

• 高等学校教学用书 •

非高炉炼铁

(直接还原与熔融还原)

GAOJING XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

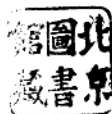
高等学校教学用书

非高炉炼铁

(直接还原与熔融还原)

北京科技大学 秦民生 主编

12.15/10



冶金工业出版社
B 521253

高等学校教学用书

非高炉炼铁

(直接还原与熔融还原)

北京科技大学 秦民生 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街原机械部七所)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 5 7/8 字数 150 千字

1988年11月第一版 1988年11月第一次印刷

印数00,001~1,480册

ISBN 7-5024-0297-7

TF-77 (课) 定价1.45元

前 言

非高炉炼铁技术是近年来发展起来的一项炼铁新技术，国内外发表了很多文献，不少院校已将其内容引入钢铁冶金课程的教学。本书可作为冶金专业本科生选修课的教材，也可作为研究生的教学参考书和研究人员的参考资料。

为了适应教学要求以及非高炉炼铁技术仍在不断发展的特点，本书用较多篇幅介绍了直接还原法和熔融还原法的原理，而对各种各样的工艺方法仅作简略的叙述。

本书是以秦民生编写的非高炉炼铁（直接还原与熔融还原）教材为基础重新编写的，杨乃伏参加了编写。

由于时间和条件所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

一九八七年七月

目 录

第一章 概 论

- 1.1 直接还原与熔融还原的意义..... 1
- 1.2 非高炉炼铁法的发展..... 4
- 1.3 非高炉炼铁法技术经济指标.....10
- 1.4 非高炉炼铁法使用的原料及能源.....12
 - 1.4.1 含铁原料12
 - 1.4.2 燃料和还原剂16
- 1.5 产品性质及应用.....19
 - 1.5.1 非高炉炼铁法产品种类和性质19
 - 1.5.2 直接还原铁的处理及贮运.....22
 - 1.5.3 直接还原铁的使用25
 - 1.5.4 钢铁生产工艺新流程及其评价31

第二章 气体还原的直接还原法

- 2.1 铁氧化物气体还原原理.....40
 - 2.1.1 热力学分析.....40
 - 2.1.2 动力学分析.....45
- 2.2 冶金还原煤气.....48
 - 2.2.1 还原煤气消耗量48
 - 2.2.2 煤气对海绵铁的脱硫及渗碳.....50
 - 2.2.3 冶金还原煤气的制造53
- 2.3 竖炉直接还原过程分析.....60
 - 2.3.1 竖炉中的炉料运动61
 - 2.3.2 竖炉中的传热过程63
 - 2.3.3 竖炉还原过程67
- 2.4 气体竖炉法工艺.....78
 - 2.4.1 Midrex法78

2.4.2 Purofer法	81
2.4.3 HYL III式竖炉	82
2.4.4 Wiberg法和Plasmared竖炉法	83
2.5 其他气体还原法	84
2.5.1 固定床还原法	84
2.5.2 流态化法	89
第三章 固体还原剂直接还原法	
3.1 固体碳还原铁矿石的反应	96
3.1.1 还原热力学分析	96
3.1.2 还原动力学分析	97
3.2 回转窑法工作原理	102
3.2.1 回转窑法炼铁过程	102
3.2.2 回转窑内炉料运动	106
3.2.3 回转窑内的传热过程	108
3.2.4 回转窑还原过程	112
3.2.5 回转窑对硫及有害杂质的去除	117
3.3 回转窑直接还原法工艺	119
3.3.1 SL—RN法	119
3.3.2 Krupp—Codir法	124
3.3.3 回转窑粒铁法 (Krupp—Renn Process)	126
3.4 其他固体还原剂的直接还原法	130
3.4.1 Kinglor—Metor法	130
3.4.2 固体反应罐法(Hoganas Process)	132
3.4.3 川崎Kip法	134
第四章 熔融还原法	
4.1 熔融还原的意义	135
4.2 液态FeO还原反应	136
4.3 一步熔融还原法	141
4.3.1 一步熔融还原法过程分析	141
4.3.2 一步熔融还原法工艺	145

4.4 二步法熔融还原.....	158
4.4.1 二步法原理分析	158
4.4.2 二步熔融还原法过程分析.....	163
参考文献.....	178

第一章 概 论

1.1 直接还原与熔融还原的意义

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，是炼铁冶金技术中的新工艺。

直接还原法是指铁矿石在低于熔化温度之下还原成海绵铁的炼铁生产过程，其产品叫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 ($< 2\%$)，矿石中的脉石成分 (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO 等) 既不能熔化造渣脱除也不能被还原，因而直接还原铁中几乎保留了铁矿石中的全部脉石杂质。

从含碳低这一特点来看，直接还原铁具有钢的性质，而且实际上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。但从钢铁冶炼的最基本原理氧化—还原过程分析，直接还原法具有直接把铁矿石炼成钢的一步法特征，这就是“直接还原”一词的来由。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，传统流程是先把铁矿石过度还原（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中用碳还原氧化铁的直接还原反应是完全不同概念的两个专有术语。

实际生产中直接还原铁仍需要用电炉精炼成钢，但电炉精炼的作用主要是熔化脱除杂质和调整钢的成分，而不是氧化脱碳。由于有直接还原—电炉串联生产钢，就出现了一个新的钢铁冶金生产工艺流程。

熔融还原法是指一切不用高炉冶炼液态生铁的方法，发展熔融还原的目的在于取代目前的高炉炼铁法，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，基本上不改变目前传统钢铁生产的基本原理。

最初开发熔融还原是期望寻求一种理想的炼铁方法，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，并且没有污染的全新炼铁方法。但是实际的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。与直接还原不同之点是熔融还原的发展目标只是代替焦炭高炉炼铁，其产品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。

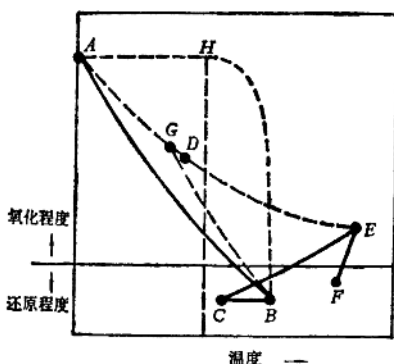


图 1-1 直接还原法与传统钢铁生产方法的氧化—还原过程比较

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

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，即夺取一个氧原子需要能耗值 O/Q 作为纵坐标，由此而得到的Rist线斜率 M 为生产一个原子Fe的热耗，则

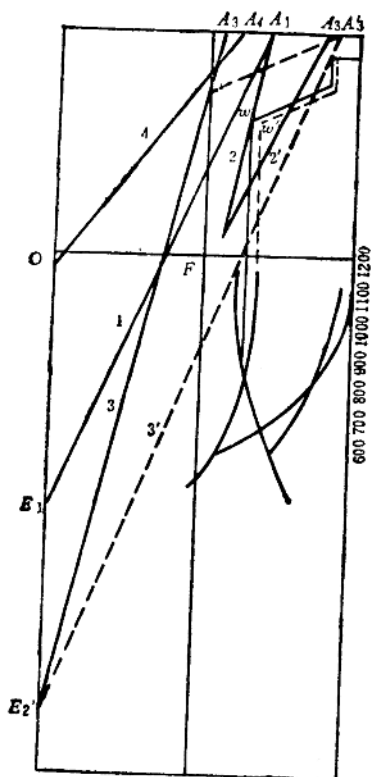


图 1-2 Rist图

每吨铁产品热耗可用下式计算：

$$Q_P = \frac{Fe_p}{56} \cdot M \cdot 1000 \quad (\text{kJ/t})$$

式中 Fe_p ——各种方法产品的含铁量，（%）；

M ——Rist线斜率，（kJ/mol·Fe）。

图1-2示出：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，则出现于第一象限（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'), 一步熔融还原和回转窑法类似, 都有后期燃烧。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 非高炉炼铁法的发展

在炼铁生产的发展过程中, 最早出现的方法是直接还原法。因为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, 这称之为块炼铁, 在我国最早出现于战国时代 (公元前六世纪), 但是铁和杂质相互混合, 得到的海绵铁只能锻打成型。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的问题日益紧张。于是直接还原的工艺又重新提出。1870年英国提出第一个近代直接还原方法 (Chenot法), 至今已有百年的历史。时至今日直接还原方法种类繁多, 仅见于文献的就有400余种, 但其中大多数未经试验就夭折了, 还有不少方法在试验中被淘汰, 直到本世纪60年代直接还原法才发展成为有意义的工业生产方法。

一百多年来直接还原方法的重大突破有:

1873—1920年英国曾建立第一个直接还原冶金生产工厂, 拉开直接还原生产的序幕;

1930年德国提出了回转窑粒铁法 (Krupp-Renn法), 1932年瑞典开始试验Wiberg竖炉法, 这就把“一步”炼海绵铁的直接还原法提高到现代化工业阶段, 实现了直接还原冶金生产的第一

次突破。

60年代以来由于下列几种原因使直接还原得到了发展：

1) 冶金焦价格的提高，石油和天然气大量开发利用，使全世界能源结构发生了重大变化。特别是高效率天然气转化法的采用，提供适用的冶金还原煤气，使直接还原冶金生产有了来源丰富、价格便宜的新能源；

2) 电炉炼钢迅速发展，加上超高功率（UHP）新技术的应用，合格废钢供应不足，价格上升，大大扩展了直接还原铁的需求；

3) 选矿技术提高，可以大量供应高品位铁精矿，矿石中的脉石量可以降低到在还原冶炼中不需要加以脱除的程度，从而简化了直接还原技术。

以上这些因素都推动了直接还原冶金生产的发展，相继在60年代出现了多种有重大意义的直接还原冶金新技术，尤其是以天然气为一次能源的竖炉法（Midrex法为代表）的出现有重大意义，在此基础上70年代初建立了大批直接还原冶金生产的工厂，其中包括百万吨级的工厂，这使非高炉的炼铁生产开始在钢铁工业中占有值得重视的地位，此时出现了海绵铁—电炉生产体系。直接还原冶金生产进入大规模工业化生产阶段，从而实现了直接还原冶金生产的第二次突破。

据统计，在50年代前，全世界直接还原冶金生产的产品不到高炉产量的0.5%，1964年占1%，1967年占1.5%，1970年占2%，达到最高潮，全世界1984年直接还原冶金设备能力已达20000000吨，实际产量只约900万吨，约占钢铁总产量的1.6%。图1-3及表1-1示出直接还原冶金生产的发展及其在钢铁生产中所占地位的变化情况。表1-2示出各国直接还原设备能力及实际产量。

由此可见，直接还原的前途是光明的。然而并未出现原来期望的取代高炉在炼铁生产中占优势的重大转变，这是因为影响和限制直接还原方法大量应用的障碍还很多，主要的限制条件有：

1) 最成熟的直接还原方法，即占总产量90%的竖炉及反应

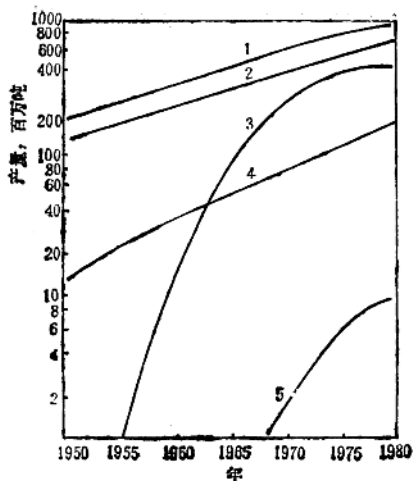


图 1-3 全世界钢铁生产与海绵铁生产发展状况
1—钢产量；2—生铁产量；3—氧气转炉钢产量；4—电炉钢产量；5—直接还原铁产量

罐法都是使用天然气作为一次能源，但天然气供应有限且价格不低。尤其在70年代能源危机以后天然气价格大幅度上涨。应用煤炭为能源的各种方法仍有若干技术有待完善。因此，直接还原方法的能源供应并未完满解决；

2) 采用直接还原—电炉生产流程，每生产一吨成品钢总共需要600—1000kWh的电耗，电能是较贵的能源，并且不是任何地区都能容易提供的；

3) 直接还原方法需要使用高品位的精矿粉，这也是难于普遍获得的。对于某些嵌布细微的难选铁矿石，用直接还原方法也难于处理。

因此，要使直接还原方法更广泛地推广应用，仍需要解决一些技术难题。目前还只能在某些地区作为典型钢铁生产方式的一种补充形式而存在。从目前状态看，直接还原法首要的意义是一种生产取代废钢产品的特殊炼铁法，而不在于是一种能期望取代

表 1-1 全世界直接还原设备分类

(至1985年止)

燃料	原理	方法	能耗		生产能力, 千吨/年	
			热耗, kJ/T	电耗, kWh/T	现有	计划
天然气	固定床	HYL	4.2	6	5527	3150
	竖炉	Midrex	2.7	125	6180	6637
	竖炉	ARMCO	3.2	40	330	/
	竖炉	HYL III	2.5	90	270	3250
	竖炉	Purofer	3.3	100	480	600
	竖炉	NSC	2.8	90	/	/
	流态化	FIOR	4.0	40	750	/
	流态化	HIB	/	/	1000	/
煤	回转窑	SL/RN	3.7	85	3265	920
	回转窑	Codir	3.8	55	150	200
	回转窑	DRC	3.5-3.9	95	60	75
	竖炉	K-M	3.8	80	4	/
煤-煤气	回转窑	ACCAR	/	50	275	1500

高炉的炼铁方法。在考虑是否开发直接还原技术时,首先要考虑是否具备了适合直接还原方法的资源条件,也就是说,有较丰富的天然气和电能,以及高品位的铁矿。其次要考虑产品海绵铁的销路。

由于资本主义国家钢铁生产萎缩,废钢供应过剩,以及天然气涨价,工业发达国家直接还原生产严重不景气,1984年全世界直接还原生产设备虽达2800万吨/年,但开工率不到40%,实际产量仅925万吨/年。只占高炉生产量的1.5%,而且仅在一些油气资源丰富而废钢十分短缺的第三世界国家,如委内瑞拉、墨西哥、沙特阿拉伯及东南亚等国家,直接还原维持较好的生产水平。

在我国,由于缺乏天然气和高品位铁矿,直接还原也难于大规模发展。但由于我国废钢短缺、废钢供应不足的情况尤为突出,因此在一些条件较适宜的地区,有可能得到开发和发展。

直接还原方法的发展在70年代接连二次能源危机以后受到了很大的阻碍。研究和开发不以天然气和石油为能源的熔融还原成

表 1-2 1984年全世界DRI产量

(千吨)

国家或地区	设备能力	实际产量
阿根廷	900	900
委内瑞拉	4500	2490
巴西	320	250
缅甸	40	10
加拿大	1000	500
印度	210	80
伊朗	330	0
伊拉克	400	0
马来西亚	650	40
墨西哥	2020	1470
新西兰	170	170
尼日利亚	1020	170
秘鲁	100	20
卡塔尔	400	500
南非	830	270
沙特阿拉伯	800	730
苏联	420	370
瑞典	70	20
西德	1280	100
特立尼达-多巴哥	800	240
美国	700	120
英国	800	/
总计	20220	9250
开工率		45.7%

为冶金工作者新的非高炉炼铁法课题。熔融还原方法是在高于渣铁熔点下进行的反应，其产品是含碳液态生铁。熔融还原的优点是以煤炭为主要能源，可熔化造渣而能去除矿石中的脉石和杂质，因此对矿石品位要求不象直接还原那样严格，生产出来的液态生铁含有C、Si等氧化放热元素，便于现有典型的氧气转炉炼钢法使用。表1-3列出当前开发的几种熔融还原法。

熔融还原是直接还原法的逻辑发展，其主要的的作用是取代典

表 1-3 正在开发的熔炼还原方法概况

1. 工艺方法	E: red	Inred	Plasmasmelt	COIN	KR	Kawasaki	Sumitomo
2. 工艺特点 两步还原 预还原阶段 最终还原阶段 是否发电	两个反应器的 两步还原 流态化床 直流感弧炉 发电	两个反应器, 二步 还原 上部为闪速熔炼室 下部为交流电炉 发电	两个反应器, 二步 还原 流态化床 竖炉	竖炉 底吹氧气转炉	竖炉 流态化熔喷气化炉 不发电	流态化 竖炉 不发电	竖炉 熔喷气化炉 不发电
3. 目前发展阶段	半工业性设备 (1976年) 预还原阶段 0.45t/hr 最终还原阶段 25t/charge	半工业性设备 5t/hr(1976年) 3t/hr(1982年2月)	半工业性设备 760 kg/hr(1.5MA) 下一阶段 1.5MW 60000t/ yrunit	半工业性设备 3t/charge	半工业性设备 60000t/y(1982年)	半工业性设备 33t/日	半工业性设备 8t/日
4. 每吨铁水的 能耗	煤680kg 4.55Gcal (19.02GJ) (电617kWhr) (氧194Nm ³) (脱硫辅助设备 136kWhr) 发电176kWhr-0.4 Gcal (1.67GJ) 合计4.15Gcal (17.35GJ)	煤600kg 4.02Gcal (16.81GJ) (电370kWhr) (氧206kWhr) (辅助设备105 kWhr) 合计4.02Gcal (16.81GJ)	煤50kg 0.34Gcal (1.42GJ) 电1100kWhr 2.70 Gcal (11.29GJ) 煤200-0kg 1.24-0 Gcal (5.81-0GJ) 油0-140kg 0-1.39 Gcal (0-5.81GJ) 合计4.3-4.4 Gcal (17.98-18.4GJ)	煤490kg 3.28Gcal (13.171GJ) 副产品, 煤气(260- 660Nm ³ -0.13 Gcal (-0.54GJ)) (13.17GJ)	煤1000kg 6.70 Gcal (28.02GJ) 副产品500Nm ³ - 1.43Gcal(5.98GJ) 煤气1500Nm ³ - 2.77Gcal (11.58 GJ)合计3.70Gcal (15.47GJ)	炭粉 氧	煤粉 氧
5. 原料	矿粉	矿粉	矿粉	烧结矿	块矿/球团	矿粉	球团
6. 铁水 C% Si%	3-4 0.05	黄铁矿 磁铁矿 3.9-3.4 2.5- 2.4 1.04-1.35 0.4-0.27	4.0 1.0	1-3 /			
7. 设备能力 建设费用	40000 t/yr 63 MSEK	40000 t/yr 75 Mus\$	250000 t/yr 38 Mus\$				

型的高炉炼铁法以解决焦炭不足的问题。但其发展也有本身的困难，熔融还原法是高温生产，需要大量氧气或电能，能耗较高，技术工艺及设备有待改进完善，除20年代矿热电炉冶炼生铁进入工业生产外，以后发展的一些有别于矿热电炉炼铁的熔融还原法，如Stora法，以及Sturzeberg法等都未取得成功，60年代以后熔融还原的研究又兴起高潮，开发了多种熔融还原的方法。但均处于试验研究阶段。1968年由瑞典冶金学家Eketorp将这类非高炉液铁法定名为熔融还原法 (Smelting Reduction Processes)。

1.3 非高炉炼铁法技术经济指标

直接还原与熔融还原法的种类繁多，需要用一些统一的技术指标来考核和评价它们的生产效果。

生产指标：

1) 利用系数：与高炉有效利用系数定义相同，即每立方米有效反应器容积每24小时的产品质量，按下式计算：

$$\eta_v = \frac{24}{\tau} \cdot \psi \cdot \frac{Fe_b}{Fe_p} \quad (1-1)$$

式中 η_v ——有效容积利用系数， t/m^3d ；
 τ ——炉料在反应器内停留的时间， h ；
 ψ ——炉料填充反应器的体积比，%；
 Fe_b ——单位炉料体积中含铁量， t/m^3 ；
 Fe_p ——产品含铁量，%。

2) 单位容积出铁率：每立方米反应器容积，每24小时产出的产品中金属铁的质量。因为非高炉炼铁法的产品含铁量有很大差别，因此用此指标来补充利用系数，以弥补利用系数不能准确衡量生产效率的不足。

$$\eta_v^* = \eta_v \cdot M$$

式中 η_v^* ——单位容积出铁率， t/m^3d ；
 M ——产品金属化率，%。