

特色冶金资源 非焦冶炼技术

储满生 柳政根 唐珏 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

特色冶金资源非焦冶炼技术

储满生 柳政根 唐珏 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 提 要

钒钛磁铁矿、硼铁矿、高铁铝土矿等典型多金属共生特色冶金资源的高效利用,对国民经济的可持续发展具有重要战略意义,而以直接还原为典型代表的现代非焦冶炼技术在冶金资源综合利用方面具有显著优势。本书在系统论述非焦冶炼技术发展现状和介绍煤制气-气基竖炉直接还原新工艺研究成果的基础上,详细介绍了煤基金属化还原-高效选分、气基直接还原-电热熔分等非焦冶炼技术应用于钒钛磁铁矿、硼铁矿、高铁铝土矿资源高效清洁综合利用新工艺开发的最新成果,同时对新工艺所涉及的热力学、反应动力学、有价组元迁移规律及其强化机制等核心理论进行了初步研究。本书对于非焦冶炼以及特色冶金资源综合利用的技术进步具有积极推动作用,同时可为其他复合矿冶金资源的生态化利用提供借鉴和参考。

本书可用作高等院校冶金工程、资源循环科学与工程、矿物加工等相关专业本科高年级学生和研究生的教学参考书,还可供冶金企业、科研、设计机构从事冶金资源综合利用工作的科技人员和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

特色冶金资源非焦冶炼技术/储满生,柳政根,唐珏著. —北京:
冶金工业出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-5024-6479-0

I. ①特… II. ①储… ②柳… ③唐… III. ①熔炼
IV. ①TF111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 024021 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6479-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2014 年 3 月第 1 版, 2014 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 23 印张; 560 千字; 356 页

70.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

以直接还原和熔融还原为主体的非焦冶炼技术是我国钢铁工业发展的重要方向之一，对钢铁产业的良性发展和低碳冶炼具有重要意义，长期以来一直是科学研究和生产应用的热点。特别是煤制气-气基竖炉直接还原新工艺为我国发展非高炉炼铁的主导方向，多家企业均有建设气基竖炉生产线的规划，但我国发展该工艺相关的原料基础、竖炉内部机理、物质-能量转换机制、技术经济可行性等关键问题尚待阐明。另外，钒钛磁铁矿、硼铁矿、高铁铝土矿等属于典型多金属共生、难处理的特色冶金资源，其高效利用对国民经济的可持续发展具有重要战略意义，而以煤基和气基直接还原为主要代表的现代非焦冶炼技术在冶金资源综合利用方面具有显著的技术优势。

本书在系统论述非焦炼铁技术发展现状和我国发展煤制气-气基竖炉直接还原技术可行性研究的基础上，全面介绍了非焦冶炼技术应用于钒钛磁铁矿、硼铁矿、高铁铝土矿资源高效清洁利用的实验室研究成果。本书为目前国内关于气基竖炉直接还原以及钒钛磁铁矿、硼铁矿、高铁铝土矿高效清洁利用新技术开发方面的较新著作之一，对我国发展非焦冶炼技术以及特色冶金资源高效利用具有积极推动作用，同时可为其他复杂难处理冶金资源的综合利用提供有益思路和借鉴。

本书共5篇16章，其中第1篇主要介绍现代炼铁工艺、直接还原炼铁和熔融还原炼铁新工艺以及非焦炼铁技术处理特色冶金资源等；第2篇主要介绍煤制气-气基竖炉直接还原技术、气基竖炉直接还原用氧化球团的制备及综合性能、还原膨胀机理研究及其性能改善以及气基竖炉直接还原热力学、动力学机理和能量利用分析等研究成果；第3篇主要介绍钒钛磁铁矿资源综合利用现状、钒钛磁铁矿煤基金属化还原-高效选分和气基竖炉直接还原-电炉熔分新工艺试验研究成果；第4篇主要介绍硼铁矿资源综合利用现状、硼铁矿直接还原-电炉熔分和金属化还原-高效选分新工艺；第5篇主要介绍高铁铝土矿资源综合利用现状、高铁铝土矿散装料和热压块金属化还原-高效选分冶炼新工艺以及高铁铝土矿碳热还原所对应的相变历程及热力学研究成果。

东北大学储满生教授和柳政根、唐珏博士共同完成了本书的撰写、统稿和

修改工作，全书由储满生审核和定稿。其中，储满生负责第1、2篇的撰写，储满生、唐珏共同负责第3篇的撰写，储满生、柳政根、唐珏共同负责第4篇的撰写，储满生、柳政根共同负责第5篇的撰写。另外，东北大学钢铁冶金研究所博士研究生王兆才参与了第2篇、博士研究生付小佼和硕士研究生于洪翔参与了第4篇的研究工作，郭同来、陈双印、陈立杰、冯聪、王宏涛、赵伟、尹庚羊和汤雅婷等参加了本书的数据整理、编排以及修改工作。

本书所涉及的研究成果得到了国家自然科学基金重大项目（51090384）、国家自然科学基金（51374058）、国家高技术研究发展计划（2008AA03Z102、2012AA062302）、中央高校基本科研业务费专项资金（N110202001）和教育部博士点基金（20100042110004）等项目的资助。在本书的编辑出版过程中，还得到了冶金工业出版社的全力支持。另外，书中还引用了国内外同行的部分科研成果。作者在此一并表示最诚挚的谢意。

由于作者水平所限，书中不妥之处诚请各位读者批评指正。

作 者

2013年10月

于东北大学

目 录

第 1 篇 非焦炼铁技术及特色冶金资源综合利用概述

1 非焦炼铁技术及特色冶金资源综合利用概述	3
1.1 现代炼铁工艺	3
1.2 直接还原炼铁	4
1.2.1 典型直接还原炼铁工艺	4
1.2.2 世界范围内直接还原技术的发展现状	13
1.2.3 直接还原在我国的发展	19
1.3 熔融还原炼铁新工艺	23
1.3.1 典型熔融还原炼铁工艺	23
1.3.2 熔融还原技术的发展现状	33
1.4 非焦炼铁技术处理特色冶金资源	34
参考文献	35

第 2 篇 我国发展煤制气—气基竖炉直接还原工艺的基础研究

2 煤制气—气基竖炉直接还原技术	39
2.1 煤制气—气基竖炉直接还原概述	39
2.1.1 研究背景	39
2.1.2 研究目的	41
2.1.3 研究内容	42
2.2 我国煤炭资源概况	43
2.2.1 我国煤炭资源的储量及分布	43
2.2.2 我国煤炭资源的种类	44
2.2.3 我国煤类的煤质特征	44
2.2.4 我国煤炭资源的供应现状	45
2.3 煤气化技术及要求	46
2.3.1 现有煤气化工艺特征	46
2.3.2 主要煤气化工艺评价	50
2.3.3 选择适宜煤气化技术的相关建议	55
2.4 小结	56
参考文献	56

3 气基竖炉直接还原用氧化球团的制备及综合性能	58
3.1 气基竖炉用氧化球团试样的制备	58
3.1.1 实验原料	58
3.1.2 球团制备工艺	59
3.2 膨润土对球团性能的影响	61
3.2.1 膨润土种类对球团性能的影响	61
3.2.2 膨润土添加量对球团性能的影响	62
3.3 合理制备工艺下三种国产球团的综合性能	63
3.3.1 化学成分	63
3.3.2 抗压强度	63
3.3.3 冷态转鼓强度	64
3.3.4 还原性	65
3.3.5 低温还原粉化性	66
3.3.6 还原膨胀性	67
3.4 气基直接还原实验	68
3.4.1 还原实验设备	68
3.4.2 还原实验条件	69
3.4.3 实验步骤	69
3.4.4 预备实验	70
3.4.5 还原实验结果	70
3.4.6 还原冷却后强度	73
3.5 小结	73
参考文献	74
4 气基竖炉球团还原膨胀机理研究及性能改善	75
4.1 还原条件对球团还原膨胀性能的影响	75
4.1.1 还原气氛	75
4.1.2 还原温度	77
4.1.3 还原膨胀率与还原率的关系	79
4.2 脉石成分对球团还原膨胀性能的影响	79
4.2.1 实验原料	79
4.2.2 实验结果	80
4.2.3 CaO 对球团还原膨胀性能的影响	80
4.2.4 SiO ₂ 对球团还原膨胀性能的影响	82
4.2.5 MgO 对球团还原膨胀性能的影响	83
4.3 球团还原膨胀性能的改善	84
4.3.1 实验原料	84
4.3.2 实验方法	84
4.3.3 硼镁复合添加剂对球团还原膨胀性能的影响	84

4.4 小结	86
参考文献	86
5 气基竖炉直接还原热力学及动力学机理研究	87
5.1 竖炉内还原气热力学利用率分析	87
5.1.1 还原煤气热力学利用率计算	87
5.1.2 还原温度和还原气氛中 $\varphi(\text{H}_2)/\varphi(\text{CO})$ 对煤气利用率的影响	90
5.1.3 直接还原铁渗碳量对煤气利用率的影响	90
5.1.4 直接还原铁金属化率对煤气利用率的影响	91
5.1.5 氧化度对煤气利用率的影响	91
5.2 气-固还原反应动力学分析	92
5.2.1 还原反应限制性环节	93
5.2.2 还原反应阻力	96
5.2.3 还原反应速率常数	96
5.3 小结	98
参考文献	99
6 气基竖炉直接还原工艺及能量利用分析	100
6.1 竖炉物料平衡计算	100
6.1.1 竖炉用氧化球团原料	100
6.1.2 入炉还原煤气成分	100
6.1.3 生产每吨直接还原铁的氧化球团需求量	103
6.1.4 炉尘	104
6.1.5 直接还原铁产品的化学成分	104
6.1.6 炉顶煤气成分	105
6.1.7 竖炉物料平衡表	108
6.2 竖炉热平衡计算	109
6.2.1 热收入	109
6.2.2 热支出	110
6.2.3 竖炉热平衡表	113
6.2.4 单因素对炉顶煤气温度的影响	114
6.3 气基竖炉直接还原焓分析	115
6.3.1 焓分析方法	115
6.3.2 气基竖炉直接还原焓分析模型	119
6.3.3 气基竖炉直接还原焓平衡	121
6.3.4 气基竖炉直接还原焓评价	122
6.3.5 气基竖炉直接还原与高炉炼铁焓比较	123
6.4 本章小结	125
参考文献	126

第3篇 钒钛磁铁矿非焦冶炼技术

7 钒钛磁铁矿资源综合利用现状及新工艺的提出	129
7.1 钒钛磁铁矿资源的特点	129
7.1.1 钒钛磁铁矿资源的分布	129
7.1.2 钒钛磁铁矿矿石、矿物特征	131
7.2 钒钛磁铁矿资源综合利用现状	132
7.2.1 钒钛磁铁矿选矿	133
7.2.2 钒钛磁铁矿高炉法综合利用	135
7.2.3 钒钛磁铁矿非高炉法综合利用	137
7.3 钒钛磁铁矿冶炼新工艺	139
参考文献	141
8 钒钛磁铁矿金属化还原—高效选分	144
8.1 实验原料与方案	144
8.1.1 还原温度的确定	144
8.1.2 实验方案的制订	145
8.1.3 实验原料	146
8.1.4 实验设备	149
8.1.5 实验步骤	149
8.2 关键工艺参数对还原和选分指标的影响	151
8.2.1 磁场强度	151
8.2.2 还原温度	152
8.2.3 还原时间	155
8.2.4 配碳比	158
8.2.5 还原煤粒度	162
8.3 磁性产物电热熔分实验	162
8.4 钒钛磁铁矿碳热还原热力学分析和相变历程	165
8.4.1 热力学分析	165
8.4.2 碳热还原相变历程	169
8.5 小结	171
9 钒钛磁铁矿氧化球团焙烧—气基竖炉直接还原	173
9.1 高铬型钒钛磁铁矿氧化球团焙烧	173
9.1.1 高铬型钒钛磁铁矿原料特性的研究	173
9.1.2 高铬型钒钛磁铁矿氧化球团的制备	176
9.1.3 焙烧温度对高铬型钒钛磁铁矿球团焙烧过程的影响研究	177
9.1.4 高铬型钒钛磁铁矿球团的氧化固结过程	183

9.1.5 焙烧时间对高铬型钒钛磁铁矿球团焙烧过程的影响	184
9.2 高铬型钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原	187
9.2.1 气基竖炉直接还原的热力学理论	187
9.2.2 实验方案和步骤	187
9.2.3 温度和气氛对球团冶金性能的影响	189
9.2.4 高铬型钒钛磁铁矿球团气基竖炉直接还原的相变历程	193
9.2.5 高铬型钒钛磁铁矿球团气基竖炉直接还原的动力学分析	196
9.2.6 还原产物熔分实验	204
9.3 小结	206
参考文献	208

第4篇 硼铁矿非焦冶炼技术

10 硼铁矿资源综合利用现状及新工艺的提出	211
10.1 硼铁矿资源的特点	211
10.2 硼铁矿资源综合利用现状	213
10.2.1 硼铁矿的选矿分离	213
10.2.2 化学法(湿法)处理及综合利用	214
10.2.3 硼铁矿生产 Fe-Si-B 母合金	215
10.2.4 硼铁矿高炉法综合利用	215
10.2.5 作为烧结球团造块添加剂	216
10.2.6 硼铁矿直接生产硼砂	217
10.3 硼铁矿高效清洁综合利用新工艺的提出	217
10.3.1 硼铁矿煤基/气基直接还原-电炉熔分新工艺	218
10.3.2 硼铁矿金属化还原-高效选分新工艺	219
参考文献	220
11 硼铁矿直接还原-电炉熔分	222
11.1 硼铁矿气基竖炉直接还原	222
11.1.1 含硼氧化球团制备	222
11.1.2 硼铁矿气基竖炉直接还原	228
11.2 硼铁矿煤基直接还原	236
11.2.1 硼铁矿选择性还原	236
11.2.2 硼铁矿回转窑直接还原	236
11.2.3 硼铁矿隧道窑直接还原	238
11.3 硼铁矿还原产物电炉熔分及硼铁分离新工艺可行性分析	243
11.3.1 硼铁矿直接还原产物电炉熔分	243
11.3.2 硼铁矿直接还原-电炉熔分新工艺可行性分析	245
11.4 小结	248

参考文献	249
12 硼铁矿金属化还原-高效选分	250
12.1 实验原料与方案	250
12.2 实验设备与步骤	250
12.3 新工艺考核指标	251
12.4 关键工艺参数对还原和选分指标的影响	251
12.4.1 磁场强度	251
12.4.2 配碳比	253
12.4.3 还原煤粒度	255
12.4.4 还原时间	257
12.4.5 还原温度	259
12.5 选分尾矿	262
12.6 小结	262

第5篇 高铁铝土矿非焦冶炼技术

13 高铁铝土矿资源综合利用现状及新工艺的提出	265
13.1 我国铁矿资源	265
13.2 我国铝土矿资源	267
13.3 我国铝资源供应现状	267
13.4 国内外铁铝复合矿资源的特点	269
13.4.1 高铝铁矿石	269
13.4.2 高铁铝土矿	270
13.4.3 赤泥	271
13.5 铁铝复合矿资源利用现状	271
13.5.1 高铝铁矿石利用现状	271
13.5.2 高铁铝土矿利用现状	272
13.5.3 赤泥利用现状	275
13.6 铁铝分离技术研究现状	277
13.6.1 物理法	277
13.6.2 化学法	279
13.6.3 生物法	281
13.7 含碳球团在冶金资源综合利用中的应用	282
13.7.1 含碳球团概述	282
13.7.2 含碳球团还原过程	283
13.7.3 含碳球团在冶金资源综合利用中的应用现状	285
13.7.4 热压含碳球团	286
13.8 高铁铝土矿高效清洁综合利用新工艺的提出	287

参考文献	289
14 高铁铝土矿金属化还原 - 高效选分	294
14.1 实验方案	294
14.2 实验原料	294
14.2.1 高铁铝土矿	294
14.2.2 还原用煤	298
14.3 实验设备及步骤	298
14.4 新工艺考核指标	300
14.5 关键工艺参数对还原和选分指标的影响	300
14.5.1 磁场强度	300
14.5.2 还原温度	301
14.5.3 还原时间	304
14.5.4 配碳比	306
14.5.5 高铁铝土矿粒度	309
14.6 还原产物元素分布规律研究	311
14.7 选分产品后续研究方案	312
14.7.1 选分产物	312
14.7.2 选分尾矿	313
14.8 小结	314
参考文献	315
15 高铁铝土矿热压块 - 还原选分	316
15.1 高铁铝土矿热压块	316
15.1.1 实验方案	316
15.1.2 实验原料	316
15.1.3 热压实验	317
15.1.4 关键工艺参数对热压块抗压强度的影响	319
15.2 高铁铝土矿热压块还原选分	323
15.2.1 实验方案及设备	323
15.2.2 关键工艺参数对还原和选分指标的影响	324
15.2.3 还原温度为 1350℃ 时还原时间对还原选分效果的影响	340
15.2.4 选分产物和选分尾矿的特性	345
15.3 小结	347
参考文献	347
16 高铁三水铝土矿碳热还原相变历程及热力学分析	348
16.1 研究方法	348
16.2 相变历程实验研究	349

16.2.1 相变历程实验	349
16.2.2 相变历程分析	350
16.3 固体碳还原铁氧化物热力学	351
16.4 $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 体系还原热力学	353
16.4.1 固相反应热力学	353
16.4.2 固相反应产物的还原热力学	354
16.5 小结	356

第 1 篇



非焦炼铁技术及 特色冶金资源综合利用概述

1 非焦炼铁技术及特色冶金资源综合利用概述

1.1 现代炼铁工艺

炼铁是将铁从自然形态的含铁矿石中还原出来的过程。现代炼铁方法包括高炉炼铁和非高炉炼铁。

高炉炼铁工艺，即以焦炭为基础能源的传统炼铁法，与转炉炼钢相配合，是现阶段钢铁生产的主要流程（BF-BOF）。高炉在生铁生产中处于统治性地位，全世界95%左右的铁水由高炉生产。随着科学技术的发展，传统钢铁生产已经达到了一个较完善的阶段，实现了大型化和高效化。然而对于传统钢铁生产流程，高炉炼铁必须依赖强度高、质量合格的焦炭和经过整粒的烧结矿或球团矿作为原料。目前，焦煤资源世界性短缺，焦炭供应紧张。改善钢铁工业能源结构，摆脱焦煤资源短缺对钢铁工业发展的羁绊，是当前钢铁产业发展的重要课题和方向。更为突出的是，BF-BOF流程环境负荷高，是最重要的污染源之一。随着环保要求的日益提高，钢铁工业面临的环境压力越来越大，减少CO₂及其他气相污染物排放已成为钢铁工业发展的迫切任务。

世界主要产钢国经过长期研究和实践，逐步形成多种不同形式的非高炉炼铁新工艺。非高炉炼铁工艺泛指有别于基于焦炭的传统高炉炼铁方法，而以煤、燃油、天然气和电能为基础能源的其他一切炼铁方法，故又称非焦炼铁。按工艺特征、产品类型以及产品用途，可将其划分为直接还原法和熔融还原法两大类。发展非焦炼铁新技术的主要原因是：

- (1) 钢铁工业发展摆脱焦煤资源羁绊的需要；
- (2) 环境保护的需要；
- (3) 降低钢铁生产总能耗的需要；
- (4) 提高钢铁产品质量和改善产品结构的需要；
- (5) 解决废钢资源短缺及其质量不断劣化的需要；
- (6) 冶金资源综合利用的需要。

非焦炼铁的发展有利于简化传统钢铁生产流程、节能降耗、实现无焦或少焦钢铁生产、降低环境负荷，是现代钢铁生产的重要前沿技术和发展方向。特别是在我国，现有钢铁生产流程的资源、能源消耗大，生产效率偏低；钢铁产业集中度低，自主创新能力不强；新工艺开发滞后；焦煤资源非理性过度使用等，这些问题制约着我国钢铁工业的可持续发展。为此，根据国家钢铁工业大力发展循环经济、降低钢铁能耗和物耗、提高资源和能源综合利用水平的产业政策，着力开发以资源与能源高效利用为前提、具有自主知识产权和辐射作用的新一代非焦炼铁技术，不仅可使我国引领国际钢铁生产技术潮流，占领未来技术制高点，而且也是解决钢铁工业可持续发展问题的重要途径之一。

1.2 直接还原炼铁

直接还原炼铁是在软化温度以下、铁矿石或含铁团块仍呈固态的条件下,进行还原而获得金属铁的方法。由于还原温度低,产品呈多孔低密度海绵状结构,含碳低,未排除脉石杂质,故称之为直接还原铁(DRI)或海绵铁。当以氧化球团为原料生产时,产品仍呈球团状,但主要成分是金属铁,为了便于区分将之称为“金属化球团”。为了提高产品的抗氧化能力和便于运输,在生产过程中将直接还原铁在热态下进行挤压成型的产品称为热压块铁(HBI)。直接还原铁的用途包括:

(1) 作为废钢替代品,用作电炉炼钢的优质原料;

(2) 用作转炉炼钢的冷却剂;

(3) 质地纯净的直接还原铁用于铸铁和铸钢;

(4) 品质稍差的直接还原铁用作高炉炼铁原料,改善高炉技术经济指标。

直接还原的发展已有近百年历史,所涉及的工艺和方法达数百种,其中已实现工业化生产的也有数十种。直接还原炼铁工艺的分类概况示于图1-1。按使用还原剂类型,其可分为固体还原剂法(简称煤基法)、气体还原剂法(简称气基法)和电热法(以电为热源、以煤为还原剂的方法);而按反应器类型,可分为竖炉法、流化床法、回转窑法、转底炉法以及罐式法等。

一般说来,煤基直接还原工艺主要有回转窑法(典型的有SL-RN)、隧道窑法(Hoganas)以及转底炉法(Fastmet);气基直接还原工艺可进一步细分为使用球团矿或者块矿的工艺、使用铁矿粉的工艺,前者主要有竖炉法(MIDREX、HYL-III、Arex)和罐式法(HYL-I),而后者一般都采用流化床法(Finmet)^[1]。

1.2.1 典型直接还原炼铁工艺

1.2.1.1 隧道窑煤基直接还原

隧道窑法生产直接还原铁是最古老的炼铁方法之一,它是将精矿粉、煤粉、石灰石粉按照一定比例和装料方法分别装入还原罐中,然后把罐放在窑车上推入条形隧道窑中,或把罐直接放到环形轮窑中,料罐经预热、加热焙烧和冷却之后使精矿粉还原,得到直接还原铁的方法。隧道窑窑车的结构示意图见图1-2。

隧道窑工艺投资少、操作简单、技术含量低,可以大量吸收劳动力。因此,我国隧道窑的建设热潮有增无减。据调查,我国已建成或正在建设的隧道窑有100多座,设计年产能超过400万吨,约70多个单位规划建设产能5万~30万吨/年的隧道窑直接还原铁厂。近年来,隧道窑工艺已有较大的改进,经改进后采用燃气加热,使用碳化硅/耐热钢反应

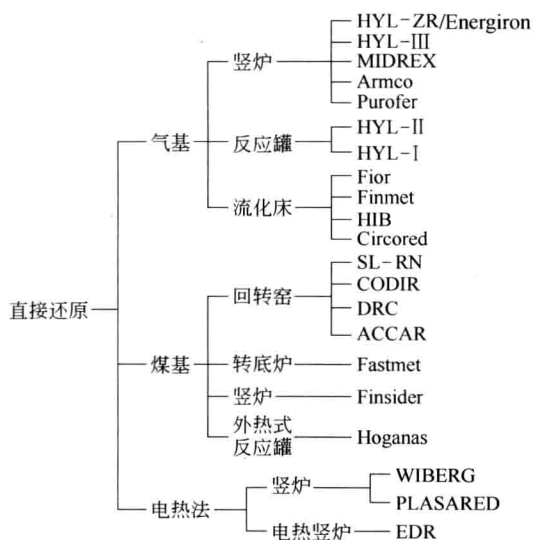


图 1-1 直接还原炼铁工艺的分类