氢系燃料非高炉炼铁技术现状及发展趋势

叶恒棣[1,2]，郑富强[1,2]，胡 兵[1,2]，李文林[1]，刘 臣[1,2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205）

摘要："双碳"背景驱动下，氢系燃料的制备及利用与非高炉炼铁技术相结合已成为推动钢铁生产从传统的"碳冶金"向"氢冶金"转变的必然趋势。本文对非高炉炼铁技术的现状及氢系燃料在非高炉炼铁中的应用进行了分析，并在综合分析我国资源及能源特点的基础上，得出在煤、天然气、风光水电、生物质丰富的地区，分别发展煤制气、天然气蒸汽重整制氢、电解水制氢等技术，结合非高炉炼铁技术革新，有利于推动我国氢基竖炉直接还原工艺和氢系燃料多喷孔回转窑预还原－氢基熔融还原工艺的发展，可进一步促使钢铁行业节能减排。

关键词：氢系燃料；非高炉炼铁；CO_2减排；直接还原；熔融还原
中图分类号：TF5；TF55 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0010－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.002

Status and development trend of hydrogen-based fuel non-blast furnace iron-making technology

YE Hengdi[1,2], ZHENG Fuqiang[1,2], HU Bing[1,2], LI Wenlin[1], LIU Chen[1,2]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan*, *China*; 2. *National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System*, *Changsha* 410205, *Hunan*, *China*)

Abstract: Driven by the background of "carbon peaking and carbon neurality", the combination of the preparation and utilization of hydrogen-based fuels and non-blast furnace iron-making technology has become an irresistible trend for the transformation of iron and steel production from traditional "carbon metallurgy" to "hydrogen metallurgy". In this paper, the current status of non-blast furnace iron-making technology and the application of hydrogen-based fuels in non-blast furnace iron-making are analyzed. Based on a comprehensive analysis on the characteristics of resources and energy in China, it is concluded that in areas rich in coal, natural gas, wind-solar hydro-power and biomass, technologies such as coal-to-gas, natural gas steam reforming to hydrogen, and water electrolysis to hydrogen should be developed respectively. The innovation of non-blast furnace iron-making technology is conducive to promoting the development on direct reduction process of hydrogen-based shaft furnace and multi-nozzle rotary kiln pre-reduction-hydrogen-based smelting reduction process with hydrogen-based fuel in China, which can further promote energy conservation and emission reduction in the iron and steel industry.

Key words: hydrogen-based fuel; non-blast furnace iron-making; CO_2 emission reduction; direct reduction; melting reduction

钢铁工业作为国家建设的基础产业，为经济社会发展提供了重要支撑。2020年我国粗钢产量达到10.65亿吨，占世界总产量的57.14%[1]。目前，我国吨钢综合能耗为545.27 kgce，平均

收稿日期：2021－12－20；**修回日期**：2022－01－05
基金项目：湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ51007)
作者简介：叶恒棣(1964—)，男，教授级高级工程师，国家烧结球团装备系统工程技术研究中心主任、烟气多污染物协同治理及资源化湖南省重点实验室主任，从事钢铁烟气治理与冶金装备等领域的研究。
通讯作者：郑富强(1988—)，男，博士，工程师，从事铁矿烧结球团、直接还原、熔融还原等研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

吨钢 CO_2 排放量为 1.765 t，钢铁工业碳排放量占总排放量的 18% 以上[2]。在“碳达峰”、“碳中和”的目标驱动下，我国钢铁行业面临产能结构低碳升级转型的巨大挑战。我国钢铁生产普遍采用高炉—转炉的长流程生产工艺，碳排放主要集中在炼铁和焦化等铁前工序，其碳排放总量超过长流程总碳排放量的 70%[3-4]。因此，发展低碳短流程炼铁技术是当前钢铁工业实现“双碳”目标的重要途径。

氢系燃料是指含有氢气或含氢组分的燃料，用于钢铁生产过程可以有效减少碳排放，且能提高还原反应速度，是实现钢铁清洁低碳高效生产的重要燃料和还原剂[5]。非高炉炼铁工艺主要包括直接还原和熔融还原两大类，非高炉炼铁技术不依赖焦炭，无烧结和焦化工序，原料准备工序简单，可用含氢气体作为燃料和还原剂[6]。将氢系燃料与非高炉炼铁技术进行有机结合，是钢铁工业降低产品综合能耗、减少 CO_2 排放的必经之路。

我国钢铁生产从“碳冶金”转变为“氢冶金”是一个逐步推进的过程，钢铁生产的绿色转型需采用氢系燃料替代目前非高炉炼铁工艺中的燃料和还原剂，其通过技术和配套装备的优化和革新，提高氢系燃料在非高炉炼铁工艺中的比例，以发挥氢气还原铁矿原料的清洁性、高效性的最大潜能。本文从氢系燃料制备技术、氢系燃料在非高炉炼铁工艺中的应用现状及面临的挑战等方面，系统分析了我国氢系燃料非高炉炼铁技术的发展趋势。

1　氢系燃料直接还原现状及发展方向

直接还原是非高炉炼铁的主要方法之一。据 Midrex Technologies 统计，2020 年全球直接还原铁产量达到 1.044 亿吨，其中气基竖炉法占比达到 75.35%[7]。在双碳背景驱动下，气基竖炉直接还原 - 电炉冶炼短流程炼铁技术已成为我国钢铁企业实现“碳达峰”、“碳中和”目标的主要方法之一，也是政策鼓励下作为长流程炼铁技术产能置换的主要炼铁方法之一。

1.1　氢系燃料的竖炉直接还原

典型的气基竖炉直接还原一般以高品质铁精矿球团为原料，其 TFe 质量分数不小于 65%，以天然气为热量及还原剂来源，天然气经过重整、加热后通入竖炉，与铁矿球团中的铁氧化物发生气固还原反应[8]。铁矿氧化球团在竖炉内向下运动的过程中，因料柱挤压和球团相互运动，会导致球团的破碎与磨损，影响料层透气性和还原反应的进行，因此，一般要求铁矿氧化球团的抗压强度大于 2 000 N/P，耐磨性小于 5%，小于 5 mm 粒度的球团占比不超过 2%。球团中的铁氧化物在还原过程中会析出活性较高的金属铁晶粒，易造成球团之间的相互黏结，一般气基竖炉内温度不超过 950 ℃。由于 CO 还原 FeO 的反应为放热反应，因此，当还原剂以 CO 为主时，竖炉内还原温度一般控制在850 ~ 900 ℃[6]。

氢系燃料中主要还原剂组分为 H_2 和 CO，铁氧化物被 H_2 和 CO 还原时，在还原温度小于 570 ℃，铁氧化物的还原历程为 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe$，主要发生的还原反应有：

$$3Fe_2O_{3(s)} + H_{2(g)} = 2Fe_3O_{4(s)} + H_2O_{(g)} \quad (1)$$

$$Fe_3O_{4(s)} + 4H_{2(g)} = 3Fe_{(s)} + 4H_2O_{(g)} \quad (2)$$

$$3Fe_2O_{3(s)} + CO_{(g)} = 2Fe_3O_{4(s)} + CO_{2(g)} \quad (3)$$

$$Fe_3O_{4(s)} + 4CO_{(g)} = 3Fe_{(s)} + 4CO_{2(g)} \quad (4)$$

当还原温度大于 570 ℃时，铁氧化物的还原历程为 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$，铁氧化物除了发生反应(1)和反应(3)外，还会发生以下还原反应：

$$Fe_3O_{4(s)} + H_{2(g)} = 3FeO_{(s)} + H_2O_{(g)} \quad (5)$$

$$FeO_{(s)} + H_{2(g)} = Fe_{(s)} + H_2O_{(g)} \quad (6)$$

$$Fe_3O_{4(s)} + CO_{(g)} = 3FeO_{(s)} + CO_{2(g)} \quad (7)$$

$$FeO_{(s)} + CO_{(g)} = Fe_{(s)} + CO_{2(g)} \quad (8)$$

式(1) ~ (8)铁氧化物与 H_2 和 CO 发生还原反应的热力学平衡图见图 1 所示。

由图 1 可知，Fe_2O_3 还原为 Fe_3O_4 所需的 H_2 和 CO 平衡分压均很低，反应易发生。当还原温度低于810 ℃时，铁氧化物被 H_2 还原的平

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

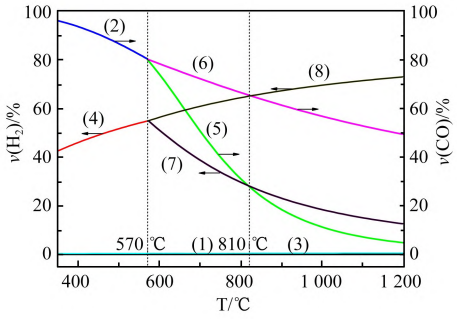


图1 铁氧化物与 H_2 和 CO 发生还原反应的热力学平衡图

Fig. 1 Thermodynamic equilibrium of the reduction reaction of iron oxide with H_2 and CO

衡分压远高于被 CO 还原的平衡分压，说明在810 ℃以下，CO 的还原能力大于 H_2。当还原温度高于810℃时，铁氧化物被 H_2 还原的平衡分压开始低于铁氧化物被 CO 还原的平衡分压，且随着温度的继续升高，二者差距逐渐加大，这说明在810 ℃以上，随着温度的升高，H_2 的还原能力大于 CO。当还原温度低于810 ℃时，铁氧化气基竖炉直接还原过程一般反应温度达到850～950 ℃，在还原反应过程工艺中，会经历 FeO 阶段，FeO 还原为 Fe 的反应难度最大，所需的 H_2 和 CO 平衡分压最高，在此温度范围，H_2 的还原能力强。因此从热力学角度考虑，提高氢系燃料中 H_2 的体积分数和 H_2/CO 比例，均有利于铁氧化物的快速还原。

在 CO 还原铁氧化物的反应中，除 Fe_2O_3 到 FeO 阶段的还原反应为吸热反应外，其他反应均为放热反应，而 H_2 还原铁氧化物的反应均为吸热反应外。因此，为了提高铁氧化物的还原反应速率，工艺需要在提高氢系燃料中 H_2 体积分数的同时，通过铁矿热装和将氢系燃料预热至足够高的温度再通入竖炉进行还原反应。在气基竖炉还原反应温度范围内，提高氢系燃料中H_2/CO比例，还原气体的利用率会有所降低，能耗升高。工艺中提高氢系燃料入炉温度和铁矿热装温度，均能提高还原气体利用率，降低能耗[8]。

铁矿球团在气基竖炉内还原时，会发生铁矿球团的还原膨胀或者破裂粉化，影响气基竖炉内料柱的透气性和气流分布。氢系燃料直接还原过程中，H_2 的分子半径远远小于 CO，还原过程中的扩散能力强于 CO，且 H_2 还原产生的金属铁多在铁氧化物颗粒原位生成，以结构紧密的块状和板状为主，不会对周边颗粒产生太大影响。CO 还原产生的金属铁则以结构疏松的纤维状形式生长，容易对周边颗粒形成推动和挤压，造成体积膨胀和产生裂纹[8]。因此，提高氢系燃料中 H_2 的体积分数和 H_2/CO 比例，有利于降低铁矿球团的还原膨胀率，保证料柱的透气性和气流的稳定分布。

1.2 天然气竖炉直接还原现状

天然气气基竖炉直接还原是以天然气作为氢系燃料的主要来源进行直接还原铁生产的工艺，典型的天然气竖炉直接还原工艺包括 MIDREX 法和 HYL/Energiron 法。近3年全球气基竖炉直接还原铁产量及占比见表1所示。

表1 近3年全球气基竖炉直接还原铁产量及占比

Table 1 Global gas-based shaft furnace direct reduction production and proportion in last 3 years

年份/年	MIDREX		HYL/Energiron		其他	
	产量/(1×10^4 t)	占比/%	产量/(1×10^4 t)	占比/%	产量/(1×10^4 t)	占比/%
2018	6 180.14	77.20	1 577.69	19.71	247.53	3.09
2019	6 540.05	79.80	1 426.92	17.41	228.58	2.79
2020	6 262.13	79.60	1 294.56	16.46	310.31	3.94

1.2.1 MIDREX 法生产直接还原铁

MIDREX 法直接还原铁生产工艺流程见图2。截止2020年，全球采用 MIDREX 法生产直接还原铁的工厂共有76家，共计96座竖炉，直接还原铁产能达到 9.269×10^7 t。2020年 MIDREX 法直接还原铁产量为 6.262×10^7 t，占全球直接还原铁总产量的60.0%，占全球气基竖炉直接还原铁总产量的79.6%。典型 MIDREX 还原气中 H_2 体积分数较低，H_2/CO 比例为1.55。含 CO_2 的炉顶气体与 CH_4 混合、预

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

热后在重整炉内会发生 CH_4 的重整反应，获得高 CO 体积分数的还原气，在加热过程中易析出碳粉而易导致设备损坏，与铁矿发生还原反应时易发生黏结，须安装破碎装置。炉内气体压力低，导致还原反应速度慢，铁矿球团在炉内停留时间长达 10 h[9]。

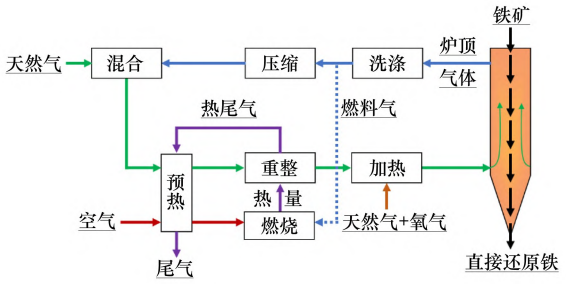


图 2　MIDREX 法直接还原铁生产工艺流程

Fig. 2　Direct reduced iron production process of MIDREX method

为了实现低碳炼铁，MIDREX 公司开发了氢气代替部分天然气或纯氢直接还原的新工艺——Midrex H_2® 的工艺。该工艺利用废热、电力或天然气等较清洁的热源，且在还原气体中添加一定量的天然气，用于维持所需的还原反应温度，每生产 1 t 直接还原铁，会消耗 550 Nm^3 的 H_2 和 50 Nm^3 的天然气。若采用 100% 纯氢直接还原工艺，则生产的直接还原铁在电炉炼钢过程中需实现无碳熔铁，含碳量低会导致钢的熔点升高，必将增加电炉炼钢能耗。因此，在 Midrex H_2® 直接还原过程中添加部分天然气可生产出含碳量为 1.4% 左右的直接还原铁，可满足电炉炼钢的要求[10]。

1.2.2　HYL/Energiron 法生产直接还原铁

HYL-Ⅲ法直接还原铁生产工艺流程如图 3 所示。HYL-Ⅲ法采用天然气蒸汽重整技术。因此，还原气体中含氢量较高，H_2/CO 比例可达 5.6 ~ 5.9，当还原气体入炉温度为 930 ℃时，还原温度高、反应速率快，且铁矿炉料不易发生结块[11]。

为了扩大还原气体来源、简化工艺流程，墨西哥 HYL 公司和意大利达涅利公司开发出可直接使用天然气、焦炉煤气、煤制气、合成气等为还原气的零重整直接还原竖炉，即

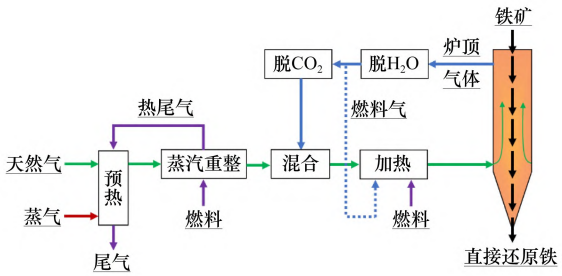


图 3　HYL-Ⅲ法直接还原铁生产工艺流程

Fig. 3　Direct reduced iron production process of HYL-Ⅲ method

Energiron ZR 技术[6,12]。Energiron ZR 法直接还原铁生产工艺流程如图 4 所示。该工艺还原气源经加热炉加热至 950 ℃，然后在反应器入口注入氧气进行部分氧化，使还原气源温度升高至 1 050 ℃。通入竖炉的加热气体在金属铁的催化作用下发生重整反应，重整后的 H_2 和 CO 与铁氧化物发生还原反应，竖炉内部在氧化剂（H_2O、CO_2）、碳氢化合物、还原剂（H_2、CO）、高温、铁氧化物、金属铁催化剂存在的复杂环境下，气体重整反应和铁氧化物的还原反应同时发生，提高了能量的利用效率。炉顶煤气经过清洗和 CO_2 脱除后，其余还原气体被循环利用，提高了还原气体的利用率。此外，竖炉内的高压操作减少了炉顶气体中铁矿粉尘量，减小了铁矿消耗[13]。

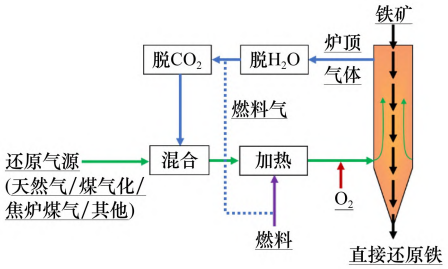


图 4　Energiron ZR 法直接还原铁生产工艺流程

Fig. 4　Direct reduced iron production process of Energiron ZR method

截止 2020 年，全球采用 HYL/Energiron 法生产直接还原铁的工厂共有 20 家，共计 25 座竖炉，直接还原铁产能达到 2 435 万吨。2020 年 HYL/Energiron 法直接还原铁产量为 1 294.56 万吨，占全球直接还原铁总产量的 12.4%，占全球气基竖炉直接还原铁总产量的 16.64%。2020 年 11 月 23 日，河钢集团与卡斯特兰萨 –

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

特诺恩签订了包括建设一座年产 6×10^5 t 的 Energiron 法直接还原铁生产工厂，这将成为全球首座使用富氢气体的直接还原铁生产线，有望将每吨直接还原铁的最终 CO_2 净排放降低至 125 kg。

1.3 煤制气竖炉直接还原现状

我国天然气资源相对缺乏，煤炭资源丰富。因此，发展煤制气直接还原炼铁工艺是符合我国目前能源特点的必然选择。一般的煤制气竖炉直接还原是将非焦煤和氧气经气化炉气化，然后对还原气体进行净化，并与除尘脱水和脱除 CO_2 的炉顶煤气进行混合、加热后通入竖炉内进行铁矿原料的还原[14]。煤制气直接还原炼铁工艺流程如图 5 所示。

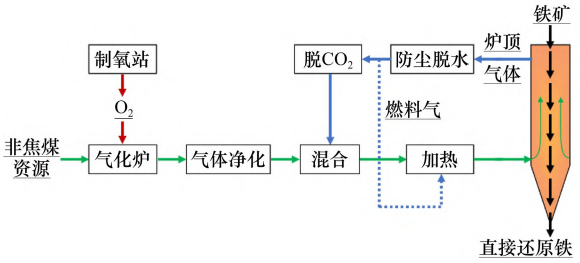


图 5 煤制气直接还原炼铁工艺流程

Fig. 5 Coal-to-gas direct reduction ironmaking process

1999 年 Midrex 公司在南非 SALDANHA 钢厂建设了世界第一套 COREX 与 Midrex 结合的短流程炼铁工艺 MXCOL 技术，将 COREX 生产过程产生的大量还原煤气经过脱除 CO_2 后经过热交换和加热炉进入 Midrex 竖炉用作还原气体生产直接还原铁[6]。Energiron 法可使用焦炉煤气、煤制气等作为还原气体生产直接还原铁，也属于煤制气竖炉直接还原铁生产技术。2013 年中晋太行矿业有限公司引进德国 MME 公司的 PERED 气基直接还原技术，与中国石油大学和北京科技大学联合攻关，于 2017 年 8 月 24 日全面开工建设我国第一套 3×10^5 t/a 焦炉煤气直接还原铁的 CSDRI 竖炉流程生产线，并与 2020 年 12 月投产，填补了中国气基竖炉直接还原技术的空白[15]。我国大型煤制气工艺及装备已十分成熟，并在化工行业得到长期应用。依托我国丰富的煤炭资源，凭借成熟的煤制气工业化实践，结合气基竖炉直接还原技术与碳捕获、利用、封存的 CCUS 技术，可为我国当下大规模发展短流程炼铁提供必要基础。

1.4 回转窑直接还原现状

回转窑直接还原是在连续转动的回转窑中用煤将含铁物料还原为海绵铁的过程。传统回转窑直接还原有“一步法”和“二步法”，其具体工艺流程如图 6 所示。

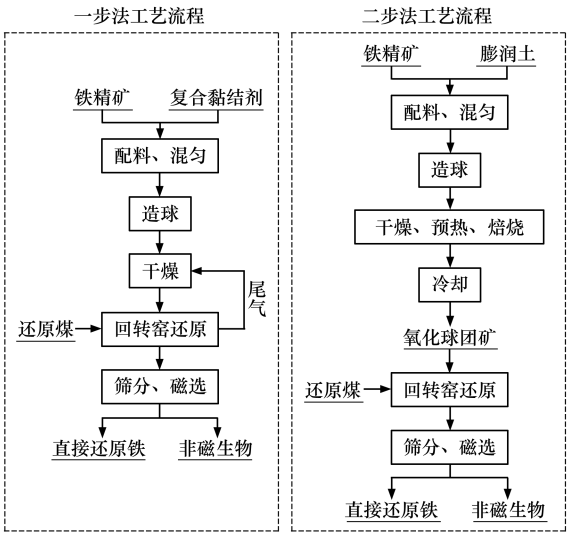


图 6 回转窑直接还原工艺流程

Fig. 6 Direct reduction process of rotary kiln

截止 2020 年，全球回转窑直接还原铁产量达到 2.547×10^7 t/a，占直接还原铁总量的 24.4%，主要分布在印度、南非、巴西及中国等地。我国曾在新疆富蕴、北京密云、天津、福州等地建设 7 条回转窑直接还原铁生产线，但因原料和燃料成本、环保政策等原因均停产。为降低回转窑直接还原铁生产的能耗和碳排放，可采用高挥发分的煤进行铁矿原料的还原，高挥发分煤种含有大量含氢物质，在高温下热解释放出氢气，可促进铁矿原料的还原。中冶长天国际工程有限公司自主研发的氢系燃料多喷孔回转窑直接还原技术，采用内配含氢组分复合球团、生物质精准喷吹、高产高效多喷孔回转窑、回转窑在线精准测温等创新技术，实现了回转窑直接还原过程窑内多点供风供气，可精准控制回转窑内还原气氛和温度场分布，改变了氢系燃料与窑内物料的传热传质方式，实

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现了铁矿原料的低温快速还原。以海砂矿为原料，与传统回转窑直接还原工艺相比，还原温度降低 100 ℃，其还原时间缩短 30 min，C/Fe 摩尔比降低 0.8[17]。

2　氢系燃料熔融还原炼铁现状及发展方向

熔融还原是指在高温熔融状态下进行铁矿的还原、熔炼的方法。该炼铁技术可以不依赖焦炭，直接采用块矿或矿粉，能省去烧结或球团工序，并可采用全氧，能产生高热值煤气，且产生的铁水与高炉铁水的成分和温度基本相同，可直接供转炉炼钢用。目前主要的熔融还原工艺包括 COREX、Finex、HIsmelt 等。

2.1　COREX 工艺

COREX 工艺是一种将气基竖炉和高炉炉缸结合，采用铁矿石和非焦煤直接生产铁水的技术。铁矿原料和熔剂从竖炉顶端加入，在下降过程中被竖炉中从下而上的还原气还原至金属化率为 70% 以上的海绵铁，然后进入熔融气化炉。煤块从熔融气化炉顶加入，下降过程被温度高达 1 050 ℃左右的炉顶煤气干燥、裂解、干馏、焦化，形成半焦固定床，保证了熔融气化炉内还原气体在料层中的穿过。海绵铁从半焦固定床上部往下运动的过程中，逐渐被进一步还原、熔化，并发生渗碳反应后进入炉缸，最终形成炉渣和铁水被排出。熔融气化炉风口鼓入的氧气与半焦反应生成高温煤气，穿过料层后从熔融气化炉顶部排出。当温度达到 1 050 ℃左右，炉顶煤气中 CO 和 H_2 的体积分数总和超过 90%，冷却至 800 ~ 850 ℃后经除尘进入还原竖炉用作铁矿原料的还原气体[18-19]。

COREX 工艺经过不断优化发展至 COREX-C3000 型。2007 年和 2010 年，宝钢通过改进布料装置、炉体、耐材、冷却系统等，在上海罗泾分别建设两条设计产能为 1.5×10^6 t/a 的 COREX-C3000 熔融还原生产线并投产。因为原料和燃料成本等问题搬迁至八一钢厂，于 2015 年成功出铁，并一直在生产运行。COREX 熔融还原在原料和燃料具有优势的地区，其铁水生产成本比高炉具有一定优势。但是 COREX 工艺目前还存在竖炉还原后球团金属化率长期低于 50%，且竖炉内料层易局部过热结块，停炉清空周期短，熔融炉铁水产能未达到设计标准等问题。宝钢通过 AGD 管向竖炉中心补充煤气，将球团的金属化率提高至 70% ~ 90%，产能有所提高[6]。

熔融气化炉煤气中 CO 体积分数高，在竖炉中与铁矿发生还原反应大量放热，易导致局部过热结块。采用氢系燃料进行铁矿原料的预还原可以避免还原反应放热量大导致的结块问题，且氢气还原铁矿原料速率快，有利于提高球团金属化率。因此，可通过将熔融气化炉顶煤气转变为氢气，或者向高温炉顶煤气中加入部分冷氢气的方式，不但能将高温炉顶煤气降温至竖炉还原所需温度，还能增加还原气体中 H_2 的体积分数。将降温后的混合气体用作竖炉中铁矿原料的还原气体，是解决 COREX 工艺中金属化率低、局部结块、产能低等问题的有效途径。因此，基于氢系燃料竖炉还原是发展 COREX 熔融还原技术的关键和主要方向之一。

2.2　Finex 工艺

Finex 工艺是 1992 年韩国浦项和奥钢联在 COREX 基础上用流化床取代还原竖炉，并采用喷煤技术和煤气回收利用技术，联合开发的熔融还原技术。韩国浦项于 2007 年和 2014 年分别建成年产 150 万吨和 200 万吨的 Finex 生产线。Finex 工艺省去了烧结和球团工序，可以直接使用铁矿粉为原料，具有成本优势，但是 Finex 工艺目前需采用 TFe 质量分数在 61% 以上的铁矿粉，且为保证流态化还原的稳定性，对铁矿粉的粒度控制要求较高。另外，预还原铁矿粉的金属化率每增加 10%，燃料比可降低约 86 kg/t-$_{铁}$[6]。由此可知，提高煤气中氢气的体积分数，能有效改善流化床的预还原反应效率；提高煤气回收利用效率，能有效降低工序燃耗，这也是 Finex 工艺的主要发展方向之一。

2.3　HIsmelt 工艺

HIsmelt 是由澳大利亚力拓、美国纽柯、日本三菱、中国首钢合资开发的一种直接使用铁

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

矿粉和煤粉进行铁浴熔融还原的炼铁技术。2003年第一座HIsmelt示范工厂在澳大利亚Kwinana厂开始建设，并与2008年达到设计产能的85%，但由于原料成本高过生铁离岸价格，最终停产。2012年我国山东墨龙公司将Kwinana厂的HIsmelt装置搬迁至国内，对炉缸内耐材、铁矿粉的预热、物料喷枪、煤气利用系统进行了优化和改进，并完成设计和建设。目前已可以对赤铁矿、磁铁矿实现稳定生产，也进行了钒钛磁铁矿的冶炼试验，其添加量可达到70%~80%[6,19]。HIsmelt工艺可适应普通铁矿、钒钛磁铁矿、海砂矿、高铝高硅铁矿、高磷铁矿等多种铁矿原料，且无需造块等预处理，生产工序相对简单。目前HIsmelt工艺的热量和还原剂主要以非焦煤提供，氢系燃料利用较少，碳排放较高。

熔融还原过程中，当C还原Fe_2O_3时，每生产1 mol Fe会消耗246 kJ的热量。如果在熔融还原过程中以H_2为还原剂实现铁矿原料的还原，则每生产1 mol Fe只消耗50 kJ的热量。因此，在熔融还原过程中利用氢系燃料作为还原剂不但能减少能量消耗，还能有效降低碳排放，极大的提高生产效率。北京建龙集团联合北京科技大学、东北大学等单位，在国内外众多非高炉炼铁技术基础上开发出氢基熔融还原的CISP工艺，并于2021年4月13日产出高纯铸造生铁。目前CISP工艺采用焦炉煤气喷吹技术，利用焦炉煤气中的氢气组分实现氢基熔融还原炼铁，验证了氢基熔融还原的可行性。

铁矿原料还原过程中，从Fe_2O_3至FeO的还原反应较容易进行，从FeO到金属铁的还原反应阶段难度最大。为降低熔融还原炼铁过程的能耗和碳排放，适宜采用氢系燃料多喷孔回转窑预还原与氢基熔融还原相结合的方式，具体流程见图7。

针对微细粒铁矿原料，工艺可通过增加预先制粒工序，保证铁矿原料在回转窑生产中的安全运行。同时，工艺可利用生物质燃料在回转窑中的可控分布实现生物质热分解与800~950 ℃段铁矿还原的高效耦合，并利用多喷孔

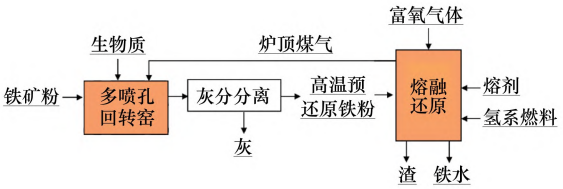


图7 氢系燃料多喷孔回转窑预还原－氢基熔融还原流程

Fig. 7 Pre-reduction of hydrogen-based fuel multi-nozzle rotary kiln-hydrogen-based smelting reduction process

回转窑温度场的精准监测与控制实现结圈的有效防控，提高回转窑预还原效率。氢系燃料多喷孔回转窑预还原－氢基熔融还原炼铁技术利用熔融气化炉煤气结合生物质在多喷孔回转窑中实现铁矿原料的预还原，在熔融炉余热余能高效利用的同时将铁矿原料较易发生的还原反应阶段提前完成；利用熔融炉高温高效的反应特点，采用焦炉煤气、煤制气、氢气等氢系燃料在熔融炉中进行铁矿原料还原难度大的阶段反应。该技术的开发和推广应用将使氢基熔融还原成为绿色炼铁技术的主要方法之一。

3 结 语

（1）气基竖炉直接还原是实现低碳炼铁的主要短流程技术。国外气基竖炉炼铁技术相对成熟，我国也在逐渐起步发展。根据我国资源及能源特点，应率先发展煤制气竖炉直接还原工艺，掌握相关核心关键技术后，逐步推进纯氢竖炉直接还原技术的开发和应用。纯氢竖炉内还原反应所需热量的高效供给和交换，以及在高温高压氢气条件下的竖炉长期高效稳定安全生产等是纯氢竖炉直接还原技术的主要研究方向。

（2）熔融还原工艺原料适应性广，适合我国铁矿资源“贫、细、杂”的特点。在熔融还原技术的掌握方面，我国已逐步走在世界前列。虽然煤基熔融还原适合我国“多煤少气”的能源特点，但在“双碳”目标的引导下，发展氢基熔融还原炼铁工艺刻不容缓。如何利用氢系燃料多喷孔回转窑实现铁矿原料的高效预热及预还原，如何实现氢系燃料在铁水熔池中均匀

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分散和快速还原铁氧化物，以及如何解决多喷孔回转窑和熔融还原炉之间的界面技术是氢基熔融还原炼铁技术的主要研究方向。

参考文献：

[1] 吕涛涛. 2020 年重点钢铁企业粗钢产量变化对钢材品种产量影响分析[J]. 冶金管理,2021(6):17 - 22.
LV T T. Analysis of the impact of changes in crude steel output of key iron and steel enterprises on the output of steel varieties in 2020[J]. Steel & Management,2021(6):17 - 22.

[2] 何坤,王立. 中国钢铁工业生产能耗的发展与现状[J]. 中国冶金,2021,31(9):26 - 35.
HE K,WANG L. Development and status of production energy consumption of China′s iron and steel industry[J]. China Metallurgy,2021,31(9):26 - 35.

[3] 郭琼. 面向未来的低碳绿色高炉炼铁技术发展研究[J]. 中国金属通报,2020(7):14 - 16.
GUO Q. Research on the development of low-carbon green blast furnace ironmaking technology facing the future[J]. China Metal Bulletin,2020(7):14 - 16.

[4] 孔令兵,郭培民,王磊,等. 喷吹的氢气在高炉内的还原行为[J]. 烧结球团,2020,45(6):1 - 4.
KONG L B,GUO P M,WANG L,et al. Reduction behavior of hydrogen injected in blast furnace[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):1 - 4.

[5] 刘臣,叶恒棣,魏进超,等. 钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析[J]. 烧结球团,2021,46(6):1 - 7.
LIU C,YE H L,WEI J C,et al. An analysis on green low carbon technology of ironmaking process in the steel industry[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):1 - 7.

[6] 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,2019,282(6):1 - 7.
YING Z W,CHU M S,TANG J,et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process[J]. Hebei Metallurgy,2019,282(6):1 - 7.

[7] 高建军,齐渊洪,严定鎏,等. 中国低碳炼铁技术的发展路径与关键技术问题[J]. 中国冶金,2021,31(9):64 - 72.
GAO J J,QI Y H,YAN D L,et al. Development path and key technical problems of low carbon ironmaking in China[J]. China Metallurgy,2021,31(9):64 - 72.

[8] 任素波,白明华,龙鹄,等. 气基竖炉直接还原技术及仿真[M]. 北京:冶金工业出版社,2018.
REN S B,BAI M H,LONG H,et al. Gas-based shaft furnace direct reduction technology and simulation[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2018.

[9] MILLNER R,ROTHBERGER J,OFNER H,et al. Further opportunities of competitiveness improvements for direct reduction plants[J]. BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte,2019,164(7):274 - 280.

[10] BOEHM C,CHEVRIER V,MILLNER R,et al. MIDREX H_2-the road to CO_2-free iron and steelmaking[C]//AISTech 2021. Cleveland USA: American Iron and Steel Institute,2021:1 - 5.

[11] JIANG X,WANG L,SHEN F M. Shaft furnace direct reduction technology-Midrex and Energiron[J]. Advanced Materials Research,2013,805 - 806:654 - 659.

[12] 闻思修. 一种新的直接还原技术——ENERGIRON 技术[J]. 烧结球团,2009,34(4):27.
WEN S X. A new direct reduction technology-ENERGIRON technology[J]. Sintering and Pelletizing,2009,34(4):27.

[13] 苏亚杰,牛强,杜英虎,等. 利用熔铁浴高温粗煤气冶炼 DRI 的能耗估算[J]. 烧结球团,2020,45(6):27 - 32.
SU Y J,NIU Q,DU Y H,et al. Estimation on energy consumption for smelting dri with high temperature crude gas in molten iron bath[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):27 - 32.

[14] 唐珏,储满生,李峰,等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金,2020,296(8):1 - 6.
TANG J,CHU M S,LI F,et al. Development status and future trend of hydrogen metallurgy in China[J]. Hebei Metallurgy,2020,296(8):1 - 6.

[15] 煤化工产业动态:标题新闻[J]. 煤化工,2017,45(5):59.
Coal chemical industry dynamics: headline news[J]. Coal Chemical Industry,2017,45(5):59.

[16] 邱冠周,姜涛,徐经沧,等. 冷固结球团直接还原[M]. 长沙:中南大学出版社,2001.
QIU G Z,JIANG T,XU J C,et al. Direct reduction of cold-bonded pellets[M]. Changsha: Central South University Press,2001.

[17] 胡兵,谢志诚,黄柱成,等. 钒钛磁铁海砂矿低温快速直接还原新工艺[J]. 烧结球团,2020,45(6):16 - 22.
HU B,XIE Z C,HUANG Z C,et al. A new process for rapid direct reduction by low temperature of marine placer containing vanadic titanomagnetite[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):16 - 22.

[18] 张志霞. Corex 熔融还原技术研究进展[J]. 河北冶金,2019,279(3):14 - 16.
ZHANG Z X. Research on corex smelting reduction tenichque[J]. Hebei Metallurgy,2019,279(3):14 - 16.

[19] 张向国,贾利军. 我国熔融还原炼铁技术发展现状及生产实践[J]. 冶金与材料,2019,39(4):90 - 91.
ZHANG X G,JIA L J. Development status and production practice of smelting reduction ironmaking technology in China[J]. Metallurgy and Materials,2019,39(4):90 - 91.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net