非高炉炼铁技术进展

朱德庆[1,2]，潘 建[1,2]，郭正启[1,2]，杨聪聪[1,2]，李思唯[1,2]
（1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；
2. 淡水河谷－中南大学低碳与氢冶金联合实验室，湖南 长沙 410083）

摘要：本文基于我国钢铁工业以长流程为主面临的碳减排压力及减排路径，较为全面的介绍了非高炉炼铁技术进展，包括煤基回转窑直接还原、气基竖炉直接还原、熔融还原及电解炼铁工艺的应用现状，指出了基于氢冶金及电气化炼铁的非高炉炼铁工艺将是我国钢铁工艺实现双碳目标的重要发展方向。

关键词：非高炉炼铁；直接还原；熔融还原；氢冶金；电解炼铁；碳减排
中图分类号：TF55 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0049－20
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.003

Technological progress in non-blast furnace ironmaking

ZHU Deqing[1,2], PAN Jian[1,2], GUO Zhengqi[1,2], YANG Congcong[1,2], LI Siwei[1,2]
(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
2. Vale-Central South University Low Carbon and Hydrometallurgy Joint Laboratory, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Base on the pressures and pathways of carbon emission reduction faced by China's iron & steel industry with predominant long technological process, this paper provides a relative comprehensive introduction to the technological progress in non-blast furnace ironmaking, including the application status of coal-based rotary kiln direct reduction, gas-based shaft furnace direct reduction, smelting reduction, and electrolytic ironmaking processes and points that that the non-blast furnace ironmaking processes based on hydrogen metallurgy and electrified ironmaking will be the important development directions for China's iron and steel industry to achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality.

Key words: non-blast furnace ironmaking; direct reduction; smelting reduction; hydrogen metallurgy; electrolytic ironmaking; carbon emission reduction

钢铁工业是我国国民经济的重要基础性产业，但也是典型的能源消耗密集型行业和碳排放大户。我国 2024 年粗钢产量为 10.05 亿 t，钢铁工业的能源消耗占国内总能源消耗比重为 11%～15%，碳排放占全球钢铁工业碳排放量的一半以上，占中国总碳排放量的 16%左右，是国内 31 个制造业门类中碳排放量最大的行业[1]。因此，自 2020 年我国提出“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”战略目标后，钢铁行业便成为国家及各地落实“双碳”政策的重点领域。2025 年 10 月钢铁工业正式被纳入我国碳排放权交易市场管理，成为全国碳排放权交易市场覆盖的三个重点行业之一（与水泥、铝冶炼并列）；2023 年 5 月欧盟正式碳边境调节机制（CBAM）进入过渡期，2026 年 1 月 1 日起

收稿日期：2026－01－25；**修回日期**：2026－01－29
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目(52474370)
作者简介：朱德庆(1964—)，男，教授，博士生导师，从事铁矿粉造块理论与新工艺、复合铁矿资源综合利用、冶金固废资源化利用、低碳冶金技术与短流程等方面的研究。
通信作者：潘 建(1977—)，男，教授，博士生导师，从事烧结球团及直接还原、二次资源综合利用、复杂难处理矿的综合利用、钢铁冶金环境保护等方面的研究。

正式实施，2028 年拟扩至下游钢铁密集型产品，如机械、汽车零部件、家电等，将对我国钢铁行业产生深远影响，尤其对长流程高排放企业冲击最大，势必倒逼钢铁行业开发和应用低碳冶炼技术、降低碳排放强度，以应对国际绿色贸易壁垒[2]。

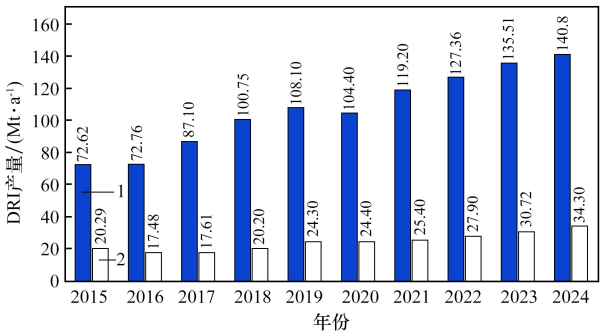
然而，高炉—转炉长流程一直在我国钢铁生产中占据主导地位，粗钢占比高达 90% 左右，而长流程钢厂粗钢的 CO_2 排放强度高达 1.8 ~ 2.2 t/t；虽然高炉炼铁工艺成熟、生产率和能量利用率高、使用寿命长、经济性更具优势，是目前国内外铁水冶炼的主流工艺，但铁前工序(烧结/球团/焦化 + 高炉炼铁)贡献了长流程粗钢生产 80% 以上的碳排放，同时还面临着焦煤资源供应短缺、能源消耗和废弃物排放大、维护成本高等问题。近年来，尽管国内在高炉高球比冶炼、高炉富氢冶炼等低碳炼铁方面开展了大量富有成效的摸索和生产实践，取得了良好效果，有望实现铁前降碳 5% ~ 25%[3-6]，但未来我国钢铁行业要实现碳中和必须采取其他措施。一方面必须走减量化发展道路，到 2060 年粗钢产量逐年降低至 6 ~ 7 亿 t，降碳潜力约占总减碳量的 40%；另一方面，在流程结构优化、低碳技术应用方面，通过降低高炉—转炉长流程占比至 15% ~ 30%，发展氢基直接还原等非高炉工艺、全废钢电炉短流程，可实现降碳 31%[7]。

非高炉炼铁指高炉炼铁之外的炼铁方法，占比不足 10%，但却是目前钢铁冶炼技术创新的重要方向之一。传统非高炉炼铁工艺包括直接还原、熔融还原、电炉炼铁等方法，以煤、气体或液态燃料为还原剂，在铁矿石未熔化条件下生产固态直接还原铁(DRI)或两步法冶炼液态铁水，具有降低焦煤依赖、减少污染等优势[1,8-9]。与此同时，近年来电解炼铁作为一种新兴非高炉炼铁技术，通过电化学还原实现铁矿石的冶炼，得到高纯铁，亦在国际上受到广泛关注[10-11]。本文在全面介绍非高炉炼铁技术进展(包括煤基回转窑直接还原、气基竖炉直接还原、熔融还原及电解炼铁工艺的应用现状)的基础上，指出了基于氢冶金及电气化炼铁的非高炉炼铁工艺将是我国钢铁工艺实现双碳目标的重要发展方向。

1 直接还原

1.1 直接还原工艺及其产量

DRI 生产工艺主要分为两大类，气基竖炉及煤基回转窑直接还原工艺。据 Midrex 技术公司的数据统计，近十年来全球 DRI 产量整体呈明显增长趋势(图 1)。



1—全球 DRI；2—煤基 DRI。

图 1 近十年全球 DRI 年产量及煤基回转窑工艺 DRI 占比

Fig. 1 Annual global DRI production in recent ten years and the proportion of coal-based rotary kiln process DRI

图 1 显示，2018 年全球 DRI 产量首次突破 1 亿 t，其中煤基回转窑工艺占比明显升高。过去十年间全球 DRI 产量增加了 6 818 万 t，涨幅约 93.87%。其中，回转窑工艺增加 3 030 万 t，涨幅为 197%。2024 年煤基回转窑工艺 DRI 占比达到 34.3%(主要受印度回转窑工艺 DRI 产量推动的影响，其增幅为 13.9%，而其竖炉 DRI 产量则小幅收缩 30 万 t)。

图 2 为全球 2024 年各种工艺生产 DRI 产量的占比[12]。由图2可知，MIDREX 工艺、HYL/Energiron

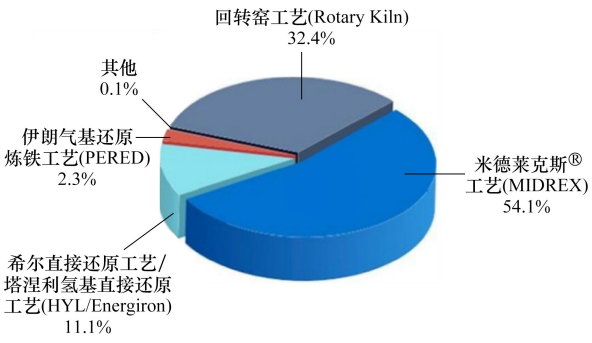


图 2 全球 2024 年各种工艺生产 DRI 产量的占比

Fig. 2 Proportion of global DRI production by various processes in 2024

工艺、PERED 工艺、回转窑工艺分别占 54.1%、11.1%、2.3% 和 32.4%。全球约 67.5% 的 DRI 为天然气基 DRI，也可称为“低碳排放 DRI”，其余为煤基 DRI，即“高碳排放 DRI”。印度回转窑工艺 DRI 产量构成了全球“高碳 DRI”的主要来源。

1.2　煤基回转窑直接还原工艺

煤基回转窑直接还原工艺是指还原煤、脱硫剂、球团或块矿组成的原料在倾斜炉体的回转窑内运动连续向前推进，在运动中炉料被以逆流方法燃烧生成的煤气加热和还原，最后得到固态 DRI(或海绵铁)产品的过程，其典型工艺流程如图 3 所示。

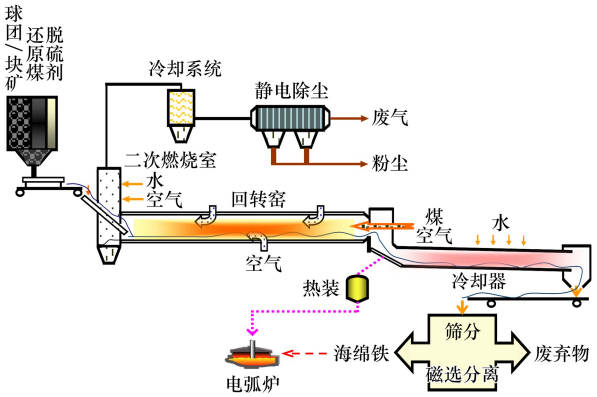


图 3　煤基回转窑直接还原工艺流程示意

Fig. 3　Schematic diagram of coal-based rotary kiln direct reduction process flow

目前，全球煤基直接还原工艺中，煤基回转窑直接还原工艺占 95% 以上。其主要工艺分为两种，即一步法和两步法[13-14]。一步法是链算机—回转窑工艺，预热球团直接入回转窑，喷入粒煤在 1 050 ~ 1 100 ℃进行还原。二步法是先将铁精矿造球，再在 1 250 ~ 1 300 ℃高温氧化焙烧制成氧化球团，然后再将冷态氧化球团送入回转窑内，同时喷入粒煤在 1 050 ~ 1 100 ℃进行还原。主要生产高品位 DRI 的方法有 SL/RN 法、KRUPP-CODIR 法、DRC 法及 ACCAR 法等；用于处理含铁粉尘和复合矿综合利用的方法有川崎(KAWASAKI)法、住友(SDR)法、久保田(SPM)法等。其中，SL/RN法生产能力占回转窑直接还原法总产能的 55.6%，CODIR 法占 22.3%，DRC 法占 9.2%，其他的为 ACCAR 法等。

1.2.1　回转窑直接还原主要影响因素[13-15]

从传热和还原来看，回转窑内预热带料层不宜过厚，而还原带料层应尽量厚些。区域热平衡和传热系数计算表明，提高排气温度、强化低温段传热、缩短预热带长度、扩大高温还原带等是提高产量的基本方向。回转窑主要结构参数适宜值：① 窑长径比(L/D)：回转窑长度 L 与其直径 D 的比值，一般为 14 ~ 17，采用二次供风，埋入式喷嘴和窑头喷吹还原煤技术，使还原带供热强度大幅提高，物料充填率增大。② 倾斜度：随着窑内供热强度提高、停留时间延长和还原条件的改善，其倾斜度均有降低趋势，如新西兰钢铁公司回转窑倾斜度为 1.5%，南非 ISCOR 公司的回转窑倾斜度为 2.5%。③ 缩口比(进料口直径 $d_{入}$/窑直径 D 或出料口直径 $d_{出}$/窑直径 D)：一般 $d_{入}/D = 0.45 \sim 0.53$，$d_{出}/D = 0.35 \sim 0.50$。从增加停留时间来考虑，回转窑的出、入端缩口逐渐变小，回转窑生产能力和热稳定性得到提高。④ 窑容利用系数：反映窑容积的利用效率，是相互比较的基准。随原料、还原剂不同，其利用系数设计值变化于 7.7 ~ 18.5 t/(m^3·d)，但无明确的定量关系。

此外，影响回转窑还原的主要工艺因素有：① 还原煤的反应性：对还原过程影响最为明显。宜选用碱性灰分和灰分软化温度高、反应性好的褐煤或烟煤，能明显提高生产率，同时也能保证窑的安全运行。② 矿石的还原性及还原膨胀特性：在条件允许时，应尽量选用还原性好、还原膨胀和粉化率低的矿石原料。③ 还原温度：提高作业温度能提高产量及改善质量。然而其作业温度取决于还原剂灰分和矿石软化温度，通常应比之低 100 ~ 150 ℃。④ 还原剂用量及粒度：增加其用量可加快还原反应，减小结圈趋势，提高作业率。适宜的碳铁比一般为 0.45 ~ 0.55，喷煤粒度为 5 ~ 25 mm。⑤ 填充率：适宜值为 15% ~ 25%。提高填充率能延长物料在窑内停留时间，有利于矿石的还原，减少已还原物料的再氧化。

1.2.2　国内外 DRI 生产技术现状

经过多年的实践和改进，煤基回转窑直接还原工艺日趋成熟。目前全球约有 300 座回转窑在运转，有 200 多条在印度应用，主要应用于铁矿还原。世界煤基 DRI 厂及处理复杂含铁资源代表性企业如表 1 所示[16-22]。

表1 世界煤基DRI厂及处理复杂含铁资源代表性企业

Table 1 Global coal-based DRI plants and representative enterprises handling complex iron-bearing resources

厂家	工艺	矿种	规模	主要技术经济指标
印度 Orissa Sponge Iron Ltd.	ACCAR	铁矿	15万t,1986年年产量达11万t	产品金属化率为87%~92%,含碳量为0.2%,煤耗为0.9 t,油耗为76~79 kg/t,综合能耗为1.675×10^4 MJ/t,由煤+油改为全煤作业
印度 Tata Sponge Iron Ltd	SL/RN	块矿赤铁矿(品位63%)	1条15万t回转窑(∅4.8 m×80 m),两条12万t回转窑(∅4.2 m×72 m)	金属化率>90%,碳约为0.1%,每吨产品:矿耗为1.6~1.8 t,煤耗为0.85~1.2 t,白云石耗为0.05 t,原料成本占总成本的82%~85%,烟煤灰熔点为1 200 ℃
印度 Godawari Power & Ispat Ltd	SL/RN	磁铁矿球团品位65%	4条还原回转窑(∅4.5 m×73 m,其中3条线产量为500 t/d,1条线产量为350 t/d)	在1 100 ℃,采用窑尾加煤、窑头喷煤的方式加煤,物料在窑中停留时间约10 h。产品粒度为5~16 mm,金属化率约为88%,P约为0.04%,吨产品矿耗约为1.5 t,煤耗为1.4 t,产品球团成本约为1 300元/t
印度 Shri Bajrang Power and Ispat Ltd.	SL/RN	赤铁矿:磁铁矿=95:5,品位约64%	∅5.3 m×76 m,其中单条线产量500 t/d	还原温度在980~1 010 ℃,窑尾加煤、窑头喷煤,在窑中停留时间约10 h。产品球团粒度为5~18 mm,吨产品矿耗约为1.5 t,煤耗为1.6 t
加拿大 Stelco Inc.	SL/RN	赤铁矿球团	∅4.6 m×125 m,设计年产0.36 Mt海绵铁	金属化率为90%,含碳量为0.3%~1.0%,每吨海绵铁耗煤(干基)为1.22 t,折合热量为24.27 GJ/t
南非 Iscor Ltd	SL/RN	铁矿	4座回转窑(∅4.8 m×80 m),设计DRI年产能为0.60 Mt	产品金属化率为93%,矿耗为1.465 t,煤耗为800 kg。作业率为90%,最长窑龄达454 d
南非 Dunswart Iron and Steel 公司	Codir	铁矿	设计年产0.15 Mt海绵铁	金属化率为92%,含碳量为0.03%~0.05%,总能耗为14.63 GJ/t海绵铁
南非 Scaw Metal Ltd	DRC法	铁矿	2座7.5万tDRI	产品金属化率为92%~95%,作业率为96%,每吨DRI的固定碳消耗为0.42 t,矿耗为1.43 t,电耗为138 kW·h,水耗为2.59 m^3
天津钢管公司	DRC	铁矿球团	2条年产15万t DRI生产线,每条生产线设有1条∅5 m×80 m的回转窑	回转窑作业率稳定在97%以上,矿耗为1 590 kg/t,煤耗为880 kg/t,电耗为每吨DRI 140.00 kW·h/t,金属化率为91.32%~93.80%,每条线DRI产量为15.00~21.00万t
北京密云冶金矿山公司	一步法	铁精矿	链箅机尺寸为∅2 m×24 m,回转窑尺寸为∅3.8 m×50 m,设计年产DRI 5万t	产品w(TFe)在91%以上,金属化率不低于92%,吨产品煤耗为850 kg,实际DRI年产量为6.2万t
南非 Highveld Steel & Vanadium Corp. Ltd.		钒钛磁铁矿	13座回转窑(∅4.0 m×60 m)和6座埋弧电炉(4 500 kVA)	年产达2.60 Mt热装DRI料,其还原度为55%~65%
新西兰 New Zealand Steel Ltd	SL/RN	钒钛磁铁矿	一座年产0.125 Mt DRI的SL/RN装置,增设了多膛炉炭化和预热,产量增加到0.175 Mt,4台外径为7.85 m、高35 m的多膛炉和4座∅4.6 m×65 m的回转窑,将产量增加到0.90 Mt	产品金属化率为87%~92%,全铁为72%,$w(TiO_2)$为10%,产品直接进电炉炼钢

表 1（续）

厂家	工艺	矿种	规模	主要技术经济指标
澳大利亚西钛公司 Western Titanium Rutile Plant		钛铁矿	回转窑内将钛铁矿中的铁还原为金属铁，再将还原矿放在加有催化剂的水中搅拌和充气，将金属铁氧化成铁锈，然后用水力旋流器进行分选得到金红石产品	钛铁精矿直接入窑，年产人造金红石 20 多万 t，$w(TiO_2)$为 92%，含铁 3.5%。该方法简单，成本较低，以煤作燃料，没有明显的污染或公害问题
日本 Sumitomo Metal Kashima Steel	SPM 法	含锌粉尘	∅3.9 m×80 m，月处理 18 000 t 粉尘，生产 12 500 t 海绵铁	金属化率为 80%~90%，含锌量为 0.10%~0.15%，抗压强度为 300 kg/P，能耗为 13.22 GJ/t，电耗为 220 kW·h/t
日本 Kawasaki Steel Corp.	川崎法	含锌粉尘	1 座回转窑（∅3.6 m×40 m），年产 6 万 t 金属化球团，2 座∅5 m×50 m、∅5 m×55 m 回转窑，年产 0.18 Mt 金属化球团	金属化率为 84.0%~91.5%，脱锌率达 95%以上，含锌量在 0.05%以下，抗压强度在 150~250 kg/p 球以上，单位热耗为 14.65~17.59 GJ/t，电耗为 100~120 kW·h/t
日本日向冶炼厂 Hyuga Smelter	RKEF 法	红土镍矿	2台回转窑，尺寸为∅4.8 m×105 m，每台窑进料速度为 60~65 t/h 干矿，焙砂进矿热炉熔炼	焙烧温度为 800~900 ℃，还原煤耗为70~80 kg/t 干矿，粉尘率为 15%~20%，红土镍矿含镍为 2.1%~2.5%，$w(Fe)/w(Ni)$ = 5.56~7.14，$w(SiO_2)/w(MgO)$ = 1.49~1.67，金属回收率为 97%~98%，镍铁含镍为 17%~25%
日本大江山冶炼厂 Nippon Yakin Oheyama Smelter	Krupp-Renn 法	红土镍矿	5 台回转窑，其中 4 台为∅3.6 m×72 m，1 台为∅4.2 m×84 m。每台窑给矿量为 420 t/d，镍回收率为 95%，工序能耗为 5 520 MJ/t，镍铁年产量为 1.5 万 t	粒铁带温度为 1 200~1 250 ℃，燃煤消耗为 80 kg/t 干矿，每吨干矿消耗还原剂（无烟煤）为 130 kg，典型粗镍铁为 0.5~20 mm，$w(C)<0.10\%$，$w(Ni)=23\%$
广西北部湾新材料有限公司	还原－磁选法	红土镍矿	4 台回转窑，尺寸为∅3.6 m×72 m，窑体斜度为 2.5%，窑体转速为 0.2~1.8 r/min，	以含镍 1.8%左右、含铁小于 20%的红土镍矿为原料生产含镍 2%~4%的干选铁和含镍 4%~8%的镍铁精粉。还原温度为1 300~1 350 ℃，作业率为 90.4%，金属回收率达 88%以上，吨镍铁煤耗约为 1.28 t，镍铁精粉产品主要应用于 RKEF 冶炼工艺
广西北部湾新材料有限公司	RKEF 法	红土镍矿	2 台回转窑，尺寸为∅5.2 m×118 m，窑体斜度为 3.5%，主传动转速为 0.20~1.23 r/min	以含镍 1.4%~1.6%、含铁小于 20%的红土镍矿为原料生产含镍 6%~10%的镍铁，其镍回收率可达到 92%以上，单炉产量 7 万 t/a
中色镍业有限公司	RKEF 法	红土镍矿	2 台回转窑（∅5.5 m×115 m），年产干矿 132 万 t，年产镍铁 8.5 万 t	达贡山矿石属于硅镁型镍矿，镍品位为 2.0%，$w(Fe)/w(Ni)$ = 7.04，$w(SiO_2)/w(MgO)$ = 2.4，焙砂排出温度为 775 ℃。炉渣熔点约为 1 500 ℃，镍铁产品镍质量分数可达 25%
新喀里多尼亚 Donniambo Metallurgical Plant	RKEF 法	红土镍矿	11 台回转窑，7 台为∅（2.7~3.1）m×125 m，4 台为∅4 m×125 m，年产镍产品约为 6 万 t，产品形状为铸块和粒化铁	焙砂温度为 900 ℃，还原煤平均消耗 50 kg/t干矿，粉尘率为 19%；红土镍矿含镍为2.2%，$w(Fe)/w(Ni)$ =4.8，$w(SiO_2)/w(MgO)$ = 1.75，金属回收率为 90%~93%，矿热炉粗制镍铁镍质量分数为 22%~28%

由表 1 可知，全世界已投产建设的煤基回转窑直接还原厂主要以 SL/RN 法为代表。回转窑还原效果较好，产品质量均匀稳定；主要能源利用简单，可直接使用非焦煤，适合中小规模需求。同时，其也是资源综合利用的一种有效手段，在钒钛磁铁矿、红土镍矿、鲕状赤铁矿、菱铁矿、高锰铁矿、赤泥等复合铁矿及冶金尘泥等固体废弃物的利用方面具有较大优势，仍然具有较好的发展前景。但是，其碳排放量高，可用部分天然气或氢气替代还原煤。

1.3 气基直接还原工艺

气基竖炉直接还原工艺是在竖炉中利用高温还原气还原铁矿石的短流程炼铁工艺，在直接还原生产中占据至关重要的地位。竖炉直接还原工艺最早是由 Wiberg 于 1932 年在瑞典发明创立，建成了第一座生产装置，也称 Wiberg Soderfors 法，经历了从木炭制造还原气到焦炭制气的发展过程[23]。20 世纪 50 年代，石油和天然气工业迅速发展，于 1952 年在瑞典 Sandvik 建成的海绵铁竖炉标志着以天然气为能源的竖炉直接还原工艺正式投入工业生产，但年产量仅有 2.4 t[24]。20 世纪 60 年代后，随着天然气的大量开采，HYL 法和 MIDREX 法相继于 1957 年和 1968 年问世，此后气基竖炉直接还原工艺得到快速发展。

竖炉直接还原法最早使用的燃料和还原剂都是天然气，这无疑导致了该工艺发展的区域局限性。近年来出现了煤制气、焦炉煤气，甚至全氢的气基竖炉，有望扩大竖炉直接还原工艺的使用范围[25]。目前，气基竖炉法直接还原铁的产量占总产量的 65% 以上，而采用 MIDREX 工艺生产的直接还原铁占竖炉工艺产量的比重维持在约 80%，生产的直接还原铁包括冷态直接还原铁、热态直接还原铁和热压块铁等形式[26]。

1.3.1 MIDREX 法直接还原

MIDREX 法直接还原工艺由 Midrex 公司最早开发，其基本工艺流程如图 4 所示。MIDREX 工艺在竖炉中完成还原过程，主要分为还原段和冷却段(其中还原段有时也可分为预热段和还原段)[27-28]。MIDREX 气基还原竖炉属于移动床反应器，铁氧化物在进入竖炉后由上向下逐渐下降，首先进入还原段。在还原段内，铁氧化物在下降过程中与上升的还原气接触，升温并被还原。竖炉内还原段温度由还原气体的温度决定，在炉顶小部分区域内温度相对较低，其它大部分还原区域温度都在 800 ℃以上。冷却段内，自上而下的 DRI 与自下而上的气流相互作用，完成冷却过程，冷却气流由炉外用于煤气清洗及冷却的煤气洗涤器和提供循环动力的加压机提供。在冷却段内，DRI 被冷却至接近室温后排出竖炉。MIDREX 法的经典操作指标如表 2 所示。

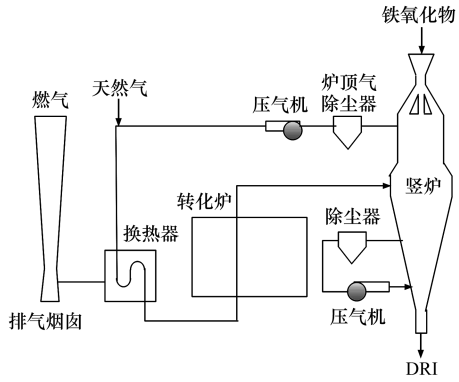


图 4 MIDREX 法标准工艺流程示意

Fig. 4 Schematic diagram of the standard MIDREX process flow

MIDREX 法对入炉炉料的适应性相对较强，传热传质效率高，能耗低，产率高且产品质量好，是目前最完善的直接还原工艺。但是 MIDREX 也存在一定局限性，首先它要求有丰富的天然气资

表 2 MIDREX 法直接还原工艺经典操作指标

Table 2 Classic operational indicators of the MIDREX direct reduction process

DRI 主要指标			还原气体组成(体积分数)/%				其他指标		
还原度/%	w(TFe)/%	抗压强度/($N\cdot P^{-1}$)	$CO+H_2$	CH_4	N_2	R_0	气耗/GJ	η_v/[$t\cdot m^{-3}\cdot(24\ h)^{-1}$]	电耗/kW·h
>92	>92	500	75~84	3	12~15	<5	10.2~11	9~12	100

注：η_v为还原段容积利用系数，t/($m^3\cdot 24$ h)；R_0为 CO_2和 H_2O 的总体积分数。

源作保障；其次该工艺反应温度低，速度慢，炉料在炉内停留时间长。另外，MIDREX 工艺要求铁矿石粒度一般小于 5 mm 粉末的质量分数不能大于 5%。此外，炉料中的 S 进入炉顶煤气后，在转化炉中会与镍基催化剂结合，使催化剂中毒失效。因此 MIDREX 法对炉料中的 S 含量有相应要求标准，而对其它元素无特殊要求[29]。

在 1974 年以前，MIDREX 基本完全使用球团矿冶炼。之后为了降低入炉矿成本，开始将其他矿种与球团矿混合使用。目前，天然块矿的使用配比一般可在 20%~60% 之间[30]。天然块矿还原性普遍较球团矿差，粉化现象也更严重，其混用配比以综合金属化率不低于 92% 及不产生大量粉末为准。MIDREX 在竖炉中吹入少量氧气来提高还原气体及炉料的温度，研究表明：将炉料温度从 789 ℃提高到 898 ℃，竖炉生产能力能提高近 50%。为了提高生产率和操作灵活性，MIDREX 工艺的技术改进主要表现在以下几方面[31]。

（1）使用 O_2 的 Oxy + TM 工艺。该工艺可大幅提高生产效率，其配有氧化系统，加上 MIDREX 重整装置，具有很高的操作灵活性。

（2）可生产高碳的 DRI。MIDREX 设备能承受不同碳质量分数的 DRI（达 3.5%），且不影响设备利用率。

（3）开发了 SimpaxTM 系统。该设备控制软件包可优化设备操作并起到很好的保护作用。

（4）采用 HotlinkTM 工艺。该工艺靠重力使 DRI 输送到电炉中，提供了一种保持 DRI 显热简单、可靠、经济的方法。

新世纪以来，伊朗、印度、埃及和沙特等国家，相继建成了多座气基竖炉直接还原生产装置[32]。目前，全球共有 79 套 MIDREX 气基竖炉在生产，2018 年运营的阿尔及利亚 Tosyali 项目的单套 DRI 年产量可达 250 万 t，而 2025 年投产的沙特阿拉伯朱拜勒（Jubail）的 Saudi Iron & Steel Company（HADEED）直接还原铁厂的 600 万 t/a 单线装置为全球最大的 MIDREX 气基竖炉。该竖炉规格：直径为 8.2 m（超越传统 4.8 m 标准型），高度为 52 m（还原区高度为 12 m，冷却区优化至 10 m），容积约 680 m^3（较 400 型竖炉容积翻倍），还原气入口采用 72 个斜向喷嘴（传统为 38 个），气流分布均匀性提升 40%。采用 Hybrid 能源系统，60% 天然气 + 40% 绿氢（电解水制氢）混合还原气，碳排放较纯天然气模式降低 65%（实测数据），搭载 AI 炉温动态调节模块，金属化率稳定在 95%~98% 区间。

1.3.2　HYL/ENERGIRON 法

HYL-III 法竖炉直接还原工艺是 Hylsa 公司在其早期开发的固定床反应罐法（HYL-I 和 HYL-II）的基础上开发成功的，以连续运行的竖炉代替了落后的间歇式反应罐[33]。一座日产 25 t 的希尔竖炉试验装置于 1975 年投入运转，一套固定床设备于 1980 年被改造成 HYL-III 装置并投产，年产量为 25 万 t。

HYL-III 法流程如图 5 所示。HYL-III 法工艺的还原气来源于以水蒸气为裂化剂、以天然气为原料的催化裂化反应。转化炉的燃料为部分炉顶煤气和天然气，燃气余热在烟道中被回收利用，以预热天然气和水蒸汽。粗还原气从转化炉中排出后首先通过热量回收装置，产生用于催化裂化反应的水蒸气，然后在洗涤器中清洗冷却，将还原气中过剩的水蒸气冷凝出。最后洗涤后的还原气体在以部分炉顶煤气为燃料的加热炉中被加热至 900~960 ℃，形成终还原气。终还原气从竖炉中间进入，与 MIDREX 法相似，还原气体向上运动，最终从炉顶排出，炉料向下运动并被加热还原。炉顶煤气经洗涤加压后分别进入转化炉和加热炉作为燃料和还原气。HYL-III 法原料一般为球团矿或天然块矿，还原和冷却原理与 MIDREX 法相似，最终 DRI 降至 50 ℃左右后排出竖炉。

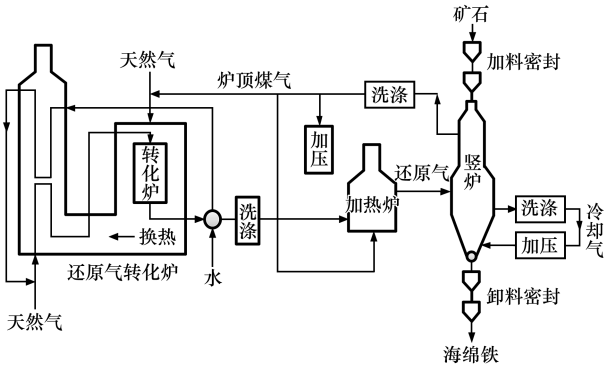


图 5　HYL-III 法工艺流程示意

Fig. 5　Schematic flow diagram of the HYL-III process

在 HYL-III 法工艺基础上，达涅利和 Tenova HYL 共同开发了 Energiron 法气基直接还原工艺，该工艺第一座工厂在2009年12月于阿联酋 ESI 钢铁公司投产，生产能力为160万 t/a。2011年，美国纽柯公司投资7.5亿美元建造了世界上最大的 Energiron DRI 设备，产能为250万 t/a，并于2013年投入运行，达到了预期效果。随后，更多的 Energiron HYL 工厂在其他地区建成，包括埃及苏伊士钢铁公司，产能为190万 t/a，印度 JSPL 公司，产能为250万 t/a。我国宝武湛江100万 t 级氢基竖炉和河钢60万 t 级氢基竖炉，均采用了 Energiron-ZR 工艺。Energiron 法能够保证单独控制 DRI 的金属化率和碳含量，尤其是可将碳质量分数在1%~3.5%内调整，满足电炉(EAF)炼钢的需求。Energiron 工艺流程如图6所示。

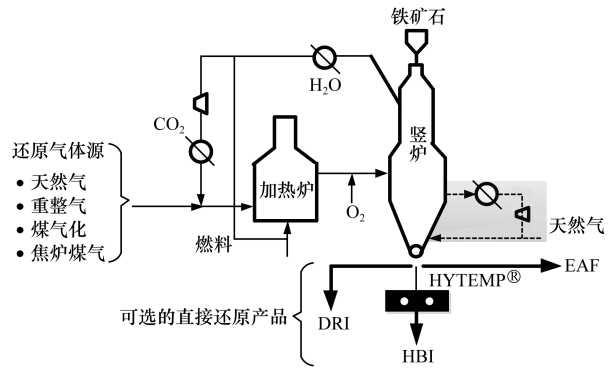


图6 Energiron 法工艺流程示意

Fig. 6 Schematic diagram of the Energiron process flow

Energiron 工艺特点[34]：① Energiron 工艺灵活性较高，可以采用多种还原气体：天然气、煤气化或其他炼铁厂如 Corex、Finex 等产生的合成气，煤制气、焦炉煤气等。② Energiron 法在加热器和竖炉之间注入氧气以提高还原气体可用化学能，从而提高碳含量或促进还原。从竖炉顶部排出的还原尾气需要进行洗涤以清除还原反应中所产生的氧化剂成分(H_2O 和 CO_2)，CO_2吸收器在吸收 CO_2的同时也会吸收 H_2S，从而使还原气体的 S 含量几乎为零，进而避免还原气体将 S 带入 DRI。③ Energiron 法可将反应器设计成利用相同的工艺布置生产 DRI 热或冷 DRI。热 DRI 可被压缩生产 HBI(用来长距离运输的典型商品)或通过 HYTEMP®气动传输系统送往 EAF；冷 DRI 可直接送往堆料场(此时需要在竖炉下半段加入冷却气体循环装置)。由于 HYL 反应器的设计是使用高 H_2浓度的还原气体甚至纯 H_2，因此使用气移反应器根据反应将 CO 转化为 H_2，气化过程中还原气($CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$)含有相当数量的 CO。因此，HYL/Energiron 工艺在纯 H_2操作、实现全氢冶金生产方面最具潜力和竞争力。

1.3.3 气基竖炉还原球团矿性能要求及测定方法

氧化球团矿具有粒度均匀、冷态强度高、铁品位高、还原性好等优点，是优质的直接还原炼铁原料。球团矿的质量对还原竖炉顺行和直接还原铁质量有较大影响，为了使还原产品达到相应的要求，用于还原的球团矿必须满足一定的性能要求。MIDREX 和 HYL 工艺不同，对球团矿的性能要求和冶金性能测试方法有不同要求[32]。

HYL 法一般要求球团矿抗压强度不低于2 000 N/P(实际生产中常要求不低于2 800 N/P)。HYL 法冶金性能要求有950 ℃或800 ℃条件下的还原度指数和还原膨胀率，以及500 ℃条件下的低温还原粉化率。表3为一定温度下 HYL 法还原球团矿冶金性能标准。球团矿还原度指数应大于4，还原膨胀率不大于15%，低温还原粉化率(>6.3 mm)大于80%、(<3.2 mm)小于10%，未破损球团配比在60%以上[35-37]。

表3 HYL 法还原球团矿冶金性能标准

Table 3 Standard on metallurgical performance of HYL process reduced pellets

还原度指数(950 ℃)	还原膨胀率(950 ℃)/%	低温还原粉化率(500 ℃)/%		整球率/%
		>6.3 mm	<3.2 mm	
>4	≤15	>80	<10	>60

MIDREX 法一般要求球团矿抗压强度不小于2 500 N/P。表4为 MIDREX 法还原球团矿还原气体组成和冶金性能标准。根据 Linder 实验标准，MIDREX 法要求球团矿还原后金属化率不低于91%，低温还原粉化率(<3.36 mm)不高于5%[38]。

MIDREX 法还原粉化同样采用林德转鼓装置。与 HYL 法相比，MIDREX 法还原气体成分将 N_2改为了 CH_4，气体配比也发生了变化，还原温度为760 ℃，还原样品质量降低到500 g，气体流量也有较大变化。详细检测方法比较见表5[39-40]。

表 4　MIDREX 法还原球团矿还原气体组成和冶金性能标准(还原温度:760 ℃)

Table 4　Standard reducing gas composition and metallurgical performance of MIDREX reduced pellets (reduction temperature:760 ℃)

还原气体组成(体积分数)/%				冶金性能标准	
H_2	CO	CO_2	CH_4	金属化率/%	低温还原粉化率(<3.15 mm)/%
55	36	5	4	>91	<5

表 5　HYL 法和 Midrex 法检测方法对比

Table 5　Comparison of testing methods between the HYL process and the midrex process

项目	还原度	还原膨胀	低温还原粉化	黏结指数
HYL	氧化球团质量为 500 g;还原温度为 950 ℃;还原气体组成(体积分数)为 55% H_2 + 21% CO + 14% CO_2 + 10% N_2;还原气流量为 55 L/min,还原至还原度为 95%	氧化球团质量为 500 g;还原温度为 800 ℃;还原气体组成(体积分数)为 55% H_2 + 21% CO + 14% CO_2 + 10% N_2;还原气流量为 55 L/min,还原至还原度为 95%	氧化球团质量为 1 000 g;还原温度为 500 ℃;转速为 18 r/min;还原气组成(体积分数)为 55% H_2 + 21% CO + 14% CO_2 + 10% N_2;还原气流量为 20 L/min;还原时间为 120 min;测 >6.3 mm、<3.2 mm 粒级及整球占比	氧化球团质量为 1 200 g;还原温度为 950 ℃;还原气组成(体积分数)为 55% H_2 + 21% CO + 14% CO_2 + 10% N_2;还原气流量为 55 L/min;还原至还原度为 95%;加压 1.5 kg/cm² 持续 30 min;1 m 高度摔落 20 次
Midrex	氧化球团质量为 500 g;还原温度为 800 ℃;还原气体组成(体积分数)为 45% H_2 + 30% CO + 15% CO_2 + 10% N_2;还原气流量为 50 L/min,还原时间为 90 min	氧化球团质量为 500 g;还原温度为 800 ℃;还原气组成(体积分数)为 45% H_2 + 30% CO + 15% CO_2 + 10% N_2;还原气流量为 50 L/min,还原时间为 90 min	氧化球团质量为 500 g;还原温度为 760 ℃;转速为 10 r/min;还原气组成(体积分数)为 55% H_2 + 36% CO + 5% CO_2 + 4% CH_4;还原气流量为 13 L/min;还原时间为 300 min;测 >6.3 mm、<3.15 mm 粒级占比	氧化球团质量为 2 000 g;还原温度为 850 ℃;还原气组成(体积分数)为 45% H_2 + 30% CO + 15% CO_2 + 10% N_2;还原气流量为 40 L/min;还原时间为 60 min 时,加压 147 kPa 持续至还原率为 95%;内径为 1 000 mm 的转鼓设备,转速 25 r/min,共转 35 圈,每 5 圈取下散开单个小球,称黏团质量

由表 5 可知，两种工艺对球团气基还原性能检测方法存在较大差异。对相同球团采用 MIDREX 和 HYL 法平行评价，其气基还原性能结果分别见表 6、7。由表 6、7 可知，按照 HYL 检测方法得到的低温还原粉化指数(>6.3 mm)、(<3.2 mm)分别为 66.12% 和 31.55%，而按照 Midrex 法得到的低温还原粉化指数(>6.3 mm)、(<3.2 mm)分别为 97.78% 和 2.19%。按照两种工艺对球团低温还原粉化性能指标的要求，该球团可满足 MIDREX 工艺的要求，但不满足 HYL 工艺的要求，进一步证明了 MIDREX 工艺对炉料的适应性更好。而从低温还原反应温度的设置来看，

表 6　模拟 HYL 法冶金性能

Table 6　Simulated metallurgical performance of the HYL process

还原度指数	还原强度指数/%		低温还原粉化指数/%		整球率/%	黏结指数/%
	800 ℃	900 ℃	>6.3 mm	<3.2 mm		
4.56	10.33	13.98	66.12	31.55	40.12	11.18

表 7　模拟 MIDREX 法冶金性能

Table 7　Simulated metallurgical performance of the MIDREX process

还原度指数(RI_{90})	还原强度指数/%	低温还原粉化指数/%			金属化率/%	黏结指数/%	
		>6.3 mm	<3.15 mm	<0.5 mm		Is_1	Is_2
81.246	6.67	97.78	2.19	1.55	93.56	0	16.66

注:RI_{90}为 800 ℃下还原 90 min 的还原度;Is_1为转 10 转后，>25 mm 粒度占比;Is_2为 35 转后，黏结颗粒的累积占比。

HYL 法设定低温还原粉化检测温度为 500 ℃，此温度下主要形成 Fe_3O_4 和 FeO，是还原球团强度最低值范围，因而也更易粉化。而 MIDREX 设定的温度为 760 ℃，该温度下球团表层能快速形成金属铁外壳，能够抵抗球团的粉化，故其测得低温还原粉化指标通常表现会更好。因此，HYL 法是对球团最极端环境下的考察，对球团质量提出了更高要求。

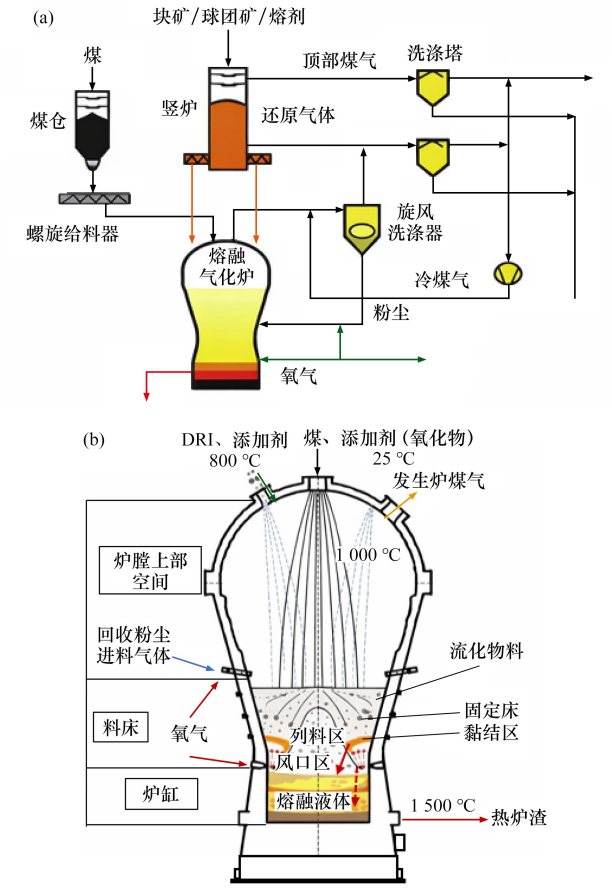
2 熔融还原[41-47]

熔融还原(smelting reduction)技术是不依铁矿粉造块，无需使用焦炭，而是直接使用粉矿、煤粉和熔剂等进行冶炼的短流程炼铁技术。相比传统高炉炼铁，具有原料适应性强、流程短、能耗较低等优点。近些年，随着优质铁矿石和焦煤价格飞涨，熔融还原工艺成为研究的热点。世界上已有熔融还原炼铁工艺约 30 余种，但至今仅 3 种工艺有较大发展且已经实现工业化，分别为 COREX、HISmelt 和 FINEX 工艺，其中 COREX 和 HISmelt 工艺在国内均获得了工业应用。根据工艺特征，熔融还原工艺可分为“一步法”和“二步法”两类。“一步法”是指铁矿石在一个反应器内完成还原、熔化和渣铁分离的过程，“二步法”则是指铁矿石先在预还原炉内完成预还原，然后在终还原炉内完成进一步还原、渣铁熔化及分离，同时产生的高温还原性气体返回至预还原炉用于铁矿石的预还原。

2.1 二步法熔融还原

“二步法”熔融还原工艺汲取了高炉炼铁、直接还原工艺和炼钢工艺的技术核心，得到了快速发展，其中技术成熟、最先实现工业化的是 COREX 工艺。COREX 熔融还原炼铁技术于上世纪 70 年代末由德国 Korf 工程公司和奥钢联(VAI)联合开发，并于 1987 年 12 月由南非伊斯科公司(ISCOR)在比勒陀利亚(Pretoria)建成世界上第一座 COREX 熔融还原炼铁装置(C-1000)，铁水设计年产量为 30 万 t，主要原料为块矿和煤炭，但运行 10 年后停产。随后世界范围内还建造了 8 套 COREX 熔融还原装置进行工业生产，包括 6 套 C-2000型(年产 65 万 t/a，其中印度 4 套、南非 1 套、韩国 1 套)和 2 套 C-3000 型(年产 150 万 t/a，宝钢分别建于 2007 年和 2011 年)熔融还原炼铁生产装置，目前韩国的 C-2000 型已经转成 FINEX 工艺，宝钢 C-3000 装置因铁水成本高、经济性差停产 1 座，另 1 座迁至铁精矿、煤炭资源和价格更具优势的八钢，通过技术升级改造和工艺优化，2015 年 7 月 19 日顺利出铁并成功实现工业化稳定生产，并命名为欧冶炉，现也已停产[41-42]。

COREX 熔融还原工艺原料、生产环节和主要设备及熔分气化炉结构示意如图 7 所示。COREX 工艺的实质是把高炉截为了上下两段，将含铁炉料的还原、熔炼过程分成两个独立的部分，分别在两个独立的反应器中完成。首先块矿、球团矿和熔剂等原料由顶部进入预还原竖炉，在与 850 ~ 900 ℃的上升高温还原气体接触过程中发生分解反应和还原反应，运行至竖炉底部时含铁原料被



(a) 工艺流程；(b) 熔分气化炉结构

图 7 Corex 熔融还原炼铁工艺流程和熔分气化炉结构示意[43]

Fig. 7 Process flow diagram of Corex smelting reduction ironmaking and schematic structure of the melter-gasifier

还原成一定金属化率的海绵铁(DRI)。为确保熔分气化炉的熔炼效率，COREX 工艺通常要求 DRI 金属化率要不低于 90%，但由于预还原竖炉中炉料经常易发生黏结，严重影响生产连续性，故欧冶炉工艺将 DRI 的金属化率要求下调至 70% 左右，实际生产运行中常低于 60%，这显著制约了熔分气化炉的冶炼效率。

预还原竖炉下方排出的海绵铁和分解后熔剂进入熔分气化炉中进行终还原，形成铁水。非焦煤直接进入熔分气化炉中，下行过程中被高温还原气体干燥和热解，脱除挥发分后形成半焦或焦炭，在炉底累积成死料柱。熔分气化炉缸圆周分布有多个风口，吹入工业氧气与非焦煤发生剧烈燃烧，产生 2 000 ℃以上的高温为终还原过程提供热量。炉顶煤气温度可达 1 100 ℃左右，主要成分有 CO、H_2、CH_4和 N_2，其中 CO 和 H_2体积分数约占总气体的 95%。同时，为了防止预还原竖炉进气口处的炉料发生黏结，气化炉排出的高温煤气必须混入约 20% 经净化后的冷煤气。混合气体温度约为 900 ℃，经旋风除尘后继续降低至约 850 ℃，供预还原竖炉使用。

为了优化 COREX 熔融还原工艺炉料质量、炉料结构和提升经济性，宝钢联合国内科研院所开展了大量研究。譬如中南大学针对预还原竖炉炉料黏结开发了高还原性低还原膨胀率的镁质熔剂性球团、为降低炉料成本开发了适合 COREX 工艺的低粉化烧结矿，促进了炉料结构由传统“球团 + 块矿”向“球团 + 烧结矿 + 块矿”转变、显著降低了炼铁成本[44-45]。此外，通过炉顶煤气循环、增设拱顶喷煤以及固废协同处置等技术措施，有效提高了煤气利用率和冶炼效率等[8,46]。

非高炉炼铁工艺与高炉炼铁工艺对比如表 8 所示。从现有的 COREX 熔融还原工艺引进和生产实际来看，虽然我国在 COREX 熔融还原工艺的消化吸收和技术创新方面开展了大量工作，但受原料和生产条件等因素制约，其在我国的商业化生产一直未能达到最初的设计要求。COREX 工艺并没有完全实现非焦冶炼，每吨铁水仍需使用 150 ~ 200 kg 的小块焦炭；生产效率偏低，低于 1 t/(m^3·d)；且铁水成本总体较传统高炉炼铁工艺高，在钢铁市场行情低迷时，易造成经济性下降、企业亏损。

未来，随着国内氢基竖炉直接还原工艺低碳低成本优质炉料制备和性能调控技术的研究和发展，有望为优化 COREX 熔融还原工艺、降低生产成本和提高经济性提供重要思路和参考；同时，二步法 COREX 工艺的生产实践，也为当前备受关注的气基直接还原 – 电炉熔分炼铁工艺的研发

表 8　非高炉炼铁与高炉炼铁工艺对比[29]

Table 8　Comparison between blast furnace ironmaking and alternative (non-blast furnace) ironmaking processes

工艺	核气设备	原料	燃料	生铁质量	投资成本	燃料消耗	发展年限
Corex	熔融气化炉、竖炉	块矿、球团	块煤、少量焦	高硅、S、P 较高	120 万 t 产能 25 亿	900 kg/t 块煤，另有 150 kg/t 焦炭	42 年
Finex	熔融气化炉、流态化还原炉、竖炉	粉矿	优质块煤、喷煤、部分焦碳	高硅、S、P 较高	150 万 t 产能 33 亿	750 ~ 850 kg/t，其中焦炭 200 kg/t	27 年
欧冶炉	熔融气化炉、竖炉	烧结、球团、生矿	沫煤、喷煤、部分焦碳	高硅、S、P 较高	135 万 t 产能 25 亿	800 ~ 850 kg/t，其中焦炭 200 kg/t	5 年
墨龙 HIsmelt	SRV 炉（铁浴炉）	粉料	煤	低硅；低 P；硫高，但其他有害元素极低	80 万 t HIsmelt 工厂投资 8 ~ 10 亿	700 ~ 900 kg/t 煤粉	37 年
高炉	高炉	烧结、球团、生矿	焦碳、喷煤	低硅、低 S、P 较高	100 万 t 产能 10 ~ 11 亿	500 kg/t，其中焦炭 350 kg/t	310 年

和应用提供了一定经验和借鉴[47]。

2.2 一步法熔融还原

一步法熔融还原工艺主要包括 FINEX、HIsmelt、Tecnored 和等离子体氢还原等技术[48]。

2.2.1 FINEX 工艺

FINEX 工艺是 1992 年由韩国浦项钢铁公司与奥钢联联合开发，经过近 15 年的研发，韩国浦项 2007 年建成了年产 150 万 t 铁水的生产线并投入商业化应用，并于 2014 年投产了 200 万 t 的生产线，其工艺流程如图 8 所示[49-50]。FINEX 工艺的核心是流化床预还原技术，即采用熔融气化炉产出的还原气体，通过三级流化床(流化床反应器系统整体高度约为 77 m)，对铁矿粉进行逐步还原，制备出金属化率为 70% 左右的直接还原铁。预还原的细粒 DRI 通过热压后进入熔融气化炉中，与型煤反应，最终产出铁水。

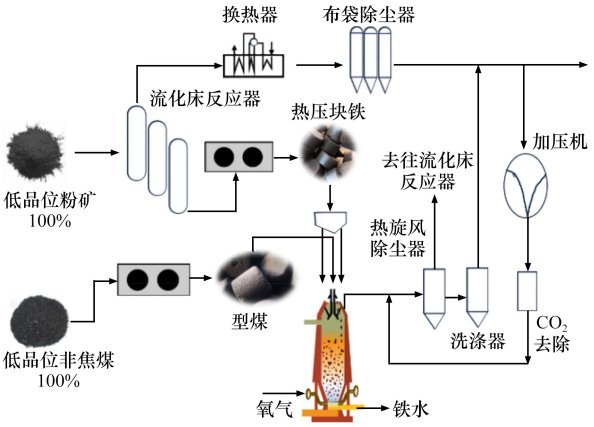


图 8 FINEX 熔融还原工艺流程示意

Fig. 8 Schematic flow diagram of the FINEX smelting reduction process

FINEX 以价格低廉、资源丰富的铁矿粉(粒度为 1 ~ 8 mm)和粉煤为主要原料，无需炼焦和铁矿造块工序，流程短、原料适应性强、成本较低、环境友好[52]。但是，FINEX 工艺中采用细粒级的铁精粉还原时，可能产生黏结失流现象，影响操作的连续性和稳定性，降低作业率。另外，预还原矿粉的压块和煤压块均增加了技术的投资成本。

2.2.2 HIsmelt 工艺

HIsmelt 工艺是最先由力拓公司 1982 年研发的直接采用铁矿粉和粉煤炼铁的单一熔池型熔融还原技术。2002 年，力拓集团、美国纽柯公司、日本三菱公司和中国首钢集团共同出资成立合营公司，推动该技术商业化进程，并于 2003 年建成了年产 80 万 t 的示范线；2012 年中国墨龙签订技术许可协议引进该技术，2013 年开始了 HIsmelt 寿光工厂建设，2016 年投产。HIsmelt 工艺取消了预还原竖炉，而是在一个密闭的熔融浴炉(SRV)中直接喷入铁矿粉，富氧高温热风和煤浆通过顶置的喷枪喷入铁浴中产生还原气体，在高温熔融浴中瞬间完成还原和熔化。同时，熔池上部逸出的 CO 和 H_2 二次燃烧，为熔池提供热量，这些热量通过熔池剧烈的喷溅运动被高效传递回下部熔池，为持续的还原反应和炉料熔化提供能量，从而形成了独特的“下吹上燃、热量自循环”体系。HIsmelt 工艺流程如图 9 所示[52-53]。

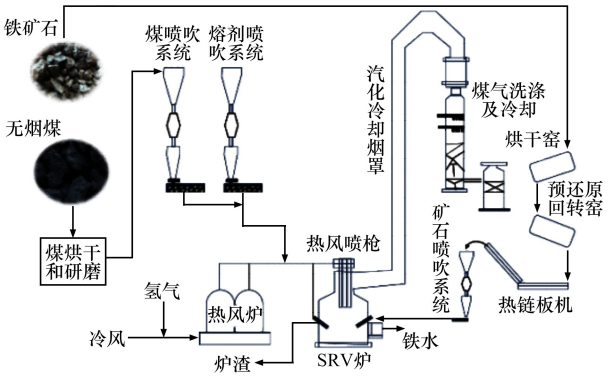


图 9 HIsmelt 熔融还原工艺流程示意

Fig. 9 Schematic flow diagram of the HIsmelt smelting reduction process

HIsemlt 熔融还原工艺具有流程短、设备紧凑、原料适应性强，铁水质量好、污染物排放小等优点，但其热效率和生产连续性受到熔池传质条件制约，早期试验装置运行中暴露出能耗较高、耐火材料侵蚀等问题，尚需进一步解决。

2.2.3 Tecnored 工艺

Tecnored 炼铁技术是由淡水河谷公司开发的一项突破性的创新技术，目前已达到单炉年产 40 万 t 铁水的生产规模。其特点：可将低成本铁矿粉/精矿和废氧化物作为炼铁原料使用，可以取消烧结或球团；可将成本较低的普通等极的煤作为还原气体和能量来源使用；完全取代焦炭；可生产经过完全还原的金属化铁水，供两种炼钢生产工艺使用；有利于环境保护；投资费用低，具有竞争力，能够将现有基础设施和厂房设备，充分用于高炉更新改造。根据现场条件和生产规模，

在欧洲具有代表性的项目单位投资费用在110～150 美元/(t·a)。此外，该工艺采用模块结构(炉体呈矩形截面)，这意味着这项技术既可在很宽的生产能力范围内发挥效益，又可分阶段实施。因此，在这种生产工艺过程中，将利用各种不同的含铁粉料(铁精矿、轧制氧化铁皮、炼钢厂废氧化物等)，含碳粉料(焦炭、煤、碎焦、木炭等)、黏结剂和熔剂制成的具有自还原性的冷压块。

同时，由于反应装置呈矩形，Tecnored 熔炼炉可采用模块结构。每个典型模块的生产能力为 40 t/h(日产约 1 000 t)，一套设备即可达到日产约 4 000 t 生产能力；而且由于该设备易于启动和停机，因此具有极大的生产操作灵活性，铁水产量可随时控制。

2.2.4　氢等离子还原熔炼

氢等离子还原熔炼(HPSR)是一种利用热等离子体技术，在高温、高焓的氢气环境中直接将铁矿石还原成金属铁的冶金工艺，其典型流程如图 10 所示。等离子体是物质的第四态，由大量离子、电子和中性粒子组成[54]。在 HPSR 工艺中，通常使用电弧等离子体炬，通过高压放电将氢气加热至数千摄氏度，形成高温等离子射流[55]。离子射流具备极高的能量密度和化学活性，能够为铁矿石的快速熔化和吸热的还原反应提供必需的巨大能量。另外，等离子体中的高能粒子(如激发态的氢原子 H^*、氢离子 H^+ 等)具有极高的化学反应活性[56]。研究表明，这些活性粒子能够显著降低铁氧化物还原反应的活化能，从而在动力学上极大地加速还原过程。这使得在传统热力学条件下难以进行的反应，在等离子体环境中变得高效可行[57]。

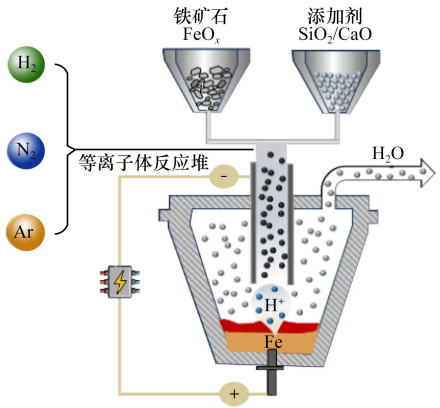


图 10　氢等离子还原示意

Fig. 10　Schematic diagram of hydrogen plasma reduction

典型的 HPSR 工艺流程是在特殊的反应器中进行，首先将铁精粉直接喷入反应器顶部的等离子体射流区，铁精粉在穿过高温氢等离子体射流的瞬间，被迅速加热至熔融状态，并发生部分还原。这个过程极短，从而显著提高了反应速率。部分还原的熔滴落入反应器底部的熔池中[58]。通过底部或侧壁吹入的氢气，或利用熔池上方的等离子体弧继续加热和搅拌，使熔融的氧化铁在熔渣－金属界面继续被深度还原，最终形成合格的液态铁水和炉渣。

与传统的炼铁相比，HPSR 具有绿色低碳、效率高、原料灵活、产品质量好等优点，是实现零碳炼铁的有效路径之一。但是，该技术在全球范围内仍处于从实验室走向中试验证的关键阶段，技术成熟度相对较低，尚未实现大规模商业化应用[59]。未来，HPSR 在走向产业化过程中仍然面临严峻挑战，包括巨大的能源消耗、等离子体炬的稳定性与放大、高温耐材、高昂的初始投资以及对绿电和绿氢成本的高度敏感性等。

2.3　DRI-ESF 工艺

近些年来，为解决大量中低品位铁矿资源的低碳冶炼，世界主要钢铁企业都在探索适用于中低品位铁矿的气基竖炉直接还原－电熔炼炉炼铁(DRI-ESF-BOF)技术。该技术是一种有别于已有的熔融还原新技术，其流程如图 11 所示。该技术通过氢基竖炉直接还原技术将中低品位的铁矿石还原成金属化球团，然后利用电熔分炉进行熔炼获得铁水[60]。电熔炉(ESF)主要通过电阻加热和短弧提供能量。由于其封闭式设计，在熔炉内可形成还原气氛。在熔炉中，直接还原的物料被熔化，进行最终还原，并将金属与炉渣分离。由于炉渣中的 FeO 含量非常低，因此熔炉对低金属化率的 DRI 不太敏感，这使得直接还原设备和熔炉单元能够进行组合优化，既解决了铁矿石来源，同时实现最大生产率[61]。另一方面，随着光电、风电、水电等技术的发展和推广，绿电规模迅速扩大，2023 年全球可再生能源新增装机 5.1 亿 kW，其中中国可再生能源装机达 13.22 亿 kW，

首次超过煤电，占总装机的 48.8%。绿电的大规模应用解决了电熔分炉绿色能源的来源问题，进一步助推了该技术的快速发展[62]。目前已有多家企业对 DRI-ESF 工艺进行产业布局。2021 年 3 月，安赛乐米塔尔宣布与法国液化空气集团签署协议研究在安赛乐米塔尔的敦刻尔克钢铁厂使用基于 100% H_2 的 DRI-ESF 工艺[63]。敦刻尔克钢铁厂当前有三座高炉，总年产能为 700 万 t 铁水。新工厂预计 2027 年投产，计划年产 200 万 t 铁水。预计到 2030 年，该厂每年的 CO_2 排放量可减少 285 万 t。2021 年 10 月，博思格宣布与力拓签署协议研究适用于西澳洲皮尔巴拉地区铁矿石的 DRI-ESF 工艺，计划使用绿氢将皮尔巴拉铁矿石直接还原成 DRI，然后在电熔炼炉中生产铁水。该项目已于 2024 年年底完成可行性研究，最早可于 2027 年投入使用。

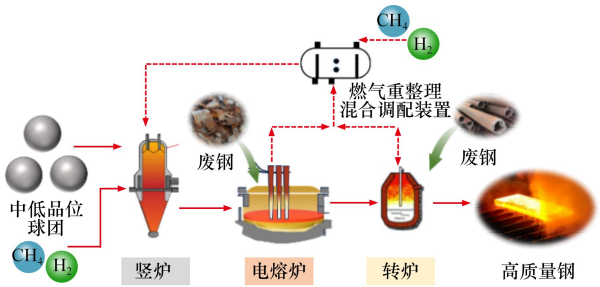


图 11 DRI-ESF 工艺流程示意

Fig. 11 Schematic flow diagram of the DRI-ESF process

DRI-ESF 熔融还原炼铁技术是钢铁行业迈向低碳、绿色、高效发展的关键路径之一，相较于传统高炉—转炉炼铁和氢基竖炉炼铁工艺，具有碳排放量小、原料适应性强等优势，具有广泛的应用前景。但是，该技术仍然面临着诸多挑战。

（1）中低品位铁矿氢基直接还原行为不明确。虽然铁氧化物富氢气基直接还原的机理研究广泛而深入，但研究所使用的原料多为脉石含量极低的高品位铁矿，而较低品位铁矿石的矿物组成及结构复杂，其制备出的氧化球团氢基还原行为和冶金特性与高品位铁矿氧化球团有所不同。因此，当前的研究结果并不能完全适用，有必要展开基础研究，为以中低品位铁矿为原料制备出高性能氧化球团的高效还原提供理论基础。

（2）电熔分炉冶炼电耗大。以中低品位的铁矿为原料制备的 DRI，其脉石含量高，冶炼过程渣量大、冶炼渣型不明确，导致冶炼电耗仍然偏高。以冶炼含铁 65% 的铁矿石为例，经预还原后入炉熔分，电耗为 1 200 ~ 1 300 kW·h/t 铁水。为此，需要系统研究中低品位 DRI 电熔分行为，明晰电炉炼铁过程冶金熔体的物性（熔点、黏度、表面与界面张力、电导率等）对冶炼过程的效率和产品质量的影响规律，建立适宜的 DRI 冶炼的渣型结构，开发出基于渣型调控的 DRI 电熔分炉炼铁技术，降低冶炼温度和电耗。

3 电解炼铁

电化学还原技术以电能为直接能量，将铁氧化物或铁离子直接电解成金属铁，是实现零碳炼铁的主要发展方向。该反应过程易控制且能量效率高，技术优势明显，但仍处于实验室阶段[64-65]。根据电解质性质，可分为熔盐体系、碱性溶液体系、酸性溶液体系和离子液体体系[66]。

3.1 熔盐电解

熔盐电解根据金属氧化物的存在形式可分为熔盐电脱氧、熔盐电沉积和熔融氧化物电解[67]。熔盐电脱氧技术是将固体氧化物制成阴极，在低于金属熔点和熔盐分解电压的条件下将金属氧化物还原成金属单质。王有群等[68]认为影响铁氧化物电还原的因素除了电解参数以外，还需要考虑烧结参数。烧结过程分解黏结剂时产生的孔穴有利于电解质进入，从而加快电解速率；同时，烧结会促进晶粒重结晶，连接方式由点转为面，有利于电子空穴的传递。然而，过高烧结温度会导致阴极孔隙率降低，不利于 O^{2-} 外扩散。此外，在电解铁氧化物过程中，含钙熔盐在电解过程会形成 CaO，并与铁氧化物反应生成铁酸钙，从而降低还原效率。熔盐电沉积工艺是将铁氧化物或铁矿石熔于电解质中，从而电还原获得金属铁。PANG 等[69]以 CaO-$CaCl_2$ 为电解质制高纯铁，结果表明，CaO 加入可促进 Fe_2O_3 溶解，并诱导其形成 $Fe_2O_4^{2-}$ 和 $Fe_2O_5^{4-}$ 离子，随后在阴极得到高纯金属铁。随着时间延长，铁膜厚度增大，超过某一限度时则会发生浓差极化，铁膜表面形成结瘤现象，使得电流效率降低。如若要保持电流效率高于 80%，则需要控制电解时间在 6 h 以内。上

述两种技术具有流程简单、无污染、产品灵活性强等优点，但是存在技术成熟度低、能耗高、电极寿命短、成本高和熔盐体系维护难等问题。

熔融氧化物电解技术(MOE)是由美国麻省理工学院于20 世纪 90 年代初提出的一种从废弃物中提取金属的工艺，其原理是将氧化铁加热至熔化状态，然后置于合适的电解质体系中，电解产生液态铁，即 $2Fe_2O_3(l) \rightarrow 4Fe(s) + 3O_2(g)$。目前 MOE 技术均处于实验室阶段，且面临一些挑战：① 电耗高。理论上 25 ℃固态 Fe_2O_3 电解得到 1 600 ℃液态铁和氧气的焓变为 9 474 MJ/t(以每吨铁计)，折合吨铁电耗 2 632 kW·h/t,考虑到将固态 Fe_2O_3 加热到熔融和热量损失，估计吨铁能耗超过 5 200 kW·h/t;② 电解质体系不匹配。电解质必须在温度高于 1 600 ℃下挥发率低、稳定，同时 Fe_2O_3 和 FeO 在其中有足够的溶解度；③ 电极材料贵，成本高，目前阳极使用铱铂合金，阴极正在开发碳化物材料及铂铑钼合金[70-71]。

3.2　溶液电解

碱性溶液体系电解铁被认为是最有前景的铁生产技术之一，其原理是将 Fe_2O_3、Fe_3O_4 或铁基复合金属氧化物通过悬浮或制备成阴极的形式加入到碱性溶液中，从而电解获得金属铁[72-73]。在反应过程中，铁化合物基本以固态形式存在，阴极处则通过溶解 - 电沉积机制、固态还原机制得到金属铁，阳极只产生氧气[74]。通过该技术可制备出铁品位高达 99.98% 的金属铁，电耗为 2 600 ~ 3 000 kW·h/t。但目前仅开展了 5 kg/d 的中试研究，未见更大规模验证试验的相关报道。此外，该技术为了避免杂质对溶液电沉积铁的不利影响，需通过酸或碱溶液对铁矿进行预先除杂，造成流程长，经济、环境成本高。

与电解制备金属锰、锌一样，铁也可以在酸性溶液体系中通过电解方法制备，其中亚铁离子酸性水溶液电解法最为常用。目前，常用的电解体系有硫酸盐体系和氯化物体系。采用硫酸盐作为电解制铁过程中的主盐，其优势主要体有：硫酸亚铁溶液在化学性质上相对稳定，且不易挥发，有助于维持电解过程的连续性和可靠性；硫酸溶液体系的腐蚀性相对较低，这有助于延长电解设备的使用寿命、减少维护成本[75]。同时，硫酸亚铁作为一种广泛使用的化学制品，其价格相对较低。然而在高纯铁的联合制备工艺中，硫酸盐体系会在电解纯铁中引入硫杂质，而硫杂质在后续的电弧熔炼阶段难以去除，导致最终高纯铁中硫含量偏高。此外，硫酸盐体系还存在导电性相对较低、能耗高和硫酸亚铁纯化难度高等问题[76]。这些缺点导致硫酸盐体系难以在高纯铁生产工业上得到广泛应用。

相比之下，在氯化物体系 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 溶解度高，离子导电率高，能够在较高的阴极电流密度下运行，从而加快铁的电沉积速率。此外，氯化物体系中的杂质更易通过溶剂萃取或离子交换等方法进行提纯，提供高纯度的 Fe^{2+} 溶液体系。尽管氯化物体系在电解精炼铁的工业应用中具有明显优势，但其工业化推广仍面临一系列技术挑战。这些挑战主要包括电解液的稳定性、析氢副反应、氯化物体系中的盐酸组分易挥发、设备腐蚀以及环境和安全等问题[77]。这些问题不仅制约了高纯铁的生产效率和产品质量，也对生产环境的安全性构成潜在威胁。

绿色电解炼铁技术的发展为钢铁行业实现低碳转型提供了一条可能的路径。但熔盐体系目前仍处于实验室阶段，虽然可以高效稳定制备高纯铁粉，但仍存在能耗高、成本高、熔盐体系维护难等问题。未来应深入研究熔盐电解反应机制、熔盐的热腐蚀和化学腐蚀性质及低成本且耐高温的惰性阳极开发。碱性溶液体系处于研发早期阶段，具备电解条件温和、析氢副反应小等优点，但杂质存在对其有损害，需进一步研究杂质影响机制和相应除杂策略。酸性溶液体系已经实现了商业应用。然而，高浓度的氢离子会促进竞争性的析氢副反应，导致反应电流效率降低。开发适时调节溶液 pH 值，提高析氢过电位的技术是抑制析氢反应的有效策略。

4　结　论

本文较为全面的介绍了非高炉炼铁技术进展，包括煤基回转窑直接还原、气基竖炉直接还原、熔融还原及电解炼铁等工艺的应用现状，得到以

下结论。

（1）发展高品位气基直接还原铁的生产可为我国短流程低碳炼钢提供重要支撑，煤基直接还原主要用于复杂铁矿资源，尤其是钢厂二次含铁资源的高效利用。

（2）基于我国能源结构调整及大力发展氢能源的背景，氢竖炉直接还原的氢冶金及电气化炼铁的非高炉炼铁技术推广应用将是我国钢铁工艺实现双碳目标的重要发展方向。

（3）在世界铁矿资源日益劣化的形式下，富氢竖炉直接还原－电炉熔分工艺（DR-ESF法）是高效利用复杂铁矿资源炼铁的低碳工艺，具有广阔的发展前景。

参考文献：

[1] TANG C M, GUO Z Q, PAN J, et al. Current situation of carbon emissions and countermeasures in China's ironmaking industry[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(9): 1633－1650.

[2] 赵禹程，徐潜，周为，等. 中国钢铁出口受碳边境调节机制影响与对策[J]. 钢铁，2025，60(1)：191－203.
ZHAO Yucheng, XU Qian, ZHOU Wei, et al. Impact of CBAM on China's iron and steel exports and countermeasures[J]. Iron & Steel, 2025, 60(1): 191－203.

[3] 叶恒棣，王兆才，陈明远，等. 球团矿配比对高炉能质流动及碳足迹影响的分析[J/OL]. 烧结球团，2026，51(1)：1－16[2026－01－09]. https://link.cnki.net/urlid/43.1133.TF.20251226.1137.008.
YE Hengdil, WANG Zhaocail, CHEN Mingyuan, et al. Analysis of the effect of pellet ratio on energy-mass flow and carbon footprint in blast furnace[J/OL]. Sintering and Pelletizing, 2026, 51(1): 1－16 [2026－01－09]. https://link.cnki.net/urlid/43.1133.TF.20251226.1137.008.

[4] 鲁雄刚，张玉文，武文合，等. 高炉富氢冶炼理论与实践[J]. 钢铁，2025，60(7)：193－205.
LU Xionggang, ZHANG Yuwen, WU Wenhe, et al. Theory and practice of hydrogen-rich smelting in blast furnace [J]. Iron & Steel, 2025, 60(7): 193－205.

[5] 毛晓明，许海法. 富氢碳循环氧气高炉工艺开发与实践[J]. 钢铁，2024，59(9)：32－37.
MAO Xiaoming, XU Haifa. Process development and practice of HyCROF[J]. Iron and Steel, 2024, 59(9): 32－37.

[6] 张盟，俸曾，胡航，等. 我国氢冶金发展现状及重点技术减碳潜力分析[J]. 冶金设备，2025(2)：1－8.
ZHANG Meng, FENG Zeng, HU Hang, et al. Development status of hydrogen metallurgy in China and analysis of carbon reduction potential of key technologies [J]. Metallurgical Equipment, 2025(2): 1－8.

[7] 崔志峰，上官方钦，马文略，等. 双碳背景下中国钢铁行业未来发展趋势探讨[J]. 工程科学学报，2025，47(4)：862－874.
CUI Zhifeng, SHANGGUAN Fangqin, MA Wenlue, et al. Discussion on the future development trend of China's iron and steel industry under the background of double carbon[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(4): 862－874.

[8] 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 Xiangguo, JIA Lijun. Development status and production practice of smelting reduction ironmaking technology in China[J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(4): 90－91.

[9] SUER J, AHRENHOLD F, TRAVERSO M. Carbon footprint and energy transformation analysis of steel produced via a direct reduction plant with an integrated electric melting unit[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2022, 8(4): 1532－1545.

[10] 朱庆山. 超低碳炼铁技术路径分析[J]. 化工进展，2022，41(3)：1391－1398.
ZHU Qingshan. Development pathway analyses for various ironmaking routes with ultra-low CO_2 emission [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1391－1398.

[11] 朱庆山，张会刚，杨埔蘅. 电解炼铁技术进展[J]. 中国科学：化学，2025，55(9)：2880－2892.
ZHU Qingshan, ZHANG Huigang, YANG Ngyang. Status quo of electrolytic ironmaking technology[J]. Scientia Sinica (Chimica), 2025, 55(9): 2880－2892.

[12] 杨悦. 全球直接还原铁突破1.4亿t，印度引领增长新浪潮[N]. 中国冶金报，2025－9－12.
YANG Yue. Global DRI output surpasses 140 million tons, india leads new wave of growth[N]. China Metallurgical News, 2025－9－12.

[13] 杨双平. 直接还原与熔融还原冶金技术[M]. 北京：冶金工业出版社,2013.
YANG Shuangping. Metallurgical technology of direct reduction and melting reduction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2013.

[14] 张建良,刘征建,杨天钧. 非高炉炼铁[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, YANG Tianjun. Non-blast furnace ironmaking[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2015.

[15] 马敬喜. 煤基链箅机—回转窑一步法直接还原设备改造及技术操作要点[J]. 烧结球团,2003,28(2):42 – 47.
MA Jingxi. The equipments reform and the technique operation principal points of one-step coal based grate-kiln dr process [J]. Sintering and Pelletizing, 2003, 28(2):42 – 47.

[16] 赵庆杰,储满生. 电炉炼钢原料及直接还原铁生产技术[J]. 中国冶金,2010,20(4):23 – 28.
ZHAO Qingjie, CHU Mansheng. EAF steelmaking raw materials and direct reduction ironmaking processes[J]. China Metallurgy,2010,20(4):23 – 28.

[17] 杨绍利. 钒钛磁铁矿非高炉冶炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
YANG Shaoli. Non-blast furnace smelting technology of vanadium-titanium magnetite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2012.

[18] 刘树立. 国外铁矿石直接还原厂[M]. 北京:冶金工业出版社,1990.
LIU Shuli. Direct reduction of foreign iron ore to the original factory[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1990.

[19] 沈峰满,姜鑫,高强健,等. 直接还原铁生产技术的现状及展望[J]. 钢铁,2017,52(1):7 – 12.
SHEN Fengman, JIANG Xin, GAO Qiangjian, et al. Situation and prospect on production technology of direct reduction iron[J]. Iron & Steel,2017,52(1):7 – 12.

[20] 刘自民,饶磊,桂满城,等. 马钢含铁尘泥综合利用研究与实践[J]. 中国冶金,2018,28(9):71 – 76.
LIU Zimin,RAO Lei,GUI Mancheng,et al. Research and practice of comprehensive utilization of Fe-containing dust in Masteel [J]. China Metallurgy, 2018, 28 (9): 71 – 76.

[21] 陶江善. 天津钢管 DRC 回转窑直接还原工艺技术的特点[C]//全国回转窑直接还原生产工艺培训交流会,天津:中国直接还原网,2020:54 – 63.
TAO Jiangshan. Characteristics of the rotary kiln direct reduction process technology at Tianjin Steel Pipe[C]// National Training and Exchange Conference on Rotary Kiln Direct Reduction Production Processes, Tianjin: China Direct Reduction Network,2020:54 – 63.

[22] 朱德庆,潘建,郭正启,等. 低品位红土镍矿冶炼不锈钢新技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2023.
ZHU Deqing, PAN Jian, GUO Zhengqi, et al. New technology for smelting stainless steel from low-grade laterite nickel ores[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2023.

[23] 郭磊,刘枫,郭占成. 钢铁冶金技术发展历程与新时期低碳发展路径[J]. 化工进展,2024,43(7):3567 – 3577.
GUO Lei, LIU Feng, GUO Zhancheng. Development process of iron and steel metallurgy technology and the low-carbon development path in the new era[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(7):3567 – 3577.

[24] 汪志远. 卡塔尔油气工业发展史述略[J]. 西安石油大学学报(社会科学版),2020,29(2):61 – 66.
WANG Zhiyuan. Overview on development history of Qatar oil and gas industry[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Social Sciences),2020,29(2):61 – 66.

[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.
ZHANG Fuming,CAO Chaozhen,XU Hui. Current status and prospects of gas-based shaft furnace direct reduction technology[J]. Iron and Steel,2014,49(3):1 – 10.

[26] 侯有玲. 球团矿 CO-H_2 气体直接还原行为及气体利用率研究[D]. 重庆:重庆大学,2023.
HOU Youling. Study on the direct reduction behavior and gas utilization of pellets by CO-H_2 gas[D]. Chongqing: Chongqing University,2023.

[27] 黄小兵. 2021 年 MIDREX 工艺直接还原铁产能分析[J]. 中国钢铁业,2022(11):38 – 41.
HUANG Xiaobing. 2021 MIDREX process DIR capacity analysis[J]. China Steel,2022(11):38 – 41.

[28] 张殿伟,郭培民,赵沛. 现代炼铁技术进展[J]. 钢铁钒钛,2006,27(2):26 – 32.
ZHANG Dianwei, GUO Peimin, ZHAO Pei. Progress in modern ironmaking process[J]. Iron Steel Vanadium

Titanium,2006,27(2):26 – 32.

[29] 马世红. 高铬型钒钛磁铁矿煤基直接还原 – 熔分实验研究[D]. 沈阳:东北大学,2017.
MA Shihong. Research on coal-based direct reduction and melting separation of a high-chromium vanadium-titanium magnetite[D]. Shenyang:Northeastern University,2017.

[30] 吴开基. 气基直接还原竖炉用氧化球团的制备及其冶金特性研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
WU Kaiji. Experimental study on preparation and metallurgical characteristics of oxidized pellets for gas-based shaft furnace direct reduction[D]. Shenyang: Northeastern University,2011.

[31] 王子涵. 回转窑碳 – 氢复合还原含铁、锌尘泥工艺及机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2023.
WANG Zihan. Rotary kiln hydrocarbon composite reduction of Fe-Zn containing dust and sludge process and mechanism research[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2023.

[32] 郭汉杰,孙贯永. 非焦煤炼铁工艺及装备的未来(2):气基直接还原炼铁工艺及装备的前景研究(上)[J]. 冶金设备,2015(3):1 – 13.
GUO Hanjie, SUN Guanyong. Future of Process and Equipment on non-coking Coal Ironmaking (II): Prospect study on process and equipment for gas-based direct reduction ironmaking (I)[J]. Metallurgical Equipment,2015(3):1 – 13.

[33] 胡俊鸽. 直接还原技术新进展[J]. 矿业工程,2005,3(6):40 – 42.
HU Junge. Latest progresses of direct reduction technology [J]. Mining Engineering,2005,3(6):40 – 42.

[34] 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.
ZHU Deqing, XUE Yuxiao, PAN Jian, et al. Research progress and development thinking of gas-based direct reduction process [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1):1 – 9.

[35] 胡俊鸽,毛艳丽,赵小燕. 气基竖炉直接还原技术的发展[J]. 鞍钢技术,2008(4):9 – 12.
HU Junge, MAO Yanli, ZHAO Xiaoyan. Development of direct reduction technology of gas-based shaft furnace [J]. Angang Technology,2008(4):9 – 12.

[36] 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.

[37] International Organization for Standardization. Iron ore-dynamic test for low-temperature reduction-disintegration: ISO 13930 – 2015[S].

[38] International Organization for Standardization. Iron ore-Determination of disintegration and metallization of feedstock for direct reduction by gas reforming processes: ISO 11257 – 1998[S].

[39] International Organization for Standardization. Iron ore-Determination of reducibility and metallization of feedstock for direct reduction by gas reforming processes: ISO 11257 – 1999[S].

[40] 徐梦杰. 铁精矿球团气基直接还原基础研究[D]. 长沙:中南大学,2018:45.
XU Mengjie. Fundamental research on gas-based direct reduction of iron ore concentrate pellets[D]. Changsha: Central South University,2018:45.

[41] 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.
YING Ziwei, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process[J]. Hebei Metallurgy,2019 (6):1 – 7.

[42] 袁万能,李涛,刘正新. 八钢低碳炼铁技术思路与实践[J]. 新疆钢铁,2022(1):1 – 4.
YUAN Wanneng, LI Tao, LIU Zhengxin. Thoughts and practice of low carbon ironmaking technology of bayi steel [J]. Xinjiang Iron and Steel,2022(1):1 – 4.

[43] ZHOU X L, PU S, LIU N B. Development of smelting reduction ironmaking process[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 768(2):022003.

[44] 朱德庆,高子富,潘建,等. 碱度及 MgO 质量分数对球团焙烧及冶金性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(10):3963 – 3970.
ZHU Deqing, GAO Zifu, PAN Jian, et al. Influence of pellet basicity and MgO content on roasting and metallurgical properties of pellets[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(10):3963 – 3970.

[45] ZHU D Q, CHOU J L, SHI B J, et al. Influence of MgO on low temperature reduction and mineralogical changes

of sinter in simulated COREX shaft furnace reducing conditions[J]. Minerals,2019,9(5):272.

[46] 田宝山. 非高炉炼铁技术的发展现状[C]//第十二届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2019:1-6.
TIAN Baoshan. Development status of non-blast furnace ironmaking technology [C]//Proceedings of the 12th Chinese Iron and Steel Annual Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals,2019:1-6.

[47] YANG C C, WEI L, ZHU D Q, et al. Hydrogen-based direct reduction behavior of iron ore pellets with iron grades ranging from 59% to 68% [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2025,138:787-801.

[48] 何桂珍,都兴红,曲赫威,等. 非高炉冶炼技术的发展现状与展望[J]. 矿产综合利用,2014,35(3):1-7.
HE Guizhen, DU Xinghong, QU Hewei, et al. Present status and development perspective of non-blast furnace ironmaking technology [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2014,35(3):1-7.

[49] 徐少兵,许海法. 熔融还原炼铁技术发展情况和未来的思考[J]. 中国冶金,2016,26(10):33-39.
XU Shaobing, XU Haifa. Development of smelting reduction iron making technology and future thinking [J]. China Metallurgy,2016,26(10):33-39.

[50] JEONG W, LEE J, KO C K, et al. Development and evaluation of FINEX off-gas capture and utilization processes for sustainable steelmaking industry[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2023,127:103936.

[51] 赵中秋. 熔融还原炼铁技术分析与发展建议[J]. 冶金与材料,2019,39(2):88-89.
ZHAO Zhongqiu. Analysis and development suggestion of smelting reduction ironmaking technology[J]. Metallurgy and Materials,2019,39(2):88-89.

[52] 王敏,任荣霞,董洪旺,等. 熔融还原炼铁最新技术及工艺路线选择探讨[J]. 钢铁,2020,55(8):145-150.
WANG Min, REN Rongxia, DONG Hongwang, et al. Latest technology of melting reduction ironmaking process and discussion of process route choice[J]. Iron & Steel,2020,55(8):145-150.

[53] 张冠琪,张晓峰,魏召强,等. HIsmelt 熔融还原工艺的技术创新及发展现状[J]. 炼铁,2023,42(1):64-67.
ZHANG Guanqi, ZHANG Xiaofeng, WEI Zhaoqiang, et al. Technological innovation and development status of HIsmelt process[J]. Ironmaking,2023,42(1):64-67.

[54] SOUZA FILHO I, MA Y, KULSE M, et al. Sustainable steel through hydrogen plasma reduction of iron ore: Process, kinetics, microstructure, chemistry[J]. Acta Materialia,2021,213:116971.

[55] ADAMI B, HOFFELNER F, ZARL M A, et al. Strategic selection of a pre-reduction reactor for increased hydrogen utilization in hydrogen plasma smelting reduction[J]. Processes,2025,13(2):420.

[56] SABAT K C, MURPHY A B. Hydrogen plasma processing of iron ore[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2017,48(3):1561-1594.

[57] SABAT K C. Hematite reduction by hydrogen plasma: Where are we now? [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(10): 1932-1945.

[58] ERNST D, MANZOOR U, SOUZA FILHO I R, et al. Impact of iron ore pre-reduction degree on the hydrogen plasma smelting reduction process [J]. Metals, 2023, 13(3):558.

[59] 丁成义,薛生,常仁德,等. 等离子体还原技术在冶金工艺中的应用[J]. 钢铁研究学报,2024,36(5):568-579.
DING Chengyi, XUE Sheng, CHANG Rende, et al. Application of plasma reduction technology in metallurgical processes[J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(5):568-579.

[60] GARLICK C, SINGH T, PAYMOONI K, et al. Electrode smelting of hydrogen-reduced hematite-goethite at laboratory scale[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2025,29:1-14.

[61] WANG Z Y, ZHANG J L, JIAO K X, et al. Effects of pre-reduction degree of ironsand on slag properties in melting separation process[J]. Steel Research International, 2018,89(3):1700363.

[62] ARIYAMA T. Perspectives on the promising pathways to zero carbon emissions in the steel industry toward 2050 [J]. ISIJ International,2025,65(2):165-184.

[63] Australian Renewable Energy Agency. ARENA Insights Spotlight Interview: the NeoSmelt joint venture[EB/OL]. (2025-03-15)[2026-12-01]. https://arena.gov.au/insights/neo-smelt-joint-venture.

[64] 张迪,王博,曹鑫,等. 水溶液电解制铁的工艺技术研究进展[J]. 钢铁研究学报,2025,37(6):708 – 727.
ZHANG Di, WANG Bo, CAO Xin, et al. Electrolytic preparation of pure iron in aqueous solutions: State-of-the-art[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2025, 37(6):708 – 727.

[65] 许茜,黎阿巧,孙晨藤,等. 电化学方法制铁研究的进展[J]. 上海金属,2021,43(1):93 – 99.
XU Qian, LI Aqiao, SUN Chenteng, et al. Progress of research on fabrication of iron by electrochemical process [J]. Shanghai Metals,2021,43(1):93 – 99.

[66] XU X, SONG F, HU X L. A nickel iron diselenide-derived efficient oxygen-evolution catalyst[J]. Nature Communications,2016,7:12324.

[67] LI H, SONG L Y, LIANG J L, et al. Study on the influence of CaO on the electrochemical reduction of Fe_2O_3 in NaCl-$CaCl_2$ molten salt[J]. Molecules, 2023, 28(24):8103.

[68] 王有群,林如山,何辉,等. NaCl-$CaCl_2$ 熔盐体系中电脱氧制备金属 Fe 的工艺研究[J]. 有色金属科学与工程,2020,11(5):39 – 44.
WANG Youqun, LIN Rushan, HE Hui, et al. Preparation of iron by electrodeoxidation in NaCl-$CaCl_2$ molten salt system[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2020,11(5):39 – 44.

[69] PANG Z Y, LI J J, CHEN S, et al. Direct electrodeposition of high-purity iron from Fe_2O_3 in molten calcium chloride[J]. ISIJ International, 2024, 64(6): 944 – 953.

[70] WIENCKE J, LAVELAINE H, PANTEIX P J, et al. Electrolysis of iron in a molten oxide electrolyte[J]. Journal of Applied Electrochemistry,2018,48(1):115 – 126.

[71] ALLANORE A. Features and challenges of molten oxide electrolytes for metal extraction[J]. Journal of the Electrochemical Society,2015,162(1):E13 – E22.

[72] CAVALIERE P. Clean ironmaking and steelmaking processes: Efficient technologies for greenhouse emissions abatement[C]//Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. Cham: Springer International Publishing, 2019:1 – 37.

[73] YUAN B Y, KONGSTEIN O E, HAARBERG G M. Electrowinning of iron in aqueous alkaline solution using a rotating cathode[J]. Journal of the Electrochemical Society,2009,156(2):D64.

[74] MONTEIRO J F, IVANOVA Y A, KOVALEVSKY A V, et al. Reduction of magnetite to metallic iron in strong alkaline medium[J]. Electrochimica Acta, 2016, 193: 284 – 292.

[75] MOSTAD E, ROLSETH S, THONSTAD J. Electrowinning of iron from sulphate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2008,90(2/3/4):213 – 220.

[76] 李毅仁,李鹏阳,魏光升,等. 电化学还原法制备金属铁研究进展[J]. 钢铁,2025,60(10):17 – 30.
LI Yiren, LI Pengyang, WEI Guangsheng, et al. Research progress in preparation of iron by electrochemical reduction[J]. Iron and Steel,2025,60(10):17 – 30.

[77] 朱庆山. 超低碳炼铁技术路径分析[J]. 化工进展,2022,41(3):1391 – 1398.
ZHU Qingshan. Development pathway analyses for various ironmaking routes with ultra-low CO_2 emission [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3):1391 – 1398.