

非高炉炼铁 工艺与理论

方觉等著

冶金工业出版社

TJ55
2002289

非高炉炼铁工艺与理论

方 觉 等著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2002

内 容 提 要

本书以MIDREX直接还原流程和COREX熔融还原流程为重点,介绍了现代化非高炉炼铁的主要工艺流程及重点设备。作者还结合自己多年的研究成果,对非高炉炼铁工艺的重要理论问题,包括冶金还原气利用率、竖炉还原理论及熔融还原工艺的优化,进行了详细的论述和讨论。本书可作为钢铁冶金专业科研及教学的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

非高炉炼铁工艺与理论/方觉等著. —北京:冶金工业出版社, 2002.1

ISBN 7-5024-2872-0

I. 非… II. 方… III. 直接炼铁 IV. TF55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 067681 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 王之光 美术编辑 王耀忠 责任校对 白迅 责任印制 李玉山

北京梨园彩印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2002 年 1 月第 1 版, 2002 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13 印张; 312 千字; 196 页; 1-1500 册

28.00 元

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 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

参加编写人员

方 觉 郝素菊 李振国

尹海生 蒋武锋 梁 军

前 言

直接还原和熔融还原是现代化非高炉炼铁工艺的主体。直接还原的产品海绵铁是电炉炼钢的优质原料,对发展钢铁冶金短流程工艺具有重要意义。熔融还原在钢铁冶金生产中相当于高炉炼铁,它的产品是液态生铁。这两项技术对改善钢铁冶金生产的能源结构具有重要的意义。

竖炉工艺是海绵铁生产的主体,廉价的天然气资源是发展竖炉生产的基本条件。在目前和可预见的将来我国都不可能将大量的天然气用于钢铁冶金生产。因此,人们往往在发展我国海绵铁工业的基本构想中局限于煤基直接还原。目前成熟的煤基直接还原工艺只有回转窑流程。但回转窑流程的高投资和低效率却使我国的大多数厂商望而却步。这或许是我国的海绵铁工业发展艰难的主要原因之一。本书作者认为,要发展我国的海绵铁工业应当走煤制气和竖炉还原的道路。此外,目前惟一的工业化熔融还原流程也使用竖炉作为还原单元。

我国在直接还原方面进行了大量的研究和开发工作。其中特别值得一提的是1998年完成的BL法工业试验。该工艺采用煤制气与竖炉还原相结合的方案生产海绵铁,证实了该方案在工业生产中的可行性。目前国际冶金界已有很多人在提倡这一方案,而我国无疑在这一方面已经走在了世界前列。鉴于其特殊地位,本书详细地介绍了这一流程的原理及工业试验情况。

COREX是惟一的工业化熔融还原流程。目前已经投入运转的COREX装置或多或少都存在煤耗过高的问题。造成这一问题的主要原因是煤的质量。使用适宜的熔炼煤将使流程能耗大大降低,从而提高熔融还原流程与高炉炼铁的竞争能力。我国非焦煤资源丰富,提供适宜的熔炼煤并非难事,因此COREX流程在我国具有很大的发展潜力。针对这一点,本书使用了较大篇幅讨论COREX流程

的特点及优化。

还原气利用率对直接还原和熔融还原流程的能耗均具有极重要的影响。氢碳比是影响还原气利用率的一个重要因素。很多非高炉炼铁流程都能够控制还原气氢碳比，特别是采用煤制气的直接还原流程。因此，还原气利用率是非高炉炼铁工艺的一个重要课题，非高炉炼铁生产在我国具有一定的发展前景。

本书汇集了在这一领域内长时期的研究成果和实践经验，希望能够在我国的非高炉炼铁事业发展中贡献一点力量。

方 觉

2001年10月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 现代化非高炉炼铁	(1)
1.2 非高炉炼铁的分类	(3)
1.2.1 分类标准	(3)
1.2.2 直接还原	(3)
1.2.3 熔融还原	(4)
1.3 非高炉炼铁的发展	(5)
1.3.1 直接还原发展简史	(5)
1.3.2 熔融还原发展简史	(7)
1.3.3 非高炉炼铁的发展环境	(11)
2 理化基础	(14)
2.1 铁的存在形态	(14)
2.2 重要反应热力学分析	(18)
2.2.1 C-H-O 系热力学	(18)
2.2.2 铁的还原与渗碳	(22)
2.2.3 非铁元素在还原和熔炼中的行为	(29)
2.3 动力学基础	(34)
2.3.1 化学反应动力学基本参数	(36)
2.3.2 传质基本参数	(38)
2.3.3 铁矿石还原与缩核模型	(40)
2.3.4 气固催化反应与还原气的制取	(43)
2.3.5 煤的气化	(48)
2.4 还原气及其利用率	(56)
2.4.1 还原气的热力学利用率	(56)
2.4.2 还原气综合利用率与关键步骤	(57)
2.4.3 类 CO 还原气与类氢还原气	(60)
2.4.4 决定还原气利用率的主要因素	(61)
3 重点设备分析	(65)

3.1	还原竖炉	(66)
3.1.1	温度分布	(66)
3.1.2	能耗分析	(70)
3.1.3	压力分布	(76)
3.2	还原流化床	(77)
3.2.1	流态化现象及流化床类型	(77)
3.2.2	流化参数	(79)
3.2.3	粘结失流问题	(82)
3.2.4	还原速度与气体利用率	(87)
3.3	熔炼造气煤炭流化床	(90)
3.3.1	熔炼煤的有效热值	(90)
3.3.2	矿石熔炼热	(91)
3.3.3	煤耗与产气量	(92)
3.3.4	与还原单元的配合	(93)
3.3.5	原燃料及配合参数对煤耗的影响	(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	(98)
3.4.3	二次燃烧率与有效热值	(99)
3.4.4	煤气改质与余热利用	(100)
3.4.5	与还原单元的配合	(103)
3.4.6	能耗分析	(104)
4	直接还原流程	(107)
4.1	重点流程 MIDREX	(107)
4.1.1	流程概述	(107)
4.1.2	MIDREX 原料	(108)
4.1.3	还原竖炉基本结构及运行状况	(110)
4.1.4	气封系统	(110)
4.1.5	还原段	(111)
4.1.6	冷却段	(112)
4.1.7	MIDREX 装置与能耗	(115)
4.1.8	MIDREX 重要工艺参数	(116)
4.1.9	流程分支	(117)
4.2	BL 流程	(119)
4.2.1	造气系统	(119)
4.2.2	还原气加热系统	(119)
4.2.3	还原系统	(120)
4.2.4	尾气清洗系统	(121)

4.2.5	原燃料性质	(121)
4.2.6	主要工艺参数	(122)
4.3	其他竖炉直接还原流程	(124)
4.3.1	HYL-Ⅲ 流程	(124)
4.3.2	ARMCO 流程	(125)
4.3.3	PUROFER 流程	(126)
4.3.4	WIBERG-SÖDERFORS 流程	(128)
4.3.5	PLASMARED 流程	(129)
4.3.6	EDR 流程	(129)
4.3.7	KINGLOR METOR 流程	(130)
4.4	流化床流程	(131)
4.4.1	FIOR 流程	(131)
4.4.2	H-IRON 流程	(133)
4.4.3	NU-IRON 和 HIB 流程	(134)
4.4.4	NOVALFER 流程	(135)
4.5	反应罐流程 HYL	(136)
4.6	回转窑流程	(137)
4.6.1	SL-RN 流程	(137)
4.6.2	CODIR 流程	(139)
4.6.3	ACCAR 回转窑装置	(140)
4.6.4	SPM 流程	(141)
4.7	外热反应罐流程 (HÖGANÄS)	(142)
4.8	转体炉流程	(143)
4.8.1	INMETCO 流程	(143)
4.8.2	FASTMET 流程	(143)
5	熔融还原流程	(146)
5.1	重点流程 COREX	(146)
5.1.1	流程概述	(146)
5.1.2	原料	(147)
5.1.3	熔炼造气煤	(149)
5.1.4	铁矿还原	(152)
5.1.5	熔炼与造气	(156)
5.1.6	还原与熔炼的配合	(161)
5.1.7	脱硫与熔剂在竖炉中的分解	(164)
5.1.8	冷却气的使用与碱金属循环	(166)
5.1.9	COREX 流程优化与能耗	(166)
5.1.10	COREX 配套设备	(168)
5.2	其他三段式流程	(176)

5.2.1 川崎流程	(176)
5.2.2 XR 流程	(179)
5.2.3 SC 流程	(179)
5.3 铁浴一步法流程 (俄罗斯一步法)	(181)
5.4 铁浴二步法流程	(182)
5.4.1 COIN 流程	(182)
5.4.2 HISMELT 流程	(184)
5.4.3 AISI 流程	(185)
5.4.4 DIOS 流程	(187)
5.5 电热法流程	(189)
5.5.1 ELRED 流程	(189)
5.5.2 INRED 流程	(190)
5.5.3 PLASMASMELT 流程	(192)
5.5.4 COMBISMELT 流程	(193)
参考文献	(196)

1 绪 论

1.1 现代化非高炉炼铁

高炉炼铁是炼铁生产的主体。经过长时期的发展，它的技术已经非常成熟。但它也存在着固有的不足，即其对冶金焦的强烈依赖，尤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。与此相反，蕴藏丰富的廉价非焦煤资源在炼铁生产中则得不到充分的利用。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。

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，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实践的检验，在激烈的竞争中逐渐衰落甚至消失，例如电高炉、电矮身竖炉和粒铁法等。经过数百年的发展，至今已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。

直接还原和熔融还原虽然同属非高炉炼铁，但他们的产品不同。因此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 4 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，它是由焦煤经炼焦生产得到的。炼焦生产的绝大部分焦炭都消耗于炼铁生产。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（精矿和富矿粉）。因此，人工造块是现代化高炉炼铁必备的工序。高炉的产品是液态生铁，它经转炉冶炼成转炉钢。

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条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，熔融还原则使用非焦煤。这样

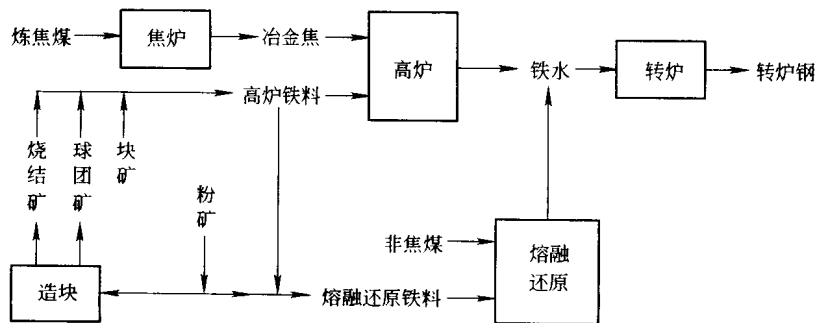


图 1-1 熔融还原与高炉-转炉冶炼流程的关系

就使炼铁摆脱了对冶金焦的依赖。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的生产环节。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。

电炉炼钢是钢铁生产的另一个重要分支。1990年电炉钢产量已占全部钢产量的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。

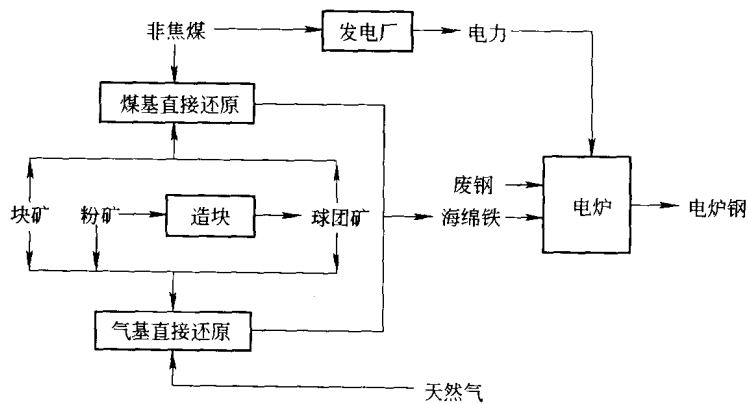


图 1-2 直接还原与电炉炼钢的关系

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，其中夹杂着矿石中的脉石成分，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。

直接还原虽然不使用冶金焦，但它的产品是固态海绵铁，不能完全取代铁水进行转炉冶炼，因此直接还原不能代替高炉生产。它的主要优点是能源的多样化，这一点对于缺乏焦煤资源的地区具有强烈的吸引力。

自从熔融还原首次在南非实现工业化后，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发展阶段，技术和理论还很不完善。它到底能否取代高炉也还有待于实践的检验。熔融还原在今后的发展过程中可能不会拘于单一的模式，其能源也是多样化的。不过对于大多数地区来讲最具吸引力的还是 COREX 那样以非焦煤为主要能源的流程。

我国虽然仍未形成非高炉炼铁的生产能力，但在直接还原和熔融还原两个方面都曾进行过大量的开发研究工作。

我国非焦煤资源非常丰富，但缺乏廉价的天然气资源，发展直接还原应当以非焦煤为主。目前成熟的煤基直接还原流程只有回转窑工艺，但该工艺在基建投资和生产效率两个方面都不能满足我国大多数厂家的要求。因此，我们应当走自己的发展道路。宝钢和鲁化

合作开发出的 BL 法流程（见第 4 章）在这一方面给我们做出了示范。

熔炼煤质量对熔融还原能耗具有决定性的影响，很多 COREX 厂家由于缺乏适宜的熔炼煤而导致煤耗居高不下，而解决这一问题在我国却是轻而易举的事情。

我国具有发展非高炉炼铁的优越条件，发展非高炉炼铁生产的要求也越来越迫切。相信在不久的将来我国的非高炉炼铁事业必将有一个突破性的进展。

1.2 非高炉炼铁的分类

1.2.1 分类标准

产品在流程划分中是最重要的特征。以此为标准可将非高炉炼铁分为直接还原和熔融还原两大类。直接还原流程的产品是固态的海绵铁（DRI），熔融还原的产品是类似于高炉产品的液态生铁。其他的分类标准并不固定，大致归纳起来有以下几种特征在流程划分中较为常用：

(1) 主体能源。主体能源往往是人们较为关注的流程特征。这一分类标准在直接还原中应用较多，例如煤基直接还原和气基直接还原。

(2) 工艺模式。工艺模式可应用于熔融还原的流程划分，例如一段式和二段式。

(3) 设备类型。设备类型可分为移动床、固定床和流化床等。

(4) 主体设备。主体设备可分为竖炉、反应罐、回转窑等。

(5) 还原剂状态。非高炉炼铁主要使用固态或气态两种还原剂。

(6) 炉料结构。炉料可分为净料（纯矿石）和混合料（矿石和燃料）两种结构。

1.2.2 直接还原

直接还原的分类一般以主体能源作为一级标准，将流程划分为煤基直接还原、气基直接还原和电热直接还原三大类。煤基直接还原以煤为主要能源，主要是使用回转窑为主体设备的流程。气基直接还原以天然气为主体能源，包括竖炉、反应罐和流化床流程。电热直接还原以电力为主要能源，是使用电热竖炉或使用电热制气的直接还原流程。

二级分类标准一般采用主体设备。据此标准可将主要直接还原流程分类如图 1-3 所示。

目前运行中的气基直接还原设备有三种。第一种是竖炉，以 MIDREX 流程为代表。竖炉流程占据了大部分直接还原生产能力。第二种是反应罐，使用反应罐的流程只有 HYL 法。反应罐采用落后的固

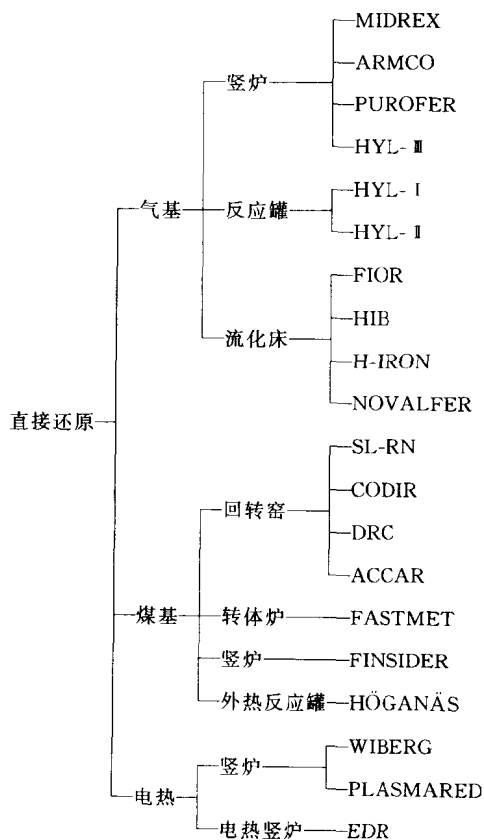


图 1-3 直接还原分类

定床非连续生产方式，因此正处于逐渐被淘汰的过程中，不过直到 1997 年 HYL 法生产的海绵铁仍占总产量的 7% 以上。第三种是流化床，目前的惟一代表是 FIOR 法，1997 年的生产份额为 1%。

煤基直接还原中只有回转窑流程拥有可观的生产能力。具有代表性的回转窑流程是 SL-RN 法。转体炉流程使用含碳球团，目前仍处于开发研究阶段。外热反应罐又称闷罐，是将矿粉和还原剂装入反应罐后通过外部加热进行还原的工艺流程。国外一般使用该流程生产粉末冶金用铁粉，加热是在隧道窑内进行的。近几年国内很多地方和私营企业使用这种方法进行小规模海绵铁生产。加热往往利用现有设备，并不局限于隧道窑。

电热直接还原要消耗大量的电力，目前都已停产。

还有少数生产能力很小的流程在这种分类法中位置不明确，例如 KINGLOR-METOR 法。这种方法使用燃气在竖炉外部加热，使用煤在竖炉内部进行还原，折算成热量的天然气和煤耗量大致相当。

1.2.3 熔融还原

熔融还原的主体能源主要分为 3 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 3 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，熔融还原较直接还原复杂得多，这样的分类方法不能确切地描述其流程特点。欧钢联的方式是根据工艺模式将熔融还原划分为 4 大类：三段式、二段式、一段式和电热法。这样的方式可以克服上述不足。

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 3 种类型有时又被称为氧煤流程，电热法则被称为电煤流程。

熔炼设备是熔融还原流程的精华。一个熔融还原流程的开发往往由熔炼设备开始，而熔炼设备开发工作又往往决定了该流程的成败。

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，竖炉则只适用于处理块状炉料。这也是一个流程的重要特征。

下面以工艺模式为一级分类标准，熔炼设备为二级分类标准，还原设备为三级分类标准对熔融还原流程进行分类，如图 1-4 所示。

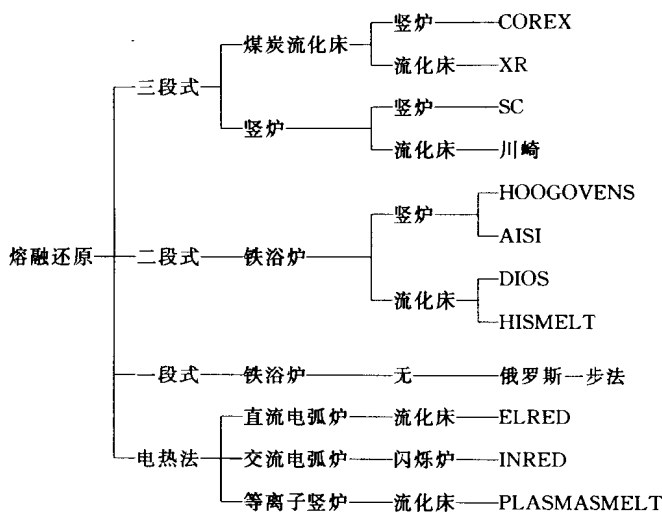


图 1-4 熔融还原分类

1.3 非高炉炼铁的发展

1.3.1 直接还原发展简史

早在 1770 年,英国就出现了第一个直接还原法专利。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。目前最重要的直接还原流程是 MIDREX。

1997 年处于运行状态的直接还原流程共有 16 个,他们是: MIDREX、HYL-Ⅲ、HYL-I、SL-RN、JINDAL、DRC、FIOR、SIIL、CODIR、OSIL、TISCO、IRON CARBIDE、GHAEM、PUROFER、DAV 和 KINGLOR-METOR,总产量为 3618 万 t。

在世界海绵铁总产量中 MIDREX、HYL-Ⅲ、HYL-I 和 SL-RN 4 个主要流程占据了 93% 以上。其中前 3 个是气基直接还原流程,生产份额约为世界总产量的 90%。MIDREX 和 HYL-Ⅲ 是竖炉流程,生产份额约为 83%。而 MIDREX 单一流程的生产份额则在 63% 以上。SL-RN 使用回转窑,是煤基直接还原的代表性流程,生产份额不足 4%。

由上述统计资料^①可见,气基直接还原是海绵铁生产的主力,而竖炉流程又是气基直接还原的主力。

第一个实现工业化的竖炉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 HYLSA 公司在蒙特利尔投产了第一座年产 95000 t 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 t 级和 30 万 t 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。它采用合理的连续性竖炉作业方式取代 HYL 法非连续性的罐式操作。1971 年同时有两座 MIDREX 竖炉在西德和美国投产,能力均为年产 40 万 t 海绵铁。MIDREX 法后来居上,1973 年产量已超过 HYL 法,

① 资料引自 MIDREX 直接还原公司的统计报告。

成为最大的直接还原流程。至 1997 年全世界共有 49 套 MIDREX 装置,总能力为年产 2875 万 t 海绵铁。

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。HYL-Ⅲ 目前仅次于 MIDREX,是第二大直接还原流程,共有装置 18 座,总能力为 1115 万 $t \cdot a^{-1}$ 。

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,主要有两种方法。

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,如 EDR;也可使用其他燃料,如 KINGLOR-METOR。

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 50 t 的流化床 H-IRON 直接还原装置投入运行。另一套 H-IRON 装置于 1962 年投产,能力为日产 120 t。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 $t \cdot a^{-1}$ 。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 20 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 法于 1931 年开发成功。稍晚,粒铁流程 KRUPP-RENN 法也于 1934 年在德国马德堡投产,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法的先驱,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,取消炉内熔炼部分等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 1997 年 SL-RN 装置已发展到 14 套,计 154 万 t 的年生产能力,是直接还原第四大流程。

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,1997 年达到 52 万 t。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。该法在技术上的特点主要是完善了炉内气氛控制手段。

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 20 世纪 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。

还有一些其他流程的发展引起了人们较为广泛的兴趣，例如生产碳化铁的流化床流程和使用含碳球团的转体炉流程。但这些流程或者尚未实现工业化，或者生产能力还很低，对海绵铁的生产形势不能构成显著的影响。

图 1-5 给出了世界范围内海绵铁生产发展的趋势。可以看出，海绵铁产量正处于加速增长之中。不过海绵铁生产的地域性极强。图 1-6 给出了海绵铁产量在世界各地区的分布，仅拉美地区就占有世界总产量的 36% 以上，其中委内瑞拉为 15%。造成这一现象的原因是这些地区丰富的廉价天然气资源和贫乏的焦煤资源：

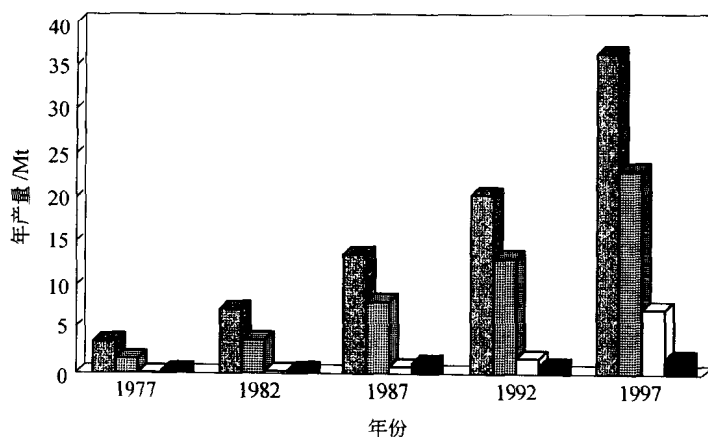


图 1-5 海绵铁生产发展趋势

■—总产量；▨—MIDREX；□—HYL-III；■—SL-RN

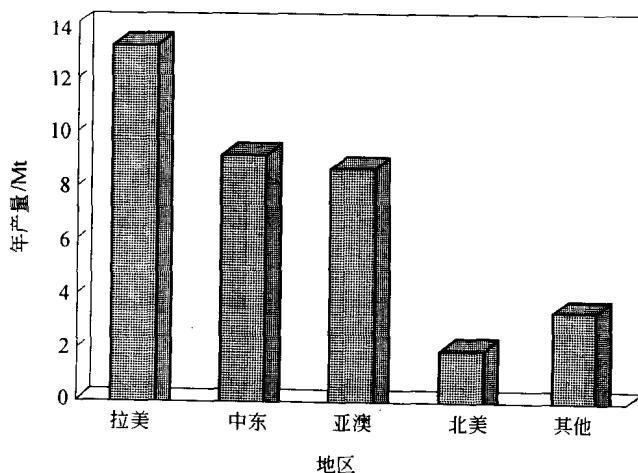


图 1-6 海绵生产的地理分布

1.3.2 熔融还原发展简史

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