综述

# 气基直接还原工艺研究进展和发展思考

朱德庆[1]，薛钰霄[1]，潘 建[1]，唐筑成[2]，杨聪聪[1]，江荣才[2]
（1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；2. 福建三钢闽光股份有限公司，福建 三明 365000）

**摘要**：钢铁工业低碳发展对我国如期实现“碳达峰”和“碳中和”的目标至关重要。本文在介绍目前钢铁工业碳排放现状及直接还原工艺发展现状的基础上分析了气基直接还原工艺发展趋势，指出气基竖炉工艺是其大力发展的方向，并提出了实现该工艺设备大型化及促进原料来源多样化的建议，以期为行业碳减排提供解决方案。

**关键词**：碳减排；直接还原；气基直接还原；DRI；铁精矿
**中图分类号**：TF55 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0001－09
**doi**：10.13403/j.sjqt.2022.01.001

## Research progress and development thinking of gas-based direct reduction process

**ZHU Deqing**[1], **XUE Yuxiao**[1], **PAN Jian**[1], **TANG Zhucheng**[2], **YANG Congcong**[1], **JIANG Rongcai**[2]
(1. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 2. *Fujian Sansteel Minguang Co., Ltd., Sanming* 365000, *Fujian, China*)

**Abstract**: The low carbon development of the iron and steel industry is crucial to achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals on schedule. Based on the introduction of the current status of carbon emission reduction in the iron and steel industry, the current development of direct reduction process is summarized, the development trend of gas-based direct reduction process is analyzed, it is pointed that the gas-based shaft furnace process is the direction of its vigorous development, and the suggestions to realize the large-scale process equipment and to promote the diversification of raw material sources are proposed in order to offer solutions for carbon emission reduction in industry.

**Key words**: carbon emission reduction; direct reduction; gas-based direct reduction; DRI; iron concentrate

2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上向国际社会作出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的郑重承诺。2020年12月16－18日的中央经济工作会议，首次将“做好碳达峰、碳中和工作”列入新一年的重点任务。2021年全国两会，“碳达峰”和“碳中和”首次被写入政府工作报告[1-2]。工信部发布的《关于推动钢铁工业高质量发展的指导意见》确立了“力争到2025年，氢冶金、非高炉炼铁等前沿技术取得突破进展”、“电炉钢产量占粗钢总产量占比提升至15%以上(力争达到20%)，废钢比达到30%”的目标[3]。可见，钢铁工业低碳发展是目前的政策导向。

2020年全球 $CO_2$ 排放量达30 355.57 Mt，其中中国 $CO_2$ 排放量为9 487.10 Mt，占世界 $CO_2$ 排放量的31.25%，中国碳减排任务任重而

**收稿日期**：2021－12－04；**修回日期**：2022－01－17
**基金项目**：中南大学研究生自主探索创新项目(2021zzts0292)
**作者简介**：朱德庆(1964—)，男，教授，从事在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。
**通讯作者**：薛钰霄(1994—)，男，博士，从事铁矿粉造块理论与新工艺、复合铁矿资源综合利用等方面的研究。

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

道远。世界钢铁协会统计数据显示，全球平均每生产1 t钢会排放1.8 t $CO_2$，钢铁行业$CO_2$排放量约占全球$CO_2$总排放量的6.7%，而我国作为钢铁大国，钢铁行业碳排放量约占全国碳排放总量的15%，占工业制造业的47%[4-5]。因此，推动钢铁行业的绿色低碳发展，对我国如期实现“碳达峰”和“碳中和”的目标至关重要。

本文在介绍钢铁工业碳排放现状的基础上，表明了发展直接还原工艺的重要性，并在阐明直接还原工艺(特别是气基直接还原工艺)发展现状的基础上，介绍了本团队高品位铁精矿球团气基直接还原工艺的相关基础研究，并对气基直接还原工艺发展提出了建议，以期为行业碳减排提供解决方案。

## 1 钢铁工业碳排放现状

2020年世界粗钢产量为18.78亿吨，其中钢铁冶炼长流程(BF-BOF长流程)粗钢产量占比达到73.2%。据相关研究测算，长流程炼钢的吨钢碳排放量约为2.1 t，短流程炼钢吨钢碳排放量约为0.9 t，长流程$CO_2$排放量占钢铁工业总排放量的85%以上。而从钢铁企业的能源结构来看，煤消耗产生的$CO_2$排放量占比最大，达到92%[6-7]。因此，在基于碳还原的传统冶金工艺中，炼铁工艺是钢铁工业$CO_2$排放的主要源头。

钢铁生产各工艺流程$CO_2$排放规律见表1。由表1可知，在传统钢铁冶炼工艺中，焦化、烧结、高炉+发电、热风炉等铁前工艺$CO_2$排放量占钢铁生产总$CO_2$排放量的88.75%，烧结球团及炼铁工艺低碳发展任重道远。

各钢铁冶炼工艺$CO_2$排放情况对比见表2。由表2可知，BF-BOF长流程吨钢$CO_2$排放量达到1.82 t，而气基+废钢(DR-EAF)短流程和全废钢电炉冶炼工艺中吨钢$CO_2$排放量分别为1.45 t和0.40 t。因此，钢铁生产减碳技术路径上“高炉转电炉”是主要方向，预计到2030年，电炉钢产量在钢铁产量中的占比将提升至30%左右。而由于我国废钢资源匮乏及来源不稳定，DR-EAF短流程有显著低碳减排的冶炼优势[8-10]。

**表1 传统钢铁冶炼各生产环节$CO_2$排放量及占比[4]**

**Table 1 $CO_2$ emissions of each production link of iron and steel smelting and its relevant proportion**

| 生产环节 | $CO_2$排放量/(kg·t$^{-1}$) | 占比/% |
|---|---|---|
| 石灰 | 57 | 3.14 |
| 焦化 | 285 | 15.70 |
| 烧结 | 288 | 15.87 |
| 高炉+发电 | 709 | 39.06 |
| 热风炉 | 329 | 18.12 |
| 热轧 | 84 | 4.63 |
| 转炉 | 63 | 3.47 |
| 合计 | 1 815 | 100.00 |

**表2 各钢铁冶炼工艺$CO_2$排放情况对比**

**Table 2 Comparison of $CO_2$ emissions of different iron and steel smelting processes**

| 钢铁冶炼工艺 | 吨钢$CO_2$排放量/t |
|---|---|
| BF-BOF长流程 | 1.82 |
| 全废钢电炉冶炼工艺 | 0.40 |
| DR-EAF短流程 | 1.45 |

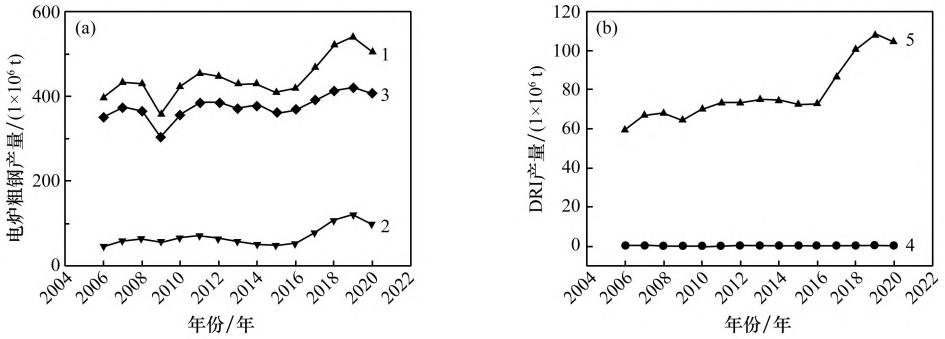
由于在废钢不断循环使用中有害元素不断积累，必须添加直接还原铁(DRI)稀释钢水中的有害元素，才能冶炼出优质钢、特殊钢。因此，电炉炼钢短流程的快速发展将为DRI的生产发展提供广阔的市场。

## 2 气基直接还原发展现状及优势

### 2.1 直接还原铁发展现状

2006~2020年电炉粗钢及DRI产量变化见图1。DRI是冶炼高品质钢铁的优质炉料，可作为“稀释剂”添加到以废钢为主要原料的电炉冶炼中，全球主流的电炉炼钢流程原料：废钢(50%~70%)+DRI(30%~50%)。自2015年来，全球DRI产量增幅50%，2020年世界DRI产量达到1.044亿吨。而中国电炉炼钢发展较为缓慢，远低于世界平均水平；但随着中国电炉钢产能逐渐增加、废钢铁产业迅速发展，在“地条钢”大量清除和废钢大量累积的情况下，中国电炉炼钢将迎来一阵迅猛发展，钢铁工业对DRI的需求量也将持续增长[11-12]。

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




1—世界；2—中国；3—其他国家；4—中国 DRI 产量；5—世界 DRI 产量。

**图 1　电炉粗钢及 DRI 产量变化**

**Fig. 1　Output variations of electric furnace crude steel and DRI**

目前，直接还原工艺可以分为气基直接还原和煤基直接还原[13-15]。前者主要包括竖炉法（Midrex 法、HYL-Ⅲ/Energiron 法及 PERED 法）、反应罐法（HYL-Ⅰ法和 HYL-Ⅱ法）及流化床法（Firor 法、Iron Carbide 法、Finmet 法和 Circored 法）；后者主要包括回转窑法、隧道窑法、竖炉法和转底炉法。迄今为止，有数十种直接还原工艺实现了工业化生产，在主要的几种工艺中，气基直接还原工艺可实现大型化生产，单台（套）产能可达 $3\times10^6$ t/a，热送热装技术成熟。回转窑法在印度得到快速发展，但多为小型回转窑，操作控制难度大，单机生产能力低。转底炉法产品易二次氧化，产品金属化率和 TFe 低、S 高，无法满足炼钢生产要求，多用于处理冶金尘泥。由相关统计可知，2020 年，气基直接还原 DRI 产量占 DRI 总产量的 75.4%，具体为 Midrex 法占 60.0%，HYL/Energiron法占 12.4%，PERED 法占 2.9%；煤基回转窑法约占总产量的 24.4%；其他方法占 0.2%[16]。由此可见，Midrex 气基竖炉工艺占 DRI 生产的主导地位，后续将主要介绍应用较成熟的 Midrex 工艺和 HYL/Energiron 工艺。

## 2.2　气基直接还原工艺发展现状

### 2.2.1　气基直接还原用球团质量要求

竖炉直接还原是高炉炼铁之外发展最快的一种炼铁工艺，从工艺原理上看与高炉软熔带以上区域的还原过程较为相似，气体还原、热交换和炉料煤气的相对运动等也基本相似。只是由于炉料比高炉单一，更为均匀，还原气分布也更为均匀，炉况顺行条件更好，热交换进行的更为充分[17-18]。作为生产 DRI 的主要流程，Midrex 和 HYL-Ⅲ/Energiron 竖炉流程技术成熟可靠。Midrex 工艺球团和块矿混合炉料质量要求有：① 球团粒度为 9～16 mm 占球团总质量的 95%，块矿粒度为 10～35 mm 占块矿总质量的 85%；② $w$(TFe)>67%，酸性脉石质量分数低（3%～5%），$w$(CaO)<2.5%，$w$(MgO)<1.0%，$w$($TiO_2$)<0.15%，$w$(S)<0.02%；③ 球团冷压强度大于 2 500 N/P，耐磨强度（+6.3 mm）大于 93%；④ 具有高软化温度和中等还原性。以 HYL 法进行气基竖炉直接还原的球团矿质量要求：抗压强度需达到 2 500 N/P，还原度指数应大于 4，还原膨胀率不应大于 15%，动态低温还原粉化率（+6.3 mm）应大于 80%，动态粉化率检测后球团完整率应不低于 60%。合格的气基直接还原球团是气基直接还原工艺发展的基础。

### 2.2.2　Midrex 工艺

Midrex 工艺流程如图 2 所示。Midrex 法标准流程由还原气制备和还原竖炉两部分组成。前者中，净化后约 70% 的（$CO+H_2$）炉顶气加压送入混合室，与当量天然气混合后送入换热器预热，后进入 1 100 ℃左右有镍基催化剂的反应管进行催化裂化反应，转化成含有 CO（4%～36%）、$H_2$（60%～70%）及 $CH_4$（3%～6%）的 870 ℃还原气。后者中，竖炉断面呈圆形，分为预热段、还原段和冷却段。炉料在 800 ℃以上的还原段停留 4～6 h。新海绵铁进入冷却

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

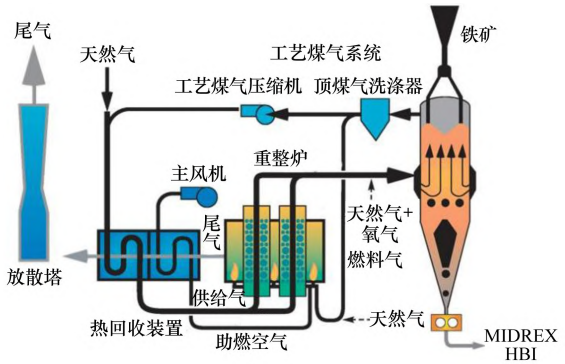



**图2 Midrex工艺流程**

**Fig. 2 Flow diagram of Midrex process**

段完成终还原和渗碳反应，同时被自下而上通入的冷却气冷却至小于100 ℃。Midrex工艺主要采用$CO_2$重整，无需单独的$CO_2$脱除系统，其在独立的高温重整炉进行催化重整，$H_2/CO$ = 1.5～1.7，还原气为类CO气体，竖炉内的操作压力为0.2～0.3 MPa。Midrex法经典操作指标见表3。

此外，Midrex法又发展为Arex法和MXCOL®法[19-21]。Arex法是Midrex法的新改进，天然气被氧气(或空气)部分氧化后送入竖炉，利用新生热海绵铁催化裂化，省去了还原气重整炉，改进后吨铁电耗可降低50 kW·h。后者则可以应用任何来源的合成气包括煤气化炉及焦炉煤气非催化部份氧化重整技术的改进。不同燃料来源的Midrex工艺应用情况见表4。

**表3 Midrex法经典操作指标**

**Table 3 Typical operation indices of Midrex process**

| DRI | | | 还原气体组成(体积分数)/% | | | 其他指标 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 金属化率/% | $w$(TFe)/% | 抗压强度/($N\cdot P^{-1}$) | $CO+H_2$ | $CH_4$ | $N_2$ | 天然气消耗/GJ | 电能消耗/(kW·h) | 水消耗/$m^3$ | 日产量/($t\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$) |
| 92～96 | >90 | 500 | 75～84 | 3 | 12～15 | 10.5～11.0 | 110 | 1.6 | 9～12 |

**表4 不同燃料来源的Midrex工艺应用情况**

**Table 4 Application of Midrex process with different fuel sources**

| 燃料来源 | 示范工厂 | 还原气种类 | $H_2$:CO | 投产时间/年 |
|---|---|---|---|---|
| 天然气 | 超过60座示范工厂 | Midrex®重整气 | 1.5～1.7 | 1969 |
| 天然气 | 早期技术 | 蒸汽重整气,加热 | 3.2～3.9 | 1990 |
| MXCOL(COREX输出煤气) | 阿赛乐米塔尔南非 | $CO_2$脱除+加热 | 0.3～0.4 | 1999 |
| MXCOL(煤制气) | 金达尔 | $CO_2$脱除+加热 | 0.5～0.6 | 2014 |
| MXCOL(煤制气) | 金达尔钢电安古尔 | $CO_2$脱除+加热 | 2.0 | 2014 |

高炉流程与MXCOL流程大气污染物排放对比见表5。由表5可知，与高炉流程相比，MXCOL流程大气污染物排放量明显减少，其中$SO_2$、烟尘、$NO_x$、$CO_2$及COD(有机物相对含量)分别仅有高炉流程的3.60%、10.40%、1.30%、79.10%和34.50%，苯酚、硫化物及HCN的排放量则几乎没有；此外，其废水排放量仅0.10 $m^3/t$，远低于高炉流程的1.29 $m^3/t$。因此，相对于传统高炉流程，MXCOL流程更加低碳环保，有很好的应用推广前景。

**表5 高炉流程与MXCOL流程大气污染物排放对比**

**Table 5 Comparison of air pollutant emissions of blast furnace and MXCOL processes**

| 污染物 | MXCOL®/($g\cdot t_{产品}^{-1}$) | BF/($g\cdot t_{产品}^{-1}$) | (MXCOL/BF)/% |
|---|---|---|---|
| $SO_2$ | 29 | 805 | 3.60 |
| 烟尘 | 35 | 335 | 10.40 |
| $NO_x$ | 12 | 920 | 1.30 |
| $CO_2$ | 1 453 000 | 1 836 000 | 79.10 |
| COD | 10 | 29 | 34.50 |
| 苯酚 | 0 | 60 | 0.00 |
| 硫化物 | — | 120 | 0.00 |
| HCN | — | 15 | 0.00 |

### 2.2.3 HYL/Energiron工艺

HYL-Ⅲ(竖炉)工艺流程见图3。该流程最初由4座罐式反应炉和1座还原气重整炉构成。

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

现将还原气重整转化与气体加热合一，4 个罐式反应炉改为连续式竖炉。该工艺采用高氢还原气，高还原温度(900 ~ 960 ℃)和高压作业[(0.4 ~ 0.6) MPa]，这可改善其还原动力学，并加速还原反应的进行，而含硫气体不通过重整炉，延长了催化剂和催化管的使用寿命。工艺运行过程中，还原和冷却作业分别控制，能对产品金属化率和含碳量进行大范围调节，产品平均金属化率可达 90.9%，控碳量在 1.5% ~ 3.0%，产品质量稳定。其配置了 $CO_2$ 吸收塔，可选择性地脱除还原气中 $H_2O$ 和 $CO_2$，提高了还原气利用率。此外，重整炉产生的高压蒸汽可用于发电，最低生产能耗为(10.43 ~ 11.20) GJ/t，电耗则为 90 kW·h/t。

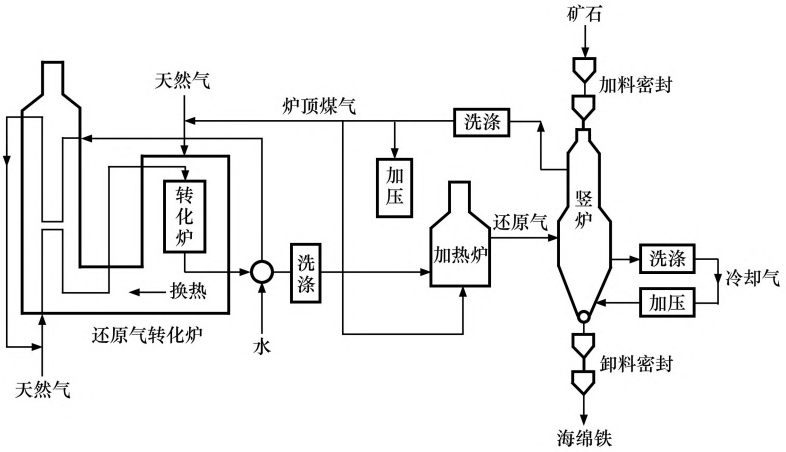



**图 3　HYL-Ⅲ(竖炉)工艺流程**

**Fig. 3　Flow diagram of HYL-Ⅲ(shaft furnace) process**

HYL-Ⅲ(竖炉)工艺具有以下特点：① 工艺灵活，气源广泛(包括天然气、煤气化、煤制气、焦炉煤气)；② 原料适应性好，对含 S 量要求不严；③ 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，可提高还原效率；④ 能效高，气耗较低，一般在 9.5 GJ/t 左右；⑤ 无需高温重整炉，采用自重整方式；⑥ 竖炉内的操作压力高，约为(0.6 ~ 0.8) MPa。HIY-Ⅲ/Energiron 工艺相关技术指标见表 6。

**表 6　HIY-Ⅲ/Energiron 工艺技术指标**

**Table 6　Technical indicators of HIY-Ⅲ/Energiron processes**

| 项目 | | 天然气 | 焦炉煤气 | 煤制气 |
|---|---|---|---|---|
| 产品 | | 热/冷 DRI | 冷 DRI | 热/冷 DRI |
| 产能/(t·a$^{-1}$) | | 200 000 ~ 2 500 000 | 200 000 ~ 2 500 000 | 200 000 ~ 2 500 000 |
| 金属化率/% | | ≥ 94 | ≥ 94 | ≥ 94 |
| 含碳量/% | | 2.5 ~ 4.5 | 2.5 ~ 4.0 | 0.5 ~ 2.5 |
| 主要参数指标(每吨产品消耗量) | 铁矿/t | 1.35 ~ 1.40 | 1.35 ~ 1.40 | 1.35 ~ 1.40 |
| | 燃料消耗/GJ | 9.84 | 8.37(其它燃料 1.67) | 9.21 |
| | 电力消耗(核心设备)/kW·h | 70 | 95 | 70 ~ 90 |
| | 氧气/Nm$^3$ | 60 | 15 | 0 |
| | 水/m$^3$ | 1.2 | 1.3 | 1.3 |
| | 人工时/(人·h$^{-1}$) | 0.11 ~ 0.17 | 0.11 ~ 0.17 | 0.11 ~ 0.17 |
| | 维护费用/美元 | 3.0 ~ 3.3 | 3.0 | 3.0 ~ 3.3 |

### 2.3　气基直接还原工艺的优势

气基直接还原工艺的优势体现在产品纯净、节能减排、成本低廉及流程简化 4 个方面，相关参数可见表 7 ~ 9。由表 7 ~ 9 可知：气基直接

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

还原工艺 DRI 产品质量更为纯净，C、S 及 P 质量分数分别仅为 0.5%~2.0%、0.001%~0.003%和 0.005%~0.090%；气基竖炉 DRI 的生产成本约为 1 964.05 元/t，明显低于高炉铁水的生产成本；与高炉工艺和煤基回转窑工艺相比，气基直接还原工艺能耗明显更低。此外，气基直接还原工艺省去了烧结和焦化工序，流程紧凑、环境友好，具有很好的发展前景[22-24]。

**表 7 产品质量对比**

**Table 7 Comparison of product quality**

| 产品成分(质量分数)/% | DRI | 高炉铁水 | 废钢 |
|---|---|---|---|
| TFe | 90~94 | ≥94 | ≥95 |
| MFe | 83~90 | — | — |
| C | 0.5~2.0 | 4.0~4.7 | ≤2.0 |
| S | 0.001~0.003 | 0.01~0.04 | ≤0.05 |
| P | 0.005~0.090 | 0.10~0.20 | ≤0.05 |
| Cu | ≤0.002 | ≤0.080 | 0.070~0.550 |
| Ni | ≤0.009 | ≤0.060 | 0.030~0.200 |
| Cr | ≤0.003 | ≤0.050 | 0.040~0.180 |
| Mn | 0.06~0.10 | 0.10~0.50 | 0.03~0.40 |
| 脉石 | 2.8~6.0 | — | — |

**表 8 工艺能耗对比**

**Table 8 Comparison of process energy consumption**

| 工艺方法 | 每吨 DRI 能源实物消耗 | 折合能耗/(kgce·t$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 高炉 | 300~420 kg 冶金焦+200~135 kg 煤粉 | 481.0~588.5 |
| HYL-ZR | 330~360 Nm$^3$ 天然气 | 375.8~427.1 |
| Midrex | 300~350 Nm$^3$ 天然气 | 355.3~392.9 |
| CG-SF | 600~750 kg 动力煤 | 445.0~460.0 |
| COG-SF | 600~700 Nm$^3$ 焦炉煤气 | 356.8~416.3 |
| 煤基回转窑 | 850~950 kg 褐煤 | 650.0~750.0 |

**表 9 工艺成本对比(2017 年)**

**Table 9 Comparison of process cost**

| | 项目 | 吨 DRI 成本/元 |
|---|---|---|
| 某煤制气竖炉 DRI 产品生产成本 | 氧化球团 | 1 076.22 |
| | 煤制气(恩德法净煤气) | 702.78 |
| | 水、电、$N_2$ 等 | 55.05 |
| | 工资福利 | 30.00 |
| | 设备折旧、维修 | 100.00 |
| | 合计 | 1 964.05 |
| 某钢铁企业高炉铁水生产成本 | | 2 088.00~2 100.00 |

## 3 气基直接还原工艺研究基础及发展趋势

### 3.1 气基直接还原工艺研究基础

铁氧化物的还原历程早已形成了系统的理论，其还原过程遵循着逐级转变规律，而其气固反应的动力学模型有许多种，“收缩未反应核模型”作为块状铁氧化物的还原模型则已被广泛认可。球团矿作为公认的优质冶炼原料，用于气基竖炉直接还原的球团矿不仅要具有合格的抗压强度等物理性能，同时要具有良好的冶金性能，如还原速率、还原膨胀率、低温还原粉化率等。从技术和经济两方面比较，“球团(块矿)——气基竖炉法”直接还原技术最成熟、生产率最高，且其投资最少、成本最低，最具有竞争力。气基直接还原入炉原料一般为球团矿或块矿，我国优质块矿资源短缺，发展“球团——气基竖炉法”技术是我国发展气基直接还原的最佳选择。球团矿在还原过程中，随着物

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

相和结构的变化，一般会出现体积膨胀现象。为解决球团矿还原膨胀问题，大量的研究工作者对其产生的原因进行了深入研究，并提出了晶格缺陷学说、碳沉积学说、相变学说、铁晶须学说及其演化学说等认同度较高的理论[25-28]。但目前，我国气基直接还原工艺发展较慢，而对其机理的研究也较为片面，尤其是制备气基还原用氧化球团的原料种类对其还原性能具有显著影响，但对其对比研究很少；另一方面，国内对超纯铁精矿的氧化球团制备技术尚需发展，对于铁品位大于 68%～69% 的铁精矿，球团制备及球团气基直接还原行为研究还处于起步阶段。因此，作者以某铁品位高达 71.68% 的国产超纯磁铁精矿和某进口赤铁精矿为研究对象，开展了铁精矿球团富氢气基直接还原基础研究，通过相关试验，制备出了 4 种金属化球团，按照国家标准 YB/T 4170—2008，分别可达到 1 级 H94、1 级 H94、1 级 H88 和 2 级 H88 的标准，为气基竖炉技术推广应用提供了技术支撑[29-30]。

### 3.2　气基直接还原工艺发展趋势

#### 3.2.1　设备大型化

自 2010 年年产 $2.0\times10^5$ t DRI 的 HYL 竖炉投产以来，其单元模块产能逐渐扩大[13,31]。现今 HYL 竖炉有 29 座，单元模块产能多为 $8.0\times10^5\sim1.5\times10^6$ t/a，新建竖炉产能高于 $2.0\times10^6$ t/a，最大是 $2.5\times10^6$ t/a。目前，单元模块产能向着 $3.0\times10^6$ t/a 发展。

自 1968 年提出 Midrex 工艺以来，其单元模块产能由 $6.0\times10^5$ t/a 逐渐增大，现今 Midrex 竖炉约有 50 座，单元模块产能多为 $1.0\times10^6\sim2.0\times10^6$ t/a，新建竖炉产能最大可达到 $2.5\times10^6$ t/a。单元模块产能 $3.0\times10^6$ t/a 是下一阶段的目标[32-33]。

#### 3.2.2　原料来源多样化

气基直接还原原料需要多样化发展，具体体现为以下 3 个方面[34-39]：

（1）气源：工艺可采用天然气、煤制气、焦炉煤气；煤制氢、石化废氢，电解制氢，核能制氢等；气体制备效率能满足不断升级的产能需要；气体制备过程不产生环境污染物；减少还原气体制备及储存成本；解决氢气易燃易爆问题。其中，MXCOL 工艺和煤基 HYL 工艺作为改进工艺，通过煤制气直接还原技术，其可利用煤气化炉及焦炉煤气等实现气源的制备。

而在目前钢铁行业低碳技术发展中，氢气直接还原技术是最受关注的领域，通过以氢代碳，其具有天然的优势。目前，由于天然气资源的匮乏、电解制气成本高昂，氢气直接还原技术发展缓慢。鉴于中国具有较为丰富的焦炉煤气，其作为富氢资源，发展焦炉煤气还原技术是目前重要的发展方向。在此基础上，逐渐提高氢气在还原气中的比重，形成富氢还原并逐步向全氢还原的转变。此外，现今氢气直接还原技术还不成熟，氢还原吸热会降低炉温，氢还原率及利用效率偏低，需要继续做好氢气直接还原工艺的技术储备，以期在解决氢气来源及储存等问题后，更快地实现全氢直接还原。

（2）含铁原料：既能使用优质的铁精矿制备出高品质的直接还原铁，又能利用气基直接还原技术处理复杂难选矿及二次资源(如高磷鲕状赤铁矿、钒钛海滨砂、钒钛磁铁矿、铜渣、硫酸渣、赤泥等)。

（3）DRI 产品：除电炉 DRI 外，高炉使用 DRI 可以降低焦比，提高生产率，减少环境污染。加拿大 Stotco B 高炉、日本 Dum Kergue 4 号高炉、Burns Harbor 3 号高炉、及福山 3 号高炉、美国钢铁公司 AKI 高炉均进行了生产实践，而奥钢联在美国建 DRI 厂远销欧洲。但因 DRI 易氧化而引起的运输及储存等处理费用高、DRI 生产费用远高于节省的费用等问题，限制了高炉 DRI 的使用。

## 4　结　语

中国电炉炼钢发展较为缓慢，远低于世界平均水平，而气基直接还原技术具有产品纯净、成本低廉、节能减排、流程简化等优势，发展气基直接还原技术具有良好的前景。但其面对着含铁原料和还原气的供应问题。其中，含铁原料方面不仅包括高品位铁精矿产出及购置问

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

题，还有优质球团矿生产与供应问题；而还原气方面包括天然气、焦炉煤气、合成气等供应问题。尤其长远来看，大规模廉价氢气的提供将会有力推动气基直接还原的快速发展。同时，气基直接还原技术要加强自主研发，包括直接还原球团制备技术的研发及质量标准的制定和统一、球团直接还原行为、还原气制备、储存及运输技术及DRI应用等方面的研究。总的来说，气基直接还原工艺主要发展方向有：设备大型化发展；气体制备过程实现多样化、高效化、绿色化、低成本，气体储存过程安全性逐步提高；产品趋于多样化；含铁原料选择多样化，既能使用优质的铁精矿制备出高品质的直接还原铁，又能利用气基直接还原技术处理复杂难选矿及二次资源。

## 参考文献：


[1] 苍大强. 钢铁工业“碳达峰”“碳中和”及低碳技术的误区及现实路径[J]. 中国冶金,2021,31(9):3-8.
CANG Daqiang. Misunderstanding and realistic path of "carbon peak" "carbon neutrality" and low carbon technologies in iron and steel industry[J]. China Metallurgy,2021,31(9):3-8.

[2] 熊超,李新创,李冰. 双碳目标下的钢铁节能理念创新与能源结构重塑探讨[J]. 中国冶金,2021,31(9):59-63.
XIONG Chao,LI Xinchuang,LI Bing. Discussion on steel energy-saving concept innovation and energy structure reconstruction under "double carbon" target[J]. China Metallurgy,2021,31(9):59-63.

[3] 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.

[4] 张琦,沈佳琳,许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. 钢铁,2021,56(10):152-163.
ZHANG Qi,SHEN Jialin,XU Lisong. Carbon peak and low-carbon transition path of China's iron and steel Industry[J]. Iron and Steel,2021,56(10):152-163.

[5] 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 Jianjun,QI Yuanhong,YAN Dingliu,et al. Development path and key technical problems of low carbon ironmaking in China[J]. China Metallurgy,2021,31(9):64-72.

[6] 上官方钦,刘正东,殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金,2021,31(9):15-20.
SHANGGUAN Fangqin,LIU Zhengdong,YIN Ruiyu. Study on implementation path of "carbon peak" and "carbon neutrality" in steel industry in China[J]. China Metallurgy,2021,31(9):15-20.

[7] 张龙强,陈剑. 钢铁工业实现“碳达峰”探讨及减碳建议[J]. 中国冶金,2021,31(9):21-25;52.
ZHANG Longqiang, CHEN Jian. Discussion on achieving "carbon peak" and suggestions for reducing carbon in iron and steel industry[J]. China Metallurgy,2021,31(9):21-25;52.

[8] 李佳楣,郭敏,张涛,等. 气基竖炉生产直接还原铁工艺的技术经济分析[J]. 钢铁研究,2017,45(5):59-62.
LI Jiamei,GUO Min,ZHANG Tao,et al. Technical and economic analysis of gas-based shaft furnace production process for direct reduction iron[J]. Research on Iron and Steel,2017,45(5):59-62.

[9] 王新东,郝良元. 现代炼铁工艺及低碳发展方向分析[J]. 中国冶金,2021,31(5):1-5;18.
WANG Xindong,HAO Liangyuan. Analysis of modern ironmaking technology and low-carbon development direction[J]. China Metallurgy,2021,31(5):1-5;18.

[10] 彭锋,李晓. 中国电炉炼钢发展现状和趋势[J]. 钢铁,2017,52(4):7-12.
PENG Feng,LI Xiao. Status and trend of China EAF steelmaking development[J]. Iron and Steel,2017,52(4):7-12.

[11] 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.

[12] 傅杰,柴毅忠,毛新平. 中国电炉炼钢问题[J]. 钢铁,2007,42(12):1-6.
FU Jie,CHAI Yizhong,MAO Xinping. Problems of EAF steelmaking in China[J]. Iron and Steel,2007,42(12):1-6.

[13] 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.

[14] 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 and Steel,2017,52(1):7-12.

[15] 于恒,周继程,郦秀萍,等. 气基竖炉直接还原炼铁流程重构优化[J]. 中国冶金,2021,31(1):31-35;45.


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

YU Heng, ZHOU Jicheng, LI Xiuping, et al. Reconstruction optimization of gas-based shaft furnace direct reduction iron-making process[J]. China Metallurgy, 2021, 31(1): 31 – 35; 45.

[16] MUSCOLINO F, MARTINIS A, Ghiglione M, et al. Introduction to direct reduction technology and outlook for its use[J]. Metallurgia Italiana, 2016(4): 25 – 31.

[17] 李峰，储满生，唐钰，等. 氢气气基竖炉—电炉短流程环境影响分析[J]. 中国冶金，2021，31(9)：104 – 109.
LI Feng, CHU Mansheng, TANG Yu, et al. Environmental impact analysis of hydrogen shaft furnace-electric furnace process [J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 104 – 109.

[18] 郭学益，陈远林，田庆华，等. 氢冶金理论与方法研究进展[J]. 中国有色金属学报，2021，31(7)：1891 – 1906.
GUO Xueyi, CHEN Yuanlin, TIAN Qinghua, et al. Research progress on hydrogen metallurgy theory and method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1891 – 1906.

[19] YI Lingyun, HUANG Zhucheng, PENG Hu, et al. Action rules of $H_2$ and CO in gas-based direct reduction of iron ore pellets [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2291 – 2296.

[20] HU Junge. Development of gas-based shaft furnace direct reduction technology[J]. 2009, 16: 1288 – 1291.

[21] PATISSON F, Mirgaux O. Hydrogen ironmaking: How it works [J]. Metals, 2020, 10(7): 922.

[22] 李新创，李冰，霍咚梅，等. 推进中国钢铁行业低碳发展的碳排放标准思考[J]. 中国冶金，2021，31(6)：1 – 6.
LI Xinchuang, LI Bing, HUO Dongmei, et al. Concerns on drafting carbon emission standard for improvement of China′s iron and steel industry with sustainable development[J]. China Metallurgy, 2021, 31(6): 1 – 6.

[23] LUNGEN H B, KNOP K, STEFFEN R. State of the art of the direct reduction and smelting reduction processes[J]. Chernye Metally, 2007(2): 13 – 26.

[24] 赵运海. 2020 年全球直接还原铁产量稍有下滑，但未来可期[J]. 冶金管理，2021(20)：4 – 10.
ZHAO Yunhai. Global production of direct reduced iron decreasing slightly in 2020 while the future can be expected[J]. China Steel Focus, 2021(20): 4 – 10.

[25] HOU Baolin, ZhANG Haiying, LI Hongzhong, et al. Study on kinetics of iron oxide Reduction by Hydrogen[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(1): 10 – 17.

[26] WANG Haitao, SOHN Hongyong. Effects of firing and reduction conditions on swelling and iron whisker formation during the reduction of iron oxide compact[J]. ISIJ International, 2015, 51(6): 906 – 912.

[27] 李艳茹，李金莲，张立国，等. 添加熔剂对球团矿还原膨胀率的影响[J]. 钢铁，2009，44(10)：14 – 16.
LI Yanru, LI Jinlian, ZHANG Liguo, et al. Effects of additives on reduction swelling of iron ore pellets[J]. Iron & Steel, 2009, 44(10): 14 – 16.

[28] WU Shengli, LIU Xiaoqin, ZhOU Qi, et al. Low temperature reduction degradation characteristics of sinter, pellet and lump ore[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011, 18(8): 20 – 24.

[29] 朱德庆，徐梦杰，潘建，等. 改善超细铁精矿成球性能的实验研究[J]. 钢铁研究学 报，2017，29(9)：704 – 710.
ZHU Deqing, XU Mengjie, PAN Jian, et al. Experimental research to improve ballability of ultrafine concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(9): 704 – 710.

[30] ZHANG Feng, ZHU Deqing, PAN Jian, et al. Influence of basicity on metallurgical performances of fired super high-grade magnetite pellets in hydrogen-rich gases[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(10): 1212 – 1222.

[31] 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.
Future of process and equipment on non-coking coal ironmaking(2)-Prospect study on process and equipment for gas-based direct reduction ironmaking(Ⅰ)[J]. Metallurgical Equipment, 2015, (3): 1 – 13.

[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(下)[J]. 冶金设备，2015，(4)：1 – 9，33.
Future of process and equipment on non-coking coal ironmaking(2)-Prospect study on process and equipment for gas-based direct reduction ironmaking(Ⅱ)[J]. Metallurgical Equipment, 2015, (4): 1 – 9, 33.

[33] 胡俊鸽，郭艳玲，周文涛. Midrex 技术发展近况[J]. 烧结球团，2016，41(6)：44 – 47.
HU Junge, GUO Yanling, ZHOU Wentao. Recent development of Midrex technology[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(6): 44 – 47.

[34] GUPTA R C. 能最大程度降低高炉焦比的低价 DRI[J]. 钢铁，2000，35：146 – 151.
GUPTA R C. Low cost DRI for farthest reduction of blast furnace coke ratio[J]. Iron and Steel, 2000, 35: 146 – 151.

[35] 赵英杰，易群，王涛，等. 煤 – 焦 – 氢 – 铁产业链发展关键技术与战略思考[J]. 中国工程科学，2021，23(5)：103 – 115.
ZHAO Yingjie, YI Qun, WANG Tao, et al. Key technologies and strategic thinking for thecCoal-coking-hydrogen-steel industry chain in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 103 – 115.

(下转第 86 页)

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

WANG Feng, QIE Junmao, WU Baohua, et al. Calculation methods for air pollutants emission of sinter flue gas[J]. Iron and Steel,2019,54(1):92 – 98.

[4] 朱德庆,何奥平,潘建,等. 铁矿烧结过程温室气体 $CO_x$ 排放规律的研究[J]. 钢铁,2006,41(2):76.
ZHU Deqing,HE Aoping,PAN Jian,et al. Rule of greenhouse gas $CO_x$ emission in iron ore sintering process[J]. Iron and Steel,2006,41(2):76.

[5] 朱廷钰,刘青,李玉然,等. 钢铁烧结烟气多污染物的排放特征及控制技术[J]. 科技导报,2014,32(33):51.
ZHU Tingyu,LIU Qing,LI Yuran,et al. Emission characteristics of multiple pollutants from iron-steel sintering flue gas and review of control technologies[J]. Science and Technology Review,2014,32(33):51.

[6] 中国南方电网. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书[R/OL]. [2021 – 4 – 24]. Http://China smart grid. com. cn/special/? id = 63842.
China Southern Power Grid. Digital power grid promotes the construction of a new power system with new energy as the main body[R/OL]. [2021 – 4 – 24]. Http://China smart grid. com. cn/special/? id = 63842.

[7] 毛晓明. 微波加热技术在铁矿烧结点火中的应用研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
MAO Xiaoming. Research on the application of microwave heating technology in iron ore sintering ignition[D]. Changsha:Central South University,2013.

[8] 任伟. 磁铁精矿的微波烧结研究[D],重庆:重庆大学,2006.
REN Wei. Study on microwave sintering of magnetite concentrates[D]. Chongqing:Chongqing University,2016.

[9] 任伟,张立国,袁慧. 少量碳粉对磁铁精矿微波加热的影响[J]. 烧结球团. 2007,32(4):10 – 13.
REN Wei, ZHANG Liguo, YUAN Hui. The analysis of the effect of carbon on microwave heating of magnetite concentrates[J]. Sintering and Pelletizing. 2007,32(4):10 – 13.

[10] 陈津,刘浏,曾加庆,等. 微波加热还原含碳铁矿粉试验研究[J]. 钢铁,2004,39(6):1 – 5.
CHEN Jin, LIU Liu, ZENG Jiaqing, et al. Experimental research of microwave heating on iron ore concentrates containing coal and lime[J]. Iron and Steel,2004,39(6):1 – 5.

[11] 胡兵,黄柱成,王兆才,等. 氧化球团微波加热煤基直接还原过程微观机制[J]. 钢铁研究学报,2016,28(10):43 – 49.
HU Bing, HUANG Zhucheng, WANG Zhaocai, et al. Microscopic mechanism of oxidized pellets during coal-based direct reduction by microwave heating[J]. Journal of Iron and Steel Research. 2016,28(10):43 – 49.

[12] STANDISH N, WOMER H. Microwave application in the reduction of metal oxides with carbon[J]. Iron and Steehnaker. 1991,18(5):59 – 61.

[13] 王晓远,邢宏伟,田铁磊,等. 微波焙烧对高磷铁矿气化脱磷的影响[J]. 烧结球团. 2016,41(4):45 – 48.
WANG Xiaoyuan, XING Hongwei, TIAN Tielei, et al. Influence of microwave roasting on high phosphorus iron ore gasification dephospororization[J]. Sintering and Pelletizing. 2016,41(4):45 – 48.

[14] 黄向东,李建保,谢志鹏,等. 微波与无机非金属介质的相互作用[J]. 无机材料学报,1998,13(3):282 – 289.
HUANG Xiangdong LI Jianbao,XIE Zhipeng,et al. Microwave interaction with inorganic nonmetallic substance[J]. Journal of Inorganic Materials. 1998,13(3):282 – 289.

[15] 代林晴,朱红波,彭金辉,等. 微波加热在钢铁冶金中的应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2011,36(增刊):182 – 185.
DAI Linqing,ZHU Hongbo,PENG Jinhui,et al. Application of the microwave heating technology in ferrous metallurgy[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition),2011,36:182 – 185.

[16] 彭金辉,夏洪应. 微波冶金学[M]. 北京:科学出版社,2017.
PENG Jinhui,XIA Hongying. Microwave metallurgy[M]. Beijing:Science Press,2017.

(上接第9页)

[36] SONG X P, GUO Z C. Technologies for direct production of flexible $H_2/CO$ synthesis gas[J]. Energy Conversion and Management,2006,47(5):560 – 569.

[37] TOWHIDI N. Influence of direct reduction condition of hematite pellets with $H_2/CO$ on the oxidation behaviour of DRI in air[J]. Steel Research International,2003,74(10):595 – 600.

[38] 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.

[39] SPREITZER D,SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen-A review[J]. 2019,90(10):1900108.

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