

氢基竖炉直接还原工艺发展现状及思考^①

王莹^{1,2}, 何志军³, 陈妍^{1,2}, 于晓莹^{1,2}, 李会敏^{1,2}, 张晶^{1,2}, 尹翔一⁴

(1.海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁鞍山 114009; 2.鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁鞍山 114009; 3.辽宁科技大学, 辽宁鞍山 114051; 4.辽宁冶金设计研究院有限公司, 辽宁鞍山 114031)

摘要:介绍了竖炉直接还原工艺 Midrex 和 HYL/Energiron 的基本流程及近年来各工艺的直接还原铁产量, 并对比分析了两种工艺的装置、原料和工艺特性。阐述了目前全球钢铁企业在该领域的技术研发和项目投资情况, 同时指出氢基竖炉直接还原技术的发展与球团矿品位、氢还原反应过程吸热、大规模绿氢制备技术以及绿氢制备成本等问题息息相关。选择符合我国国情的氢基竖炉直接还原技术, 是我国钢铁行业低碳可持续发展的重要方向。

关键词: 炼铁; 氢基直接还原; 竖炉; 低碳减排; 氢能源; 绿氢; Midrex; HYL

中图分类号: TF5; TK91

文献标识码: B

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.04.041

文章编号: 0253-6099(2024)04-0212-05

Development Status of Hydrogen-Based Direct Reduction Process in Shaft Furnace and Related Thoughts

WANG Ying^{1,2}, HE Zhijun³, CHEN Yan^{1,2}, YU Xiaoying^{1,2}, LI Huimin^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, YIN Xiangyi⁴

(1. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institute, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China; 4. Liaoning Metallurgical Design & Research Institute Co., Ltd., Anshan 114031, Liaoning, China)

Abstract: The basic flow of Midrex and HYL/Energiron technologies for direct reduction in a shaft furnace and the direct reduced iron output by each processing technique in recent years are firstly introduced, and then the equipment, raw materials and process characteristics of those two technologies are analyzed based on comparison. Based on the expounding of technical R & D and investment of global steel companies in these two technologies, it is pointed out that the development of hydrogen-based direct reduction process in a shaft furnace is closely related to grade of pellet ore, heat adsorption during hydrogen-based reduction reaction process, technologies for large-scale green hydrogen production and production cost among others. It is important for sustainable development of Chinese iron and steel industry to adopt hydrogen-based direct reduction in a shaft furnace that conforms to the national conditions.

Key words: ironmaking; hydrogen-based direct reduction; shaft furnace; carbon emissions reduction; hydrogen energy; green hydrogen; Midrex; HYL

随着钢铁行业快速发展,巨大的环保压力随之而来,低碳生产已成为现代钢铁企业实现可持续发展的必由之路^[1-3]。开发利用无碳和低碳能源,显著减少碳足迹、碳排放的冶金工艺技术逐渐成为钢铁行业的热潮^[4-5]。以氢代碳是当前钢铁行业实现绿色低碳、高质量可持续发展的重要方向和出路^[6-7]。

氢基竖炉直接还原工艺具有减少碳排放、清洁高效的特点,符合当前钢铁行业形势,受到了国内外冶金工作者的广泛关注^[8]。目前氢基竖炉工艺以 Midrex 和 HYL/Energiron 工艺较为成熟^[9]。本文对这两种工艺的技术路线、工艺特点、产量以及应用情况进行了阐述,同时指出利用氢基竖炉直接还原工艺生产需要解

① 收稿日期: 2024-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(52374339)

作者简介: 王莹(1994—),女,辽宁鞍山人,硕士,助理工程师,主要研究高炉、非高炉炼铁技术。E-mail: 18242288015@163.com

通信作者: 何志军(1980—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,主要研究绿色低碳与智能冶金。E-mail: hzhj2002@126.com

决的关键问题及应对策略,以期为钢铁行业低碳减排提供一定参考。

1 典型氢基竖炉直接还原工艺

1.1 Midrex 工艺

1.1.1 工艺流程

Midrex 工艺流程由 Midland Ross(米德兰)公司于 1967 年开发^[10],主要设备为竖炉和重整炉,在竖炉中块矿被还原成直接还原铁(DRI),在重整炉中还原气体被重整。重整炉具有独特的催化剂设计,天然气通过填充镍的管道持续进行催化转化为 H₂ 和 CO 喷入竖炉。该工艺能够使原料从炉顶装入并与还原气体逆流通过炉子^[11-12],工艺流程如图 1 所示。

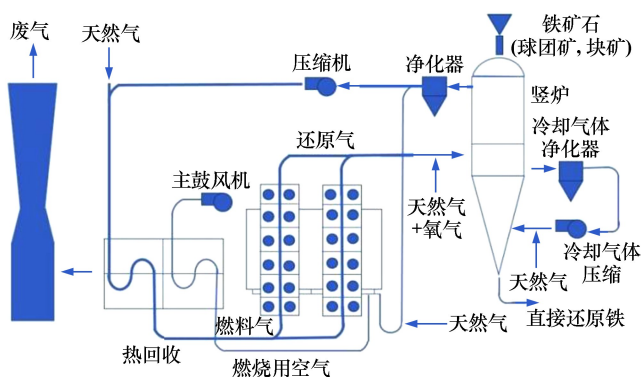


图 1 Midrex 工艺流程

富含 CO 和 H₂ 的炉顶气体离开竖炉,在洗涤器中清洗后再次用作还原气体,可用于预热和保持重整器中天然气的温度。在 Midrex[®]工厂,气体重整通过炉顶气中 CO₂ 实现,将 CH₄ 裂解成 CO 和 H₂^[13-14]。Midrex 工艺生产 1 t DRI 的能耗在 9.5~10.0 GJ 范围内。

1.1.2 工艺产量

2022 年, Midrex[®] 工厂生产 DRI 7 356 万吨,比 2021 年产量(7 085 万吨)增加了 3.8%。全球竖炉 DRI 总产量的 80% 是由 Midrex 技术生产的。根据世界钢铁协会(WSA)数据显示:伊朗境外 Midrex[®] 工厂 DRI 产量为 4 342 万吨,伊朗的 Midrex[®] 工厂 DRI 产量为 3 014 万吨。有超过 1 000 万吨的 HDRI 是由 Midrex[®] 工厂生产的,由附近钢厂使用。^[15]

1.2 HYL/Energiron 工艺

1.2.1 工艺流程

墨西哥希尔萨公司(HYL)开发的 HYL-III 竖炉工艺用于天然气蒸汽重整还原块状铁矿石^[14]。天然气裂化通常在重整器中进行。通过洗涤除去 CO₂ 来提高还原气体中氢含量(约 80%)。添加无水和无 CO₂ 的炉顶气并间接加热,将还原气喷入还原炉。DRI 在

竖炉底部被冷却到 50 °C 以下。

Energiron-ZR 工艺是在 HYL-III 工艺基础上提出来的,ZR 代表“零重整器”。在竖炉中用 O₂ 部分氧化天然气后,在热 DRI 下进行天然气的转化。DRI 以冷态或热态形式从竖炉排出,可以直接热装至下游电弧炉。Energiron-ZR 工艺流程如图 2 所示。Energiron-ZR 工艺的特点是选择性去除炉顶气中的 H₂O 和 CO₂^[16],它们通过炉顶气体洗涤和 CO₂ 去除装置(如变压吸附)去除。

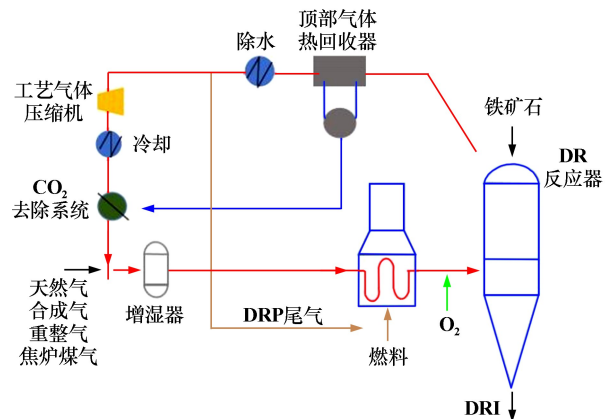


图 2 Energiron-ZR 标准工艺流程

1.2.2 工艺产量

2017 年,全球 DRI 总产量为 0.87 亿吨,利用气基还原的产量占 82.4%,其中 Midrex 工艺占 64.8%,HYL 工艺占 16.9%^[17]。2019—2021 年全球各种工艺 DRI 产量占比见表 1^[18]。HYL/Energiron 工艺的产量占比稳定在 13% 左右。

表 1 2019—2021 年全球各种工艺 DRI 产量占比

年份	全球各种工艺 DRI 产量占比/%				
	Midrex	HYL/Energiron	PERED	其他	回转窑
2019	60.5	13.2	2.1	0.2	24.0
2020	60.2	12.4	2.9	0.2	24.3
2021	59.5	12.7	2.2	0.1	25.4

2 Midrex 和 HYL/Energiron 工艺对比

2.1 装置区别

Midrex 和 HYL/Energiron 工艺在装置上的主要区别是:Midrex 工艺需要 1 座气体重整炉和 1 座竖炉,Energiron 工艺只需要 1 座竖炉。Energiron 工艺竖炉内有催化剂,还原气体能直接在竖炉内部重整,将天然气和炉顶煤气转化为氢,利用氢还原铁氧化物。Midrex 工艺竖炉没有重整功能,必须配备重整装置。

另外, Midrex 工艺拥有独立的重整装置,相对容易

控制还原气体质量,但改变还原气体种类时,重整装置也需随之改变。HYL/Energiron 工艺采用自重整,控制还原气体质量相对较难,但更改还原气体种类时,只需调整操作参数,无需重新设计建造重整装置。

2.2 原料区别

直接还原工艺原料中所有的杂质和脉石均保留在 DRI 产品中,为减少对后续电炉炼钢工艺的影响,通常要求原料品位尽可能高、杂质尽可能少,铁矿石品位一般要求在 67% 以上。

Midrex 工艺中球团或块矿的 S 品位建议控制在 0.008% 以下, TiO_2 品位控制在 0.15% 以下。S 品位过高会降低重整炉的能力, TiO_2 品位过高对还原性不利。Energiron 工艺在竖炉内进行重整,使用金属铁作为重整反应的催化剂,因此对原料的 S 品位无过多要求,但要求 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 品位在 0.2% 以下。

2.3 工艺特性区别

Midrex 工艺压力 0.2~0.3 MPa, HYL/Energiron 工艺竖炉压力 0.6 MPa 左右^[19]。另外, Midrex 工艺采用的还原气体中含有较多 CO, CO 还原铁氧化物的过程放出大量热,球团易发生黏结,竖炉内温度一般控制在 850~900 °C; HYL/Energiron 工艺采用的还原气体中含有较多 H_2 , H_2 还原铁氧化物吸收大量热, HYL/Energiron 工艺的竖炉温度要高于 Midrex 工艺 50 °C 左右。

Midrex 工艺的氧化剂为炉顶气中的 CO_2 , 采用干重整方式进行气体重整,炉顶气处理未经过脱碳,还原气体中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 比 1.5 左右; HYL/Energiron 工艺采用湿重整的方式进行气体重整,氧化剂为水蒸气,因此炉顶气设置了脱碳处理,还原气体中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 比 5.5 左右^[20-21]。不同竖炉工艺的参数对比如表 2 所示。

表 2 不同竖炉工艺参数对比

工艺参数	Midrex	HYL-III	Energiron-ZR
操作压力	0.2~0.3 MPa	0.4~0.6 MPa	0.6~0.8 MPa
还原气原料	天然气	天然气	天然气、焦炉煤气
还原气处理	炉顶煤气裂解	水蒸气裂解	炉内自重整
还原气成分	$\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 1.5~1.7	$\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 5.6~5.9	$\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO}) \sim 6$, $\varphi(\text{CH}_4) > 25\%$
还原气温度	850~900 °C	900~960 °C	~1 050 °C
工序能耗	~387.63 kgce/t	~396.63 kgce/t	~405.64 kgce/t
还原铁原料成本	~2 394.18 元/t	~2 408.43 元/t	~2 400 元/t
产能	最大 200 万吨/年	最大 135 万吨/年	最大 250 万吨/年
作业率	90%	90%	90%
全铁质量分数	>90%	>90%	>90%
金属化率	~92%	~91%	94%~96%
碳质量分数	2.0%~3.5%	1.5%~2.0%	2%~4%
硫质量分数	<0.02%	<0.02%	<0.02%
磷质量分数	<0.02%	<0.02%	<0.02%

3 Midrex 和 HYL/Energiron 工艺应用

3.1 Midrex 工艺应用

自 1969 年以来,全球已有 21 个国家建造了近 100 个 Midrex 竖炉^[15],同时陆续有多家钢铁企业采用 Midrex 工艺以应对全球低碳减排趋势。

1) 蒂森克虏伯公司。Midrex 技术公司和 Paul Wurth 合作,拟为蒂森克虏伯欧洲公司建造一个年处理量 250 万吨的 Midrex FlexTM 直接还原厂,计划于 2026 年底启动。工厂初期利用天然气添加 50% 或更多 H_2 作为还原剂,逐步向 100% H_2 过渡,预计 2027 年实现全氢冶炼。此外,该直接还原厂拟结合 SMS 公司的熔融技术,显著提高运行效率,每年减少 CO_2 排放超过 350 万吨。

2) 神户制钢及三井物产。2023 年 4 月,日本神户制钢、三井物产与阿曼共同合作在阿曼开发低碳项目,项目采用 Midrex Flex 工艺,生产规模为 DRI 年产量 500 万吨。项目初期还原剂采用天然气,并逐步向 H_2 过渡,同时结合 CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) 技术,进一步减少碳排放。

3) 瑞典 H_2 Green Steel 企业。Midrex 和 Paul Wurth 与 H_2 Green Steel 展开合作,建设 100% 使用 H_2 的 DRI 工厂,通过使用可再生电力驱动的绿色 H_2 取代煤炭,可实现碳减排高达 95%。该工厂年产 210 万吨 DRI 和热压铁块 (HBI),计划 2025 年投产、2026 年实现量产。

4) Tosyali 控股公司、Metalloinvest 公司以及米哈伊洛夫斯基·HBI 公司近年均有利用 Midrex 工艺建厂投产的规划,产能多在 200 万吨以上。

3.2 HYL/Energiron 工艺应用

工艺配置灵活是 HYL/Energiron 技术的突出特点,当一些地区天然气成本高或匮乏时,通常采用焦炉煤气或其他碳氢化合物来代替。目前,多家钢铁企业采用该工艺向可持续发展转型。

1) 安赛乐米塔尔公司。安赛乐米塔尔公司加拿大 Dofasco 厂氢基直接还原项目于 2022 年 10 月破土动工,项目采用 Energiron ZR 工艺,设计年产量 250 万吨,初期还原气体采用天然气,后续随着技术开发,当拥有数量足够且具有成本效益的绿氢供应时,将采用氢气进行还原生产。该厂生产的 HDRI 将通过 Hytemp 气力输送系统进行处理。

2) 塔塔钢铁荷兰公司。塔塔钢铁荷兰公司于 2022 年 8 月宣布,拟在 Ijmuiden 建设直接还原厂以推动其公司绿色低碳发展,该厂同样基于 Energiron 工

艺,初期采用天然气,同时能够适应 H_2 。该工厂生产的DRI产品金属化率可达96%,随着 H_2 含量不同,碳含量在0.5%~4.5%范围内波动。

3) 河钢集团。2020年11月,河钢集团与特诺恩集团合作建设年产60万吨的Energiron直接还原设备,使用来自现有工厂产生的焦炉煤气和70%以上的 H_2 混合物作为补充气体。2023年5月,利用Energiron®直接还原工艺的河钢集团氢冶金示范工程实现安全顺利连续生产绿色DRI产品,DRI产品金属化率达到94%,生产的产品关键指标完全达到合格标准。

4) 宝钢集团。宝钢集团湛江钢铁氢基竖炉采用Energiron® ZR工艺,还原气体为天然气、焦炉煤气以及高达100%的 H_2 ,设计年产量100万吨,产品金属化率高达96%。2023年12月23日,湛江钢铁氢基竖炉已经成功点火投产,与传统同等规模铁水产量的全流程高炉工艺相比,每年可减少碳排放量50万吨以上。

4 关键问题及应对策略

尽管目前国内外多家钢铁企业均开展了氢基竖炉直接还原工艺的项目开发,拥有明确的技术路线甚至有低碳产品输出,但在中国资源和能源条件下,该工艺的发展仍有诸多问题需要解决。

4.1 球团矿使用问题

氢基竖炉直接还原工艺通常与电炉炼钢工艺相配合,为降低电炉渣量,要求入炉球团矿铁品位67%以上,目前我国自产精矿产量和品质逐年下降,关于这类球团矿的产能几乎为0,缺少高品位球团矿是影响我国发展氢基竖炉直接还原技术的重要原因之一^[22-24]。同时,竖炉冶炼用氧化球团低温还原粉化、高温还原膨胀以及高温黏结问题也是国内外钢铁企业研发的重点,一般要求^[25]球团的低温还原粉化率(+6.3 mm)大于80%,膨胀指数低于10%。

首钢利用消石灰生产高铁低硅碱性球团,球团矿铁品位达到66%^[26]。另外,利用国内外有利资源建立多样化、稳定的原料供应体系,开发新技术有助于球团矿品位的提高^[27],生产熔剂性球团和镁质球团有助于球团矿冶金性能的改善。有专家学者表示,可以考虑开发对球团矿品位要求没有那么高的工艺,例如浦项制铁的HyRex流化床氢冶金工艺以及普锐特冶金技术公司的HYFOR技术,直接利用粉矿进行氧化铁还原。

4.2 纯氢还原问题

氢气还原铁氧化物为强吸热反应,利用氢气还原会导致竖炉内部出现热量不足、温度分布不均的现象,

通过增加预热装置或改进工艺实时向反应系统补充热量,有利于反应过程的稳定进行。同时氢气具有独特的物理性质(密度小、易扩散、爆炸性等),如何安全有效地加热纯氢气体,如何改进技术使得炉管材料具有抗高温、抗氢脆失效问题的特性同样需要解决。因此研发应该聚焦在氢气加热专用材料和装备上,通过工艺突破,满足氢气加热过程中对材料及装备的较高要求。

4.3 绿氢制备问题

目前制氢方式主要有化石能源、化学品、工业副产以及电解水制氢,其中以化石能源制氢发展最为成熟且经济,但未来绿氢制备是钢铁行业实现氢基竖炉大规模生产、低碳可持续发展的基础,如何发展高效、大规模的水电解制氢技术及装备是重中之重^[28]。电解水制氢技术主要有碱性电解水、质子交换膜、固体氧化物电解三种,其中碱性电解水虽已工艺成熟但其能源效率低、能耗高;质子交换膜和固体氧化物电解虽未实现商业化,但能耗低、能源转换效率高,可以考虑加大技术开发,在水电解过程中降低贵金属电催化剂等材料的成本、操作环境温度及压力、提高反应过程中组件的耐用性能以及电池反应接触面积等方面作出努力,从而提高电解和氢气生产效率,扩大电解水制氢规模^[29-30]。

4.4 成本问题

制备绿氢需要利用可再生能源,需要建设大功率太阳能和风能发电站,还需建设电解水制氢的电解厂,需要投入大量资金。因地制宜,在太阳能和风能资源丰富、电价足够低的地区可以优先发展氢基竖炉工艺。同时,氢气的大量储存和运输难度较高且消耗成本巨大,目前较为成熟的储运方式是液化或高压。氢气还原为吸热反应,补热过程中采用过量氢气,同样会提高整体成本^[30]。如何降低制氢成本,是氢基竖炉工艺持续长久发展的关键因素。

5 结论与展望

国内外钢铁企业广泛应用氢基竖炉直接还原技术实现低碳减排,其中Midrex和HYL/Energiron两种工艺相对成熟,其对原料条件和还原气种类的适应性较强,是国内外多家钢铁企业认可并采纳的工艺技术。蒂森克虏伯、神户制钢等均与Midrex®公司进行合作,建造直接还原厂,采用部分或全部氢气进行冶炼;安赛乐米塔尔、塔塔以及国内的河钢和宝钢集团等采用HYL/Energiron工艺,作为钢铁厂转型的主要手段。

为应对“双碳”的严峻形势,真正实现绿色发展,

还需要不断解决存在的关键问题,突破技术瓶颈。总体而言,气体制备将逐步向绿色低碳、高效安全的方向发展;原料制备将逐步趋向于优质稳定化;工艺也需不断优化与改进。

基于此,对氢基竖炉直接还原工艺的发展提出几点展望:

1) 在我国目前的资源条件下,采用焦炉煤气的氢基竖炉技术仍然是主流工艺,但大规模绿色制氢是未来能源发展的主要方向,开发更高效、更低成本的制氢技术是实现真正可持续发展的关键环节,同时气体的储运安全性也需逐步提高,提供大规模、廉价氢气将有利于推动氢基直接还原工艺的进步。

2) 立足国内现有资源及技术水平,在铁矿资源品位较低、复合伴生矿比例高、存在大量难选铁矿的情况下,采取国内、国际资源协调并进的方式建立直接还原工艺原料供应体系,保证原料的优质化和稳定化是发展直接还原工艺必不可少的条件。

3) 加大技术研发,包括提高球团矿入炉品位、减少冶炼过程中氧化球团高温黏结、解决氢气还原强吸热引起的炉内温度不均问题以及开发大规模绿氢制备技术和降低绿氢制备成本等。

参考文献:

[1] 阚杰. 中国钢铁产业竞争力研究[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2019.

[2] 王国栋,储满生. 低碳减排的绿色钢铁冶金技术[J]. 科技导报, 2020, 38(14):68-76.

[3] 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.

[4] 杨天钧,张建良,刘征建,等. 关于新形势下炼铁工业发展的认识[J]. 炼铁, 2020, 39(5):1-9.

[5] TANG J, CHU M S, LI F, et al. Development and progress on hydrogen metallurgy[J]. International Journal of Metallurgy and Materials, 2020, 27(6):713-723.

[6] 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]. 炼铁, 2023, 58(8):25-31.

[7] 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.

[8] 李峰,储满生,唐珏,等. 非高炉炼铁现状及中国钢铁工艺发展方向[J]. 河北冶金, 2019(10):8-15.

[9] 邱梓洋,王淇,王义松,等. 典型的气基竖炉直接还原工艺[C]//中国金属学会能源与热工分会. 第十一届全国能源与热工学术年会论文集. 2021:629-635.

[10] 南铁玲. Midrex 气基直接还原工艺的发展[J]. 工业加热, 2011, 40(6):13-16.

[11] 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.

[12] 王岩,郝素菊. 我国直接还原工艺的发展及评述[J]. 南方金属, 2016(2):4-6.

[13] DR-ING HANS BODO LÜNGEN, NEUSS. History, developments and processes of direct reduction of iron ores [C]//Proceedings of 8th ECIC European Coke and Ironmaking Congress & 9th ICSTI International Conference on Science and Technology of Ironmaking. 2022:1-18.

[14] 应自伟,储满生,唐珏,等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析[J]. 河北冶金, 2019(6):1-7.

[15] The World Leader in Direct Reduction Technology | Midrex Technologies, Inc[EB/OL]. <https://www.midrex.com/>.

[16] 袁冬冬,刘谭璟,周强. 直接还原铁生产概况及工艺评述[C]//2014年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会文集(下). 2014:370-375.

[17] 潘聪超,庞建明. 氢冶金技术的发展溯源与应用前景[J]. 中国冶金, 2021, 31(9):73-77,129.

[18] 赵芸芬. 2021年全球直接还原铁产量再创新高[N]. 世界金属导报, 2022.09.26(A06).

[19] 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.

[20] 周和敏,郝晓东,杨光浩,等. 纯氢竖炉还原及高纯材料制备工艺技术开发[C]//2022非高炉高峰论坛. 富氢氢基竖炉直接还原会议. 2022:79-93.

[21] 余长春,李然家,周红军. 气基直接还原铁还原气制造探讨[C]//2018年非高炉冶炼创新发展论坛. 2018:151-156.

[22] 徐万仁,朱仁良,毛晓明,等. 国内外氢冶金发展现状及需要研究解决的主要问题[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集:2. 炼铁与原燃料. 北京:冶金工业出版社, 2022:507-519.

[23] 曹朝真,张福明,毛庆武,等. 竖炉直接还原技术若干问题的探讨[C]//中国金属学会. 2014年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会文集(下). 2014:384-392.

[24] 张辉,李志斌,刘沛江,等. 鞍钢带式机球团生产中优化配矿的研究与应用[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3):103-109.

[25] 张福明,曹朝真,徐辉. 气基竖炉直接还原技术的发展现状与展望[J]. 钢铁, 2014, 49(3):1-10.

[26] 青格勒,黄文斌,安钢,等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(1):119-126.

[27] 朱德庆. 低碳绿色钢铁炉料制备技术现状与前景[C]//2022非高炉高峰论坛:富氢氢基竖炉直接还原会议. 2022:125-157.

[28] 林安川,阴树标,朱羽,等. 钢铁工艺流程概述及发展方向初探(下篇)[J]. 云南冶金, 2021, 50(5):119-128.

[29] 白佳凯,李朋喜,乔东伟. 水电解制氢技术现状及展望[J]. 现代化工, 2023, 43(增刊1):63-65.

[30] 车彦民,曹莉霞,刘金哲. 氢的大规模制备及在钢铁行业的应用和展望[J]. 中国冶金, 2022, 32(9):1-7.

引用本文: 王莹,何志军,陈妍,等. 氢基竖炉直接还原工艺发展现状及思考[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4):212-216.