

熔融还原与直接还原

方 觉 等著

东北大学出版社

前 言

本书编审人员多年从事非高炉炼铁方面的研究和教学,最长的已有 30 年历史。今天能使研究所得成书,首先应感谢冶金工业部人教司和宝山钢铁(集团)公司的大力支持。特别值得提出的是有关熔融还原的各章节,它的很多内容直接来源于宝钢支持的科研工作成果。我在这里代表全体编审向这两个部门表示衷心的感谢。

熔融还原和直接还原是非高炉炼铁的主体,人们希望能够通过这两项技术最终使钢铁生产彻底摆脱对冶金焦的依赖。熔融还原是冶金学科的前沿课题,在世界范围内已受到广泛的重视。从目前的发展趋势看,该技术在中国的工业应用是指日可待的事情。直接还原的产品“海绵铁”是发展电炉短流程工艺的优质原料。发展海绵铁生产在优化我国钢铁产品结构方面的重要意义已经越来越清楚。能够在我国熔融还原和直接还原的发展中起到一点促进作用是我们编写本书的出发点。

本书以东北大学与宝钢合办的“熔融还原研讨班”教材为基础,经扩展而成。第一章由宝钢沈震世编写。第五章由东北大学方觉和宝钢张瑞祥、陈炳庆、李永全负责编写。其余各章由方觉负责编写。沈震世负责全书的审校。在编写和出版过程中,承蒙宝钢职工大学谭泽培先生、葛昕女士及冶金部东北大学继续教育中心王允旌先生的大力协助,在此一并表示诚挚的谢意。

方 觉

1996 年元月

《熔融还原与直接还原》编委会

主任委员 王万宾
副主任委员 高海航 李行键 沈震世
委员 张瑞祥 方 觉
主 编 方 觉
主 审 沈震世
编写人员 方 觉 沈震世 张瑞祥
陈炳庆 李永全

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 现代化钢铁生产概述	1
1.2 炼铁生产工艺模式	2
1.3 熔融还原和直接还原的分类	5
1.4 直接还原与熔融还原的发展条件	7
1.4.1 资源条件	7
1.4.2 市场条件	7
1.5 直接还原与熔融还原发展简史	9
第二章 理化基础	16
2.1 铁的存在形态.....	16
2.2 重要反应热力学分析.....	20
2.2.1 C-H-O 系热力学.....	20
2.2.2 铁的还原与渗碳	24
2.2.3 非铁元素在还原和熔炼中的行为	30
2.3 动力学基础.....	35
2.3.1 化学反应动力学基本参数	37
2.3.2 传质基本参数	39
2.3.3 铁矿石还原与缩核模型	41
2.3.4 气固催化反应与还原气的制取	45
2.3.5 煤的气化	49
2.4 还原气及其利用率.....	57
2.4.1 还原气的热力学利用率	57
2.4.2 气体综合利用率与关键步骤	58
2.4.3 类 CO 还原气与类氢还原气	60
2.4.4 决定气体利用率的主要因素	62
第三章 重点设备分析	66
3.1 还原竖炉.....	67
3.1.1 温度分布	67
3.1.2 能耗分析	71
3.1.3 压力分布	73
3.2 还原流化床.....	76
3.2.1 流态化现象及流化床类型	76
3.2.2 流化参数	78
3.2.3 粘结失流问题	81

3.2.4	还原速度与气体利用率	86
3.3	熔炼造气煤炭流化床	89
3.3.1	熔炼煤的有效热值	89
3.3.2	熔炼煤耗与产气量	90
3.3.3	与还原单元的配合	92
3.3.4	矿石品位对理论最佳配合参数的影响	93
3.3.5	Q ₀ 的选择与能耗分析	94
3.4	熔炼造气铁浴炉	97
3.4.1	铁浴炉形式	97
3.4.2	影响熔炼煤有效热值的参数	99
3.4.3	二次燃烧率与有效热值	100
3.4.4	煤气改质与余热利用	101
3.4.5	与还原单元的配合	104
3.4.6	能耗分析	106
第四章	直接还原流程	109
4.1	重点流程—MIDREX 法	109
4.1.1	流程概述	109
4.1.2	MIDREX 原料	110
4.1.3	还原竖炉基本结构及运行状况	111
4.1.4	气封系统	112
4.1.5	还原段	113
4.1.6	冷却段	114
4.1.7	MIDREX 装置与能耗	116
4.1.8	MIDREX 重要工艺参数	119
4.1.9	流程分支	121
4.2	其他竖炉流程	122
4.2.1	HYL III 法	122
4.2.2	ARMCO 法	123
4.2.3	PUROFER 法	125
4.2.4	WIBERG—S ÖDERFORS 法	127
4.2.5	PLASMARED 法	128
4.2.6	EDR 法	128
4.2.7	KINGLOR METOR 法	129
4.3	流化床流程	130
4.3.1	FIOR 法	130
4.3.2	H—IRON 法	132
4.3.3	NU—IRON 法和 HIB 法	133
4.3.4	NOVALFER 法	134
4.4	反应罐流程	135

4.4.1	HYL 法	135
4.4.2	H ÖGAN ÄS 法	137
4.5	转体炉流程—INMETCO 法	138
4.6	回转窑流程	139
4.6.1	SL/RN 法	139
4.6.2	CODIR 法	140
4.6.3	ACCAR 法	141
4.6.4	SPM 法	142
第五章	熔融还原流程	144
5.1	重点流程—COREX 法	144
5.1.1	流程概述	144
5.1.2	原料	146
5.1.3	熔炼造气煤	147
5.1.4	铁矿还原	151
5.1.5	熔炼与造气	154
5.1.6	还原与熔炼的配合	160
5.1.7	脱硫与熔剂在竖炉中的分解	164
5.1.8	冷却气的使用及碱金属循环	166
5.1.9	COREX 的能耗	166
5.1.10	COREX 配套设施	168
5.2	其他三段式流程	177
5.2.1	川崎法	177
5.2.2	XR 法	179
5.2.3	SC 法	180
5.3	铁浴一步法流程——俄国一步法	182
5.4	铁浴二步法流程	183
5.4.1	COIN 法	183
5.4.2	HISMELT 法	183
5.4.3	AISI 法	186
5.4.4	DIOS 法	187
5.5	电热法流程	190
5.5.1	ELRED 法	190
5.5.2	INRED 法	192
5.5.3	PLASMAMELT 法	194
5.5.4	COMBISMELT 法	195

第一章 绪 论

1.1 现代化钢铁生产概述

直接还原和熔融还原是非高炉炼铁的两个重要组成部分。它们虽然同属非高炉炼铁,但在钢铁冶金工艺中所处的位置是不同的。

现代化钢铁生产最重要的工艺流程如图 1-1 所示。它的主体由四部分构成:焦炉、造块设备(例如烧结机或带式焙烧机)、高炉和转炉。高炉使用冶金焦作为主体能源,它是由炼焦煤经炼焦生产得到的。高炉必须使用高强度块状铁料,而矿山提供的则大部分是粉状铁矿(铁精矿和富粉矿)。因此,人工造块是现代化高炉炼铁必需的工艺。高炉的产品是液态生铁,它经转炉冶炼成转炉钢。

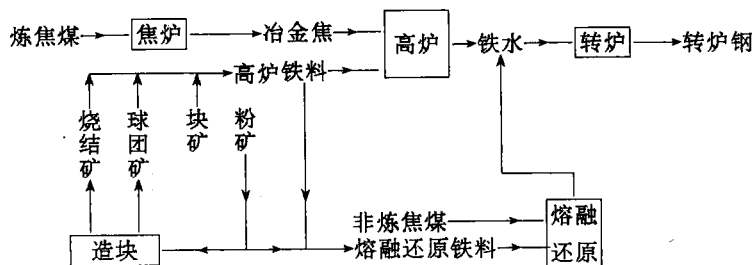


图 1-1 熔融还原与高炉—转炉冶炼流程的关系

熔融还原的产品相当于高炉铁水。因此它在转炉炼钢工艺链中处于相当于高炉的环节。它与高炉的最大区别在于主体燃料。高炉使用冶金焦,熔融还原则使用非炼焦煤。这样就使炼铁摆脱了对炼焦煤的依赖。同时,熔融还原还提供了直接使用粉矿的可能性。粉矿冶炼使炼铁生产进一步摆脱了烧结矿和球团矿生产环节。这些特性使得熔融还原具有在高炉的基础上降低基建投资、能耗和生产成本的能力或潜力。因此,熔融还原是一个有希望取代高炉炼铁的工艺流程。

电炉炼钢是钢铁生产的一个重要分支。1990 年世界电炉钢产量已占总产量的 25% 以上。在产量上它虽然赶不上高炉—转炉流程。但其重要性和比重却越来越大。我国目前的电炉钢在炼钢生产中的比例虽然较低,但已充分注意到发展电炉钢生产在提高钢的品种质量方面的意义。电炉生产在我国必将有一个大的飞跃。

如图 1-2 所示,电炉炼钢的原料是废钢,主要能源是电力,产品是电炉钢。大多数品种的特殊钢都是通过电炉冶炼生产的。

直接还原在传统流程中找不到相应的环节。它的产品是在熔点以下还原得到的固态金属铁,其中夹杂着少量脉石成分,称为直接还原铁(常用其英文缩写 DRI)。由于直接还原铁未经过熔炼,在脱氧过程中形成多微孔的结构,状似海绵,因此又称海绵铁。海绵铁可代替废钢作为电炉原料。它具有一些废钢所缺乏的优点,其中最重要的是有害杂质含量低。因此海绵铁是特钢冶炼的优质原料,很多用废钢不能生产的特种钢都能用海绵铁生产出来。

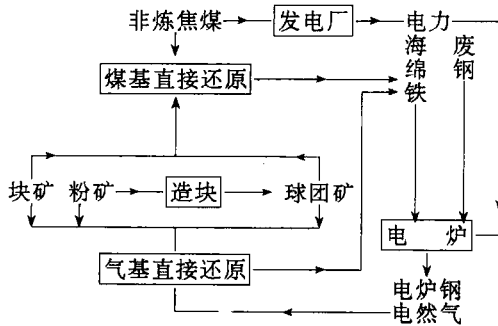


图 1-2 直接还原与电炉炼钢的关系

发展非高炉炼铁的根本动力是摆脱炼铁生产对冶金焦的依赖。炼焦生产的大部分产品都消耗于高炉炼铁。随着焦煤资源的日渐贫乏，冶金焦的价格也越来越高。与此相反，蕴藏丰富的廉价非炼焦煤在炼铁生产中却得不到充分的利用。为了降低生铁成本，数十年来人们一直在不懈地努力寻求降低焦比的途径。例如喷吹煤粉，吹重油和喷吹天然气等措施都是比较有效的方案。但这些措施的效果毕竟是有限的，不能从根本上解决问题。

直接还原首次使炼铁生产彻底摆脱了冶金焦。由于它的流程多种多样，对主体能源的适应性也相当广泛。这一点对于缺乏焦煤资源的国家和地区特别具有吸引力。

但直接还原的产品只能用于电炉冶炼，它不能代替高炉炼铁。自从第一个熔融还原流程在南非实现了工业化后，人们才开始充满希望地谈论推翻高炉的话题。熔融还原目前仍处于开发阶段，在今后的发展中很可能不会固定于一个模式。它到底能不能取代高炉炼铁也还有待于实践的检验。熔融还原的能源也是多样化的。但最具吸引力的还是以非炼焦煤为主要能源的流程。

我国是非焦煤资源非常丰富的国家，有着发展非高炉炼铁的良好条件。虽然非高炉炼铁在我国还没有形成生产能力，但在直接还原和熔融还原两个方面我国都曾进行过大量的研究开发工作。

发展海绵铁生产的要求在我国越来越迫切。从我国的能源条件看，在可预见的将来把大量的天然气用于钢铁冶金还是不可能的。因此今后的工作仍应以发展煤基直接还原为主要目标。煤基直接还原的成熟工艺目前只有回转窑流程。但不应排除煤造气再用于直接还原的流程开发。

我国的钢铁冶金界对熔融还原工艺的开发和技术引进兴趣浓厚。COREX 工艺的引进工作是指日可待的事情。与此同时，我国也在着力于独具特色的熔融还原工艺开发。

1.2 炼铁生产工艺模式

在钢铁生产的发展过程中形成了以高炉流程为主的现代化炼铁工业。虽然新型炼铁法正在飞速发展，但高炉仍然占据着绝大多数的炼铁生产能力。无论是高炉还是非高炉炼铁工艺，其首要任务都是将氧化物中的铁还原成金属铁。

高炉的特点最明显。它是一个竖炉型冶炼设备，使用冶金焦和鼓风，产品是生铁。但现代化的高炉大量采用喷煤和富氧鼓风技术。喷油、喷天然气、喷等离子、喷粉矿和使用预还原矿等技术也屡有使用或正在开发中。这些都使高炉冶炼偏离了其原始的特点。

高炉对冶金焦的强烈依赖性迫使那些缺乏焦煤的国家和地区对立足于本地能源的炼铁技术进行探索和开发。水电资源丰富的地区自然而然地将兴趣转向廉价的电力。电高炉和电矮身竖炉(电弧炉)就是这一趋势的产物。我们将这类产品与生铁类似,主体能源是电力,原料未经预还原处理的流程称为电炼铁流程。这类流程已趋淘汰。

粒铁法是非高炉炼铁的另一个类别。它的主体设备是回转窑,产品是由半熔化状的金属铁形成的粒状物,称为粒铁。

熔融还原至今难下确切定义。按字面意义讲,熔融还原流程应含有相当程度的熔融状态下的还原过程。但这样一来,那些固态还原深度过高的流程,包括目前唯一的工业化熔融还原流程 COREX 都将被拒之门外。这显然是不合理的。根据对现有流程的分析,本书将产品与生铁类似,且起码具有下列特点之一的非高炉炼铁流程定义为熔融还原:

- a. 还原与熔炼共同进行的一步法流程主体能源不应是电力。
- b. 在具有独立的预还原炉和熔炼炉的二步法流程中,还原段不能有独立的产品。
- c. 二步法流程的还原段使用熔炼段煤气作为还原剂。

直接还原的产品是固态海绵铁,这是它最明显的特点。直接还原的模式繁多,设备各异,主体能源也囊括了气、固、液三相。

由于直接还原和熔融还原的兴起,大量的还原装置加入铁矿石还原反应器的行列,使铁元素还原工艺的模式变得非常复杂。其中最具代表性的还原装置是竖炉、反应罐、流化床和回转窑。在反应器分类中,竖炉属于移动床,反应罐属于固定床,回转窑属于变位混合床。移动床、固定床、流化床和变位混合床囊括了铁矿石还原的绝大部分反应器。其他类型的反应器在炼铁工艺中所占比重甚小(例如转体炉)或已被淘汰。

在不同的流程中,铁矿石的还原历程是不一样的。还原过程的一个共同点是铁矿石在固态下都有一定程度的还原。不同工艺的区别主要在以下几个方面:

a. 流程类型

炼铁流程模式描述的第一个层次是类型,即高炉炼铁、电炼铁、粒铁、熔融还原或直接还原。

b. 主体设备

高炉和直接还原的主体设备一般只有一种。多数熔融还原主体设备则有两种,即还原设备和熔炼造气设备。

c. 主体能源

主要有冶金焦、非焦煤、天然气、电力等。例如,高炉主体能源是冶金焦,回转窑是非焦煤,直接还原竖炉和流化床是天然气,电炉熔融还原是电力等。

d. 还原剂种类

还原剂种类是指送入还原炉时的还原剂状态。炼铁主要使用固态和气态两种还原剂。例如,高炉使用焦炭,回转窑使用非焦煤,是固态还原剂。竖炉和流化床一般使用液化天然气,是气态还原剂。

e. 高温熔炼过程

高温熔炼过程是指矿石在熔点以上,即液态下的进一步还原和熔炼。直接还原的产物一般是固态的海绵铁,整个还原过程温度都低于矿石熔点 T_s ,即无高温熔炼。高炉的高温熔炼与还原在同一装置中进行,称为单容器高温熔炼。熔融还原的高温熔炼一般与还原在不同装置中分

开进行,称为多容器高温熔炼。

f. 固态还原深度 R_s

固态还原深度即铁在矿石熔点 T_s 以下达到的还原度。可分为低、中、高三个层次。如果固态下无金属铁生成,则属于低层次固态还原深度。有金属铁生成至 $R_s \leq 90\%$ 为中等固态还原深度。 $R_s > 90\%$ 为高等固态还原深度。

g. 固态床结构

主要区别在于炉料粒度和组成。粒度可大致分为粉料和块料。组成可分为净矿和矿石燃料混合物。例如,高炉的固态床结构为块状混合物,传统流化床则为粉状净料。

根据上述方法可列出重要炼铁流程模式如表 1-1 所示。

表 1-1 重要炼铁流程模式

类型	流 程	主体设备	主体能源	还原剂	R_s	还原炉料	
高炉	高炉炼铁	高炉	冶金焦	固态	中	块状混合	
电 炼 铁	电高炉炼铁	电高炉	电力	固态	低	块状混合	
	LUBATTI	电矮身竖炉	电力	固态	低	块状混合	
	TYSLAND-HOLE	电矮身竖炉	电力	固态	低	块状混合	
粒 铁	KRUPP-RENN	回转窑	非焦煤	固态	高	块状混合	
	MIDREX	竖炉	天然气	气态	高	块状净料	
	ARMCO	竖炉	天然气	气态	高	块状净料	
	PUROFER	竖炉	天然气	气态	高	块状净料	
	HYL II	竖炉	天然气	气态	高	块状净料	
	WIBERG	竖炉	焦+电	气态	高	块状净料	
	FINSIDER	竖炉	非焦煤	气态	高	块状净料	
	PLASMARED	竖炉	油气+电	气态	高	块状净料	
	直 接	EDR	电热竖炉	煤+电	固态	高	块状混合
		KINGLOR-METOR	外热竖炉	气+煤	固态	高	块状混合
	还 原	HYL I, I	反应罐	天然气	气态	高	块状净料
		HÖGANÄS	外热反应罐	煤+焦	固态	高	粉状混合
		FIOR	流化床	天然气	气态	高	粉状净料
		HIB	流化床	天然气	气态	中	粉状净料
		H-IRON	流化床	天然气	气态	高	粉状净料
		NOVALFER	流化床	天然气	气态	高	粉状净料
		SL/RN	回转窑	非焦煤	固态	高	块状混合
		CODIR	回转窑	非焦煤	固态	高	块状混合
		DRC	回转窑	非焦煤	固态	高	块状混合
		ACCAR	回转窑	非焦煤	固态	高	块状混合
熔 融 还 原	INMETCO	转体炉	非焦煤	固态	高	块状净料	
	COREX	竖炉+流化床	非焦煤	气态	高	块状净料	
	XR	流化床+流化床	非焦煤	气态	中	粉状净料	
	川崎	流化床+竖炉	焦+煤	气态	中	粉状净料	
	SC	竖炉+竖炉	焦+煤	气态	中	块状净料	
	DIOS	流化床+铁浴	非焦煤	气态	低	粉状净料	
	COIN	流化床+铁浴	非焦煤	气态	高	粉状净料	
	HISMELT	流化床+铁浴	非焦煤	气态	低	粉状净料	
	HOOGOSENS	竖炉+铁浴	非焦煤	气态	高	块状净料	
	AISI	竖炉+铁浴	非焦煤	气态	低	块状净料	
	俄国一步法	铁浴	非焦煤	固态	无	无	
	ELRED	流化床+电弧炉	煤+电	固态	中	粉状混合	
INRED	闪烁炉+电弧炉	煤+电	固态	低	粉状混合		

1.3 熔融还原和直接还原的分类

熔融还原和直接还原在发展过程中出现了不同的流程。这些流程虽然大多数没能实现工业化或者影响不大,但需要讨论的流程仍然数量繁多。为了方便讨论,必须对这些流程分门别类。如何进行分类并没有统一的准则,完全取决于研究者的兴趣。例如,讨论能源结构时可以按主体能源进行分类,讨论设备时则可按主体设备进行分类。

直接还原的分类准则大致有下面几种:

a. 主体能源

以非焦煤为主体能源的流程称为煤基直接还原,以天然气为主体能源的流程称气基直接还原,使用大量电热的流程称为电热直接还原。

b. 主体设备

主要有竖炉、反应罐、流化床、回转窑、转体炉等。

c. 反应器类型

例如移动床、流化床等。

d. 产品类型

例如热压块或金属化球团。

e. 还原剂种类

分为气态和固态。

f. 原料状态

分为块状料和粉料。

较常见的方法是以主体能源为一级分类标准,以主体设备为二级分类标准。使用这一方法对表 1-1 所列直接还原流程进行分类可得结果如图 1-3。

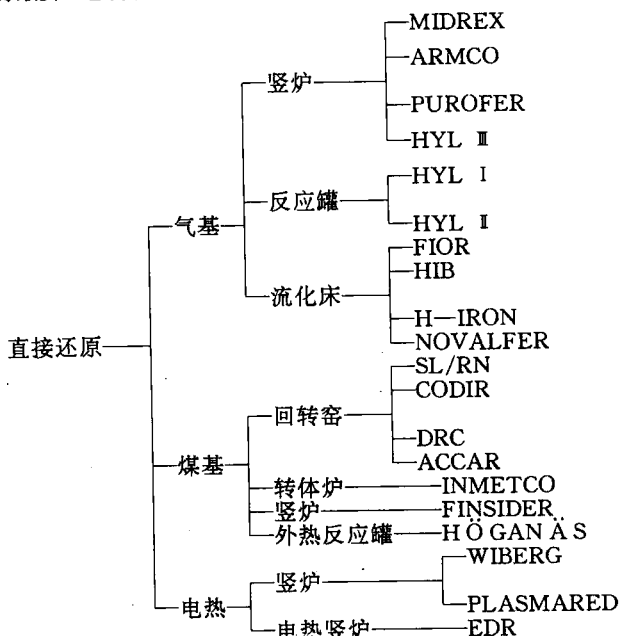


图 1-3 直接还原分类

熔融还原的主体能源主要分为三种：非焦煤、焦炭（一般为非冶金焦）和电力。我们可以仿照直接还原的方法将其分为三类。能源供应以非焦煤为主的称为煤基流程。仍然需要焦炭（包括低质量焦炭）来支撑料柱的称为焦基流程。使用大量电热的称为电热流程。但是，主体能源基本由熔炼设备决定。例如煤炭流化床和铁浴以非焦煤为能源，竖炉运行离不开焦炭，电炉则消耗大量电力等。因此人们更关心的是设备类型。熔融还原的设备类型可分为四种：三段式、二段式、一段式和电热式。

三段式熔融还原流程可分为两大部分：还原部分和熔炼造气部分。还原部分就是还原段。熔炼造气部分则在同一个设备中包含了熔炼造气段和煤气转化段。其构造特点是熔池上方存在一个含碳料层，例如竖炉中的焦炭柱和煤炭流化床中的煤炭固定床和流化床。在含碳料层中可利用煤气过剩物理热完成 CO_2 和 H_2O 向 CO 和 H_2 的转化过程。

二段式也由还原部分和熔炼造气部分组成，因此又与三段式统称二步法。二段式与三段式的主要区别是熔炼造气炉中熔池上方不存在含碳料层。某些二段式流程为了解决还原气成分和温度问题，在熔炼炉与还原炉之间附加了一个还原气改质炉。为了与典型三段式相区别，本书仍称这种流程为二段式流程。

一段式流程只有熔炼段，没有还原段。现代化的一段式流程和二段式流程均采用铁浴炉熔炼设备，因此二者又统称铁浴法。

三段式由煤基流程和焦基流程组成。二段式和一段式则由煤基流程组成。以上三种类型有时又被称为氧煤流程，电热法则被称为电煤流程。

还原设备决定了适用原料的性质。例如流化床可直接处理粉料，竖炉则只适宜处理块状料。这也是评价一个流程的重要标准。

下面以设备类型为一级分类标准，熔炼设备为二级分类标准，还原设备为三级分类标准对表 1-1 所列熔融还原流程进行分类，结果见图 1-4。

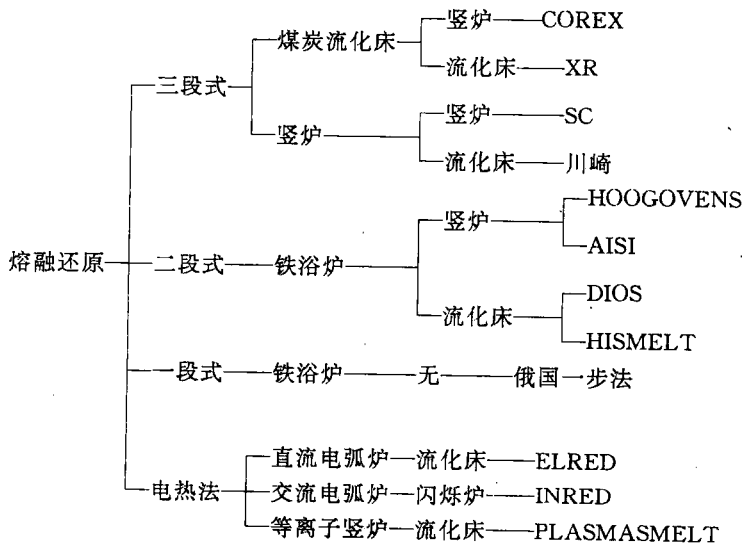


图 1-4 熔融还原分类

1.4 直接还原与熔融还原的发展条件

1.4.1 资源条件

据统计,世界燃料总储量约为 9×10^{12} 吨标准煤。其中 2.3% 是天然气,石油约为 4.3%, 92% 是煤,其余为油页岩。从总的能源结构看,发展气基直接还原的条件不如煤基直接还原和熔融还原优越,而且出于经济方面的考虑人们并不总是愿意拿出大量的天然气来发展钢铁生产。这决定了气基直接还原不可能成为炼铁主体流程。但是天然气分布非常集中,且运输困难,在盛产天然气的地区存在发展气基直接还原的优越条件。这就是直接还原高度地域化及至今生产能力仍然有限的主要原因。据统计,1984 年全世界海绵铁产量约为 959 万吨,其中 92.5% 是通过气基直接还原生产的。因此,海绵铁产量高度集中于天然气和铁矿产地南美洲,占总产量的 60% 以上。

煤的总储量中大部分是非焦煤,其中适合直接还原和熔融还原的煤种占了很大比例,而且价格低,分布广。世界范围大部分地区都具备发展煤基直接还原和熔融还原的能源条件。煤的运输较天然气方便得多,地域效应也远低于天然气。

我国已探明的天然气资源正在迅速增长。但我国非钢铁企业对天然气的需求量也越来越大。预计在一个较长的时期内我国不可能将天然气大量用于钢铁冶金。虽然在个别地区存在着建设一些中小型气基直接还原厂的可能性,但该法不可能成为我国发展海绵铁生产的主方向。

我国的煤炭资源非常丰富,已探明储量约为 5.4×10^{11} 吨。我国的煤资源中约 39% 是炼焦煤,可供直接还原和熔融还原用的煤种储量也很庞大。

我国可开发水电资源达 370×10^6 kW,但目前已开发的装机容量不足 10%。这种状况对我国钢铁冶金工业具有两种影响。首先,丰富的水电资源为海绵铁后续电炉炼钢工业的发展提供了可靠的远景能源条件。廉价的电力供应是发展海绵铁生产的前提条件之一。在水电供应丰富的地区,适量发展电热熔融还原也是可能的。其次,由于水电资源开发不足,致使电力供应紧张,电价昂贵。这会限制电炉钢生产能力的提高或导致电炉开工率不足,从而掩盖了对废钢和海绵铁的实际需求量。

我国铁矿资源丰富,总储量居世界第三位。矿山的特点主要有三项:

a. 品位低

我国铁矿资源中绝大多数是贫矿。这一特点决定了我国的铁矿供应以精矿为主。

b. 难选

难选的结果是精矿粒度偏小。

c. 多金属共生矿多

在以铁为主的矿山中往往伴生着具有回收价值的共生元素,例如攀枝花矿中的钒、钛以及包头矿中的稀土和铌。

1.4.2 市场条件

在钢铁市场供求平衡的大前提下,在世界不同的地区钢铁工业的发展条件是不尽相同的。

特别是在工业化国家和发展中国家之间这种差别更大。一般讲,工业化国家的钢铁生产能力高于自身对产品的需求量。过剩产品只能靠出口来解决市场问题。产品出口的对象主要是发展中国家。这些国家一般都在大力发展自己的钢铁工业,自然会对进口钢铁采取抵制态度。在这种情况下,西方钢铁工业中实行限产和倒闭的不在少数。因此钢铁工业在西方已成了既少不得又难以发展的所谓“夕阳工业”。

发展中国家的钢铁生产能力一般都不能满足自身的需要。解决问题的短期作法是从国际市场进口钢材,长期目标是发展自己的钢铁工业,以满足对钢材的需求。这些国家是目前钢铁生产发展的主要力量。

熔融还原的产品与高炉类似,面临的问题是与高炉生铁争夺市场。较量的结果取决于建设投资和生产成本。在钢铁生产能力过剩,大量高炉闲置的前提下,建设新厂的投资再低也不如利用现有高炉。由于投资对成本的影响,在这种条件下熔融还原的生产成本也很难大幅度低于高炉。因此,熔融还原与高炉的竞争在工业化国家中是不平等的。

在钢铁生产能力不足的发展中国家为熔融还原提供了与高炉竞争的公平条件。COREX法首先在南非实现了工业化。更大规模的生产厂也在韩国投产。我国也有很多厂家计划引进这一技术。这说明熔融还原在发展中国家具有良好的市场。

海绵铁主要有两个用途。低级用途是代替废钢生产一般电炉钢。高级用途是生产使用废钢难以冶炼的特殊钢。目前,海绵铁主要用来代替废钢。但由于其性质较优,价格比废钢略高。因此直接还原的经济性主要取决于废钢市场和主要能源天然气的价格。

1970至1985年是直接还原飞速发展的15年。在此之前海绵铁生产能力微不足道。这15年间海绵铁的生产状况典型地体现了该工业的特点。表1-2和图1-5给出了该期间直接还原生产的变化情况。首先可以看到,直接还原生产能力大致呈加速的上升趋势。15年间生产能力增加至26倍。实际生产量提高速度虽不如设备能力惊人,但也基本呈直线上升态势,1985年产量是1970年的15倍以上。这一情况说明钢铁工业对海绵铁的需求量在稳步上升,市场形势看好。

直接还原的设备开工率波动较大,且呈下降趋势。造成这种情况的直接原因是某些大型气基直接还原厂的减产和停产。影响来自两个方面。其一是废钢市场的变化。在废钢供应充足

表 1-2 1970至1985年直接还原生产状况

年 度	设备能力(百万吨)	实际产量(百万吨)	设备开工率(%)
1970	0.83	0.73	100
1971	1.63	0.86	70
1972	1.63	1.30	80
1973	2.25	1.80	93
1974	2.50	2.60	100
1975	2.50	2.69	100
1976	3.59	2.90	100
1977	5.50	3.36	74
1978	7.08	4.83	77
1979	9.89	6.64	78
1980	12.42	7.20	65
1981	14.02	7.89	60
1982	17.01	7.28	47
1983	19.86	7.90	43
1984	20.69	9.59	47
1985	21.69	11.22	53

注:当年新增设备能力按50%计算开工率。

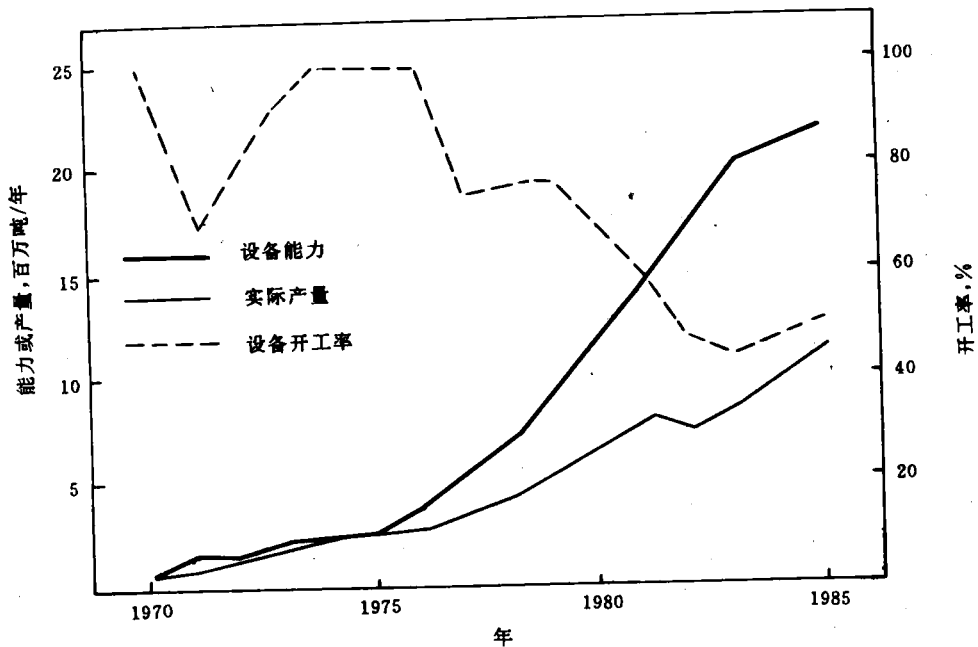


图 1-5 直接还原生产状况

的年代,廉价的废钢对海绵铁市场造成巨大的冲击,迫使某些直接还原厂降低生产量,甚至停产。在废钢供应不足的年代,电炉炼钢工业原料供不应求,这种需求又会刺激海绵铁工业的发展,促使新的直接还原工业投产。另一方面的影响来自天然气供应。某些大型油气田的开发往往会直接导致直接还原厂的建立,而天然气价格的上升则容易造成直接还原工业的减产和倒闭。1980年前后开工率的突降就体现了能源危机造成的影响。

1.5 直接还原与熔融还原发展简史

早在 1770 年,英国就出现了第一个直接还原法专利。自此以后已有数百种直接还原方案相继问世。众多的直接还原流程中绝大多数没有实用价值,或未能实现工业化。有些流程则在实践中被逐步淘汰。不包括低金属化率和特殊用途的生产,1984 年运行中的流程仅有 10 个,他们是:

MIDREX	494 万吨
HYL I	286 万吨
SL/RN	45 万吨
HYL II	39 万吨
FIOR	33 万吨
CODIR	8 万吨
DRC	8 万吨

ACCAR	5 万吨
PLASMARED	2 万吨
KINGLOR—METOR	1 万吨

气基直接还原是海绵铁生产的主力。第一个实现工业化的气体直接还原流程是瑞典于 1932 年开发的 WIBERG 法。它使用焦炭气化的方法制取还原气。1957 年墨西哥 HYL SA 公司在蒙特利尔投产了第一座年产 95000 吨的 HYL 法气基直接还原装置,这是现代化直接还原法进入工业化的开始。接着,墨西哥于 1967 年和 1969 年又相继投产了两座 20 万吨级和 30 万吨级的 HYL 法直接还原厂。自此,气基直接还原法成了非高炉炼铁的一支重要力量。

MIDREX 法的开发成功是气基直接还原技术的重大进步。它采用合理的连续作业方式取代 HYL 法非连续性的罐式操作。1971 年同时有两座 MIDREX 竖炉在德国和美国投产,能力均为年产 40 万吨。MIDREX 法后来居上,1973 年产量已超过 HYL 法,成为直接还原产量最大的流程。至 1990 年共有 46 套 MIDREX 装置投入或计划投入生产,总能力为 2113 万 t/a。

竖炉的工艺原理被普遍接受。1979 年,HYLSA 将一套 HYL 法装置改造成连续型竖炉,定名为 HYL III。1983 年,又一套 HYL 反应罐被改建成竖炉,使 HYL III 总容量达到 75 万 t/a,成为直接还原第四大流程。

竖炉直接还原的运行离不开天然气,这对世界大部分地区是不方便的。为了解决这一问题,人们做了很多的工作,主要方法有两种。

其一是在造气上解决问题,即利用电力或氧气对非焦煤或焦炭进行气化,生产供竖炉用的还原气。WIBERG 法的造气炉采用电弧加热,可对焦炭和块状非焦煤进行气化。该流程目前已不再使用。PLASMARED 使用等离子技术,可对多种燃料进行气化。FINSIDER 法则采用氧气和非焦煤制取还原气,这种方案至今仍具有吸引力。

其二是采用外加热的方法将竖炉内气流降至极低的水平。从而可将非焦煤作为还原剂混入炉料,而不致有透气性恶化带来的问题。外热能源可使用电,例如 EDR 流程。也可使用其他燃料,例如 KINGLOR—METOR 流程。

气基直接还原的另一个重要分支是流化床法。1951 年,第一套日产 50t 的流化床 H—IRON 直接还原装置投入运行。另一套 H—IRON 法装置于 1962 年投产,能力为日产 120t。1979 年,另一个流化床流程 HIB 法以更大的规模实现了工业化,能力为 100 万 t/a。对流化床直接还原影响最大的是 FIOR 法的工业化。该流程于 1976 年在委内瑞拉建成第一套年产 40 万 t 海绵铁的工业装置。由于它的产品是粉状海绵铁,不便储存、运输和使用,所以采用热压工艺将其加工成团块出售。团块的性能优良,故热压工艺后来也被某些竖炉流程采用。

煤基直接还原以回转窑流程为代表。回转窑炼铁生产历史可追溯到本世纪 30 年代初的回转窑铁水和粒铁生产工艺。生产铁水的 BASSET 流程于 1931 年开发成功。稍晚,粒铁流程 KRUPP—RENN 法也于 1934 年在德国 MAGDEBURG 投产,这一流程至今仍有一定影响。从产品看,这类流程更接近于现代熔融还原。但他们是回转窑直接还原的祖先,熔融还原的发展与其关系不大。

后来人们发现,缩短回转窑冶炼过程,取消炉内熔炼部分的措施对解决该流程中发现的大量技术问题非常有效。于是,回转窑炼铁产品转为以海绵铁为主,逐步形成现代化煤基直接还原工艺。

第一套 SL/RN 回转窑直接还原装置于 1970 年在新西兰投产,能力为年产 19 万 t。至 1984 年,SL/RN 装置已发展到 11 套,计 100 万 t 的生产能力,成为直接还原第三大流程。

第一座 CODIR 直接还原回转窑工业装置于 1973 年在南非投产,能力为年产海绵铁 15 万 t。当年产量为 3 万 t,1980 年达到 12 万吨。该工艺的特点是由窑头喷入大量还原煤,对改善窑内温度分布和还原条件起到重要作用。此后又有 ACCAR 法投产成功。该法在技术上的进步主要在完善了炉内气氛控制手段。

1984 年回转窑海绵铁总生产能力为 140 万 t,实产海绵铁 66 万 t。

直接还原回转窑常被用于特殊目的。最常见的是钢铁厂工业粉尘处理,例如日本住友重工的 SDR 法、住友金属的 SPM 法和川崎钢铁公司的川崎法等。回转窑还可用于复合矿的综合回收。我国在 80 年代初期进行了利用回转窑综合回收钒钛磁铁矿的工业试验,并建立了一个示范厂。

图 1-6 和图 1-7 是四个代表性直接还原流程生产能力及实际产量的发展情况。

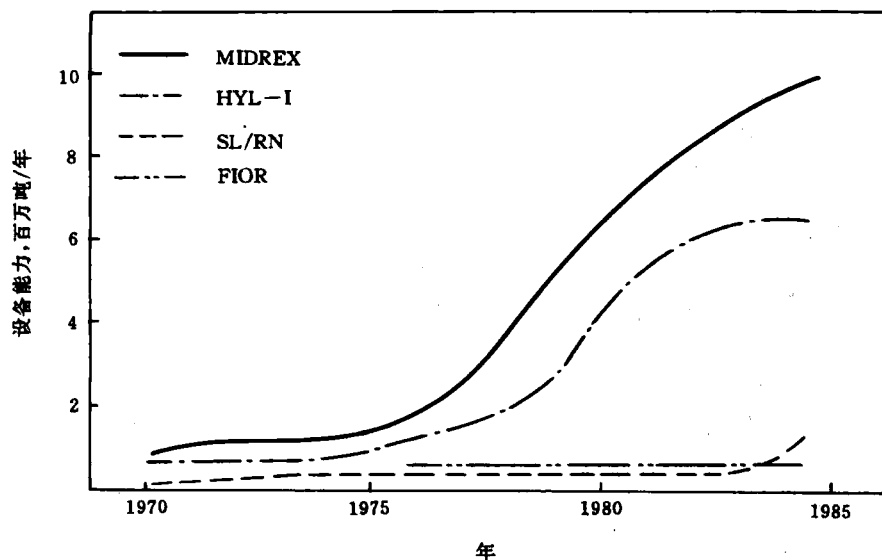


图 1-6 直接还原代表流程生产能力的发展

20 世纪 20 年代已经开始进行熔融还原法的研究开发工作。早期的熔融还原流程以一步法为主,例如 DORED 法、CIP 法、EKETORP 法等。个别流程虽考虑了尾气余热的利用,但也仅附加了矿石预热和煤的干燥,例如 ST ÜRZELBERG 法。这类流程遇到了两大问题。

第一个问题是铁氧化物在还原和熔炼过程中形成高 FeO 炉渣。这种炉渣对炉衬的侵蚀极为严重。为了解决这一问题,EKETORP 法和 CIP 法分别采用了垂直的和水平的高速旋转离心炉。在离心力的作用下,密度较大的铁水紧贴炉壁,将炉衬与炉渣隔开,起到保护炉衬的作用。EKETORP-VALL 法则将矿粉沿炉墙加入,形成所谓矿幕来达到保护炉衬的目的。但事实证明,这些措施在炼铁大工业生产中的实用价值不大。

第二个问题是能耗过高。主要原因是炉内不能形成足够的温度梯度,煤氧燃烧放出的热量不能有效地集中使用于铁的还原和熔炼。而高温煤气的物理热又不能有效利用。

由于不能解决以上两个问题,早期熔融还原最终都以失败告终。虽有个别流程在特殊条件