

直接还原与熔融还原

ZHIJIE HUANYUAN YU
RONGRONG HUANYUAN
YEJIN JISHU

冶金技术

杨双平 王苗 折媛 编著
张从容 董洁 李继



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

013034134

TF111
11

直接还原与熔融还原冶金技术

杨双平 王 苗 折 媛 编著
张从容 董 洁 李 继



北京
冶金工业出版社
2013

TF111



北航 C1641449

13130310

内 容 提 要

直接还原与熔融还原技术作为新兴的、开拓性的前沿技术而受到人们的广泛关注,对改善钢铁冶金生产的能源结构具有重要意义。

本书共分11章,第1章对高炉、直接还原与熔融还原三种工艺进行了对比;第2~8章为直接还原篇,探讨了发展直接还原技术的意义及前景,重点介绍了直接还原技术的概念、分类、原料、热力学及各种直接还原法的特点与比较;第9~11章为熔融还原篇,详细阐述了熔融还原技术的原理、现状、分类及特点,列举了主要的熔融还原工艺,并对熔融还原技术的发展进行了展望。

本书可作为研究直接还原和熔融还原技术的入门读物,也可作为冶金、能源等专业研究生和本科生教学与参考用书,也可供冶金专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

直接还原与熔融还原冶金技术/杨双平等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2013. 4

ISBN 978-7-5024-6147-8

I. ①直… II. ①杨… III. ①直接还原 ②熔融还原
IV. ①TF111. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 065204 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 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 曾 媛 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6147-8

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

2013 年 4 月第 1 版, 2013 年 4 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 13 印张; 313 千字; 198 页

39.00 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

当前世界各国正在争相发展高科技及其产业。一些发达国家（如美国、俄罗斯、日本、西欧等）都把高科技的发展及其产业化纳入 21 世纪的国家发展战略。因为当今世界经济正在从劳动密集型向智力密集型的方向发展，高科技已经成为影响一个国家发展和社会进步的关键因素。

在钢铁工业领域中，由于世界能源形势日益严峻，废钢短缺问题日益突出，新的钢铁生产工艺——直接还原法与熔融还原法作为新兴的、开拓性的前沿技术，越来越受到人们的关注。各发达国家已把熔融还原技术作为钢铁工业的一次技术革命，放到较高的战略位置去考虑，集中资金进行研究探索。据介绍，在俄罗斯的高等理工科教育中，钢铁冶金专业的专业课总学时为 510 学时，而且在炼铁学内容不减的情况下，又增加了 108 学时的直接还原课，足见其重视的程度。

我国钢产量虽然已经领先于世界先进国家，但科技水平仍相对落后，除了要消化好引进的技术并要进行提高外，更为重要的是要有自己的新技术，才能使我国钢铁工业摆脱落后停滞的局面。因而在新技术开发上，也要进行带有改革性质的超前性研究。而未来钢铁工业的出路，就在于改变现行的冶金工艺，采用直接还原与熔融还原等新技术。

近年来，直接还原与熔融还原技术取得了很大进展，并受到钢铁冶金、能源开发和化工等行业的普遍关注，如宝钢 C3000 熔融还原工程建成投产，标志着我国直接还原与熔融还原技术正式进入工业化生产时代。本书结合作者近年来从事本科、研究生教学和科研的体会，介绍了直接还原与熔融还原的技术经济特点、基本原理和典型工艺。由于直接还原与熔融还原的理论和实践在中国尚在发展之中，故本书较多地介绍了工艺流程；典型流程则只侧重介绍已经进行工业试验的较为成熟的流程。

本书共分 11 章，由西安建筑科技大学杨双平教授担任主编，并负责全书的

统稿和整体修改工作。各章的具体编写分工为：第1~3章由王苗编写；第4~5章由张从容编写；第6章由董洁编写；第7~9章、第11章由杨双平、张从容编写；第10章由折媛、周军编写；附录由杨双平、李继编写。本书得到了冶金物理化学陕西省重点学科支持，编写过程中，还得到了西安建筑科技大学冶金工程学院、冶金工程研究所等领导同事的鼎力支持，对本书所参考的有关文献资料的作者和单位以及冶金同行的科研成果，在此一并表示诚挚的谢意。研究生汪剑、刘杰、杜新、梁洁旗和蔡文森参加了资料收集工作，也在此表示诚挚的谢意。

借本书出版之机，作者又对2005年8月编写的讲义进行了部分的修正和补充，力求本书内容能跟上时代，反映当前世界最新研究及生产成果。

由于水平有限，经验不足，书中存在的缺点和错误，希望读者批评指正。

编著者

2012年12月

目 录

1 绪论	1
1.1 炼铁工艺的技术特点	1
1.1.1 高炉	1
1.1.2 直接还原	1
1.1.3 熔融还原	2
1.2 炼铁工艺的比较	2
1.2.1 直接还原与高炉流程的比较	2
1.2.2 熔融还原与高炉流程的比较	3
1.3 我国发展炼铁技术的策略	4
1.3.1 继续完善和改进高炉炼铁工艺	5
1.3.2 适度发展直接还原技术	6
1.3.3 积极研究和发展熔融还原技术	6
1.4 不同钢铁生产流程的技术经济分析	7
1.4.1 BF—BOF 流程	7
1.4.2 废钢为主炉料的电炉炼钢流程	7
1.4.3 使用煤的直接还原和电炉炼钢流程	7
1.4.4 直接还原的竞争力	8
1.4.5 熔融还原的潜力	10
参考文献	11

直接还原篇

2 直接还原的发展及前景	12
2.1 国外直接还原的发展及前景	12
2.2 我国应当发展直接还原工艺	12
参考文献	14
3 直接还原及其分类与标准	15
3.1 直接还原的概念	15
3.2 直接还原的分类	15
3.3 直接还原的生产指标	16
3.3.1 单位容积利用系数	16
3.3.2 设备作业强度	16

3.3.3	能量消耗指标	17
3.3.4	煤气利用率	17
3.3.5	产品的质量指标	17
	参考文献	18
4	原料、燃料和还原剂	19
4.1	含铁原料	19
4.1.1	含铁原料的化学成分	21
4.1.2	含铁原料的物理性质	22
4.1.3	含铁原料的冶金性能	23
4.2	直接还原与熔融还原的燃料与还原剂	24
4.2.1	固体燃料	24
4.2.2	固体还原剂	24
4.2.3	气体还原剂	26
4.3	直接还原与熔融还原典型工艺的燃料与还原剂	36
4.3.1	回转窑直接还原工艺的原燃料	36
4.3.2	COREX 熔融还原工艺的原燃料	39
	参考文献	41
5	直接还原法的热力学	42
5.1	还原温度的选择	42
5.2	直接还原的热力学	42
5.2.1	用 CO 还原	42
5.2.2	用 H ₂ 还原	44
5.2.3	用 CO + H ₂ 混合气体还原	45
5.2.4	用固体碳还原	46
5.3	还原铁渗碳的热力学	48
5.4	还原过程中硫的控制	48
	参考文献	49
6	主要的直接还原法	50
6.1	以 MIDREX 法为主的竖炉法	50
6.1.1	竖炉生产海绵铁的工艺原理	50
6.1.2	竖炉法的应用和发展	52
6.1.3	MIDREX 法工艺流程	53
6.2	WIBERG-SODERFORS 法	57
6.3	以希尔法(HYL 法)为代表的反应罐法	58
6.3.1	希尔法(HYL 法)	58
6.3.2	HYL-III 法	60

6.3.3 PUROFER 法	62
6.3.4 PLASMARED 法	64
6.4 流态化法	67
6.4.1 FIOR 法	67
6.4.2 HIB 法	68
6.5 以 SL/RN 为代表的回转窑法	68
6.5.1 回转窑炼铁的工艺原理	68
6.5.2 回转窑生产海绵铁	70
6.5.3 回转窑直接还原法	71
6.6 等离子直接还原法	99
6.6.1 等离子体	99
6.6.2 等离子直接还原法流程	100
6.6.3 等离子法与回转窑法比较	100
6.7 竖炉直接还原法	101
6.7.1 竖炉法的发展	101
6.7.2 竖炉法的工作原理	101
参考文献	113
7 各种直接还原法的比较与选择	114
7.1 直接还原方法的比较	114
7.2 直接还原方法的选择	116
参考文献	118
8 海绵铁的应用	119
8.1 海绵铁的主要用途	119
8.1.1 用于电炉	119
8.1.2 用于高炉	119
8.1.3 用于转炉	119
8.1.4 其他用途	119
8.2 直接还原铁的储存、运输和应用	119
8.2.1 直接还原铁的储存和运输	119
8.2.2 直接还原铁的应用	123
参考文献	134
熔 融 还 原 篇	
9 熔融还原的兴起与现状	135
9.1 直接还原的局限性	135
9.2 熔融还原的优点	139

9.3 熔融还原法分类及特点	140
9.3.1 按工艺阶段划分	140
9.3.2 按使用能源划分	141
9.3.3 按反应器类型划分	141
9.3.4 按工艺模式划分	142
9.4 熔融还原法的原理	142
9.4.1 铁氧化物熔融还原反应	142
9.4.2 熔融还原能耗评价	143
9.5 熔融还原的现状	146
参考文献	147
10 熔融还原法主要工艺	148
10.1 等离子体熔融还原法	148
10.1.1 等离子体加热原理	148
10.1.2 冶炼特点	148
10.1.3 冶炼工艺	149
10.2 COREX 法	150
10.2.1 工艺流程	152
10.2.2 原料	154
10.2.3 主要设备	156
10.2.4 工艺特点	162
10.3 FINEX 法	164
10.3.1 综合分析评价	164
10.3.2 技术特点	166
10.3.3 原料	167
10.4 HISMELT 工艺	167
10.4.1 工艺介绍	167
10.4.2 工艺综述	168
10.4.3 工艺特点	171
10.4.4 存在的问题	172
10.4.5 HISMELT 工艺与高炉工艺比较	173
10.4.6 工艺意义	175
10.5 PLASMAMELT 法	176
10.6 ELRED 法	177
10.7 INRED 法	179
参考文献	180
11 熔融还原技术展望	181
11.1 非焦炼铁势在必行	181

11.2 熔融还原与短流程	183
11.3 熔融还原的发展	184
11.3.1 发展熔融还原的初衷	184
11.3.2 熔融还原技术变革	185
11.3.3 广义的熔融还原	185
参考文献	188
附录 精铁矿粉采用直接还原工艺研究报告	189

1 绪 论

近代高炉已有数百年历史，其工艺已达到相当完善的地步。它与氧气转炉结合在一起形成了效率很高、规模巨大的钢铁生产流程，成为世界上钢铁生产的主力。但是在它日益完善化和大型化的同时，也带来了流程长、投资大以及污染环境等问题。随着世界上废钢铁积累减少，电炉流程迅速发展，20世纪60年代兴起了直接还原工艺，生产出的海绵铁供电炉炼钢，其产量正逐年增加。此外，由于炼焦煤资源日渐短缺、焦炉逐渐老化以及人们对焦炉污染的日益关注，80年代以来，各发达国家纷纷谋求开发另外的无焦炼铁工艺——熔融还原，其中 COREX 流程已实现工业化生产。与此同时，高炉迅速发展了喷煤技术，焦比大幅度降低。综合来看，当前炼铁工艺正朝着少焦或无焦炼铁方向发展，并已形成高炉、直接还原和熔融还原三种炼铁工艺并存、互相渗透的局面。

1.1 炼铁工艺的技术特点

1.1.1 高炉

1995 年全世界铁产量 5.164 亿吨，99% 以上是高炉生产的，其中绝大部分以铁水形态供炼钢。高炉炼铁的基本流程是：将炼焦煤装入焦炉炼成焦炭，将粉状铁矿先制成烧结矿或球团矿，然后将焦炭和烧结矿、球团矿、块矿中的一种、两种或三种以及熔剂按一定配比装入高炉，从高炉下部鼓入热风将炉内焦炭燃烧，产生热量和还原性气体，进而把铁矿石中的氧化铁还原、熔化而生产出铁水。高炉流程的特点是技术完善而且成熟，效率高，能耗低，产品质量好，设备大型化、长寿化。单座高炉年产量可达 350 万吨铁，一代炉役产铁量可达 4000 ~ 5000 万吨。它对原料的适应性较强，既可用块铁，也可用粉矿（经过烧结或球团造块）；它的脱硫能力很强，焦炉、烧结和高炉都有很高的脱硫效率，可以生产出低硫铁。高炉流程的缺点是必须用焦炭，而炼焦过程对环境污染严重，全世界炼焦煤资源也有限。因此，高炉流程的改进方向是：发展高炉喷煤，以煤代焦。通过喷煤可减少焦炭用量 40% ~ 50%；加强焦炉污染的治理，并开发新的无污染或少污染并能多有弱黏结煤的炼焦工艺。

1.1.2 直接还原

直接还原工艺的产品是固态海绵铁，主要供电炉炼钢用。从能源角度可分为气基直接还原和煤基直接还原两大类。气基直接还原是用天然气经裂化产出的 H_2 和 CO 作为还原剂在竖炉或罐式炉内将铁矿中的氧化铁在固态温度下还原成海绵铁。目前主要方法有 MIDREX 法和 HYL 法两种。煤基直接还原是用煤作还原剂，在回转窑、转底炉或循环流化床内将铁矿石中的氧化铁在固态温度下还原成海绵铁，其中回转窑是已经成熟的方法，转底炉和循环流化床尚在试验中。2010 年全世界生产直接还原铁 7500 万吨，其中

MIDREX 法和 HYL 法占 93%，煤基直接还原占 9%。气基直接还原效率高、产量大，单体设备能力可达 50~100 万吨/年，在直接还原中占主导地位；煤基直接还原中的主体工艺——回转窑效率很低，目前单体设备最大年产量不超过 20 万吨。直接还原的优点是流程短，没有焦炉，污染较少，缺点是对原料要求严，矿石必须品位高，脉石少 ($(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{TFe} < 5\% \sim 9\%$) 熔点高，有害元素低，高温下不会爆裂，还原性好，不易粉化。气基直接还原必须要有天然气；煤基回转窑所用的煤灰熔点要高，反应性要好。对矿石和煤的粒度也有严格要求，可用富块矿或球团矿作原料。直接用粉矿作原料的流化床工艺，有的尚未工业化，已工业化的效率也不高。

碳化铁是直接还原的一个新方法，尚在工业试验阶段。其基本过程是将 H_2 、 CH_4 （天然气改质后）气体通入铁矿粉中与氧化铁反应生成 Fe_3C 和 H_2O 。反应在流化床内 550~600℃ 低温条件下进行，所用矿粉和还原气都需经过预热，对矿粉粒度有严格要求。和其他直接还原工艺比较，其优点是反应温度低，不易黏结；产品不易氧化；可以直接用矿粉。其缺点是生产条件较苛刻，预计难以大规模生产。

1.1.3 熔融还原

熔融还原是一种发展中的新炼铁技术，其目的是以煤代焦和直接用粉矿炼铁，因而既无炼焦又无烧结或球团矿，使炼铁流程简化，受到许多国家的重视。开发过程中提出过许多种方案，当今引起人们注意、已工业化生产的有奥钢联的 COREX 工艺，已经或正在进行工业试验的有日本的 DIOS 法，澳大利亚的 HISMELT 法，欧洲的 C. C. F 法和俄罗斯的 PJV 法等。熔融还原的目的是取代高炉。目前的熔融还原流程多已采用两步法，即先在竖炉（块矿）或流化床（粉矿）内将矿石进行预还原，然后再进入终还原炉。向终还原炉内加入煤和氧气，煤燃烧产生热和 H_2 、 CO 等还原性气体，和高炉流程比，熔融还原的第一个特点是用煤不用焦，因而可以不建焦炉；可以用和高炉一样的块状含铁原料（COREX）或直接用粉矿作原料（用流化床进行预还原工艺的 DIOS、HISMELT 等）。第二个特点是多数用氧而不用风。目前已工业化生产的熔融还原工艺是 COREX 流程，包括南非 ISCOR 的一套年产能力 30 万吨，韩国的一套年产能力 60~70 万吨，中国宝钢两套年产能力 30 万吨。其产出的铁水成分和温度都与高炉基本相同。COREX 工艺的优点是用煤，没有焦炉污染，煤源广泛。不足之处是：第一，不能直接用粉矿；第二，消耗高，全用天然块矿吨铁耗氧达 640m^3 ，耗煤 1180kg，但它同时能产出大量热值的煤气（每吨铁产煤气 1650m^3 ，其热值达 $7000\text{kJ}/\text{m}^3$ ）。其改进的方向是降低煤耗和氧耗，并经济地利用其输出的煤气。已经提出的方案是将此煤气用于直接还原生产海绵铁，但需先脱除 CO_2 ，进行温度调控并防止可能产生的碳素沉积。

1.2 炼铁工艺的比较

1.2.1 直接还原与高炉流程的比较

直接还原与高炉流程的对比情况见表 1-1。从表 1-1 可知，直接还原工艺与高炉流程相比，主要区别有以下几点：

(1) 产品。直接还原铁碳含量低，渣含量大，产品为固态，而高炉铁碳含量高，无

渣，产品为液态铁水或固态生铁。

(2) 原料。直接还原需要高品位矿作为原料，高炉对原料的适应能力较强。

(3) 能源。气基直接还原需要天然气，煤基直接还原的煤源相对比较广泛，但也有一定要求，例如回转窑要求煤的灰分熔点高，反应性好，而高炉则要求有炼焦煤。

(4) 能耗。气基直接还原与高炉流程能耗相近，煤基直接还原比高炉流程能耗高，高炉可供液态铁水，而直接还原只能供固态海绵铁，因此若将直接还原铁熔化耗热量计算在内，则所有直接还原工艺的能耗都比高炉高。

(5) 基建投资。气基直接还原与高炉流程基建投资相近，煤基直接还原比高炉流程明显较高。

(6) 生产能力。高炉单炉最大生产能力远比直接还原大，特别是回转窑直接还原很难适应大规模生产。

表 1-1 直接还原与高炉的比较

炼铁流程	产品形态	产品质量特点	对原料要求	主要能源	能耗	投资	单炉最大能力
高炉	铁水或铁块	碳高(4%)，无渣	对原料适应性强	焦炭煤粉	12~14.5GJ/t (含高炉、焦炉全部能耗)	236 美元/(吨·年) (含高炉焦炉)	350 万吨/年
MIDREX	固态	碳低，含渣	要求矿石含铁高，脉石少，硫低	天然气	天然气:13GJ/t 电:120kW·h/t	250 美元/(吨·年)	100 万吨/年
HYL	固态	碳低，含渣	要求矿石含铁高，脉石少，硫低	天然气	天然气:11GJ/t	电:85kW·h/t	250 万吨/年 100 万吨/年
SL/RN (煤基回转窑)	固态	碳低，含渣	要求矿石含铁高，脉石少，硫低	煤	煤:19.4~19.9GJ/t 电:110kW·h/t	260~320 美元/(吨·年)	20 万吨/年

应该说明，上述比较中高炉流程只是把高炉和焦炉计算在内，而未把烧结或球团算入，因为竖炉和回转窑直接还原也需要用到块矿和球团，和高炉用料基本一样，故未参与比较。

表 1-1 中的投资和能耗引用的是国外数据。根据我国最近几年建成投产的和在建的回转窑直接还原设备，如果全部用国产设备，年产海绵铁投资约 2000 元/(吨·年) (含粉矿造球)；如用进口技术和设备，则投资约为 3000 元/(吨·年) (用块矿或外购球团)。而近几年我国新建高炉 (含所需焦炭、烧结) 的投资约为 1400 元/(吨·年)，相比之下回转窑投资比高炉流程高 50% 到一倍。

1.2.2 熔融还原与高炉流程的比较

在各种熔融还原工艺中，目前只有 COREX 真正实现了工业化生产。因此本节重点比较 COREX 与高炉流程。

1.2.2.1 基建投资比较

美国钢铁公司 Oshnock T W 等人对 COREX 和高炉的投资进行了比较，见表 1-2。可以看出，COREX 吨铁投资如果不算电站和制氧站的话，则与高炉 (含焦炉) 相近，若计入制氧站和电站，则比高炉 (含焦炉) 高得多。

表 1-2 国外 COREX 与高炉投资比较

比较项目	高炉流程		无焦炼铁 (COREX) 流程	
	高炉	焦炉	还原熔炼设备	制 O ₂ 和电站
费用/亿美元	4.00	2.5	2.5~3.0	5.25
年生产能力/万吨	270	8.5	110	
年吨铁投资/美元	148	294 (吨焦)	227~273	477
(不喷煤) 焦比 500kg/美元	148 + 294/2 = 295			
(喷煤) 焦比 300kg/美元	148 + 294 × 0.3 + 10 ^① = 246			
(喷煤) 焦比 200kg/美元	148 + 294 × 0.2 + 15 ^② = 222			
COREX (含制氧、电站) 吨铁投资/美元			704~750	

① 该项为喷煤投资, 焦比 300kg 时需喷煤 200kg, 估算投资约 10 美元;

② 该项为喷煤投资, 焦比 200kg 时需喷煤 300kg, 估算投资 15 美元。

表 1-3 是国内 COREX 与高炉的比较, COREX 的吨铁投资约比高炉高 67%。

表 1-3 国内 COREX 与高炉投资比较

比较项目	COREX 流程		高炉流程		
	COREX 炉	制氧站	高炉	焦炉	煤粉
年生产能力/万吨	160		224	112	22.4
投资/亿元	18	10.96	19.2	7.392	0.672
吨铁投资/元	1810		1217		

注: 表中数据取自 (1) 重庆钢铁设计院, 宁波钢厂预可行性研究; (2) 武钢 5 号高炉投资 (换算成 1993 年价格); (3) 首钢新 1 号焦炉投资。

1.2.2.2 主要消耗指标比较

COREX 和高炉的产品都是铁水, 温度和成分基本相同。两者用的铁矿石基本相同, 都可以用块矿或球团和烧结矿。不同的是 COREX 全用煤, 高炉用焦炭和煤粉; COREX 用氧气, 高炉则用高温鼓风 (加少量 O₂)。两者主要消耗指标对比见表 1-4。从表中可见, COREX 的主要能耗比高炉高。但高炉必须用焦煤, 而 COREX 用的是非焦煤, 两种煤的价格是不同的。

表 1-4 COREX 与高炉流程主要消耗指标对比

比较项目	综合煤耗 /kg · tFe ⁻¹	其中焦耗 /kg · tFe ⁻¹	其中喷煤 /kg · tFe ⁻¹	氧耗 /m ³ · tFe ⁻¹	鼓风 /m ³ · tFe ⁻¹	O ₂ 或鼓风耗电 /kW · h · tFe ⁻¹	炼焦用电 /kW · h · tFe ⁻¹	输出煤气合标煤 /kg · tFe ⁻¹
高炉	912	560	100		1800	163.8	11.2	276.3 (其中焦气 79.5)
COREX	1180			640		384		394.17
差值	268					209		117.87

注: COREX 的耗氧量与耗煤量来自 1993 年南非考察报告, 高炉指标是根据南非生产条件 (100% 块矿) 估算的。

1.3 我国发展炼铁技术的策略

目前全世界高炉产铁能力有 5 亿多吨, 直接还原产铁能力约 4300 万吨, 熔融还原生

产能力约 100 万吨。三者能力相差如此悬殊，可见要想用直接还原和熔融还原来取代高炉流程，从建设资金和建设时间上考虑都绝非短时间能做到的。何况直接还原和熔融还原工艺在生产效率、能耗、单体设备能力、炉体寿命和单位投资等各方面与高炉工艺比较还有较大差距。迄今，无论是发展中国家还是发达国家都没有停止新高炉的建设。可以预见，高炉、直接还原和熔融还原三种工艺并存的局面将是长期的。

直接还原和熔融还原是新兴的炼铁技术，它们完全不用焦炭，必将继续受到重视，必然会继续发展和完善。但是高炉也不会停止发展。特别是从降低生铁成本，减少焦炭用量，减少焦炉污染考虑，发展高炉喷煤，最大限度地以煤代焦，乃是见效最快的办法。因为高炉产铁能力大，基数大，所以目前国内外冶金工作者都在大力发展高炉喷煤。随着喷煤量增加，要求焦炭和原料质量进一步提高，鼓风含氧量也要进一步增加，这必然又会促进高炉工艺进一步向前发展。可以预料，高炉生铁在相当长时间内仍将占统治地位。

根据上述情况，我国炼铁技术的发展应采取如下策略。

1.3.1 继续完善和改进高炉炼铁工艺

1.3.1.1 大力发展高炉喷煤

为了降低生铁成本和减少焦炉，日本、韩国和西欧的大部分高炉都已喷煤，过去以天然气为主的美国近几年也纷纷转喷煤粉。喷煤已成为当前世界高炉炼铁技术发展的主流。国外高炉的煤比多在 100kg/tFe 以上，多的达 200kg/tFe（占总燃料比 40% 左右），正向 250kg/tFe 迈进。我国高炉喷煤起步早，但发展慢，现在已落后于国外。我国与国外的差距，一是煤比低，重点企业平均煤比仅 150kg/tFe，地方骨干企业仅 120kg/tFe；二是普及率低，重点企业尚有 10%，地方骨干企业尚有 40% 的高炉没有喷煤，众多的其他小高炉则基本上没有喷煤。可见，我国在煤比和普及率两方面都需要提高。在提高煤比方面，应根据条件分层次制订目标。喷煤除可以少用焦炭，减少焦炉和焦炉的污染外，还可改善炼焦配煤，提高焦炭质量。因此，应大力发展高炉喷煤技术。

随着煤比的提高，风温和鼓风含氧量应相应地提高，原料应进一步改善，高炉寿命也需提高。

1.3.1.2 逐步实现高炉炉容大型化

近二十年来发达国家的高炉有一个显著的变化趋势，高炉座数减少，单炉产量增加，生产效率提高，焦比降低，详见表 1-5、表 1-6、表 1-7。我国生产高炉 1994 年为 576 座（地县以上），平均单炉年产铁 16.74 万吨。其中重点企业高炉 79 座，平均单炉年产铁 66 万吨，和国外比差距很大。我们应该在有条件的企业新建或扩容改造一批现代化大高炉，用逐渐增加大高炉和强制淘汰小高炉的办法来实现我国高炉大型化和现代化。

表 1-5 欧洲高炉委员会 12 成员国高炉变化

年份	生产高炉/座数	生铁产量/万吨	平均单炉年产量/万吨	利用系数/%	焦比/kg·Fe ⁻¹
1987	95	8810	92.7	100	445
1992	72	8860	123	111.6	385

表 1-6 日本高炉变化

年份	生产高炉/座数	生铁产量/万吨	平均单炉年产量/万吨
1973	>60	9000	150
1993	33	7374	223.5

表 1-7 北美(美国和加拿大)高炉变化

年份	生产高炉/座数	生铁产量/万吨	平均单炉年产量/万吨
1973	170	10100	59.4
1993	49	5900	120.4

1.3.1.3 采用新的炼焦工艺,扩大弱黏结煤的使用,减少焦炉污染,提高焦炭质量

首先应推广国内外已成熟的先进技术,如干熄焦、配型煤炼焦、入炉煤水分调控、捣固焦等。采用这些技术可以在保证焦炭质量的同时,扩大弱黏结煤的使用,并节能增产。第二应努力开发新的炼焦工艺,如型焦、直立炉连续炼焦技术等。此外,应采取有效措施取缔土法炼焦生产,同时对各厂焦炭产量加以限制以改善环境。

1.3.2 适度发展直接还原技术

我国电炉钢年产量已超过 2000 万吨,国内废钢已供不应求,优质废钢更为短缺,发展直接还原势在必行。但是我国缺乏富块矿和天然气,而煤资源丰富,发展直接还原只能采用煤基工艺,其原料只能采用氧化球团或进口块矿。这样生产的直接还原铁在投资、能耗和生产成本等方面必然较高。因此,直接还原铁在我国只能作为电炉炼钢的纯净原料在有条件的地方适度发展,而不宜指望它来作为电炉的基本原料。国际钢铁协会的研究也证明了这点,详见表 1-8。

表 1-8 三种炼钢流程能耗比较

流 程	能 耗	
	kJ/吨钢	折合标煤, kg/吨钢
高炉—转炉—连铸—轧钢	20.68×10^6	706
电炉全废钢冶炼—连铸—轧钢	8.375×10^6	285
直接还原—电炉—连铸—轧钢	22.966×10^6	284

1.3.3 积极研究和发发展熔融还原技术

熔融还原是炼铁技术发展的方向。世界上焦煤资源有限,我国焦煤也不足,而且炼焦过程污染严重。我国已是世界钢铁生产大国,生铁产量为世界之首。2012 年 1~10 月全国生铁累计总产量 5.58 亿吨,同比增长 2.94%,焦炭产量 3.32 亿吨,同比增长 3.9%,不仅每年要消耗大量焦煤,而且如此大量的焦炭生产对环境的污染更是不容忽视的。因此,积极发展无焦炼铁技术——熔融还原应是我国的长远之计。

我国对熔融还原的研究已进行过很多工作,有一定的基础。过去进展不快的原因主要

是缺乏资金，其次是缺乏有机的组织。像熔融还原这样难度较大的新开发项目，必须依靠国家投入足够的资金，把各方面的技术力量有机地组织起来，统一方案、统一指挥、协调行动，方能奏效。在技术思路，既要考虑我国铁矿资源的特点（细精矿多），又要借鉴国外不同流程的经验，吸取各家之长，为我所用。目前我国拟采用的“含碳球团—铁浴”流程，预期是有前途的，应早日起步。

1.4 不同钢铁生产流程的技术经济分析

为了确定钢铁冶炼技术将来可能的发展趋势，有必要对三种钢铁生产流程进行经济技术分析，这三个流程是：BF—BOF（传统的高炉—氧气转炉）流程，DR—EAF（直接还原—电炉）流程，SR—BOF（熔融还原—氧气转炉）流程。

1.4.1 BF—BOF 流程

BF—BOF 流程是以下列条件为基础的：要有焦炉设备，要有原料的造球和烧结设备；考虑从焦炉和高炉废气回收余热；转炉钢铁料组成为铁水、废钢。目前，采用 BF—BOF 流程的钢铁联合企业已经有超越只用焦炭作能源的趋势，当考虑回收和再利用过剩能量时，每吨生铁的能耗估计为 14.63GJ。然而考虑到转炉余热回收和向铁水中混入废钢，计算的每吨生铁能耗为 13.79GJ。

1.4.2 废钢为主炉料的电炉炼钢流程

对于这种炼钢流程，采用理论换算，即 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电相当于 3595kJ 的热量，生产每吨钢水所需的能量为 1.8GJ；当根据热效率换算时，即 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电相当于 10241kJ 的热量，每吨钢水的能耗为 5.1GJ，如图 1-1 所示。

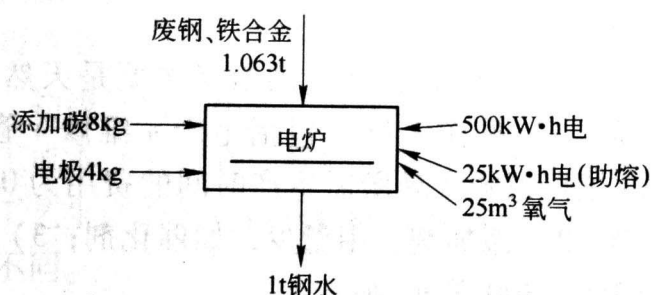


图 1-1 废钢—电炉流程示意图

1.4.3 使用煤的直接还原和电炉炼钢流程

采用回转窑工艺，铁矿石和煤以混合状态在窑内燃烧，与竖炉工艺相比，这种方法的热交换和反应效率较低，每吨直接还原铁的能耗一般为 17.51GJ，如果使用煤的直接还原法与天然气的直接还原法采用同类铁矿石，电炉的炼钢能耗几乎相同。

目前，仅有两种炼钢方法在实际生产中得到了发展，即熔融还原法和熔炼法。熔融还原法第一步是还原、金属熔融及脉石和灰分的熔融分离；第二步是将铁水炼制成钢。熔炼法是将固体金属（废钢、生铁和直接还原铁）炼制成钢，而且目前几乎都是用电炉进行熔炼。但是，大量的研究与开发正逐渐迅速改变这种状况，以下对几个问题进行论述：