

氢基竖炉生产直接还原铁的工艺特点及减碳环节

冀宗贺^{1,3}, 刘艳峰², 李兰杰^{1,3}, 田志强^{1,3}, 牛佳星^{1,3}, 王小艾^{1,3}

(1. 河北河钢材料技术研究院有限公司 河北 石家庄 052160; 2. 河钢集团张宣高科科技有限公司, 河北 宣化 075100; 3. 河北省氢冶金低碳技术重点实验室 河北 石家庄 052160)

摘要:在国家“双碳”战略目标背景下,钢铁行业作为高碳排放的重点领域,加速推进绿色低碳转型已刻不容缓。依托焦炉煤气资源丰富的优势,我国氢基竖炉直接还原技术对国外已成熟应用的Midrex法和HYL/Energiron法进行优化改进,其以富氢或纯氢气体为还原剂生产固态海绵铁,已在多个项目中取得阶段性成果。为此,本文重点探讨氢基竖炉直接还原技术的工艺特点、减碳机制以及经济价值。结果表明:氢基竖炉生产系统包含多个部分,核心是氢基竖炉本体,其以H₂还原为主、CO还原为辅,生产的DRI成分稳定、化学反应活性高。该工艺的减碳关键环节:借助炉内条件,CH₄-CO₂重整避免外部重整带来的高能耗问题,可实现能源循环利用;采用MDEA化学吸附法,能够高效脱除CO₂;而在CO₂利用环节,通过多级精制工艺可制备出纯度达99.9%的食品级CO₂产品,创造显著的经济效益。基于焦炉煤气的氢基竖炉直接还原零重整工艺结合CCUS技术,相比传统高炉炼铁,可实现碳减排超60%,同时大幅降低粉尘、SO₂、NO_x等污染物排放。

关键词: 氢基直接还原; 碳排放; 碳捕集; 短流程; 氢冶金

中图分类号: TF554

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0020-06

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.038

Process characteristics and carbon reduction links of direct reduced iron for hydrogen-based shaft furnace production

Ji Zonghe^{1,3}, Liu Yanfeng², Li Lanjie^{1,3}, Tian Zhiqiang^{1,3}, Niujiaxing^{1,3}, Wang Xiaoi^{1,3}

(1. HBIS Materials Technology Research Institute Shijiazhuang 052160, Hebei, China; 2. HBIS Group Zhangxuan Technology Co., Ltd., Xuanhua 075100, Hebei, China; 3. Key Laboratory of Low Carbon Technology of Hydrogen Metallurgy in Hebei Province Shijiazhuang 052160, Hebei, China)

Abstract: Under the background of the national “dual carbon” strategic goal, the steel industry, as a key area of high carbon emissions, has an urgent need to accelerate the green and low-carbon transformation. Relying on the advantages of abundant coke oven gas resources, China’s direct reduction technology of hydrogen-based shaft furnace has optimized and improved the mature application of Midrex method and HYL/Energiron method in foreign countries, making hydrogen-rich or pure hydrogen gas as the reducing agent to produce solid sponge iron, which has achieved phased results in many projects. Therefore, the process characteristics, carbon reduction mechanism and economic value of direct reduction technology for hydrogen-based shaft furnace are focused on. The results show that the hydrogen-based shaft furnace production system consists of multiple parts and the core is the hydrogen-based shaft furnace itself, which is mainly based on H₂ reduction and supplemented by CO reduction, with stable DRI composition produced and high chemical reaction activity. The key link of carbon reduction in the process: with the help of furnace conditions, CH₄-CO₂ reforming avoids the

收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2024-11-14

基金项目: 河北省战略性技术专项(23314601L)

作者简介: 冀宗贺(1997—),男,助理研究员,从事氢冶金关键技术与装备方面的研究工作。

通信作者: 刘艳峰(1986—),男,高级工程师,从事氢冶金生产、CO₂减排与利用方面的研究工作。

high energy consumption caused by external reforming, and can realize energy recycling; The MDEA chemical adsorption method can remove CO₂ efficiently; In the CO₂ utilization process food-grade CO₂ products with a purity of 99.9% can be prepared through a multi-stage refining process, creating significant economic benefits. The hydrogen-based shaft furnace direct reduction zero reforming process based on coke oven gas combined with CCUS technology can reduce carbon emissions by more than 60% compared with traditional blast furnace ironmaking, greatly reducing the emission of pollutants such as dust, SO₂ and NO_x.

Key words: hydrogen-based direct reduction; carbon emissions; carbon capture; short process; hydrogen metallurgy

近年来,随着工业化进程的加快,温室气体的总排放量日益增长,全球气候变暖仍在加剧。2015年,178个国家共同签署《巴黎协定》,明确21世纪全球平均气温上升幅度需控制在2℃以内,并力求实现不超过1.5℃的目标^[1]。我国政府恪守约定、勇担大国责任,在2020年9月宣布在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的“双碳”目标^[2]。据测算,若我国能成功实现“双碳”目标,全球温度上升幅度将减少0.2~0.3℃^[3]。经有关模型^[4]论证,要达成1.5℃的温控目标,需要在大型制造业内推广氢能源的应用;而若要实现2℃的温控目标,到2050年前我国短流程炼钢的占比需要提升至33%左右。但是,在当前我国钢铁冶炼流程中,传统的“高炉—转炉”长流程生产占比超过90%,在这一过程中,煤炭在能源消耗中的占比接近70%^[5]。我国每生产1t钢材,就会产生约2t的碳排放,高于1.83t的世界平均水平^[6]。

高炉法炼铁以其生产规模大、技术成熟的优势在我国炼铁领域长期占据着主导地位,其工艺原理是在高温条件下,利用焦炭、煤粉与氧气反应生成的CO将铁从矿石中还原出来,形成铁水和熔渣,此方法在全球范围内得到广泛应用。然而,高炉炼铁存在明显弊端,在炉内还原冶炼时,CO₂气体会大量产生,并且高炉炼铁大多采用烧结矿和焦炭作为原料,在前端制备烧结矿和焦炭的过程中,同样会释放出大量碳,严重污染生态环境。尽管多年来,高炉炼铁在装备升级和智能化方面取得了显著进步,但从工艺本质而言,始终无法攻克碳排放量大这一关键难题。

为响应国家减污降碳的号召,钢铁工业加速绿色转型已成为大势所趋。我国钢铁工业的低碳发展途径^[7]:在流程结构上增加氢基直接还原—

电炉短流程的比例;在生产技术上致力于研发低碳技术,并运用市场机制引导生产流程转变,推进碳捕集等变革性脱碳技术的发展;在能源结构上促进“碳冶金”向“氢冶金”转变。基于此,本文对氢基竖炉直接还原技术的工艺特点、减碳机制以及经济价值展开研究,以期提升钢铁行业竞争力、促进可持续发展提供理论与实践参考。

1 氢基竖炉直接还原工艺特点

氢基竖炉直接还原技术是以富氢或纯氢气体作为还原剂,通过大型竖炉设备生产固态海绵铁的变革性技术,主要分为Midrex法和HYL/Energiron法两种方法,在国外已实现成熟应用^[8]。Midrex法是以天然气为原料,HYL/Energiron法是以天然气、煤制气或焦炉煤气为原料,这两种方法制备的CO+H₂总量均在90%以上^[9]。在工艺参数方面,Midrex法的还原过程通常须在约820℃的温度下进行,炉内最大压力约为233kPa;而HYL/Energiron法的还原温度则约为930℃,且在高压条件下运行,最高压力可达到600kPa^[10]。与Midrex法相比,HYL/Energiron法的炉身构造装置相对简单,球团还原速率更快^[11]。

在国外氢冶金工艺较为成熟的前提下,我国依据焦炉煤气资源丰富的优势对氢冶金工艺进行合理优化改进。河钢集团张宣科技的120万吨氢冶金示范项目一期已全面贯通,是全球首个采用“焦炉煤气零重整竖炉直接还原”工艺技术的示范工程,为我国钢铁工业减少对传统化石燃料的依赖开辟了新路径^[12]。中晋太行采用具有自主知识产权的“焦炉煤气干重整制合成气生产还原铁技术”,其焦炉煤气净化、干重整炉和氢气竖炉工艺设备可以达到100%国产化^[13]。宝钢湛江钢铁以打造世界最高效率的绿色碳钢制造基地为目标,

建设了国内首套百万吨级氢基竖炉，同时能实现焦炉煤气等多种不同比例还原气的灵活使用，得到的 DRI 产品中含碳量和金属化率均达到预期目标^[14]。

1.1 生产系统

基于焦炉煤气的氢基竖炉生产系统包括焦炉煤气供应系统、上料系统、排料系统、储存系统、工艺回路、CO₂ 处理系统及其它辅助系统等，其中工艺回路包括还原回路、冷却回路和底气回路，CO₂ 处理系统由 CO₂ 吸收塔、换热器、CO₂ 再生塔和 CO₂ 精制设备组成。氢基竖炉直接还原配套 CO₂ 处理工艺流程如图 1 所示。整个系统的核心是氢基竖炉本体，主要分为还原段和锥体两部分。在生产过程中，高品质球团矿由竖炉上部装入并逐渐向下运动；还原气经加热炉加热，与喷入的氧燃烧达到 1 000 °C 后，在竖炉锥部被注入，并向上运动。在还原段内，球团矿被 CO 和 H₂ 还原为直接还原铁，并从竖炉下部排出，而废气由竖炉顶部排出。炉顶煤气经过换热器降温、洗涤除尘、脱水、打压、CO₂ 脱除及加热等环节，重新作为工艺气进入竖炉内被循环利用，实现“变废为宝”，同时焦炉煤气在竖炉下部被不断送入，以此来补充工艺气并调节气路成分和压力，满足炉内直接还原反应、渗碳反应和重整反应的需要。氢基竖炉生产工艺的核心技术是以 H₂ 还原为主、CO 还原为辅，在低于球团矿熔化温度即可实现固态还原^[15-16]。

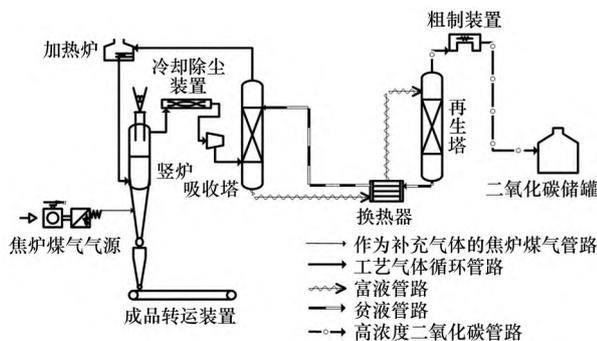


图 1 氢基竖炉直接还原配套 CO₂ 处理工艺流程
Fig. 1 Flow process of CO₂ treatment for direct reduction of hydrogen-based shaft furnace

1.2 产品应用

氢基竖炉生产的直接还原铁(DRI)产品共有三种类型:冷态直接还原铁(CDRI)、热态直接还原铁(HDRI)和热压铁块(HBI)。

DRI 成分稳定，以固体形式存在，呈多孔结构，形似海绵，具有较高的化学反应活性。当下，在电炉炼钢中，DRI 常被用作部分废钢的替代物。因其纯净度高，能够直接生产出不含残余元素的钢，且钢中的夹杂物较少，极大地改善了钢的热轧、冷轧及拉拔性能。此外，DRI 的含碳量通常较低，这不仅使其适用于低碳钢生产，还有助于减少炼钢过程中碳的排放。尽管电炉是最常用的 DRI 应用方式，但在某些情况下，DRI 也可作为长流程钢铁生产的一部分，将其添加至转炉中，能够提高钢水的质量与产量^[17]。

以 DRI 作为原料，可以高效地生产出符合多个工业领域需求的高品质钢材。这些钢材主要用于石油工业中的油井套管和钻杆，机械工业中的深冲汽车钢板，以及特殊用途的钢丝和钢材，例如弹簧钢、轴承钢、汽轮机转子、炮管和核工业用钢等。随着全球钢铁行业朝着更加环保和高效的生产模式转型，DRI 的重要性和应用范围预计将不断扩大。

2 减碳关键环节

在氢基竖炉直接还原过程中，炉内反应所产生的 CO₂ 会与焦炉煤气中的 CH₄ 发生干重整反应，转化为还原所需的 CO 和 H₂。在气体变换的同时，炉顶煤气中 CO₂ 的排放占比也相应减少，可为后续 CO₂ 处理释放很大的压力。炉顶煤气进入 CO₂ 吸收塔后，可以实现 CO₂ 的全部捕集和利用。在整个流程中，CO₂ 的唯一排放源是加热炉烟气。经计算，与高炉炼铁相比，每生产 1 t 合格生铁，氢基竖炉直接还原过程中 CO₂ 的排放量将减少 60% 以上。

2.1 CH₄-CO₂ 重整

在竖炉生产过程中，焦炉煤气中 CH₄ 并不直接参与铁矿的还原反应，而主要在竖炉下部参与 DRI 的渗碳反应： $3\text{Fe}(s) + \text{CH}_4(g) \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}(s) + 2\text{H}_2(g)$ 。从能源利用的角度来看，焦炉煤气中 CH₄ 体积分数达 18%~25%，若经过改质转化为有效气体参与到铁矿的还原反应中，其利用率会大大提高。

CH₄ 分子结构非常稳定，其内部由 C—H 键

组成, 这些键的解离能较高, 尤其在饱和烃类中表现得更为明显。因此, 在进行转化时必须将热力学稳定的 CH_4 分子活化。 CH_4 分子重整的条件是高温、催化剂和氧化剂, 而这三大条件在竖炉内部即可满足。反应时, 竖炉内还原区温度为 $1\ 000 \sim 1\ 050\ ^\circ\text{C}$, 具备重整反应所需的高温条件。同时竖炉下部的 DRI 可以作为催化剂, 还原反应生成的 CO_2 可以作为氧化剂参与重整反应。因此 CH_4 - CO_2 重整反应无需在外部设置重整炉, 这降低了系统能源消耗, 也规避了重整炉效率低、工艺操作危险等技术难题^[18]。

CH_4 - CO_2 重整反应的方程式: $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$, $\Delta H_{298\text{K}} = -247\ \text{kJ/mol}$ 。由此可看出, 该重整反应为强吸热反应, 在反应过程中会消耗大量的热量, 这部分热量由 CH_4 的部分氧化放热来供应。在重整反应进行的过程中, 积碳、逆变换、消碳等副反应也将同步发生。具体为, 积碳反应: $\text{CH}_4 \leftrightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$, $2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$; 逆变换反应: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$; 消碳反应: $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$ 。其中积碳反应是阻碍 CH_4 - CO_2 重整进程的不利反应, 因此抑制 CH_4 与 CO 的解离是需要解决的关键问题。通常, 在竖炉工艺气中加入适当比例的蒸汽可以促进消碳反应的进行, 但若添加过量的蒸汽, 则会导致逆变换反应向左移动, 从而影响 CO_2 的转化率。有研究表明, 低压和高 $c(\text{CO}_2)/c(\text{CH}_4)$ (体积分数比) 条件可改善竖炉内发生的积碳问题^[19-20]。

CH_4 - CO_2 重整技术实现了能源的循环利用, 兼具环保意义和经济价值。此外, 竖炉内 CO_2 得到有效利用, 在很大程度上实现了炉顶煤气排放降碳的目标。

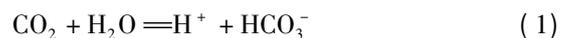
2.2 CO_2 捕集

在竖炉内发生复杂的化学反应后, 产生的炉顶煤气经排放进入 CO_2 捕集装置, 此时混合气中部分 CO_2 未被重整, 仍具备很大的利用价值。工业上常采用化学吸附法对炉顶煤气进行处理, 具体方法: 向吸收塔内喷入 MDEA 溶液(贫液)高效脱除工艺气体中的 CO_2 , 然后将失去 CO_2 的工艺气送入还原回路。

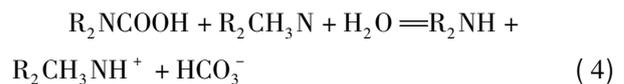
MDEA 即 N-甲基二乙醇胺 ($\text{R}_2\text{CH}_3\text{N}$), 是一

种优良的选择性脱碳溶剂, 它易溶解于水和醇中, 微溶于醚, 化学稳定性良好。MDEA 具有高选择性、低溶剂消耗、不易降解等特点, 在适当的条件下, 其对 CO_2 等酸性气体可展现出强大的吸收能力^[21]。采用 MDEA 法不仅能够有效捕集 CO_2 , 还能去除硫化氢和有机硫; 此外, 在捕集过程中, MDEA 对 H_2 和 N_2 等非极性气体的溶解度很低, 可以减少净化气体的损失。

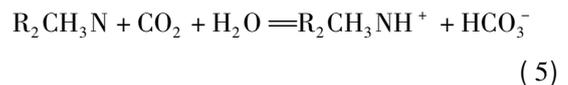
MDEA 溶液与 CO_2 可按式(1)发生反应。



式(1)受到液膜控制, 反应速率非常缓慢, 式(2)是一个迅速且可逆的过程。因此, 式(1)成为 MDEA 吸收 CO_2 过程中的控制步骤。为了加速这一反应过程, 通常会在 MDEA 溶液中添加 $1\% \sim 3\%$ 的 R_2NH 活化剂, 以此来改变 MDEA 溶液吸收 CO_2 的方式, 具体的反应过程如下。



总反应式:



由式(3)至(5)可以看出, 活化剂能够吸收 CO_2 并促进其向液相转移, 这加速了 MDEA 与 CO_2 之间的反应速率。活化剂的作用在于提高了 CO_2 的吸收效率, 使得整个吸收过程更加高效。MDEA 法捕集技术是目前最先进的脱碳技术之一, 该技术使得脱碳后工艺气中 CO_2 体积分数降低至 1% 以下, 满足了工艺气的质量要求。

2.3 CO_2 利用

吸收 CO_2 后, MDEA 溶液(富液)经过贫/富液换热器进入再生塔。在再生塔内, 富液通过蒸汽气提法再生, 重新转化为贫液, 贫液经换热冷却后回到吸收塔被循环使用。富液携带 CO_2 进入再生塔后, 随蒸汽由再生塔顶部排出, 并进入后续的 CO_2 精制系统。 CO_2 精制过程一般是将吸附、吸收、还原反应等工序加以组合, 进行预精制, 然后经过液化、蒸馏工序制取高纯 CO_2 产品, 供下游用户使用。目前, 高纯 CO_2 已在医药、食品

加工、环境保护、制造行业及农业生产等多个领域获得广泛应用。

在竖炉生产时,脱碳量 = 工艺气流量 × (脱碳前工艺气 CO₂ 体积分数 - 脱碳后工艺气 CO₂ 体积分数)。若脱除工序实际入口 CO₂ 占比为 7%、出口 CO₂ 占比为 0.8%、工艺气流量按 180 000 m³/h 计算,那么每小时 CO₂ 吸收量为 22.06 t,年产 CO₂ 为 17.7 万吨。在 CO₂ 精制过程中,每制取 1 t 高纯 CO₂,成本约为 350 元,外销价格为 450 元/t,则年利润可达到 1 770 万元。在钢铁行业产能过剩、原料成本较高的情况下,氢基竖炉作为铁前系统的一项关键技术,可实现废气资源的再利用,也大幅提高了钢铁冶炼的经济效益。

3 结语

(1) 基于焦炉煤气的氢基竖炉直接还原零重整工艺结合 CCUS 技术,彻底摒弃了烧结、焦化等传统钢铁生产工序。在还原进程中,该工艺能够高效实现燃料气内循环。与传统高炉炼铁工艺相比,氢冶金在环保层面的优势极为显著,可达成 60% 以上的碳减排目标,同时粉尘、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等污染物的排放量也大幅降低。

(2) 借助 MDEA 技术捕集并经过精制处理后的 CO₂,能够转化为高纯度的 CO₂ 产品,供下游产业使用,实现了末端治理。特别是在当前钢铁企业普遍面临亏损的背景下,将钢铁领域规模化生产的 CO₂ 作为化工行业的原料加以利用,对于构建氢冶金体系具有极其重要的意义。

(3) 氢冶金技术在国内的成功实施,标志着我国钢铁行业迈入了“以氢代碳”的新时代。这一工艺不仅符合我国资源的实际状况,而且是实现“双碳”目标的重要途径之一。未来氢冶金技术的应用,还需要进一步加大装备研发力度,提高技术装备的国产化水平,尤其是突破规模化低成本制取绿氢和氢气加热等技术。

参考文献:

[1] CHEN J W,ZHANG H,ZHAO G,et al. Low-carbon manufacturing and optimization strategies of iron and steel industry based on industrial metabolism[J]. JOM, 2023, 75(7): 2199-2211.

- [2] 邓旭,谢俊,滕飞. 何谓“碳中和”? [J]. 气候变化研究进展 2021, 17(1): 107-113.
DENG Xu, XIE Jun, TENG Fei. What is carbon neutrality? [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107-113.
- [3] 王利宁,彭天铎,向征艰,等. 碳中和目标下中国能源转型路径分析[J]. 国际石油经济 2021, 29(1): 2-8.
WANG Lining, PENG Tianduo, XIANG Zhengjian, et al. Analysis of China's energy transition pathways under the goal of carbon neutrality [J]. International Petroleum Economics 2021, 29(1): 2-8.
- [4] 郦秀萍,上官方钦,周继程,等. 钢铁制造流程中碳素流运行与碳减排途径[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
LI Xiuping, SHANG Guanfangqin, ZHOU Jicheng, et al. Carbon flow operation and carbon emission reduction pathway in steel manufacturing process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2020.
- [5] 上官方钦,张春霞,胡长庆,等. 中国钢铁工业的 CO₂ 排放估算[J]. 中国冶金 2010, 20(5): 37-42.
SHANGGUAN Fangqin, ZHANG Chunxia, HU Changqing, et al. Estimation of CO₂ emission in Chinese steel industry [J]. China Metallurgy 2010, 20(5): 37-42.
- [6] 王克,刘芳名,尹明健,等. 1.5 °C 温升目标下中国碳排放路径研究[J]. 气候变化研究进展 2021, 17(1): 7-17.
WANG Ke, LIU Fangming, YIN Mingjian, et al. Research on China's carbon emissions pathway under the 1.5 °C target [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 7-17.
- [7] 程茉莉. 钢铁企业二氧化碳减排路径分析及展望[J]. 冶金经济与管理 2022(4): 18-22.
CHENG Moli. Analysis and prospect of carbon dioxide emission reduction path of iron and steel enterprises [J]. Metallurgical Economics & Management 2022(4): 18-22.
- [8] TANG J, CHU M S, LI F, et al. Development and progress on hydrogen metallurgy [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(6): 713-723.
- [9] GUO H J. Physicochemical principles of hydrogen metallurgy in blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research International 2024, 31(1): 46-63.
- [10] 王晶,王朋. 国内外氢冶金技术研究进展 [J]. 河北

- 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.