气基竖炉直接还原工艺发展现状及展望

蒋历俊，张 涛，郑 军，吴开基，翟晓波，李佳楣，高 雅
（中冶赛迪工程技术股份有限公司，重庆 401122）

摘要：钢铁工业碳减排是我国达成“碳达峰”、“碳中和”目标的工作重心，发展气基竖炉直接还原技术对实现我国钢铁工业低碳转型意义重大。本文介绍了 Midrex、HYL-III、Energiron-ZR 等典型的气基竖炉直接还原工艺流程及其技术特点，总结了我国当前气基竖炉直接还原发展现状，并对气基竖炉直接还原工艺的发展方向进行展望，提出提升竖炉产能、确保竖炉长效运行、开展全氢直接还原竖炉研究的建议，以期为我国钢铁工业低碳冶金技术发展提供参考。

关键词：直接还原；气基竖炉；Midrex；HYL-III；Energiron-ZR
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0018－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.036

Development status and prospect on direct reduction process of gas-based shaft furnace

JIANG Lijun, ZHANG Tao, ZHENG Jun, WU Kaiji, ZHAI Xiaobo, LI Jiamei, GAO Ya
(CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, Sichuan, China)

Abstract: Carbon emission reduction in the iron and steel industry is the focus of China's efforts to achieve the goals of "carbon peaking" and "carbon neutrality", and the development on direct reduction technology of gas-based shaft furnace is of great significance to realize the low-carbon transformation of China's iron and steel industry. The direct reduction process of typical gas-based shaft furnace and its technical characteristics, such as Midrex, HYL-III and Energiron-ZR, are introduced, the current development status on direct reduction of gas-based shaft furnace in China is summarized, the development direction on direct reduction process of the gas-based shaft furnace is prospected, and in order to provide reference for the development of low-carbon metallurgical technology in China's iron and steel industry, some suggestions are put forward to improve the production capacity of the shaft furnace, ensure the long-term operation of the shaft furnace, and carry out the research of all-hydrogen direct reduction shaft furnace.

Key words: direct reduction; gas-based shaft furnace; Midrex; HYL-III; Energiron-ZR

中国近年来的全球 CO_2 排放贡献率高约 30%，已成为最主要的 CO_2 排放国[1]。钢铁工业 CO_2 排放量占全国的 15%～17%，是我国推进实现“双碳”目标的重点行业[2-3]。我国钢铁生产以高炉—转炉长流程为主，生产每吨粗钢 CO_2 排放量高达 1.85～2.2 t[4-5]，其中高炉炼铁工序的 CO_2 排放量占比高达 70%[6-7]。以废钢为原料的电炉炼钢短流程生产每吨粗钢 CO_2 排放量仅约 0.40 t[5]，表现出显著的环保优势。然而，由于废钢资源短缺、废钢品质参差不齐，我国电炉粗钢年产量占比长期仅约 10%[8-9]，远低于世界平均水平(33%)[4]，这是导致我国钢铁工业 CO_2 排放

收稿日期：2023－02－02；**修回日期**：2023－04－28
基金项目：重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-BSX0032)；五矿集团科技专项经费资助项目(2021ZXD01)；中国中冶“181 计划”重大研发项目(90150933)
作者简介：蒋历俊(1993—)，男，博士，工程师，从事气基竖炉直接还原、冶金废气处理等领域研究。

浓度居高不下的重要原因之一。

直接还原铁较为纯净且成分稳定，能够有效地用作电炉炼钢优质原料及废钢调质剂[10]，但我国现有 DRI 产能仅百万吨级，无法满足国内每年上千万吨级的 DRI 需求量[11-12]。气基竖炉直接还原炼铁工艺是一种典型的氢冶金工艺，具有环境负荷小、工艺能耗低、生产规模大、生产效率高等优势。据报道，以天然气为还原剂生产的直接还原铁—电炉短流程生产每吨粗钢 CO_2 排放量约为 0.97 t[13]。气基竖炉直接还原工艺技术符合我国钢铁工业绿色低碳转型发展要求，对我国发展短流程炼钢、生产优质钢意义重大，是我国钢铁工业节能降耗、减少 CO_2 排放的重要发展方向。

本文就气基竖炉直接还原工艺的发展现状进行综述，总结了几种典型的气基竖炉直接还原工艺特点，并对气基竖炉直接还原工艺发展方向进行展望，以期为我国钢铁工业低碳冶金技术发展提供参考。

1　典型气基竖炉直接还原工艺

2016 年—2022 年世界直接还原铁产量中不同生产工艺占比情况如表 1 所示[14]。由表 1 可知，以 Midrex 及 HYL/Energiron 为主的气基竖炉直接还原工艺占比超过 70%，已成为世界上主流的气基竖炉直接还原工艺。

1.1　Midrex 工艺

Midrex 工艺由 Midrex 技术公司成功开发，现已被日本神户制钢公司收购，是现如今世界上总产量最大的直接还原工艺，其工艺流程如图 1 所示。Midrex 工艺主要包括了原料气重整系统、竖炉还原系统及排料系统[15]。标准的 Midrex 工艺使用天然气作为原料气，与部分除尘、加压后的炉顶气混合，经换热器预热后送入装有镍基催化剂反应管的重整转化炉，反应得到含 CO 及 H_2 共约 87% 的还原气，剩余部分的炉顶气用作重整转化炉的燃料气；还原气从竖炉中部的风口支管鼓入，与球团/块矿形成对流的气固两相流，经炉顶导出管排出；球团/块矿由炉顶装入，连续缓慢下行过程中被还原气加热、还原后得到直接还原铁，经下锥段冷却后排出，也可直接热压块成型，或直接热装热送至下一工序，如电弧炉等。Midrex 技术公司配套开发了 MxCol 工艺，使其可以灵活地使用天然气、煤制气、COREX 煤气等原料气。

Midrex 工艺回收了约 60%~70% 的炉顶煤气，循环利用了炉顶煤气中剩余的还原性气体（H_2、CO）。Midrex 工艺直接将洗涤除尘、加压后的炉顶煤气与天然气进行混合重整，充分利用了炉顶煤气中的 CO_2，无需设置炉顶煤气脱碳工序，且无需补充额外的氧化剂。由于主要发生 CH_4 与 CO_2 的重整反应，制得的还原气中 $n(H_2)/n(CO)$（n 为物质的量）约为 1.5 ~ 2.0。但需注意的是，由于采用炉顶气混合重整，Midrex 工艺对原料气和铁矿石中的硫含量均有严格要求，要求进入重整炉之前的还原气中硫质量浓度小于 4.3 mg/m^3，铁矿石中的硫质量分数小于 0.01%，这也导致该工艺无法直接使用焦炉煤气（占比 >30% 时）作为气源。Midrex 工艺竖炉操作压力通常为 0.1 ~ 0.2 MPa，入炉还原气温度通常为 850 ~ 950 ℃，温度过高会导致高温炉料在下降过程中发生黏结或开裂等现象，影响炉料顺行。Midrex 工艺与其他气基竖炉直接还原工艺相比，DRI 能耗较高，约为 10.2 ~ 11.0 GJ/t。

1.2　HYL-III 工艺

HYL-III工艺是由Hylsa公司在其早期开发的

表 1　2016 年—2022 年世界直接还原铁（DRI）产量各工艺占比（质量分数）

Table 1　Ratio of world DRI production by different processes from 2016 to 2022　　%

直接还原工艺	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
Midrex	64.8	64.8	61.5	60.5	60.2	59.5	57.8
HYL/Energiron	17.4	16.9	15.7	13.2	12.4	12.7	12.1
Pered	—	—	2.4	2.1	2.9	2.3	2.1
回转窑	17.5	17.6	20.2	24.0	24.3	25.4	0.1
其他	0.3	0.7	0.2	0.2	0.2	0.1	27.9

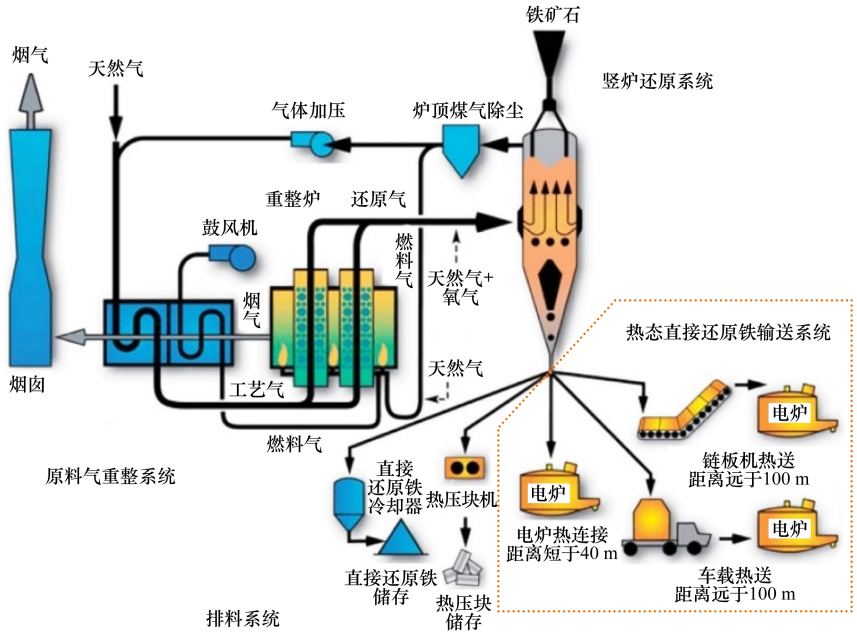


图 1 Midrex 工艺流程

Fig. 1 Midrex process flow

间歇式固定床罐式法(HYL-I 和 HYL-II)的基础上革新的一种高压逆流式移动床竖炉法直接还原工艺，于 1980 年开始生产直接还原铁，其工艺流程如图 2 所示。

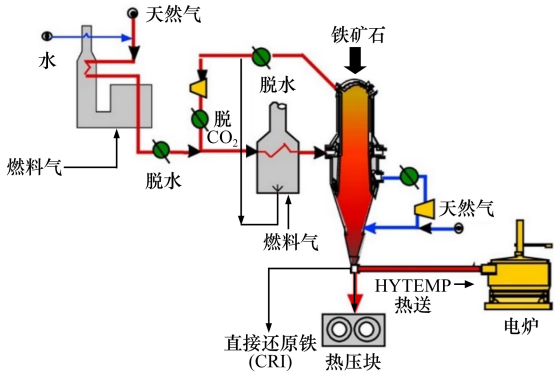


图 2 HYL-III 工艺流程

Fig. 2 HYL-III process flow

HYL-III 工艺以天然气为原料气，以水蒸气为裂化剂，在镍基催化剂作用下重整为富含 H_2 和 CO 的还原气，由于采用水蒸气重整工艺，还原气中的 $n(H_2)/n(CO)$ 比值可高达 5 ~ 6。相较于 Midrex 工艺，HYL-III 工艺采用独立的原料气重整系统及独立的炉顶煤气循环系统，重整反应器及催化剂不受炉顶煤气中粉尘和硫的影响，因而对铁矿石中的硫含量不作特殊要求，但由于使用镍基催化剂，对进入重整炉之前的气体硫含量有严格要求。原料气与水蒸气混合后在重整炉烟道对流换热器中预热至约 370 ℃，然后流经脱硫系统将原料气中的硫质量浓度降低至 4.3 mg/m^3 以下，脱硫后的原料气方能进入重整炉进行催化重整[16]。重整炉产生的粗还原气经过还原气洗涤器进行洗涤、冷却，以冷凝出过剩水蒸气，提高还原气的还原势。净化后的还原气与部分洗涤、加压、脱碳后的炉顶气混合送入加热炉进行预热，升温至 900 ~ 950 ℃，然后从竖炉本体中间部位进入还原段，与下降的球团矿形成逆向流动，并完成对球团矿的预热及还原过程。还原后产生的炉顶煤气首先经过洗涤，将其中的水蒸气冷凝分离，并脱除粉尘。洗涤后的净炉顶煤气被分为两部分，其中一部分作为燃料供应给还原气加热炉，另一部分经加压、脱碳后用作还原气补充气，与净化后的还原气混合后一并通入加热炉预热。HYL-III 工艺竖炉采用高压操作，通常为 0.5 ~ 0.6 MPa，可实现更好的过程控制、获得更高的生产效率，DRI 工艺能耗为 10.4 ~ 11.3 GJ/t。

1.3 Energiron-ZR 工艺

Energiron-ZR 工艺是 Tenova HYL、Techint 和 Danieli 公司基于 HYL-III 工艺联合开发的一种“零重整”直接还原工艺，其现今应用范围较 HYL-III 更为普遍，其流程如图 3 所示。Energiron-

ZR 工艺与 HYL-III 工艺的基本流程回路相同，基本流程回路的主要设备包括竖炉本体、CO_2 脱除装置、气体加热装置，区别在于 Energiron-ZR 工艺移除了原料气外部催化重整系统，将原料气直接通入竖炉内部，在高温直接还原铁中金属铁的催化作用下与 CO_2 和 H_2O 发生炉内原位重整反应，将原料气中的 CH_4 转化为 H_2、CO 还原性气体。炉内重整反应难以调节，CH_4 的重整转化率不高，还原气中的有效还原气（H_2+CO）体积分数通常仅约为 65%，导致相同竖炉产能的情况下炉内循环气量及系统能耗增加；但由于重整反应和还原反应均发生于竖炉内，提供给工艺流程的能量大部分被有效利用，向环境散失的热量少，因而该工艺的整体能效超过 78%，高于其他工艺流程（70%），以天然气为原料气的 Energiron-ZR 工艺生产的 DRI 能耗约为 10.0 ~ 10.5 GJ/t[17]。

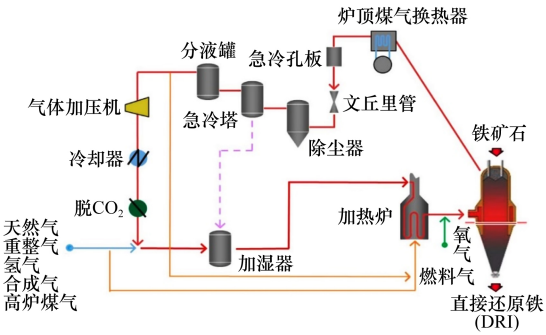


图 3　Energiron-ZR 工艺流程

Fig. 3　Energiron-ZR process flow

Energiron-ZR 工艺由于采用炉内原位自重整转化技术，移除了重整炉及催化剂，对原料气及铁矿石的硫含量均无特别要求，可选择天然气、焦炉煤气、合成气等气体作为原料气；当采用焦炉煤气作为原料气时，本身带入一部分 H_2 和 CO，能够共同补充还原反应消耗的 H_2 和 CO；但需注意当原料气中重烃比例较高（>6%）时，重烃成分容易在加热过程中裂解析碳，增加对气体加热炉的危害，该条件下采用HYL-III工艺更合适。Energiron-ZR工艺还原后的炉顶煤气温度通常为 400 ~ 500 ℃，通过换热器回收热量后再经冷却、洗涤以实现除尘、脱水，从炉顶气中回收的水进入冷凝回收系统，可供工艺加湿器使用。除尘、脱水后的炉顶气进一步加压、脱碳后与原料气混合作为工艺气进入加湿器，以提高工艺气体进入加热炉之前的湿度、抑制加热炉中的析碳反应。加热炉预热后的工艺气温度通常约为 900 ℃，但竖炉内发生的自重整反应主要为 CH_4 与 H_2O 的重整，产生的还原气中 $n(H_2)/n(CO)$ 比例较高（3 ~ 5），炉内整体反应吸热量大，导致炉内温度迅速下降，不利于铁矿石的还原，因而需向预热后的工艺气补充氧气，以发生部分燃烧将温度进一步提升至1 050 ~ 1 080 ℃，这使得 Energiron-ZR 工艺要求铁矿石具备良好的还原性能及较高的软化温度指标，并且为了弥补炉内温降造成的还原效率降低，其炉内操作压力较 HYL-III 更高，通常为 0.6 ~ 0.8 MPa，因而对设备要求更严格，投资费用更高。

2　我国气基竖炉发展现状

尽管我国从上世纪 70 年代开始研究气基竖炉直接还原工艺，但由于受气源及高品位铁矿石的制约，我国的气基竖炉直接还原工艺发展滞缓。近年来在碳减排政策推动的影响下，国内宝武集团、河钢集团及中晋太行矿业等公司已开始积极布局气基竖炉直接还原。我国现有的气基竖炉工程化项目如表 2 所示。由表 2 可见，当前我国气基竖炉直接还原工艺工业化应用仍依赖于引进国外技术包和主要设备，存在“卡脖子”问题，亟需开发具有自主知识产权的国产化气基竖炉工艺技术及装备。

3　气基竖炉直接还原展望

3.1　竖炉产能提升

提高竖炉产能具有诸多优势，如提高竖炉生产效率，降低成本，减少排放，降低基建投资，

表 2　国内气基竖炉工程化建设项目

Table 2　Industrial construction gas-base shaft furnace projects in China

企业	产能（万吨/年）	核心工艺	项目现状
中晋冶金	30	Pered 工艺	2020 年 12 月试生产
宝武集团	100（一期）	Energiron-ZR 工艺	2023 年 12 月投产
河钢集团	60（一期）	Energiron-ZR 工艺	2023 年 5 月投产

生产流程及直接还原铁产品质量稳定，能够应用更先进、更智能的生产设备等。自世界上第一座直接还原竖炉建设以来，全球竖炉单套规模主要为50万~100万t/a，其占比超过60%[18-19]。经过数十年的发展，单套竖炉的产能逐步扩大，由原来的10万吨级突破至百万吨级，近年来投产的竖炉单套产能多为100万~200万t/a，最高可达250万t/a。单套产能突破300万t/a甚至更高将是气基竖炉直接还原工艺下一阶段的重要发展目标。

3.2 竖炉长效运行

竖炉长期安全高效运行是提高生产效率、降低维护检修成本的重要前提，而导致竖炉停产维护的主要原因在于炉料下行受阻、炉衬耐火材料受损严重。为了确保竖炉长效运行，可围绕以下3点开展工作。

（1）炉料膨胀、黏结行为研究。球团矿在竖炉内高温还原过程中，由于物相转变、铁晶须、内应力、碳沉积等原因，会不可避免地发生体积膨胀[20]。当发生异常膨胀(体积膨胀>20%)时，炉料相互挤压加剧，黏结成块，严重影响炉料下行，导致透气性变差，降低直接还原铁质量；球团膨胀还会对炉衬耐材产生压力，造成耐材压溃，缩减耐材使用寿命。球团在高温还原过程中的膨胀行为主要受球团矿的组成特性、还原气组成及温度等因素影响[21]，基于上述因素耦合作用下的球团还原膨胀、黏结行为及膨胀抑制方法研究是确保竖炉长期顺行的重要研究方向之一。

（2）竖炉结构优化设计。球团矿的加热及还原过程是在竖炉上部还原段内完成，还原段的结构参数优化对于缓解炉料膨胀挤压具有重要作用。依据竖炉还原段不同高度上的铁氧化物还原行为及球团矿膨胀特性进行竖炉内型设计优化，同样有利于竖炉长效运行。

（3）竖炉用新型耐材开发。基于竖炉工艺特点，从竖炉耐火材料组成设计、结构调控、制备工艺、改性工艺方面入手，开发并制备长寿化、功能化的新型耐火材料能够从根本上解决因耐材受损导致的炉役缩减问题。与高炉工况条件相比，竖炉虽然工作温度较低，但其采用富含H_2和CO的强还原性气体，要求耐火材料具有高化学稳定性，即要求严格控制铁氧化物的含量。还原气中的H_2具有强扩散性、强还原性、高渗透等特点[22]，在带压工况下扩散作用更强，要求竖炉工作层耐材不仅具有强抗还原性能，还应具有低气孔率、少裂纹或缝隙等性能，对保温层的抗还原性能同样具有较高要求。H_2还原铁氧化物后产生的水蒸气在高温下会与耐火材料发生反应，要求耐材尽可能避免含有CaO、MgO等低温易水化物相及SiC、Si_3N_4等易高温水化物相[23]。竖炉运行过程中，内部填充大量的球团矿及直接还原铁，耐材受高温挤压、磨损严重，要求工作层耐材具备低蠕变、高耐磨特性。

3.3 全氢直接还原竖炉

以氢代碳具有显著的减碳优势，在“碳排放”政策引导及下游市场“低碳钢”、“零碳钢”倒逼下，进一步提升还原气中的氢气含量以形成富氢还原并最终发展成为全氢还原必将成为气基竖炉直接还原的重要发展方向。全氢直接还原技术尚不成熟，仍处试验探索阶段，目前仅有Energiron公司于2020年在瑞典吕勒奥和2022年在德国萨尔茨吉特建设的两座生产能力分别为1 t/h和0.1 t/h的试验线全氢直接还原竖炉，距离真正的大规模工业化生产还有一定距离。

全氢直接还原技术仍面临诸多挑战，氢气还原铁氧化物会导致炉内温度显著降低，降低氢气的还原效率及热能利用效率；高温全氢气氛对耐火材料及加热炉等设备及材料的抗氢腐蚀性能要求更高；同时，随着氢气直接还原铁产能提升，必然大量使用氢气，对氢气的制备、安全运输及储存技术存在重大依赖。基于上述问题，行业研究人员做好相关技术储备，才能更快、更好地实现全氢直接还原工业化应用。

4 结 语

我国钢铁工业长期以高炉—转炉长流程为主导，碳排放强度居高不下。直接还原铁或废钢—电炉短流程碳减排优势显著，是我国钢铁工业低碳转型重要发展方向。Midrex、HYL/Energiron等仍是当前生产直接还原铁的主流工艺。国内气基竖炉直接还原发展滞缓，现有工程化项目均依赖

于引进国外技术，亟需开发国产化气基竖炉直接还原工艺技术。目前，提高竖炉产能、确保竖炉长效运行、发展全氢直接还原竖炉是气基竖炉直接还原工艺的主要发展方向。

参考文献：

[1] FRIEDLINGSTEIN Pierre, O'SULLIVAN Michael, JONES Matthew, et al. Global carbon budget 2022 [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(4): 1917 – 2005.

[2] 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.

[3] 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 – 72；113.
DAI Youxun, YU Junjie, WANG Zhaocai, 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 – 72; 113.

[4] 邢奕，崔永康，田京雷，等. 钢铁行业碳中和低碳技术路径探索[J]. 工程科学学报，2022，44(4)：801 – 811.
XING Yi, CUI Yongkang, TIAN Jinglei, et al. Exploration of low-carbon technology paths for carbon neutrality in the iron and steel industry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 801 – 811.

[5] 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 gas-based direct reduction[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 1 – 9; 86.

[6] SHAO Lei, WANG Quanle, QU Yingxia, et al. A numerical study on the operation of the H_2 shaft furnace with top gas recycling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52(1): 451 – 459.

[7] 汪旭颖，李冰，吕晨，等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究，2022，35(2)：339 – 346.
WANG Xuying, LI Bing, LÜ Chen, et al. China's iron and steel industry carbon emissions peak pathways[J]. Researc of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 339 – 346.

[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] 姚聪林，朱红春，姜周华，等. 全废钢连续加料电弧炉短流程碳排放计算及分析[J]. 材料与冶金学报，2020，19(4)：259 – 264.
YAO Conglin, ZHU Hongchun, JIANG Zhouhua, et al. CO_2 emissions calculation and analysis of electric arc furnace with continuous feeding of only scrap[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020, 19(4): 259 – 264.

[10] 徐卫芳. 直接还原铁在八钢短流程生产线应用的实践分析[J]. 工业加热，2010，39(3)：52 – 55.
XU Weifang. The practice analysis of HBI application in a Basteel mini steelmaking process[J]. Industrial Heating, 2010, 39(3): 52 – 55.

[11] 耿淑华. 基于改质焦炉煤气直接还原铁矿石的基础研究[D]. 上海：上海大学，2018.
GENG Shuhua. Fundamental research on gas-based direct reduction of iron ore with reformed coke oven gas[D]. Shanghai: Shanghai University, 2018.

[12] 邱梓洋，王淇，王义松，等. 典型的气基竖炉直接还原工艺[C]//第十一届全国能源与热工学术年会论文集. 马鞍山：中国金属学会，2021：604 – 610.
QIU Ziyang, WANG Qi, WANG Yisong, et al. Typical gas-based shaft furnace direct reduction process[C]// Proceedings of the 11th National Annual Conference on Energy and Thermal Engineering. Ma'anshan: The Chinese Society for Metals, 2021: 604 – 610.

[13] PATISSON Fabrice, MIRGAUX Olivier. Hydrogen ironmaking: How it works[J]. Metals, 2020, 10(7): 922.

[14] MIDREX Technologies Inc. 2022 world direct reduction statistics[EB/OL]. [2023 – 9 – 12]. https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf.

[15] 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.
NAN Tieling. The development of Midrex gas-based direct reduced technology[J]. Industrial Heating, 2011,

40(6):13 – 16.

[16] SAH Rameshwar, DUTTA Sujaykumar. Direct reduced iron: production [M]. New York: Taylor and Francis, 2016:1082 – 1108.

[17] MARTINIS Alessandro, PAULUZZI Dario. Sustainable decrease of CO_2 emissions in the steelmaking industry by means of the Energiron direct reduction technology[C]// Association for Iron & Steel Technology. Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference: Volume I. New York: Curran Associates, Inc., 2018:608 – 614.

[18] MIDREX Technologies Inc. MIDREX Plants[EB/OL]. (2023 – 03 – 15)[2023 – 04 – 28]. https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-Plants-Sheet2023.pdf.

[19] DANIELI, TENOVA. HYL/ENERGIRON projects reference list[EB/OL]. (2022 – 05 – 19)[2023 – 04 – 28]. https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2022/05/Energiron-reference-list.pdf.

[20] 郭宇峰,刘阔,刘雅婧,等. 铁矿球团还原膨胀机理及影响因素的研究进展[J]. 钢铁,2021,56(4):9 – 15.
GUO Yufeng, LIU Kuo, LIU Yajing, et al. Research progress on reduction swelling mechanism and influencing factors of iron ore pellets[J]. Iron and Steel, 2021,56(4):9 – 15.

[21] ZHAO Zichuan, TANG Jue, CHU Mansheng, et al. Direct reduction swelling behavior of pellets in hydrogen-based shaft furnaces under typical atmospheres[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(10):1891 – 900.

[22] 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(8):1 – 6;51.
TANG Jue, CHU Mansheng, LI Feng, et al. Development status and future trend of hydrogen metallugy in China [J]. Hebei Metallugy, 2020(8):1 – 6;51.

[23] 向宇,余金山,王洪磊,等. 碳化硅纤维高温抗氧化性研究进展[J]. 硅酸盐通报,2022,41(9):3234 – 3242.
XIANG Yu, YU Jinshan, WANG Honglei, et al. Research progress on high temperature oxidation resistance of SiC fibers[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2022, 41(9):3234 – 3242.

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”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。