷铁矿的熔分工艺条件。

煤基直接还原高磷铁矿成本较高,污染也较严重。因此,采用气基直接还原—熔分的工艺进行高磷铁矿冶炼是一种适宜的方式。赵志龙

等^[41-42]在 2008 年前后提出气基直接还原—电炉熔分冶炼高磷铁矿新工艺, 试验结果表明: 含磷 1.28% 的高磷铁矿通过 CO 还原后进行熔分, 可得到含磷 0.27% 的低磷铁; 通过 H₂ 还原后进行熔分, 可得到含磷 0.33% 的低磷铁。候晓梅等^[43]主要研究了高磷铁矿球团的气基还原行为, 分析了高磷铁矿球团的组成成分、矿相结构、微观形貌, 探究了不同还原气氛(CO、H₂)下球团的还原行为。经气基直接还原和熔分后, 试验获得磷质量分数为 0.35% 的铁水。赵栋^[44]详细研究了高磷铁矿球团的气基还原行为和熔分过程中熔分温度、碱度、熔分时间等对熔分效果的影响。

3.3 硼铁矿熔分工艺

我国硼矿资源丰富, 但多为硼、铁、镁等多元素复合矿, 难以被利用。而硼铁矿利用技术主要有化学法、直接生产硼砂、高炉火法分离^[45]、煤基直接还原—熔分等, 这些方法成本较高, 污染也较严重, 利用率较低。目前针对硼铁矿直接还原工艺的研究主要分为煤基和气基两种^[46-48]。气基竖炉直接还原—熔分工艺在还原过程中能免受杂质和添加剂的污染。王兆才^[49]制备了一种硼铁矿球团, 然后进行熔分试验, 得到富硼渣, 渣中 B₂O₃ 的收得率高达 95%。储满生等^[50]研究了含硼铁矿气基竖炉直接还原—电炉熔分新工艺, 分析了球团的还原率和还原膨胀率, 试验结果表明, 在高温下熔分后硼和铁可以高效分离。

上述对复合矿熔分工艺的研究都是利用熔渣和铁水的比重不同将二者分离, 以此达到提纯的目的, 为低品位矿脉石的去除提供了较大可能性。

4 熔分炉介绍及工艺研究进展

对于中等品位的 DRI, 如果直接用电炉冶炼, 有以下几方面问题: ① 对于含有大量脉石的中等品位 DRI, 如果在电炉中冶炼, 需要加入等量的碱性熔剂, 由于熔化熔剂的能量约为熔化铁的二倍, 这将造成电能和耐火材料消耗量的增加; ② 炉渣增多将导致渣中的 FeO 也增多, 进而铁损也增多; ③ 电炉渣中 FeO 含量、碱度较高, 其无法出售给水泥行业导致成本增加。

因此, 需要研究直接还原铁熔分技术。熔分

炉的类型主要有电弧炉、矿热炉、中频感应炉和试验中经常使用的高温电阻炉等。目前, 国际上熔分炉主要有 Hatch 公司连续还原铁炼钢工艺 (continuous reduced iron steelmaking process, CRISP) 的电熔炉 (electric smelting furnace, ESF) 和 Tenova 公司的开式渣浴炉 (open slag bath furnace, OSBF) 两种。相对于传统处理高品位、低脉石球团生产的 DRI 电炉, 它们都能直接连接竖炉、长时间运行, 且可以处理低品位球团和生产出符合水泥行业标准的废渣^[51]。下面将详细介绍这两种熔分炉以及熔分炉工艺的研究进展。

4.1 熔分炉

图 4 是 Hatch 公司的直接还原炼铁和熔分炉工艺。其有以下特点: ESF 具有 6 个电极、多个出钢口, 可以实现金属和炉渣的连续进料、熔化、还原和出钢, 且无断电时间; 具有封闭式的炉盖和低进气量维持炉内还原性气氛, 提高铁水的收得率; 大容量铁水处理 (>1 000 t), 维持稳定操作; 炉渣中 FeO 含量低于电炉, 铁的收得率更高。图 5 是 ESF 电熔炉熔分过程中主要使用的刷弧模式。

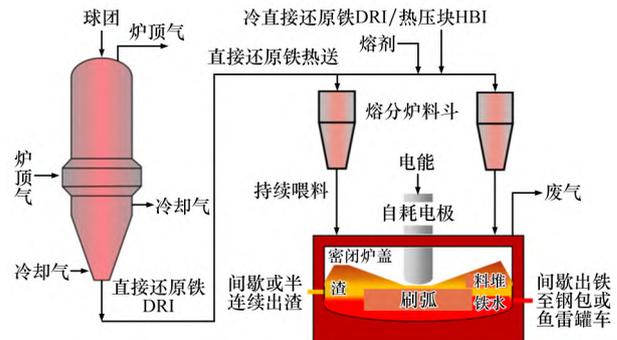


图 4 Hatch 公司的直接还原和电熔炉技术

Fig. 4 Hatch's direct reduction and ESF electric furnace technologies

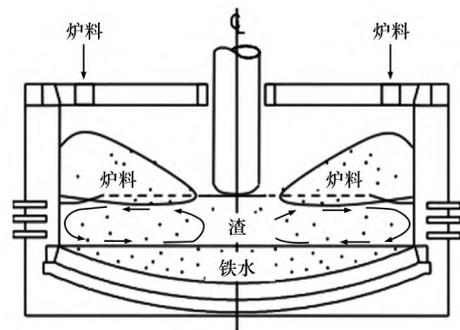


图 5 Hatch 公司的 ESF 电熔炉中的刷弧模式

Fig. 5 Brushing mode in Hatch's ESF electric furnace

图 6 是 Tenova 公司的气基直接还原—OSBF 炉生产铁水的工艺, 其具有以下特点: 具有大型的开放式熔池和半永久性的耐火材料, 设计寿命为 5 ~ 10 a(炉子内部如图 7 所示); 球团的直径要求小于 6 mm; 由 3 个独立的电极供电, 以穿过炉渣层电阻产生的电弧加热(刷弧的电极位置见图 8 中的阴影部分), 可以固定电源输入功率; 通过出渣孔和溜槽定期排出炉渣和铁水, 通过添加增碳剂来调节含碳量^[52]。

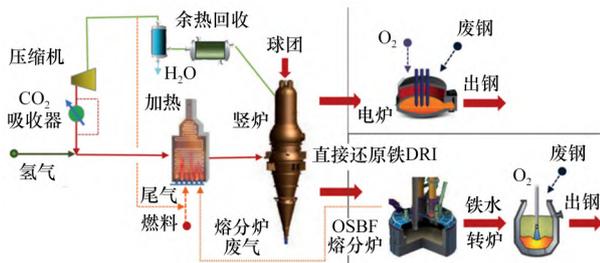


图 6 Tenova 公司的直接还原和 OSBF 电熔炉技术

Fig. 6 Tenova's direct reduction and OSBF electric furnace technologies

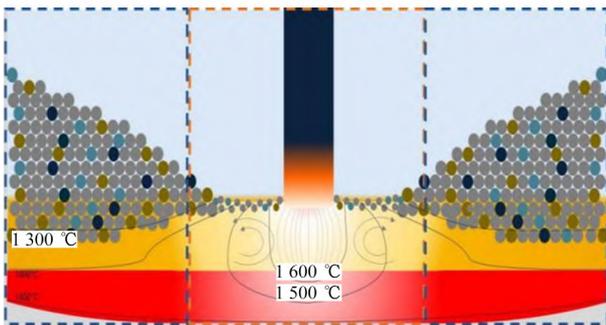


图 7 开放式渣浴炉工艺示意

Fig. 7 Process schematic of OSBF(open slag bath furnace)

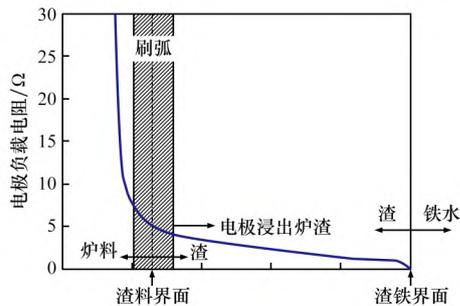


图 8 OSBF 中电极尖端与电阻的关系

Fig. 8 Relationship between electrode tip and resistance in OSBF

4.2 熔分炉工艺研究进展

一些国外学者已经对气基直接还原—熔分炉

工艺开展了研究。如 KIM 等^[53]认为氢基直接还原最后阶段的扩散阻力会降低还原速度, 从而限制 DRI 的金属化率, 导致电弧炉能耗增加, 特别是对于无碳 DRI 电弧炉的操作, 其难以进一步还原剩余的氧化铁, 使得铁水的收得率降低。分析原因认为, 由于氢基直接还原铁内缺少碳, 熔点将升高; 碳的缺失也会抑制铁水中 CO 的生成反应, 使得控氮困难。此外, 他们也介绍了 DRI-OSBF-BOF 工艺路线, 指出此工艺路线还需进行大量验证。而 CAVALIERE 等^[52]主要介绍了熔分炉中电弧的产生机制。电弧热主要是通过电弧等离子体的辐射、电弧推动的气体对流以及阳极和阴极的电极效应产生。在熔炼还原操作中, 电极尖端的电流密度很高, 碳电极和炉渣之间的还原反应速率增加。在电极浸入炉渣的模式下, 电阻随浸入深度的增加而减小。

SCHNALZGER 等^[54]则从炉衬的角度概述了 DRI-ESF-BOF 和 DRI-EAF 两种替代长流程炼钢的工艺路线, 并详细分析了几种炉渣对 ESF 炉中耐火材料的影响。研究指出, DRI/HBI 中存在的剩余酸性脉石会在随后的熔化中形成酸性炉渣从而影响耐火炉衬。

4.3 熔分炉仿真研究进展

除了这些对熔分炉工艺和机制的研究外, 还有一些学者利用 CFD 模拟的方法研究了球团在熔池中的熔化行为。CALDERON 等^[55]研究了低碳球团(碳质量分数为 0.1%) 在 EAF 钢水和熔渣中的熔化行为, 利用 CFD 技术建立传热模型模拟 H-DRI 球团的熔化行为; 通过将 H-DRI 浸入钢水和炉渣中, 利用球团中心的温度变化和不同熔化阶段的壳厚度来验证该传热模型的正确性, 得到模拟结果与测试结果一致。GOVRO 等^[56]在电弧炉熔炼环境中研究氢基无碳 DRI 的熔化行为, 开发出模拟 DRI 球团在钢水中壳的生长和熔化速率的模型, 并进行试验记录球团在炉渣和钢水中的熔化速率, 利用试验数据验证该模型的正确性, 旨在揭示氢基 DRI 在 EAF 中的熔化行为。

可以看出, 为了提高已经商用的熔分炉的寿命, 降低耐火材料的消耗量, 可将炉内调控为还原性气氛。炉渣或高炉渣可以直接出售给水泥行

业,降低企业的生产成本;同时生产的铁水可以用于转炉冶炼,利旧已有长流程设施。综上所述,对于中等品位铁矿,气基直接还原铁—熔分—转炉的绿色低碳冶炼流程适合作为我国钢铁企业绿色低碳改造的方向。

5 结语

本文分析了目前实现钢铁行业碳减排的难点,总结了中等品位铁矿气基直接还原熔分技术的发展,并综述了相关研究进展;此外,还介绍了国外目前已经实现的两种熔分炉工艺、炉内的 DRI 熔化过程和工业现场实施的可行性。主要结论如下:

(1) DRI-EAF 流程是钢铁行业降低碳排放的关键技术,但是有两个制约因素:一是必须使用高品位球团矿;二是由于电炉冶炼过程中电弧持续电离空气导致钢液控氮非常难,导致高端钢种无法生产。

(2) 气基竖炉炼铁工艺比较成熟,但对铁矿品位的要求较高。对于中等品位铁矿,经气基直接还原获得的 DRI 最好直接热装入大型熔分炉进行渣铁分离,并且定期排出适合转炉冶炼的铁水,随后可以继续利用炼钢车间的设备生产钢水。

(3) 我国钢铁生产主要以长流程为主,盲目改造为电炉短流程会浪费已建成的长流程冶炼设施。中等品位直接还原铁—熔分—转炉的绿色低碳冶炼流程,既能发挥氢冶金绿色低碳优势,又能利旧长流程工艺中的转炉。另外,利用转炉冶炼,在最终产品方面具有极大的灵活性和适用范围。

参考文献:

- [1] 上官钦,崔志峰,周继程,等. 双碳背景下中国电炉流程发展战略研究[J]. 钢铁, 2024, 59(1): 12-21.
SHANGGUAN Fangqin, CUI Zhifeng, ZHOU Jicheng, et al. Research on development strategy of electric arc furnace process in China under background of double carbon[J]. Iron & Steel, 2024, 59(1): 12-21.
- [2] 叶恒棣,郑富强,胡兵,等. 氢系燃料非高炉炼铁技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 10-17.
YE Hengdi, ZHENG Fuqiang, HU Bing, et al. Status and development trend of hydrogen-based fuel non-blast furnace iron-making technology[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 10-17.
- [3] 朱德庆,薛钰霄,潘建,等. 气基直接还原工艺研究进展和发展思考[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 1-9; 86.
ZHU Deqing, XUE Yuxiao, PAN Jian, et al. Research progress and development thinking of the gas-based direct reduction process[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 1-9; 86.
- [4] SHAO L, WANG Q L, QU Y X, et al. A numerical study on the operation of the H₂ shaft furnace with top gas recycling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52(1): 451-459.
- [5] 代友训,余俊杰,王兆才,等. 基于焦炉煤气平衡的长短流程冶金工艺布局的思考[J]. 烧结球团, 2022, 47(3): 66-7; 11.
DAI Youxun, YU Junjie, WANG Zhao cai, et al. Consideration on layout of metallurgical processes of long and short flow based on coke oven gas balance[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(3): 66-7; 11.
- [6] 薛英岚,张静,刘宇,等. “双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4392-4400.
XUE Yinglan, ZHANG Jing, LIU Yu, et al. Roadmap of coal control and carbon reduction in the steel industry under the carbon peak and neutralization target[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4392-4400.
- [7] 李晋,谢璨阳,蔡闻佳,等. 碳中和背景下中国钢铁行业低碳发展路径[J]. 中国环境管理, 2022, 14(1): 48-53.
LI Jin, XIE Canyang, CAI Wenjia, et al. Low carbon development pathway of China's iron and steel industry under the vision of carbon neutrality: Consensus and uncertainty[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2022, 14(1): 48-53.
- [8] 杨天钧,张建良,刘征建,等. 低碳炼铁势在必行[J]. 炼铁, 2021, 40(4): 1-11.
YANG Tianjun, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Low carbon ironmaking is imperative in facing environment challenge[J]. Ironmaking, 2021, 40(4): 1-11.
- [9] 赵沛,邓小旋,杨利彬. 高品质 IF 钢的炼钢流程和关键技术解析[J]. 中国冶金, 2023, 33(6): 1-8.
ZHAO Pei, DENG Xiaoxuan, YANG Libin. Analysis on key technologies and steelmaking processes of high

- quality IF steel sheets [J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(6): 1-8.
- [10] PATISSON F, MIRGAUX O. Hydrogen ironmaking: How it works [J]. *Metals* 2020, 10(7): 1-15.
- [11] 李翠, 郭会良, 玄振法, 等. 我国非高炉炼铁的现状与发展 [J]. *山东冶金* 2024, 46(2): 7-10.
LI Cui, GUO Huiliang, XUAN Zhenfa, et al. Present situation and development of non-blast furnace ironmaking in our country [J]. *Shandong Metallurgy*, 2024, 46(2): 7-10.
- [12] 丁瑞锋, 张大伟, 赵婷婷. 直接还原炼铁工艺的现状和发展趋势 [J/OL]. *上海金属* 2024: 1-7 [2025-03-17]. <https://doi.org/10.19947/j.issn.1001-7208>. 2024.05.17.
DING Ruifeng, ZHANG Dawei, ZHAO Tingting. Current situation and development trend of direct reduction ironmaking process [J/OL]. *Shanghai Metals* 2024: 1-7 [2025-03-17]. <https://doi.org/10.19947/j.issn.1001-7208>. 2024.05.17.
- [13] 张奔, 赵志龙, 郭豪, 等. 气基竖炉直接还原炼铁技术的发展 [J]. *钢铁研究* 2016, 44(5): 59-62.
ZHANG Ben, ZHAO Zhilong, GUO Hao, et al. Development of direct-reduction ironmaking technology in gas-based shaft furnace [J]. *Research on Iron and Steel*, 2016, 44(5): 59-62.
- [14] 潘钊彬. 碳中和背景下我国低碳炼铁技术发展现状与前景 [J]. *烧结球团* 2024, 49(1): 35-41.
PAN Zhaobin. Development status and prospect of Chinese low-carbon ironmaking technology under carbon neutrality background [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2024, 49(1): 35-41.
- [15] 蒋历俊, 张涛, 郝军, 等. 气基竖炉直接还原工艺发展现状及展望 [J]. *烧结球团* 2024, 49(3): 18-24.
JIANG Lijun, ZHANG Tao, ZHENG Jun, et al. Development status and prospect on direct reduction process of gas-based shaft furnace [J]. *Sintering and Pelletizing* 2024, 49(3): 18-24.
- [16] 卢立金, 王海风, 王锋, 等. 氢冶金工艺技术发展现状及应用 [J]. *钢铁* 2024, 59(3): 183-196.
LU Lijin, WANG Haifeng, WANG Feng, et al. Development status and application of hydrogen metallurgy technology [J]. *Iron & Steel*, 2024, 59(3): 183-196.
- [17] 王新东, 赵志龙, 李传民, 等. 基于富氢焦炉煤气零重整的氢冶金工程技术 [J]. *钢铁* 2023, 58(5): 11-19.
WANG Xindong, ZHAO Zhilong, LI Chuanmin, et al. Hydrogen metallurgy engineering technologies based on zero reforming of hydrogen enriched coke oven gas [J]. *Iron & Steel* 2023, 58(5): 11-19.
- [18] 鲁雄刚, 张玉文, 祝凯, 等. 氢冶金的发展历程与关键问题 [J]. *自然杂志* 2022, 44(4): 251-266.
LU Xiong gang, ZHANG Yuwen, ZHU Kai, et al. Development and key problems of hydrogen metallurgy [J]. *Chinese Journal of Nature* 2022, 44(4): 251-266.
- [19] 张建良, 巨世峰, 刘征建, 等. 氢基直接还原炼铁工艺的创新与实践 [J]. *钢铁* 2023, 58(8): 25-31.
ZHANG Jianliang, JU Shifeng, LIU Zhengjian, et al. Technical innovation and production practice of hydrogen-based direct reduction ironmaking process [J]. *Iron & Steel* 2023, 58(8): 25-31.
- [20] 于榭, 王锋, 齐渊洪, 等. 氢基直接还原铁工艺技术及应用 [J]. *钢铁研究学报* 2024, 36(3): 283-298.
YU Xue, WANG Feng, QI Yuanhong, et al. Technology and applications of hydrogen-based direct reduced iron process [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2024, 36(3): 283-298.
- [21] 范川林, 杜占, 潘锋, 等. 过程工程所流化床直接还原技术研究进展 [J]. *过程工程学报*, 2022, 22(10): 1325-1332.
FAN Chuanlin, DU Zhan, PAN Feng, et al. Research progress of fluidized bed direct reduction at Institute of Process Engineering [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering* 2022, 22(10): 1325-1332.
- [22] 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.
- [23] 刘松利. 钒钛铁精矿转底炉直接还原-电炉熔分工艺与理论研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
LIU Songli. Study on Technology and Theory of Direct Reduction by RHF and Smelting Separation by Arc Furnace from Vanadium and Titanium Iron Concentrate [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [24] 唐珏. 高铬型钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原-熔分新工艺基础研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
TANG Jue. Fundamental study on innovative process of

- gas-based shaft furnace direct reduction-melting separation for high chromium vanadium-bearing titanomagnetite [D]. Shenyang: Northeastern University 2017.
- [25] 张宗旺, 陈士朝, 吴轩, 等. 钒钛磁铁矿金属化球团熔分深还原试验研究[J]. 钢铁研究 2013, 41(4): 1-5. ZHANG Zongwang, CHEN Shichao, WU Xuan, et al. Research on smelting and deep reduction of vanadic-titanomagnetite metallized pellet [J]. Research on Iron and Steel 2013, 41(4): 1-5.
- [26] 韩子文. 钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原—电炉熔分新工艺的实验研究[D]. 沈阳: 东北大学 2011. HAN Ziwen. Experimental study on new process of gas-based direct reduction-electric furnace smelting separation for vanadium-titanium magnetite [D]. Shenyang: Northeastern University 2011.
- [27] 李峰. 高铬型钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原—电热熔分机理研究[D]. 沈阳: 东北大学 2016. LI Feng. Mechanism of gas-based direct reduction and melting separation of high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [28] 杨双平, 汪剑, 杜新, 等. 钒钛磁铁矿金属化球团熔分及 TiO₂ 富集试验研究[J]. 矿冶工程 2014, 34(1): 87-88; 96. YANG Shuangping, WANG Jian, DU Xin, et al. Study on melting separation for metallized pellet of vanadium-titanium magnetite and TiO₂ enrichment [J]. Mining and Metallurgical Engineering 2014, 34(1): 87-88; 96.
- [29] 师学峰, 徐红军, 张颖异, 等. 钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(1): 52-56. SHI Xuefeng, XU Hongjun, ZHANG Yingyi, et al. The experimental study on direct reduction of shaft furnace based gas of vanadium titanium magnetite [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2015, 36(1): 52-56.
- [30] 高建军, 洪陆阔, 徐洪军, 等. 钒钛磁铁矿金属化球团还原熔分试验及渣相分析[J]. 有色金属(冶炼部分) 2018(3): 14-18. GAO Jianjun, HONG Lukuo, XU Hongjun, et al. Smelting-separation for metallized pellets of vanadium-titanium magnetite and slag phase analysis [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(3): 14-18.
- [31] 洪陆阔, 齐渊洪, 孙彩娇, 等. 钒钛磁铁矿金属化球团还原熔分试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(5): 101-107. HONG Lukuo, QI Yuanhong, SUN Caijiao, et al. Research on smelting-separation for metallized pellets of vanadium-titanium magnetite [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(5): 101-107.
- [32] ZHANG Y Y, XUE Q G, WANG G, et al. Gasification and migration of phosphorus from high-phosphorus iron ore during carbothermal reduction [J]. ISIJ International, 2018, 58(12): 2219-2227.
- [33] CHEN Y B, LIU W G, CHEN J S, et al. Gasification behavior of phosphorus during hydrogen-rich sintering of high-phosphorus iron ore [J]. ISIJ International, 2022, 62(3): 496-503.
- [34] ZHANG Y, MUHAMMED M. The removal of phosphorus from iron ore by leaching with nitric acid [J]. Hydrometallurgy, 1989, 21(3): 255-275.
- [35] WU S C, LI Z Y, SUN T C, et al. Effect of additives on iron recovery and dephosphorization by reduction roasting-magnetic separation of refractory high-phosphorus iron ore [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(12): 1908-1916.
- [36] 揭晓武, 王成彦, 张永禄, 等. 高磷鲕状赤铁矿金属化还原焙烧—磁选—熔分新工艺研究[J]. 矿冶, 2018, 27(5): 37-42. JIE Xiaowu, WANG Chengyan, ZHANG Yonglu, et al. Study on innovative process of high phosphorus oolitic hematite ores processed by metallized reduction roasting and magnetic separation and melting separation [J]. Mining and Metallurgy 2018, 27(5): 37-42.
- [37] 周继程. 高磷鲕状赤铁矿煤基直接还原法提铁脱磷技术研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2007. ZHOU Jicheng. Study on dephosphorization technology for high phosphorus oolitic hematite by coal-based direct reduction [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology 2007.
- [38] 肖敏, 邱小英, 蓝桥发. 高磷鲕状赤铁矿金属化还原焙烧—磁选—熔分新工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2020(5): 87-91. XIAO Min, QIU Xiaoying, LAN Qiaofa. Study on the new technology of reduction roasting, magnetic separation and melting of high phosphorus oolitic hematite [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources 2020(5):

- 87-91.
- [39] 郑福生. 低品位高磷铁矿煤基直接还原—熔分工艺实验研究[D]. 重庆: 重庆大学 2009.
- ZHENG Fusheng. Research on coal-based direct reduction-melting separation process for low-grade and high phosphorus iron ore[D]. Chongqing: Chongqing University 2009.
- [40] 张媛媛. 直接还原高磷铁矿铁磷分离工艺基础研究[D]. 北京: 北京科技大学 2019.
- ZHANG Yuanyuan. Fundamental research on iron and phosphorus separation of high-phosphorus iron ore by direct reduction[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing 2019.
- [41] 赵志龙, 王海华, 唐惠庆, 等. 高磷铁矿除磷的实验研究[J]. 中国稀土学报 2008 26(专辑): 676-681.
- ZHAO Zhilong, WANG Haihua, TANG Huiqing, et al. Experimental study on phosphorus removal from high-phosphorus iron ore [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society 2008 26(Spec): 676-681.
- [42] 赵志龙, 唐惠庆, 郭占成. 高磷铁矿气基还原冶炼低磷铁[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(8): 964-969.
- ZHAO Zhilong, TANG Huiqing, GUO Zhancheng. Dephosphorization of high-level phosphorus iron ore by gas-based reduction and melt separation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(8): 964-969.
- [43] 候晓梅, 于浩, 唐惠庆, 等. 球团气基还原联合高温熔分实现高磷铁矿脱磷的研究[J]. 江西冶金, 2023, 43(4): 290-297.
- HOU Xiaomei, YU Hao, TANG Huiqing, et al. Research on the gaseous reduction of pellet followed by hightemperature melting separation for phosphorus removal from highphosphorus iron ore[J]. Jiangxi Metallurgy 2023 43(4): 290-297.
- [44] 赵栋. 高磷鲕状赤铁矿氢还原—熔分制备直接还原铁的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2018.
- ZHAO Dong. Study on the slag/metal separation from H₂-reduced high phosphorus oolitic hematite for direct reduction ironmaking [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology 2018.
- [45] 郎建峰, 艾志, 张显鹏. “高炉法”综合开发硼铁矿工艺中铁硼分离基本原理及工艺特点[J]. 矿产综合利用, 1996(3): 1-3.
- LANG Jianfeng, AI Zhi, ZHANG Xianpeng. Basic principle and technological characteristics of iron and boron separation in the process of comprehensive development of bentonite by blast furnace method [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1996(3): 1-3.
- [46] 付小佼, 于洪翔, 柳政根, 等. 含硼铁精矿选择性还原—选分新工艺的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2013 34(7): 966-970.
- FU Xiaojiao, YU Hongxiang, LIU Zhenggen, et al. Experimental study on new process for selective reduction and separation of boron-bearing iron concentrate [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013 34(7): 966-970.
- [47] WANG G, DING Y G, WANG J S, et al. Effect of carbon species on the reduction and melting behavior of boron-bearing iron concentrate/carbon composite pellets [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials 2013 20(6): 522-528.
- [48] WANG G, WANG J S, DING Y G, et al. New separation method of boron and iron from ludwigite based on carbon bearing pellet reduction and melting technology [J]. ISIJ International 2012 52(1): 45-51.
- [49] 王兆才. 煤制气—气基竖炉直接还原工艺的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学 2013.
- WANG Zhaocai. Fundamental study on process of coal gasification-gas based shaft furnace direct reduction [D]. Shenyang: Northeastern University 2013.
- [50] 储满生, 赵嘉琦, 付小佼, 等. 基于气基直接还原—熔分的硼铁矿高效利用新工艺[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2016 37(6): 805-809.
- CHU Mansheng, ZHAO Jiaqi, FU Xiaojiao, et al. New efficient process utilizing ludwigite on gas-based shaft furnace direct reduction and electric furnace smelting separation [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science) 2016 37(6): 805-809.
- [51] ZHANG Yale. The past, present and future of electric smelting furnaces [J]. Steel Times International, 2023, 47(3): 52-55.
- [52] CAVALIERE P, PERRONE A, SILVELLO A, et al. Integration of open slag bath furnace with direct reduction reactors for new-generation steelmaking [J]. Metals, 2022, 12(2): 203.

(下转第 25 页)

- 冶金 2022(4):1-5.
WANG Jing ,WANG Peng. Research progress of hydrogen metallurgy technology in the domestic and overseas[J]. Hebei Metallurgy 2022(4):1-5.
- [11] 赵志龙. 绿色低碳氢冶金技术进展及前景展望[J]. 绿色矿冶 2023 39(5):1-8.
ZHAO Zhilong. Progress and prospect of green low hydrocarbon metallurgy technology [J]. Sustainable Mining and Metallurgy 2023 39(5):1-8.
- [12] 路鹏. 氢基竖炉直接还原提产降耗生产实践[J]. 河北冶金 2024(6):47-51.
LU Peng. Production practice of hydrogen-based shaft furnace direct reduction to increase production and reduce consumption [J]. Hebei Metallurgy ,2024 (6): 47-51.
- [13] 卢立金,王海风,王锋,等. 氢冶金工艺技术发展现状及应用[J]. 钢铁 2024 59(3):183-196.
LU Lijin , WANG Haifeng , WANG Feng , et al. Development status and application of hydrogen metallurgy technology [J]. Iron & Steel ,2024 ,59(3): 183-196.
- [14] 韩仁义,梁利生. 湛钢绿色低碳炼铁技术进步[J]. 炼铁 2023 42(5):26-29.
HAN Renyi , LIANG Lisheng. Green and low-carbon ironmaking technology progress of Zhongang Iron and Steel Co. ,Ltd. [J]. Iron Smelting 2023 42(5):26-29.
- [15] 禹忠剑. 张宣科技氢基竖炉生产工艺特点[J]. 炼铁 2024 43(2):65-68.
YU Zhongjian. Process features of ZXHT hydrogen-based shaft furnace[J]. Ironmaking 2024 43(2):65-68.
- [16] 王新东,赵志龙,李传民,等. 基于富氢焦炉煤气零重整的氢冶金工程技术[J]. 钢铁 2023 58(5):11-19.
WANG Xindong ,ZHAO Zhilong ,LI Chuanmin ,et al. Hydrogen metallurgy engineering technologies based on zero reforming of hydrogen enriched coke oven gas [J]. Iron & Steel 2023 58(5):11-19.
- [17] 于樾,王锋,齐渊洪,等. 氢基直接还原铁工艺技术及应用[J]. 钢铁研究学报 2024 36(3):283-298.
YU Yue ,WANG Feng ,QI Yuanhong ,et al. Technology and applications of hydrogen-based direct reduced iron process [J]. Journal of Iron and Steel Research ,2024 , 36(3):283-298.
- [18] 张文利. MgO 作为甲烷转化制合成气催化剂载体及改性研究[D]. 天津:天津大学 2007.
ZHANG Wenli. Study on MgO as catalyst carrier and modification for methane conversion to syngas [D]. Tianjin: Tianjin University 2007.
- [19] 李怡诺,闫宇强,徐彬,等. 甲烷干重整制 CO 全流程模拟及工艺优化研究[J]. 天然气化工(C1 化学与化工) 2019 44(4):66-71.
LI Yinuo ,YAN Yuqiang ,XU Bin ,et al. Simulation and optimization of the dry reforming of methane process for producing CO [J]. Natural Gas Chemical Industry 2019 , 44(4):66-71.
- [20] 余长春,李然家,王伟,等. CO₂/CH₄ 干重整转化催化剂的积碳控制研究[J]. 石油化工 2020 49(10):925-930.
YU Changchun ,LI Ranjia ,WANG Wei ,et al. Study of carbon deposition controlling over CO₂/CH₄ dry reforming catalyst [J]. Petrochemical Technology ,2020 , 49(10):925-930.
- [21] 闫军. 二氧化碳脱除在氢基竖炉中的应用[J]. 河南冶金 2023 31(5):32-35.
YAN Jun. Application of carbon dioxide removal in hydrogen-based shaft furnace [J]. Henan Metallurgy , 2023 31(5):32-35.

(上接第 11 页)

- [53] KIM W ,SOHN I. Critical challenges facing low carbon steelmaking technology using hydrogen direct reduced iron [J]. Joule 2022 6(10):2228-2232.
- [54] SCHNALZGER M ,SPANRING A ,KIRSCHEN M ,et al. Electric melting furnaces for green steel transformation of integrated steel plants: Requirements , challenges and solutions from a refractory perspective [C]//Procedures of the 9th European Oxygen Steelmaking Conference. Aachen: ASMET 2022.
- [55] CALDERON HURTADO F A ,GOVRO J ,EMDADI A , et al. The melting behavior of hydrogen direct reduced iron in molten steel and slag: an integrated computational and experimental study [J]. Metals 2024 14(7):821.
- [56] GOVRO J ,MEENA A ,CHAKRABORTY S ,et al. Melting behavior of conventional and hydrogen-reduced DRI in a simulated EAF steel bath [J/OL]. AISTECH ,2022 ,1: 1960775. [2022-05-01]. https://doi.org/10.33313/386/036.