




FEI GAOLU LIANTIE

# 非高炉炼铁

张建良 刘征建 杨天钧 著

 冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 非高炉炼铁

张建良 刘征建 杨天钧 著

北京

冶金工业出版社

2015

## 内 容 提 要

本书从非高炉炼铁的热力学、动力学基础理论出发,系统叙述了直接还原和熔融还原的历史沿革和工艺特点;介绍了以 Midrex 法、HYL-Ⅲ法为代表的气体还原的直接还原方法,深入分析了近年来取得重大进展的 Energiron 法的特点和应用前景,介绍了以回转窑和转底炉工艺为代表的固体还原剂的直接还原方法,并介绍了 ITmk3 和 CHARP 法的进展;从技术经济角度分析了熔融还原代表性流程:Corex 工艺、Finex 工艺、HIs melt 工艺、CCF 工艺、DIOS 工艺、AISI 工艺、Romelt 工艺、Oxycup 工艺和 Tecnoled 工艺等,详细阐述了近年来着力开发的 HIsarna 工艺。本书还收入了作者课题组在利用生物质炼铁方面研究的一些心得;并以相当篇幅介绍了与炼铁工艺相关的一些单元技术:变压吸附制氧技术、CO<sub>2</sub> 分离捕集与封存技术、流态化技术、焦炉煤气利用技术、粉体造粒技术、环境保护和烟气脱硫技术以及煤气改质技术。

本书可供冶金、能源、化工等行业的工程技术人员以及高等院校相关专业教师、研究生和高年级本科生阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

非高炉炼铁/张建良,刘征建,杨天钧著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-5024-6851-4

I. ①非… II. ①张… ②刘… ③杨… III. ①直接炼铁  
IV. ①TF55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 045822 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 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 王 优 张耀辉 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6851-4

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  
2015 年 3 月第 1 版, 2015 年 3 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 25 印张; 604 千字; 385 页

90.00 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

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

近年来，非高炉炼铁技术有了很大进展，这主要是因为：

(1) 资源限制。国际范围内焦煤资源日益匮乏，以非焦煤为主要能源，改善钢铁工业能源结构的呼声日益高涨；与此同时，许多含铁原料难以满足大型高炉冶炼的要求，如多金属共生矿（钒钛磁铁矿、红土矿、硼铁矿等）、菱铁矿、褐铁矿、特种赤铁矿，日益恶化的资源条件推动非高炉炼铁技术向前发展。

(2) 环境要求。非高炉炼铁流程不用或少用造成大量污染的炼焦和造块工艺，同时大幅度减少传统高炉  $\text{CO}_2$ 、硫化物、氮氧化物、污水的排放；与此同时，短流程（一般指废钢—电炉流程）是今后清洁化钢铁生产的重要方向，大多数工业化国家电炉钢产量已超过 50%，但废钢质量恶化是制约电炉钢，尤其是纯净钢、优质钢发展的重要因素，直接还原铁（DRI/HBI）是其优质替代品，也是废钢残留有害元素的稀释剂。因此，非高炉炼铁技术的发展是实现环境友好、提升钢铁产品质量的需要。

作者在多年教学和科研工作基础上编著本书，立意在于：

(1) 系统介绍非高炉炼铁的基础理论，并融入作者多年的科研成果，力求科学严谨，各种流程、工艺的介绍务求准确新颖。

(2) 冶金工作者必须开阔视野才能在非高炉技术方面有所创新，因此作者结合自己科研工作的体会，专门介绍了一些相关技术：变压吸附制氧技术、 $\text{CO}_2$  分离捕集与封存技术、流态化技术、焦炉煤气利用技术、粉体造粒技术、环境保护和烟气脱硫技术以及煤气改质技术等，并收入了作者近年来在生物质炼铁技术方面研究的一些心得。

在书稿杀青之际，作者要特别感谢：

(1) 20 世纪末作者参加“含碳球团竖炉预还原—铁浴终还原”熔融还原流程开发与研究，后来列入国家攀登计划，并成功地在承德开展了半工业试

验。此间研究工作的积累，尤其是黄典冰博士关于含碳球团和熔融还原能耗的杰出研究成果，会同孔令坛老师的研究共同出版了《熔融还原》一书（冶金工业出版社，1998年），这次本书引用了黄典冰博士的许多论述和研究成果，在此向黄典冰博士、孔令坛老师表示衷心的感谢。

(2) 作者和秦民生老师合作编著《炼铁过程的解析与模拟》一书（冶金工业出版社，1991年），用数值模拟方法解析炼铁过程，尤其是非高炉炼铁过程；作者和刘述临老师合作编著《熔融还原技术》一书（冶金工业出版社，1991年），比较系统地介绍了当时国内外研究成果和编著人员的心得；作者还为秦民生老师的《非高炉炼铁》一书（冶金工业出版社，1988年）承担了收集整理资料的工作。这次本书引用了上述著作的许多论述，而秦民生老师、刘述临老师均已作古，谨在这里表示深深的怀念和崇高的谢意。

(3) 本书是作者课题组多年合作的成果。第4章收入了徐萌博士的部分研究成果，第9章收入了刘征建博士的部分研究成果。这里要特别说明的是：作者与日本东北大学有山达郎教授（Prof. A. Ariyama）合作研究生物质炼铁方法，并得到日本新能源产业技术开发机构（NEDO）的支持，在此向有山达郎教授专致谢忱。这一项目的研究成果，尤其是胡正文博士的许多论述收入在第8章。与此同时，本书还凝聚着左海滨、国宏伟、祁成林老师的许多贡献，在此一并表示深深的感谢。

(4) 焦克新博士承担本书策划、统筹和大量的编辑工作，付出了辛勤的劳动；李克江、王翠、刘兴乐、洪军、王润博、王振阳、张亚鹏、宋腾飞、李洪玮、李倩、耿巍巍、柴轶凡、于韬、于文涛等研究生同学参与了许多资料收集、翻译和编辑工作。同学们多次召开读书会、研讨会，许多思想的火花为本书增加了光彩，对于同学们的辛勤劳动，在此专致谢忱。

(5) 20世纪80年代，作者师从德国亚琛工业大学古登纳教授（Prof. Dr.-ing. H. W. Gudenau），开始接触非高炉炼铁技术，此后经常互访交流，尤其是2013年他访问中国和2014年作者访问德国，交换了许多宝贵的资料并进行了深入讨论，受益匪浅；与此同时，蒂森钢铁公司科塔斯博士（Dr.-ing. B. Korthas）提供了许多宝贵的建议，在这里也表示深深的感谢。

本书编著过程中得到孔令坛老师、王筱留老师的指导，刘云彩、李维国、王维兴等专家提供了宝贵的资料，在此一并表示诚挚的感谢。

感谢国家自然科学基金资助项目《基于金属化球团法处理钢厂含锌铁回收料关键技术研究》(U1260202) 对本书的支持。

由于水平所限，书中不足之处，恳请广大读者批评指正。

杨天钧 谨识

2014年10月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 非高炉炼铁方法的意义 .....	1
1.1.1 直接还原法 .....	2
1.1.2 熔融还原法 .....	2
1.2 非高炉炼铁方法的发展及现状 .....	4
1.2.1 直接还原技术概况 .....	4
1.2.2 熔融还原技术的产生与发展 .....	10
1.3 我国非高炉炼铁技术概况 .....	10
1.3.1 我国直接还原技术发展概况 .....	10
1.3.2 我国熔融还原技术发展概况 .....	12
参考文献 .....	12
<b>2 非高炉炼铁基础</b> .....	<b>14</b>
2.1 非高炉炼铁方法的技术经济指标 .....	14
2.2 非高炉炼铁方法使用的原燃料 .....	16
2.2.1 含铁原料 .....	16
2.2.2 燃料与还原剂 .....	18
2.3 含碳球团及其还原机理 .....	20
2.3.1 固-固还原机理 .....	20
2.3.2 二步还原机理 .....	21
2.4 产品性质及其应用 .....	25
2.4.1 非高炉炼铁方法产品种类和性质 .....	25
2.4.2 直接还原铁的处理及储运 .....	27
2.4.3 直接还原铁的应用 .....	29
参考文献 .....	33
<b>3 气体还原的直接还原方法</b> .....	<b>35</b>
3.1 铁氧化物气体还原机理 .....	35
3.1.1 热力学分析 .....	35

3.1.2 动力学分析 .....	37
3.2 冶金还原煤气 .....	40
3.2.1 还原煤气消耗量 .....	40
3.2.2 煤气脱硫及海绵铁渗碳 .....	41
3.2.3 冶金还原煤气的制造 .....	43
3.3 竖炉法基本原理 .....	47
3.3.1 竖炉法概述 .....	47
3.3.2 竖炉内还原基础 .....	48
3.4 竖炉法直接还原典型工艺 .....	54
3.4.1 Midrex 工艺 .....	54
3.4.2 HYL-III 工艺 .....	58
3.4.3 Energiron 工艺 .....	59
3.4.4 其他工艺 .....	62
3.5 其他气体直接还原方法 .....	70
3.5.1 固定床方法 .....	70
3.5.2 流态化方法 .....	73
参考文献 .....	77
<b>4 应用固体还原剂的直接还原方法 .....</b>	<b>79</b>
4.1 固体碳还原铁矿石的反应 .....	79
4.1.1 热力学分析 .....	79
4.1.2 动力学分析 .....	80
4.2 回转窑法 .....	83
4.2.1 回转窑法工艺原理 .....	83
4.2.2 回转窑法典型工艺介绍 .....	90
4.3 转底炉法 .....	92
4.3.1 概述 .....	92
4.3.2 转底炉法工艺原理 .....	93
4.3.3 转底炉法典型工艺介绍 .....	96
4.4 ITmk3 与 CHARP 法 .....	102
4.4.1 ITmk3 工艺 .....	102
4.4.2 煤基热风转底炉熔融炼铁法 .....	104
4.5 其他应用固体还原剂的直接还原方法 .....	104
4.5.1 Kinglor-Metor 法 .....	104
4.5.2 EDR 法 .....	106
4.5.3 固体反应罐法 .....	107



4.5.4 川崎 KIP 法 .....	107
参考文献 .....	108
<b>5 熔融还原基础 .....</b>	<b>110</b>
5.1 预还原基础研究 .....	110
5.1.1 预还原反应热力学 .....	110
5.1.2 预还原过程能耗分析 .....	111
5.1.3 预还原过程能耗图解 .....	113
5.1.4 预还原反应动力学 .....	117
5.2 终还原基础研究 .....	121
5.2.1 终还原反应热力学 .....	121
5.2.2 终还原过程能耗分析 .....	122
5.2.3 终还原过程能耗图解 .....	125
5.2.4 终还原反应动力学 .....	132
5.3 煤气改质技术研究 .....	139
5.3.1 煤气改质技术的物料平衡及热平衡 .....	139
5.3.2 煤气改质的作用 .....	140
5.4 熔融还原全过程操作线图分析 .....	142
5.4.1 预还原度平衡点 .....	142
5.4.2 煤气改质对熔融还原过程的影响 .....	143
5.5 泡沫渣的形成与抑制 .....	144
5.5.1 泡沫渣的形成机理及影响因素 .....	144
5.5.2 泡沫渣指数 .....	145
参考文献 .....	146
<b>6 含碳球团研究 .....</b>	<b>148</b>
6.1 含碳球团还原的特点 .....	149
6.1.1 含碳球团的还原过程 .....	149
6.1.2 含碳球团还原过程特点及其在熔融还原中的应用 .....	155
6.1.3 含碳球团的直接还原度 ( $R_d$ ) .....	156
6.1.4 含碳球团直接还原度的变化 .....	157
6.2 含碳球团还原过程数值模拟 .....	159
6.2.1 界面反应模型 .....	160
6.2.2 综合模型 .....	162
6.3 含碳球团冷固结技术 .....	166

6.3.1 波兰特水泥固结法 .....	167
6.3.2 高压蒸养法 .....	168
6.3.3 水玻璃固结法 .....	169
6.3.4 其他冷固结法 .....	170
6.4 含碳球团预还原过程物料平衡计算和热平衡计算 .....	170
6.4.1 含碳球团中碳的直接还原度与煤气条件的关系 .....	170
6.4.2 含碳球团竖炉还原过程分析 .....	171
参考文献 .....	179
<b>7 典型熔融还原流程 .....</b>	<b>182</b>
7.1 Corex 工艺 .....	182
7.1.1 概述 .....	182
7.1.2 工艺流程 .....	183
7.1.3 原燃料要求 .....	185
7.1.4 Corex 流程的工艺特点 .....	186
7.1.5 宝钢罗泾 Corex C-3000 装置 .....	186
7.1.6 宝钢罗泾 Corex C-3000 装置的技术进步 .....	194
7.1.7 Corex 流程的展望 .....	195
7.2 Finex 工艺 .....	196
7.2.1 工艺流程 .....	197
7.2.2 Finex 工艺流程的技术及经济指标 .....	199
7.2.3 Finex 工艺应用前景 .....	203
7.3 HIs melt 工艺 .....	204
7.3.1 工艺流程 .....	205
7.3.2 SSPP 及 HRDF 试验结果 .....	208
7.3.3 HIs melt 流程的技术及经济评价 .....	213
7.3.4 HIs melt 流程应用前景 .....	215
7.4 CCF 工艺 .....	216
7.4.1 工艺流程 .....	216
7.4.2 旋风熔融预还原炉 (旋风炉) .....	217
7.4.3 旋风熔融炉的试验结果 .....	218
7.4.4 CCF 过程的物料平衡和热平衡 .....	218
7.4.5 CCF 流程技术及经济评价 .....	219
7.5 HIsarna 工艺 .....	220
7.5.1 工艺流程 .....	220
7.5.2 HIsarna 流程的技术特点 .....	222

7.5.3 Hisarna 流程半工业试验 .....	224
7.5.4 Hisarna 流程的主要特点 .....	224
7.6 DIOS 工艺 .....	225
7.6.1 DIOS 主要研究结果 .....	226
7.6.2 DIOS 半工业试验 .....	231
7.6.3 DIOS 流程的技术及经济特征 .....	235
7.7 AISI 工艺 .....	236
7.7.1 工艺流程 .....	237
7.7.2 AISI 流程的主要影响因素 .....	238
7.7.3 AISI 流程技术及经济指标 .....	238
7.8 Romelt(PJV) 工艺 .....	240
7.8.1 工艺流程 .....	240
7.8.2 Romelt 流程的技术特点 .....	241
7.8.3 Romelt 流程半工业试验 .....	243
7.8.4 Romelt 流程的技术经济指标 .....	243
7.8.5 Romelt 流程的主要特点 .....	246
7.9 Oxycup 工艺 .....	247
7.9.1 工艺流程 .....	247
7.9.2 德国蒂森-克虏伯钢铁公司 Oxycup 工艺的技术经济指标 .....	249
7.9.3 Oxycup 工艺特点 .....	251
7.10 Tecnoled 工艺 .....	252
7.10.1 Tecnoled 工艺流程 .....	252
7.10.2 Tecnoled 工艺特点 .....	252
7.10.3 Tecnoled 工业试验 .....	253
7.11 其他熔融还原工艺 .....	253
7.11.1 Redsmelt 法 .....	253
7.11.2 川崎法 .....	255
7.11.3 XR 法 .....	258
7.11.4 Combismelt 法 .....	259
7.11.5 CIG 法 .....	260
7.11.6 CGS 法 .....	269
7.11.7 COIN 法 .....	277
7.11.8 Elred 法 .....	283
7.11.9 SC 法 .....	288
7.11.10 COSRI 法 .....	295
7.11.11 Plasmasmelt 法 .....	296
7.11.12 LB 法 .....	296

参考文献 .....	297
<b>8 利用生物质的炼铁方法 .....</b>	<b>301</b>
8.1 关于生物质的基础理论 .....	301
8.1.1 生物质的概念及资源状况 .....	301
8.1.2 生物质的基础特性及利用 .....	301
8.1.3 生物质能的碳中性 .....	303
8.2 生物质应用于炼铁工艺概况 .....	304
8.2.1 生物质应用于高炉喷吹 .....	304
8.2.2 高炉使用含生物质焦的铁矿压块 .....	308
8.2.3 生物质作为辅助原料在炼铁及相关工艺中的应用 .....	310
8.2.4 生物质能辅助炼铁系统 .....	311
8.2.5 生物质能辅助炼铁及 CO <sub>2</sub> 减排潜力 .....	313
8.3 生物质焦的基础研究 .....	317
8.3.1 生物质焦 .....	317
8.3.2 生物质焦的气化反应性及其影响因素 .....	317
8.4 生物质焦和铁矿粉复合压块的基础研究 .....	322
8.4.1 配加生物质焦粉的铁矿粉混合物的还原规律 .....	322
8.4.2 生物质焦粉的铁矿压块的自还原规律 .....	328
8.4.3 含生物质焦粉的铁矿粉压块的自还原动力学 .....	339
8.5 应用生物质能的非高炉炼铁流程 .....	349
8.5.1 生物质焦应用于直接还原 .....	349
8.5.2 生物质制氢-直接还原铁技术 .....	351
参考文献 .....	351
<b>9 炼铁工业相关的单元技术 .....</b>	<b>354</b>
9.1 变压吸附制氧技术 (PSA 技术) .....	354
9.1.1 历史沿革 .....	354
9.1.2 工艺流程 .....	355
9.1.3 技术特点 .....	355
9.1.4 半工业或工业试验结果 .....	356
9.1.5 小型医用变压吸附制氧技术 .....	356
9.1.6 评价及展望 .....	357
9.2 CO <sub>2</sub> 分离捕集与封存技术 (CCS 技术) .....	357
9.2.1 CO <sub>2</sub> 分离捕集和封存技术发展 .....	358

9.2.2	CO <sub>2</sub> 分离捕集和封存技术工艺流程 .....	358
9.2.3	CO <sub>2</sub> 分离捕集技术特点 .....	358
9.2.4	CO <sub>2</sub> 的运输及经济技术评价 .....	361
9.2.5	CO <sub>2</sub> 地质封存的技术特点 .....	361
9.2.6	评价与展望 .....	362
9.3	流态化技术 .....	362
9.4	焦炉煤气 (COG) 利用技术 .....	364
9.4.1	焦炉煤气生产甲醇工艺 .....	364
9.4.2	焦炉煤气低温分离生产液化天然气 (LNG) 联产氢气技术 .....	365
9.4.3	焦炉煤气用于直接还原炼铁工艺 .....	366
9.4.4	甲烷炉内改质直接还原工艺 .....	366
9.5	粉体造粒技术 .....	368
9.5.1	粉体造粒技术简介 .....	368
9.5.2	基本造粒方法 .....	369
9.5.3	粉体粒子间的结合力 .....	369
9.6	环境保护及烟气脱硫脱硝技术 .....	370
9.6.1	环境保护技术 .....	370
9.6.2	烟气脱硫技术 .....	371
	参考文献 .....	375
<b>10</b>	<b>我国发展非高炉炼铁的展望 .....</b>	<b>376</b>
	<b>索 引 .....</b>	<b>378</b>

## 1.1 非高炉炼铁方法的意义

铁是一种非常重要的金属，2013 年全球粗钢总产量达到 16.07 亿吨，全球生铁产量为 11.65 亿吨。然而 2013 年全球非高炉工艺生铁产量约 7719 万吨，占全球生铁产量的 6.3%<sup>[1]</sup>。高炉工艺的主要原理人们在中世纪就已经知道，但直到近 100 年来它才有很大发展，尤其最近几十年发展更快<sup>[2]</sup>。现代化高炉是一种效率极高的冶炼设备。确保大型高炉顺行、无故障操作的一个重要条件是，原料和燃料应具有竖炉所要求的良好冶金性能。为确保良好的透气性和煤气在高炉中的分布，矿石必须有较大的粒度。然而，今天所生产的大部分矿石是精矿粉，它在竖炉使用之前必须造块——烧结或造球；煤不能直接用作高炉的主要燃料，除非转变为高级的冶金焦炭<sup>[3]</sup>。精矿粉的造块和煤的焦化是昂贵的过程，产生的费用相当于生铁生产成本的 15%~20%，同时烧结厂和焦化厂还严重地污染环境。况且，矿石的还原工序所消耗的能量要占钢铁生产总能耗的 65% 左右。因此，如果能研究出一种不需要造块和焦化工艺的方法将是技术上的重大突破<sup>[4]</sup>。

高炉炼铁目前已达到十分完善的程度。例如，现代高炉的容积不断大型化，出现 4000m<sup>3</sup> 以上的超大型高炉，年产量可达 300~500 万吨。近年来广泛采用的精料、高风温、高压、富氧、喷煤、计算机控制等先进技术，已使高炉成为在热工和反应动力学方面很有成效的生产装置。现代高炉的作业率确实令人惊叹，焦比（全焦操作）低于 450kg/t，生产率可达 2.5t/(m<sup>3</sup>·d)。如果回收高炉煤气的能量（低热值高炉煤气的热损失为 30%），则高炉的能量利用率是很高的。在过去的 25 年中，高炉所取得的进步主要是更好地了解了炉内发生的各种过程的原理<sup>[3]</sup>。

然而，也不难指出高炉过程所固有的一些缺点<sup>[5]</sup>：

(1) 煤气和炉料逆流运动的高炉过程需要高质量的人造炉料，即铁精矿要被加工成烧结矿或球团矿，煤要炼成焦炭，而含 20% CO 的低热值炉顶煤气是由优质焦炭产生的。

(2) 由于加热空气和除尘，需要建设大量辅助设备。因此，由烧结、炼焦、热风炉、高炉等组成的炼铁系统是一个复杂、庞大的生产系统，需要巨额投资，且工艺流程长，原料、燃料必须经过反复加热、冷却和加工，能耗和生产成本比较高。

(3) 高炉流程进行经济生产要求的规模较大，生产的灵活性较差。

而高炉本身作为一个反应器也具有以下缺点：

(1) 冶炼过程是在单个反应器中进行，逆流热交换、煤气还原、焦炭燃烧、煤气的产生和渣铁分离等所有过程都发生在这个反应器中，除了加料和排放渣铁外，缺少调节和控制手段。

(2) 物料的向下运动是不规则的，煤气在通过浆糊状的软熔带时尤其困难。

(3) 改变工艺参数后若干小时才会看到变化，即高炉过程的滞后性，使这一过程难以

控制。

高炉炼铁作为炼铁生产的主体,经过长时间的发展,其技术已经非常成熟。但由于对冶金焦的强烈依赖导致其对那些缺乏焦煤资源的地区影响格外突出。随着焦煤资源的日渐贫乏,冶金焦的价格越来越高。与之相反,蕴藏丰富的廉价非焦煤资源在炼铁生产中却得不到充分的利用。为了降低炼铁成本,人们一直在孜孜不倦地寻求以其他燃料代替冶金焦的途径,其中煤粉喷吹、重油喷吹、天然气喷吹以及塑料喷吹等都是较为有效的措施。但这些措施的效果毕竟是有限度的,不可能从根本上解决问题<sup>[6]</sup>。

为了摆脱焦煤资源短缺对发展的羁绊,适应日益提高的环境保护要求,降低钢铁生产能耗,以非结焦煤为能源的非高炉炼铁技术,或称为非焦炼铁技术,成为钢铁界的研究热点。使炼铁生产彻底摆脱对冶金焦的依赖是开发非高炉炼铁技术的根本动力。历史上曾经出现过为数众多的非高炉炼铁流程,但这些流程大多数未能实现工业化。在那些实现了工业化的流程中也有很多未能经受住时间的考验,在激烈的竞争中逐渐衰落甚至消失,如电高炉、电矮身竖炉和粒铁法。经过数万年的发展,至今已经形成了以直接还原和熔融还原为主体的现代化非高炉炼铁工业体系<sup>[7]</sup>。

尽管到目前为止,传统的高炉—转炉流程在钢铁生产中仍占最重要地位,还没有任何一种方法能够取代高炉炼铁,但非高炉炼铁技术已是钢铁工业持续发展、实现节能减排、环境友好发展的前沿技术之一<sup>[8]</sup>。铁矿石直接还原与熔融还原是非高炉炼铁方法的两大课题,也成为炼铁冶金技术上的新工艺。

### 1.1.1 直接还原法

直接还原法是指铁矿石在低于熔化温度情况下还原生产海绵铁的炼铁生产过程,其产品称为直接还原铁,也称海绵铁。由于是低温还原,得到的直接还原铁未能充分渗碳,因而含碳较低(小于2%)。矿石中的脉石成分( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ )既不能熔化造渣脱除也不能被还原,因而直接还原铁几乎保留了铁矿石中的全部脉石杂质<sup>[9]</sup>。

从含碳低这一特点来看,直接还原铁具有钢的性质,而实际上它也多是作为废钢代用品使用的。然而直接还原铁由于含脉石杂质较多并不具有成品钢的作用,从钢铁冶炼的最基本原理氧化—还原过程分析,直接还原法只有直接把铁矿石炼成钢的一步法特征,这就是“直接还原”一词的由来。此词是相对于传统的钢铁生产流程(高炉—氧气转炉流程)而言,传统流程是把铁矿石过度还原(渗碳)成生铁,再把生铁中碳氧化,精炼成钢的“二步法”。这里“直接还原”一词与高炉用碳还原氧化铁的直接还原反应是概念完全不同的两个专有术语<sup>[10]</sup>。

实际生产中直接还原铁仍需要电炉精炼成钢,但电炉精炼的作用主要是熔化脱除杂质和调整钢的成分,而不是氧脱碳。由于可以通过直接还原—电炉串联生产成钢,就出现了新的钢铁冶金生产工艺流程。

### 1.1.2 熔融还原法

熔融还原法是指一切不用高炉冶炼液态生铁的方法。发展熔融还原法的目的在于取代目前的高炉炼铁方法,但它仅是把高炉过程在另外一个不用焦炭的反应器中完成,基本不改变目前的钢铁生产的主要流程。

最初开发熔融还原法是期望寻求一种理想的全新炼铁方法，既不用昂贵短缺的焦炭以省去炼焦厂的庞大基建费用，又不用矿粉造块而免除烧结球团工序，并且没有污染。但是实际发展过程中更为实际的考虑逐步代替了理想的愿望，现在认为凡不以焦炭为主要能源而以煤炭为主要能源，虽使用烧结球团的非高炉炼铁法都属于熔融还原的范畴。与直接还原不同之处是熔融还原的发展目标只是代替焦炭高炉炼铁，其产品则是与高炉铁水性质相近的液态生铁。图 1-1 示出各种钢铁生产流程的还原—氧化过程<sup>[11,12]</sup>。

各种直接还原法与熔融还原法的基本特征及其与高炉法的区别可用 Rist 图加以表示(图 1-2)。因为各种方法使用的一次能源不同，可用一个统一的热耗  $Q$  表示 Rist 图的纵坐标，如用夺取一个氧原子需要能耗值  $Q_0$  作为纵坐标，由此而得到的 Rist 线斜率  $M$  为生产一个 Fe 原子的热耗，则吨铁产品热耗可用下式计算：

$$Q_p = \frac{w(\text{Fe})_p}{56} M \times 1000 \text{ kJ/t}$$

式中  $w(\text{Fe})_p$  ——各种方法产品的含铁量，%；  
 $M$  ——Rist 线斜率（每摩尔铁的热耗），  
 kJ/mol。

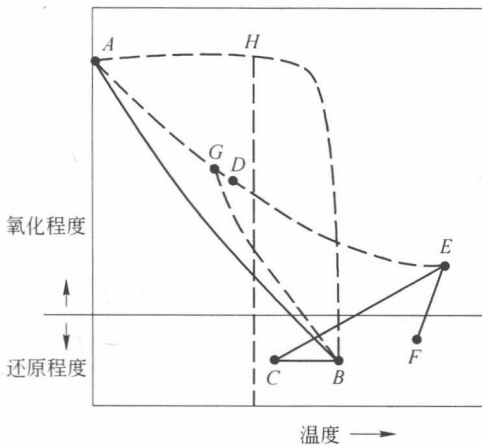


图 1-1 各种钢铁生产流程的还原—氧化过程

A—铁矿石；B—高炉出炉铁水；C—装入炼钢炉的铁水；  
 D—海绵铁；E—出炉钢水；F—成品钢；G—预还原矿石；  
 A-B—高炉过程；C-E—氧气转炉炼钢过程；A-G—预还原；  
 A-D—直接还原；D-E—电炉炼钢；G-B—终还原；  
 A-G-B—二步法熔融还原；A-H-B—一步法熔融还原

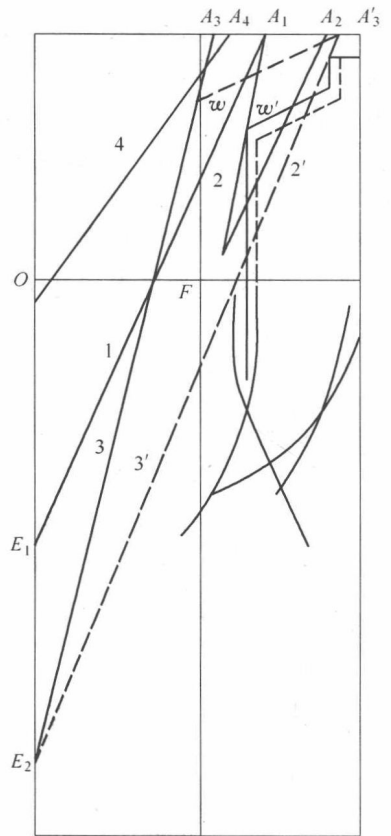


图 1-2 Rist 图

图 1-2 表明：高炉法与二步熔融还原法的基本原理相同，可用同一 Rist 法表示（线 1）；气体还原只相当于高炉法炉身预还原过程，故出现于第一象限（线 2）；如气体还原法的煤气回收利用，则 Rist 线不受热力学条件限制（线 2'）；一步熔融还原法和回转窑法类似，有后期燃烧；虽然矿石中 FeO 都是用固体碳还原，但煤气成分不受热力学条件限制，因而可用线 3 表示，其燃料比则用折线平均斜率（线 3'）表示；电炉法没有燃烧反应，因此列于第四象限（线 4）。



## 1.2 非高炉炼铁方法的发展及现状

### 1.2.1 直接还原技术概况

在炼铁生产的发展过程中,最早出现的方法是直接还原法。在当时的历史条件下(中国约2000年前,欧洲约600年前),由于设备简单和技术水平低,只能在较低温度下用碳还原铁矿石,产出的只能是固体海绵铁,也称为块炼铁,在我国最早出现于战国时代(公元前6世纪)。由于铁和杂质相互混合,得到的海绵铁只能锻打成型,并要经过多次反复锻打才可排出部分杂质,从而提高强度。显然这种生产过程效率低,质量也得不到保证。随着科学技术和装备水平的提高,世界上出现了高炉炼铁法。高炉法的产品是生铁,必须加工成熟铁或钢才能应用,即出现了二步法。高炉炼铁取代原始的直接还原冶金方法,使生产效率和经济效益显著改善,这是钢铁冶金技术上的重大进步。然而,随着钢铁工业的巨大发展,供应高炉合格的冶金焦炭日益紧张,于是直接还原的工艺又重新提出。早在1870年,英国就出现了第一个直接还原法专利,之后又出现过上百种直接还原方案,但真正实现工业化是从20世纪50年代开始的。1957年,墨西哥建成第一座用还原气体生产的样板厂(HYL法),1960年加拿大Stelco钢铁公司和德国Lurgi公司联合开发成功的SL-RN法以及1966年投产的米德兰法(Midrex),确立了工业规模直接还原铁(DRI)发展的道路,使直接还原铁得到迅速发展<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.1.1 世界直接还原铁产量增长情况

数据显示,自20世纪70年代以来,世界直接还原铁产量一直呈上升趋势,见图1-3。

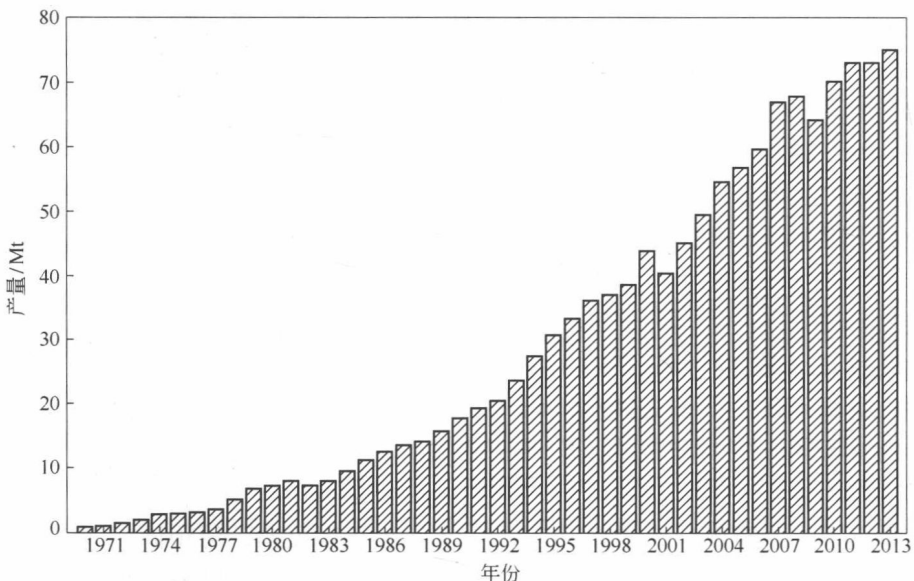


图1-3 世界直接还原铁产量变化

1970年世界直接还原铁产量为79万吨,而到2005年达到5687万吨,在这期间,只有1982年和2001年出现了负增长。20世纪80~90年代,直接还原技术和产量有了突飞猛进的发展,80年代中期,全世界直接还原铁产量突破1000万吨;90年代初,产量突破