

气基竖炉直接还原 技术及仿真

QIJI SHULU ZHIJIE HUANYUAN
JISHU JI FANGZHEN

任素波 白明华 龙 喆 徐 宽 著 ◆

非
外
借

 冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

气基竖炉直接还原技术及仿真

任素波 白明华 龙 鹄 徐 宽 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2018

内 容 提 要

本书介绍了气基竖炉直接还原技术的基础理论、仿真分析及实验研究。内容涵盖了气基竖炉直接还原技术的国内外现状及发展趋势、直接还原机理、物料平衡分析、气基竖炉的炉型设计方法、气基竖炉内流场、布料过程的仿真模拟、物料热送工艺及装备等方面的知识，内容力求科学性与通俗性相结合，由浅入深，循序渐进。

本书可作为高等院校冶金机械、烧结球团等相关专业的本科生、研究生的教材或参考书；也可供广大冶金设计研究院、烧结球团行业的技术人员、DRI竖炉生产企业的从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

气基竖炉直接还原技术及仿真/任素波等著. —北京:
冶金工业出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-5024-8019-6

I. ①气… II. ①任… III. ①竖炉—直接还原—研究
IV. ①TF3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 289457 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 夏小雪 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹蕊

责任校对 郑娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8019-6

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2018 年 12 月第 1 版，2018 年 12 月第 1 次印刷

169mm×239mm；11 印张；212 千字；164 页

51.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)



前 言

随着环保力度逐年增大，我国钢铁工业快速发展的同时，钢铁行业可持续发展对节能减排的需求也更加严格，资源贫乏和环境破坏成为了日益凸显的两大问题。我国冶金行业的传统烧结工艺普遍采用带式烧结机，炼焦—烧结—高炉—转炉—铸轧这一长流程生产方式对环境的污染不可忽视，近些年我国雾霾天气给人们生活带来的影响愈加严重，传统的烧结工艺再次被推上风口浪尖，曾经一度被认为是造成雾霾的罪魁祸首，备受诟病。

由化石燃料燃烧产生的温室气体导致的气候变暖现象已成为全球共同面对的问题，钢铁行业是工业当中的温室气体排放大户。中国是钢铁生产大国，在钢铁生产能源结构中，煤炭尤其是焦煤占的比例最大，据统计，钢铁厂的吨钢 CO_2 排放量约为 1832kg ，其中高炉炼铁系统的 CO_2 排放占全流程的 76.1% 。同时高炉由于大量使用焦炭以及烧结矿，是 SO_2 、 NO_x 、粉尘的主要来源，也是造成大气雾霾的主要因素之一。以碳还原铁矿石为高炉技术核心的传统长流程钢铁工业亟待转型发展，发展绿色节能的环保型钢铁生产工艺及装备迫在眉睫。

气基竖炉直接还原技术生产直接还原铁是以天然气与二氧化碳或水蒸气催化裂解生成的 H_2 和 CO 作为还原剂，将铁矿石在固态下还原成海绵铁 (DRI)，在富产天然气的国家中得到迅速发展。与高炉炼铁流程相比，该工艺可摆脱焦煤资源对发展的羁绊，并且物料和气体均在密闭状态下输送，所以大量减少 CO_2 排放，具有低能耗、低排放、清洁生产特征。同时由于产品 DRI 的化学成分稳定、有害杂质含量少、粒度均匀，是替代或者部分替代废钢的优质原料。国际上，气基竖炉

直接还原技术中运用最为广泛的是 MIDREX 工艺和 HYL 工艺，二者均采用天然气改质生成的 CO 和 H₂ 为还原气，但气体的 H₂/CO 比值不同，其中 HYL-III 工艺中还原气 H₂ 含量较高，竖炉炉内压力较高，之后 HYL 公司进一步推出了天然气零重整竖炉技术，并提出直接使用焦炉煤气、合成气、煤制气等为还原气的 Energiron 技术，成为竖炉发展的热点。

在中国，由于煤炭资源的丰富以及已开采的天然气资源缺乏等原因，气基竖炉直接还原技术发展缓慢，20 世纪 90 年代宝钢与鲁南化工厂合作研发煤制气-竖炉生产 DRI，即 BL 法，由于当时煤制气成本高，没有得到进一步发展，近几年各大院校以及研究所增加了对煤制气竖炉的研究。对于焦炉煤气用于 DRI 的生产，国内研究主要侧重于工艺流程介绍及可行性分析。中国 DRI 的市场需求量较大，而目前国内年产量仅在几十万吨，且主要为煤基法，严重供求不平衡。中国资源现状为煤储量丰富而天然气资源较少，为了在中国发展清洁的对天然气资源依赖较小的气基竖炉直接还原技术，近年来探索和采用新的还原气已成为该技术的重点发展方向，其中煤制气、焦炉煤气和合成气等逐渐得到人们的重视，尤其值得关注的是我国每年产出的大量焦炉煤气中含有丰富的氢气资源。目前，国内通过技术引进正在建设一条年产 30 万吨海绵铁焦炉煤气竖炉直接还原铁生产线。

鉴于我国钢铁行业的基本国情，为促进钢铁行业技术进步，提高能源资源利用效率，改善环境，化解过剩产能，随着钢铁行业供给侧结构性改革的深入进行，可以预见气基竖炉直接还原技术在中国必将得到长足的发展，而目前适合我国国情的关于该技术的专业书籍，理论基础十分匮乏。为此，作者结合多年气基直接还原研发经验，将近些年作者所在课题组关于气基直接还原反应机理、还原实验、还原竖炉炉型设计、炉内物料运动仿真，热直接还原铁输送技术等研究成果加以总结成书。书中内容浅显，很多工作尚不完善，但作者仍坚持出

版，意在抛砖引玉，把我们的观点共享，与广大冶金学者及同行进行交流，以期丰富气基竖炉直接还原技术的基础理论，为带动广大技术人员开展更加深入的研究增加动力，推动行业发展进步，为该技术在我国的工业化略尽绵薄之力。

本书由燕山大学任素波、白明华、龙鹤、徐宽撰写，任素波撰写第1、2章，白明华撰写第4、8章，龙鹤撰写第3、6章，徐宽撰写第5、7章，全书由任素波统稿。著书过程中，参考了同行的一些研究成果及相关文献，在此一并向他们深表感谢！同时，感谢河北省自然科学基金项目（E2017203157）对本书的资助！

由于作者水平和精力有限，书中内容难免存在不足之处，恳请专家和广大读者批评指正。

著 者

2018年10月

目 录

1 概述	1
1.1 直接还原技术的现状及发展	1
1.1.1 世界直接还原技术的现状及发展	1
1.1.2 我国直接还原技术的现状及发展	3
1.2 典型的气基竖炉直接还原工艺	5
1.2.1 MIDREX 工艺	5
1.2.2 HYL-III 工艺	5
2 气基竖炉直接还原机理	8
2.1 气基竖炉直接还原反应的热力学规律	8
2.1.1 铁氧化物的稳定性	8
2.1.2 还原气平衡组分	10
2.1.3 还原气热力学利用率分析	12
2.2 铁矿石球团气基直接还原动力学机理	15
2.2.1 还原过程组成环节	15
2.2.2 还原过程数学模型的选择	16
2.2.3 单界面未反应核模型	17
3 气基直接还原物料平衡及能量利用分析	20
3.1 直接还原竖炉物料平衡热平衡计算模型	20
3.1.1 工艺参数	21
3.1.2 还原气需求量计算	23
3.1.3 物料平衡及热平衡计算	25
3.2 物料平衡及热平衡计算结果对比分析	30
3.2.1 计算结果与 MIDREX 生产数据对比	30
3.2.2 H_2/CO 的影响	30
3.2.3 N_2 含量的影响	32
3.2.4 CH_4 含量的影响	33
3.2.5 还原气温度的影响	36

3.2.6	物料温度的影响	38
3.3	还原气利用率及最低能耗对比	39
4	气基竖炉直接还原实验研究	43
4.1	球团矿还原膨胀标准检测方法	43
4.2	还原膨胀实验方法	44
4.2.1	实验原料	45
4.2.2	实验设备	45
4.2.3	实验条件	46
4.2.4	实验方法及步骤	47
4.3	实验结果及讨论	50
4.3.1	动态模拟实验和 ISO 4698 标准实验检测结果	50
4.3.2	恒温升温条件下还原结果	51
4.3.3	还原过程显微形貌变化	53
4.3.4	动力学分析	55
4.3.5	还原膨胀分析	58
5	气基直接还原竖炉炉型设计及仿真	62
5.1	气基直接还原竖炉	62
5.2	炉型参数及其确定方法	63
5.2.1	合理炉型的定义	63
5.2.2	竖炉炉型参数间的制约关系及影响因素	64
5.3	设计范例	67
5.4	还原段必要还原时间的确定	68
5.5	还原段物料传输模拟及其高度确定	68
5.5.1	颗粒离散元素法	69
5.5.2	仿真模型的建立	70
5.5.3	模拟结果及分析	71
5.5.4	还原段高度的确定	77
5.6	竖炉还原段内型曲线的确定	78
5.6.1	内型曲线的确定方法	78
5.6.2	实验结果的应用	79
5.6.3	内型曲线的拟合与确定	81
6	气基竖炉内流场数值模拟研究	84
6.1	气基直接还原竖炉内流场数学模型的建立	84

6.1.1	模型建立	84
6.1.2	基本假设	85
6.1.3	控制方程	85
6.2	气基竖炉流场分布的影响因素	87
6.2.1	炉顶压强对流场影响	87
6.2.2	炉顶气出口大小对流场影响	90
6.2.3	还原气通入量对流场的影响	91
6.2.4	还原气温度对流场的影响	95
6.2.5	支管数量对流场影响	98
6.3	气基直接还原竖炉内的流场优化	99
6.3.1	合理的气流分布	99
6.3.2	基于响应面多个因素对流场的影响分析	100
6.3.3	基于遗传算法气基竖炉流场优化	103
7	气基直接还原竖炉布料过程仿真分析	111
7.1	离散单元法	111
7.2	模型仿真	114
7.2.1	挡板布料器	115
7.2.2	溜槽布料器	120
7.3	结果与分析	122
7.3.1	布料器挡板角度	122
7.3.2	挡板布料器料线高度	124
7.3.3	挡板布料器颗粒质量比	126
7.3.4	溜槽布料器溜槽角度	127
7.3.5	溜槽布料器料线高度	129
7.3.6	溜槽布料器颗粒质量比	130
8	直接还原热送工艺流程及装备	132
8.1	保温输送设备概述	132
8.1.1	普通机械输送系统	133
8.1.2	气力输送系统	133
8.1.3	热输送系统	134
8.1.4	热送系统的工艺要求	134
8.2	输送斗物料输送系统	135
8.2.1	密封系统	135

8.2.2	设计目标和参数	137
8.2.3	物料输送斗的结构	137
8.2.4	系统总体输送参数	139
8.3	物料输送斗	139
8.3.1	物料输送斗的隔热层	140
8.3.2	料斗隔热层的仿真分析	140
8.3.3	硅酸铝板厚度	141
8.3.4	料斗保温试验	142
8.4	气体密封仓	145
8.4.1	密封仓内气体	145
8.4.2	氮气仓外罩材料	145
8.4.3	氮气仓外罩温度场	146
8.4.4	氮气仓外罩厚度	149
8.4.5	氮气仓内压强	149
8.5	输送系统中的密封	154
8.5.1	传输链与保温罩之间的密封设备	154
8.5.2	板簧密封原理	155
8.5.3	板簧压力	156
8.5.4	板簧温度场	157
8.5.5	中间仓的密封研究	158
8.6	高温保温螺旋输送机	160
8.6.1	结构组成	160
8.6.2	保温原理	161
	参考文献	163

1 概 述

随着钢铁工业的快速发展，资源贫乏和环境破坏成为了日益凸显的两大问题。我国非焦煤资源丰富，但焦煤资源匮乏，这使得依赖于焦煤资源的高炉炼铁需要寻找新的途径。炼焦—烧结—高炉—转炉—铸轧这种长流程生产工艺对环境的影响不可忽视，如我国雾霾天气与之有很大联系。废钢的不足和杂质成分的存在使优质钢种的冶炼受到阻碍，非高炉炼铁以非焦煤为能源，适合短流程炼钢，能摆脱资源匮乏的困境和解决环境破坏的问题。同时，非高炉炼铁的产品——海绵铁含硫、磷及有色金属等杂质较少，是电炉冶炼优质钢种的原料。目前，非高炉炼铁有熔融还原和直接还原两种方式。在我国，熔融还原有一定的发展，宝钢已有 COREX-3000 熔融还原竖炉两座，但尚无工业化的气基竖炉直接还原设备和工艺。

直接还原技术炼铁是钢铁生产短流程的基础，指在铁矿石软化温度以下进行还原以获得固态金属铁的方法，属于非高炉炼铁范畴的一种炼铁工艺方法。与高炉的产品——高温铁水不同，直接还原技术炼铁的产品为固态的直接还原铁 (DRI)。由于铁矿石在失氧过程中形成气孔，直接还原铁在显微镜下观察形似海绵，所以又叫海绵铁。根据还原剂的不同，直接还原分为以 CO 和 H₂ 气体为还原剂的气基直接还原和以非焦煤为还原剂的煤基直接还原两种。不同的直接还原工艺，发生反应的主体设备也不尽相同。直接还原的主体设备有竖炉、回转窑、流化床、隧道窑等，因此直接还原技术有气基竖炉法、气基流化床法、煤基回转窑法、煤基隧道窑法等。主要的气基直接还原技术有 MIDREX、HYL 和 FIOR，主要的煤基直接还原技术有 SL/RN、DRC 法等。气基法由于反应速率快、生产效率高、能量利用率高、产品质量好等优点而得到了较快的发展，如今在国外已逐渐发展成为直接还原的主导工艺。

1.1 直接还原技术的现状及发展

1.1.1 世界直接还原技术的现状及发展

20 世纪 20 年代，英国建立了世界上第一个直接还原铁厂。此后，各种直接还原技术经受了工业生产的实用考验，并在生产技术上有了很大的进步。在 20 世纪 30 年代，瑞典开发的 WBIERG 法，使得世界上出现了第一个利用焦炭气化

制取的气体作为铁矿石还原剂的方法，并将此方法工业化。

随着直接还原技术的发展，1957年希尔萨公司在蒙特利尔建立了首座9.5万吨的HYL气基直接还原铁生产装备，此套技术装备的投产也标志现代化DRI技术的开端。MIDREX法对DRI生产技术进行了重大突破，体现在采用连续化作业方法。1973年，采用MIDREX法的产量已经超过了HYL方法，成为世界上产量最大的直接还原工艺方法。

发展到当今，国外直接还原技术已经十分成熟，根据MIDREX公布的初步统计数据，2016年全球直接还原铁产量为7277万吨。近两年世界直接还原铁产量在全球的分布见表1-1，中东北非地区2016年产量为3419万吨，比2015年增长了6.38%；北美地区2016年产量为321万吨，同比增长23.46%；亚洲/大洋洲地区2016年产量为1918万吨，同比增长2.62%。主要生产国印度和伊朗产量分别为1847万吨和1601万吨，同比分别增长4.5%和10%。沙特阿拉伯、俄罗斯和墨西哥产量分别是589万吨、570万吨和531万吨，中国直接还原铁产量未统计在内。

表 1-1 2015 年和 2016 年世界直接还原铁产量 (百万吨)

地 区	2015 年	2016 年
拉美	12.1	9.19
中东北非	32.14	34.19
亚洲/大洋洲	18.69	19.18
北美	2.60	3.21
独联体/东欧	5.44	5.70
撒哈拉以南	1.12	0.70
西欧	0.55	0.60
全球总计	72.64	72.77

21世纪以来，世界直接还原铁产量呈增长趋势，并且MIDREX公司指出，随着新一批直接还原设备的建立与投产，产量增长趋势还将持续，未来直接还原铁将以每年600万吨的产量增加。

近五年来采用不同生产工艺的直接还原铁产量，见表1-2。其中，主要以气基竖炉直接还原法的MIDREX工艺和HYL法工艺生产为主导，占世界直接还原铁总量的75%以上。随着气基竖炉直接还原技术的不断发展，可利用多种气源作为还原气体，如天然气、高炉煤气、转炉煤气以及煤制气等，均可用于相应的直接还原工艺，这就使得天然气资源匮乏的区域发展气基竖炉直接还原技术成为了可能。

表 1-2 2012~2016 年世界直接还原铁产量 (百万吨)

工 艺	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
MIDREX	44.76	47.56	47.12	45.77	47.14
HYL/Energiron	10.79	11.29	12.08	11.62	12.66
流化床工艺	0.53	0.14	—	0.51	0.24
回转窑法, 煤基	17.06	15.93	15.39	14.74	12.73
全球总计	73.14	74.92	74.59	72.64	72.77

1.1.2 我国直接还原技术的现状及发展

我国从 20 世纪 60 年代即开始了直接还原技术的研究, 在这半个世纪中走过了漫长而曲折的道路, 发展缓慢。时至今日尚无连续生产的气基竖炉直接还原工艺及装备, 究其原因, 天然气和高品位铁矿石资源短缺是严重制约我国气基竖炉直接还原技术发展的重要因素。至今我国每年直接还原铁的产量未超过 100 万吨, 占世界总产量比重极小。

由于天然气资源不足, 我国直接还原技术的研究开发工作一直立足于利用国内丰富的煤炭资源上, 即走煤基直接还原铁的道路。在煤基直接还原技术方案中, 主要集中在隧道窑、回转窑和转底炉技术的研究, 特别是前两项, 在国内发展应用已经比较成熟。目前, 我国已建的比较有代表性的回转窑直接还原厂有: 密云、喀左、天津钢管、鲁中、富蕴金山矿业, 其中天津钢管公司引进外来技术, 并通过改造取得了技术上的突破, 使得生产指标达到了国际领先的地位。在使用 TFe68% 球团时, 产品 TFe 含量 >94.0%, 金属化率 >93.0%, S、P 含量 <0.015%, SiO₂ 含量约为 1.0%, 煤耗 (褐煤) 900~950kg/t, 单机产能达 15 万吨/年, 而且通过尾气预热发电进一步降低了能耗。

近些年, 随着钢铁工业的发展、环境保护要求的提高以及对含铁尘泥处理、复合矿综合利用的重视, 转底炉工艺受到人们的关注。除了 20 世纪 90 年代在鞍山、舞阳、河南等地建转底炉探索性生产装置外, 这几年又在四川龙蟒、攀枝花、日照、马钢、沙钢、山西翼城、莱钢、天津荣程等地建立生产装置。截至目前, 国内有产能 3000~10000 吨/年的隧道窑数座, 设计产能约 60 万吨, 是目前国内直接还原铁的主要生产工艺; 5 万吨/年以上规模的回转窑企业 5 家, 总产能 76.2 万吨, 但这 5 家企业由于成本、环保、原料等原因现在处于停产状态。尽管煤基直接还原技术在我国发展较好, 但是该技术在生产规模、能源消耗、环境保护、产品质量、技术稳定性以及成本等方面仍然存在着大量的问题没有得到解决, 无法与气基竖炉直接还原技术相比较。我国天然气资源短缺, 可直接用于直接还原的高品位块矿和球团矿也匮乏, 迄今尚没有气基竖炉直接还原技术的工

业化生产装备。近年来，我国钢铁、化工业界对煤制气-竖炉直接还原技术进行了大量的调查研究工作，积累了丰富的数据，为我国采用煤制气-竖炉直接还原技术奠定了良好的基础。业内专家和企业用户普遍认为，煤制气-竖炉直接还原技术在将来一定会成为我国直接还原铁生产工艺的主要途径。但是，煤制气方法的选择、煤种的选择、竖炉工艺的选择、煤制气与竖炉的衔接、煤气的加热及相关装备等问题还有待进一步深入地研究和探讨。

早在 20 世纪 70 年代，广东韶关钢铁厂就进行了水煤浆制气竖炉还原生产海绵铁的试验。1997~1998 年，宝钢公司与山东鲁南化工集团公司合作，进行了德士古炉水煤浆制气-竖炉生产直接还原铁的半工业性试验，连续 20 天稳定地生产出金属化率达 93.04% 的合格海绵铁。其实验工艺流程如图 1-1 所示。从德士古炉生产出来的煤气经过脱除 CO_2 、 H_2S 后，在加热炉加热到 $850\sim 950^\circ\text{C}$ ，之后进入竖炉还原球团矿，该试验装置及各项工艺参数设计合理、很成功，对推进以煤制气-竖炉直接还原铁技术的发展有重要意义。据不完全统计，目前国内约有 30 家单位正在筹划、规划、设计建设煤制气-竖炉直接还原铁生产线。这些生产线建成后，将改变我国直接还原铁的生产面貌，但由于其原料供应没有落实以及投资大等原因，至今还没有进入实质性的建设阶段。

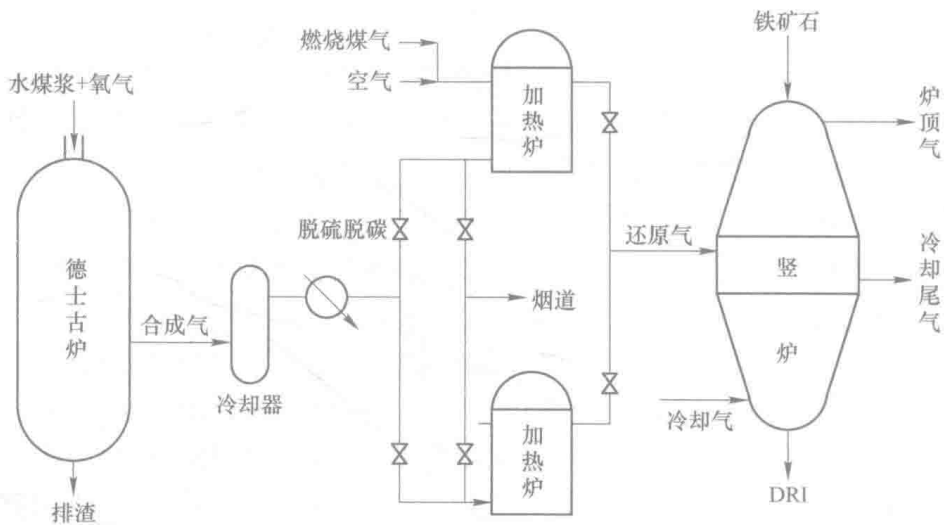


图 1-1 BL 法生产海绵铁试验工艺流程

目前国内直接还原铁产能很低，仅为百万吨级，这种状况与我国钢铁生产技术发展水平和经济社会发展需要极不平衡。据中国废钢铁应用协会统计预估，目前我国直接还原铁的年需求量为 1000 万~1500 万吨。因此，高品质的直接还原铁在我国具有广阔的发展前景，时不我待，现在正是大力发展我国直接还原铁技术，特别是发展气基竖炉直接还原技术的关键时期。

1.2 典型的气基竖炉直接还原工艺

1.2.1 MIDREX 工艺

MIDREX 工艺由美国 MIDREX 公司开发，是当今世界直接还原铁产量最大的直接还原工艺，占直接还原铁产量的 50% 以上。从 1936 年开始研究以来，经长期试验，直至 1966 年天然气制取还原气和气-固相逆流热交换还原竖炉两项关键技术成功，才使得该技术趋于成熟。MIDREX 还原工艺流程如图 1-2 所示。

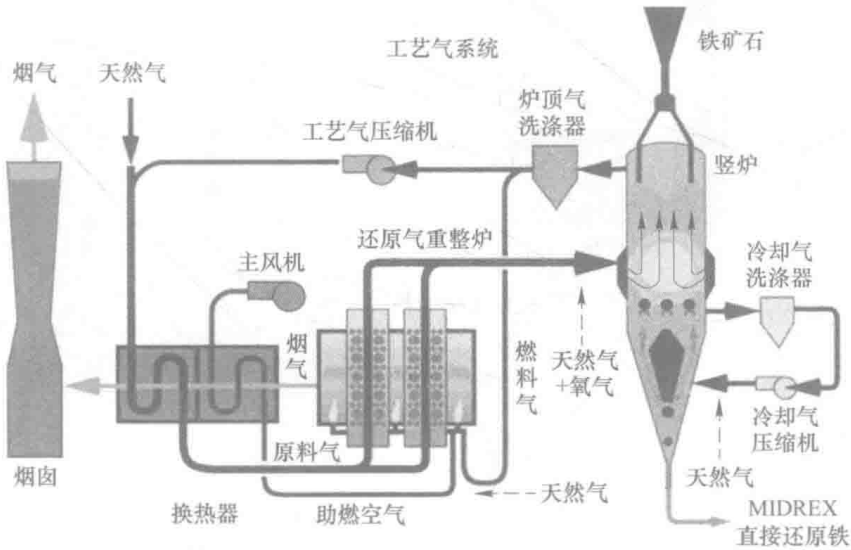


图 1-2 MIDREX 直接还原工艺流程

MIDREX 法的主要设备组成有竖炉、还原气重整炉、冷却气洗涤器和炉顶气洗涤器。年产 40 万吨的竖炉总高 45.19m，最大外径 7.188m，还原区直径 4.8m，还原区高度 9m，总容积为 341m³，上部呈圆柱体体积约为 262m³，下部呈圆锥体体积约 79m³，共设置 38 个还原气入口；与年产 40 万吨直接还原竖炉配套的重整炉长为 3.9m，宽为 10m，炉墙耐火材料厚 300mm，隔热层厚为 80mm，炉顶厚为 230mm。洗涤系统由文丘里管、填料洗涤塔和锥心除雾器三部分组成；炉顶气洗涤塔的特性和结构与冷却气洗涤塔相同。炉顶气和冷却气洗涤塔除尘量约为产品产量的 2%。洗涤水经闭路或开路循环水系统处理。

1.2.2 HYL-III 工艺

HYL-III 工艺是墨西哥 Hylsa (希尔萨) 公司开发的直接还原工艺，其工艺流程如图 1-3 所示。还原气以水蒸气为裂化剂，以天然气为原料，通过催化裂化反应制取。与 MIDREX 工艺相比，HYL-III 具有以下特点：(1) 还原气中氢含量高，

$H_2/CO = 5.6 \sim 5.9$, 而 MIDREX 竖炉 $H_2/CO = 1.55$; (2) 操作压力大, 为 0.55MPa , 而 MIDREX 竖炉为 0.23MPa ; (3) 还原温度高达 930°C , MIDREX 竖炉为 850°C 。由于上述特点的存在, 使得 HYL-III 竖炉生产效率高。与 MIDREX 竖炉相比, 同样炉容的条件下, HYL-III 竖炉海绵铁产量更大。加上制气部分和还原竖炉相对独立, 使得还原竖炉选择配套的还原气发生设备具有很大的灵活性。而 MIDREX 工艺, 还原竖炉和制气设备是相互联系、互相影响的。

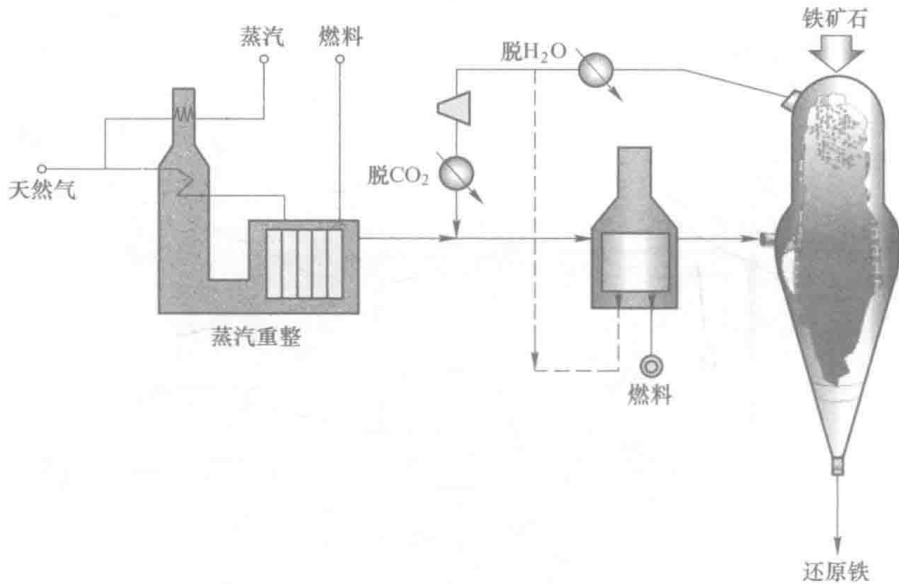


图 1-3 HYL-III 直接还原工艺流程

HYL 公司进一步推出了天然气零重整竖炉技术, 并提出直接使用焦炉煤气、合成气、煤制气等为还原气的 Energiron 技术, 成为竖炉发展的热点。Energiron 工艺流程如图 1-4 所示, 天然气、焦炉煤气等气体经加热器加热至 950°C , 在入炉前部分氧化, 温度升高到 1050°C , 生成的 H_2O 与 CH_4 在竖炉内以 Fe 作为催化剂进行重整, 得到还原气体, 与原有工艺技术相比无需再额外增加重整装置, 还原效率及能量利用率更高。竖炉顶部排出的气体经过洗涤系统脱水以及 CO_2 去除系统后循环利用。竖炉内压力为 $0.4 \sim 0.6\text{MPa}$, 生产能力大, 且烟尘损失很小。该工艺流程所涉及的部分氧化和重整反应主要为式(1-1)~式(1-4), 竖炉内还原反应为式(1-5)和式(1-6), 增碳反应为式(1-7), 即:



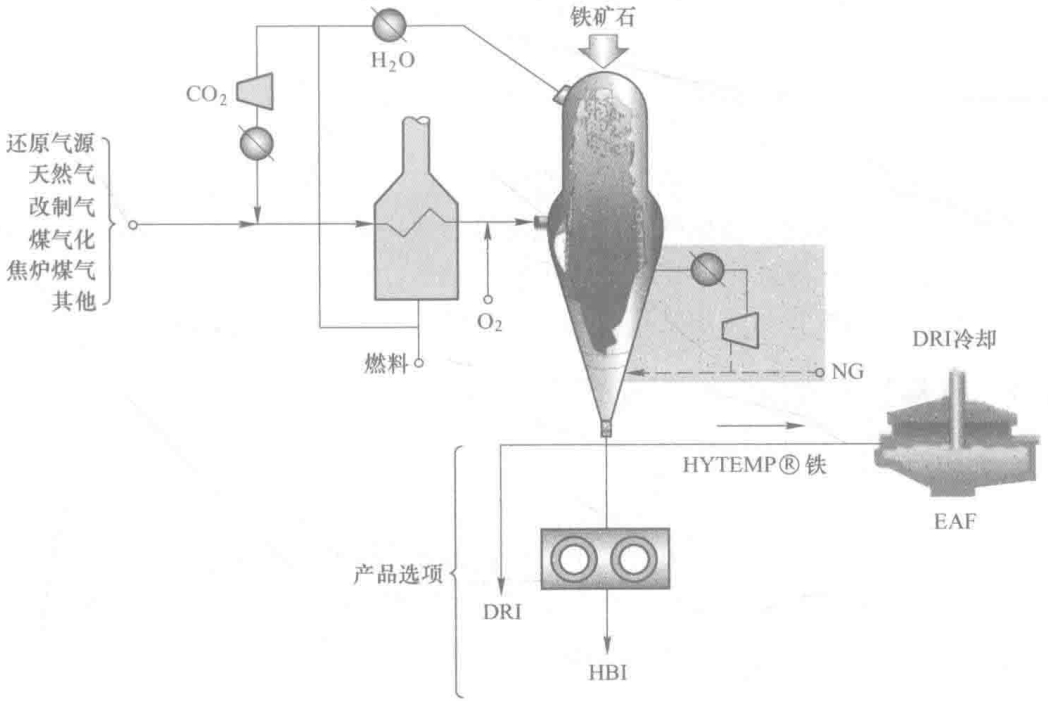


图 1-4 Energiron 总工艺流程