

高等学校教学用书

非高炉炼铁学

史占彪等 编著

东北工学院出版社

前 言

非高炉炼铁技术的开发已有百余年历史，近年来已进入工业生产阶段。这种新兴的炼铁技术在国外的的发展较快，国内也进行了广泛深入的研究，日益受到重视。

东北工学院自 1975 年起就为钢铁冶金专业本科生和研究生开设了非高炉炼铁课程，多年的教学实践和长期从事这一领域的科学研究为编写本书奠定了基础。考虑到教学的需要和知识的连续性，本书用较大篇幅介绍了非高炉炼铁法基础原理，较全面地对各种非高炉炼铁工艺特征及现状做了较详细的叙述。

本书共分 7 章，参加本书编写工作的有史占彪（第 1 章，第 4 章 4.1, 4.3, 4.4, 4.5 节），赵庆杰（第 2 章，第 3 章 4.2 节，第 6 章，第 7 章），张树勋（第 3 章，第 4 章 4.6 节），赵一红（第 4 章 4.2 节），许力贤（第 5 章），全书由史占彪修改、定稿。

在本书编写过程中，李殷泰教授参与了提纲的制定、内容讨论和审查，给予了很大的支持和关心；在编辑过程中赵庆杰副教授协助进行了文稿和图稿的审校工作；亦得到了东北工学院冶金资源工程研究室的同志们的大力协助，在此一并表示感谢。

由于我们水平有限，加之编写时间短促，书中难免有缺点错免误，恳请读者批评指正。

作 者

一九九〇年十月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论

- 1.1 炼铁技术的发展 (1)
 - 1.1.1 非高炉炼铁法的历史及现状 (2)
 - 1.1.2 直接还原法分类 (4)
 - 1.1.3 直接还原法发展动向 (4)
 - 1.1.4 熔融还原法的兴起 (6)
- 1.2 我国非高炉炼铁的发展前景 (7)
 - 1.2.1 我国非高炉炼铁的基本情况 (7)
 - 1.2.2 发展非高炉炼铁的可行性 (8)
- 1.3 非高炉炼铁法的主要技术经济指标 (11)

第 2 章 非高炉炼铁冶炼理论基础

- 2.1 铁氧化物的还原 (13)
 - 2.1.1 铁氧系状态图 (13)
 - 2.1.2 铁氧化物的气体还原 (14)
 - 2.1.3 固体碳存在时的还原 (15)
 - 2.1.4 铁矿石还原速度及影响因素 (17)
- 2.2 非铁元素的还原 (20)
 - 2.2.1 氧势图及非铁元素还原顺序 (20)
 - 2.2.2 铬、锰、硅等氧化物的还原 (23)
- 2.3 燃料燃烧 (26)
 - 2.3.1 概 述 (26)
 - 2.3.2 可燃气体的燃烧 (27)
 - 2.3.3 油粒的燃烧 (30)
 - 2.3.4 碳的燃烧反应 (31)
 - 2.3.5 炭粒燃烧的异相反应速度 (33)
 - 2.3.6 煤粒的燃烧 (36)
- 2.4 冶金熔体 (38)
 - 2.4.1 冶金熔体的结构及物性 (38)
 - 2.4.2 熔体中的 C-O 反应 (44)
 - 2.4.3 熔体中的氧化和还原 (44)
 - 2.4.4 脱磷反应 (46)
 - 2.4.5 脱硫反应 (47)

第 3 章 非高炉炼铁原料及燃料

- 3.1 含铁原料 (50)
 - 3.1.1 含铁原料的化学成分 (50)

3.1.2	含铁原料的物理性质	(52)
3.1.3	含铁原料的冶金性能	(53)
3.2	燃料与还原剂	(54)
3.2.1	固体燃料	(54)
3.2.2	非高炉炼铁用煤	(55)
3.2.3	冶金还原气	(56)
3.2.4	冶金还原气的制备	(57)

第四章 直接还原工艺

4.1	回转窑直接还原法	(64)
4.1.1	回转窑法工作原理	(64)
4.1.2	回转窑法工艺介绍	(80)
4.1.3	回转窑基本尺寸的确定	(95)
4.2	竖炉直接还原法	(98)
4.2.1	竖炉法的发展	(98)
4.2.2	竖炉法工作原理	(98)
4.2.3	竖炉法工艺介绍	(110)
4.2.4	我国竖炉直接还原法的试验研究	(118)
4.3	罐式直接还原法(HYL- I、II)	(121)
4.3.1	罐式法工作原理	(121)
4.3.2	罐式法工艺过程	(123)
4.4	流化床直接还原法	(127)
4.4.1	流化床概念	(127)
4.4.2	铁矿石的流化床还原	(134)
4.4.3	流化床法工艺介绍	(135)
4.5	其他直接还原法	(139)
4.5.1	Kinglor Metor 法	(139)
4.5.2	EDR (Midrex 电热) 法	(141)
4.5.3	Höganäs 法	(142)
4.6	直接还原铁的储存、运输及应用	(143)
4.6.1	直接还原铁的储存和运输	(143)
4.6.2	直接还原铁的应用	(148)

第5章 熔融还原法

5.1	熔融还原法分类及特点	(160)
5.2	熔融还原法基本原理	(161)
5.2.1	铁氧化物熔融还原反应	(161)
5.2.2	熔融还原能耗分析	(162)
5.3	熔融还原法工艺介绍	(165)
5.3.1	KR 法 (COREX 法)	(165)
5.3.2	Plasmasmelt 法 (等离子熔炼法)	(168)
5.3.3	川崎 (Kawasaki) 法	(170)

5.3.4	SC (住友) 法	(172)
5.3.5	COIN 法	(176)
5.3.6	Elred 法 (电还原法)	(177)
5.3.7	Inred 法 (强化还原法)	(179)
5.4	采用熔融还原法的铁合金生产	(180)
5.4.1	熔融还原法铁合金生产的基本原理	(180)
5.4.2	熔融还原法铁合金生产工艺介绍	(182)
5.5	煤的熔池造气	(183)
5.5.1	煤熔池造气的基本原理	(184)
5.5.2	煤熔池造气工艺	(185)
第 6 章 其他炼铁法		
6.1	电炉炼铁	(187)
6.1.1	电炉炼铁设备	(187)
6.1.2	电炉炼铁工艺过程	(188)
6.1.3	电炉炼铁展望	(190)
6.2	双联法	(190)
6.2.1	回转窑—电炉法	(191)
6.2.2	竖炉—电炉法	(192)
6.2.3	DLM 法	(193)
6.3	粒铁法	(193)
6.4	生铁水泥法 (Basett 法)	(196)
6.5	其他能源炼铁法	(196)
第 7 章 非高炉炼铁技术经济评价		
7.1	各种钢铁生产流程的基本参数及其比较	(197)
7.2	直接还原—电炉流程与高炉—氧气转炉流程的比较	(201)
7.2.1	美国条件下的比较	(201)
7.2.2	东南亚地区条件下的比较	(202)
7.3	我国条件下直接还原—电炉、高炉—氧气转炉两种流程的比较	(207)
7.3.1	投资比较	(208)
7.3.2	成本比较	(208)
7.3.3	能耗比较	(211)
7.3.4	效益比较	(212)
7.4	不同直接还原法的经济比较	(212)
7.5	直接还原—电炉与高炉—氧气转炉两种流程经济比较的结论	(214)

第 1 章 绪 论

非高炉炼铁法是高炉炼铁法之外，不用焦炭炼铁的各种工艺方法的统称。确切地说，按工艺特征、产品类型及用途，可分为直接还原法和熔融还原法两大类。

直接还原法限于以气体燃料、液体燃料或非焦煤为能源，是在铁矿石（或含铁团块）呈固态的软化温度以下进行还原获得金属铁的方法。由于还原温度低，产品呈多孔低密度海绵状结构，含碳低、未排除脉石杂质的金属铁产品，叫直接还原铁（DRI），或称海绵铁。

熔融还原法则以非焦煤为能源，在高温熔态下进行铁氧化物还原，渣铁能完全分离，得到类似高炉的含碳铁水。其目的在于不用焦炭，取代高炉炼铁法。

1.1 炼铁技术的发展

人类学会冶铁技术和使用铁器已有 3 000 年的历史。最早人们是将铁矿石和煤一块加热，在较低温度下，用碳将绝大部分与铁结合的氧还原脱除，然后再反复加热锻打挤出杂质，使铁的单体颗粒得以焊接，再按要求锻打成型，经渗碳处理后得到铁制品。可见最早的炼铁技术也属于直接还原法。这种生产方法效率极低，质量也难以保证。

随着人类征服和改造自然能力的提高，人们开始建造较大的炼铁炉，炉内煤气与矿石的热交换改善，温度升高，矿石也得到好的加热、还原，并进一步渗碳，出现了熔融铁水在炉底聚集的现象，这就是高炉炼铁法的雏型。由于生铁含碳高，不再能锻打成型。然而人们却发现矿石内的脉石杂质已转变成熔融炉渣，渣铁分离比老办法简便。特别是 1735 年用焦炭取代木炭炼铁的成功和蒸汽机的使用，使高炉炼铁技术有了飞跃进步。

为了适应炼铁技术发展，1856 年发明了酸性转炉法，能够有效地脱除铁水中多余的碳、硅等杂质元素，把铁水炼成钢。从此，钢铁生产得到突飞猛进的发展，到 1890 年世界钢产量已超过一千万吨，它们的绝大多数是用转炉生产的。

随着钢的生产和消费的增加，废钢堆积过剩，以消耗大量废钢的平炉炼钢法应运而生。平炉炼钢法有生产高质量钢种的良好特性，适应了人类科学技术进步对钢铁工业发展的需要。20 世纪以来，无论是钢的品种质量，还是技术经济方面，电炉炼钢法都具有很强的竞争力。当前科学技术高速发展，技术装备更新加快，特别是超高功率电炉、水冷炉壁、辅助喷吹、强化加热等新技术的应用，进一步推动了电炉炼钢法的迅速发展。据统计世界电炉钢产量增长情况如下：

年	份：	1950	1960	1970	1980	1990
占总产量的百分比：		7.8	10.7	15.9	20	25~30

至今传统钢铁生产方法已经取得巨大进步，达到比较完善的程度，提供了品种齐全、质地优良、数量巨大的钢铁材料，为人类物质文明和社会步进做出了巨大贡献。然而与此同时，人们并没有放弃对非高炉炼铁法的追求和探索，其原因是：

① 传统钢铁生产工艺中冶金反应重复，见图 1-1。炼铁过程中，在把铁和氧分离开的

同时，还会使相当数量的 Si, Mn 和 C 等元素进入铁水，这样的铁水必须进行精炼，精炼后还要进行脱氧。因此，冶炼工艺复杂化，造成了不必要的能源和原材料的消耗。铁矿石直接还原法虽然没能实现矿石一步成钢，但它具有一步法的特征，没有冶金反应反复所带来的一些矛盾现象，还减少了因高温冶炼对冶金设备和耐火材料等方面带来的一系列困难。

② 高炉炼铁以焦炭为基础。从已查明的世界煤炭储备看，焦煤仅占煤总储量的 5%，其中以现行技术可经济开发的只有 30%~40%。由于长期的巨大消耗及焦煤资源分布不均，高炉炼铁法发展面临缺乏焦煤的困难。

③ 自然界中的铁矿物并不都是单独存在的，常有多种金属元素共生的情况。此外，有色金属尾矿，冶金厂和化工厂粉尘和含铁渣等，也都是重要的铁资源，应根据资源特点选择炼铁方法实现综合利用。如南非海维尔钢铁公司及新西兰钢铁公司采用回转窑—电炉炼铁联合流程成功地处理了含钒钛磁铁矿，回收铁和钒；澳大利亚西部钛公司处理钛铁矿生产人造金红石和铁红；希腊处理贫镍铁矿，同时回收铁和镍；日本开发了处理硫酸渣的新日铁 (KOH) 法，回收了铁和其它有价值金属元素；许多国家成功地解决了含铁粉尘利用的问题；我国也研究出综合利用攀枝花钒钛磁铁矿工艺，成功地实现了铁、钒、钛的回收。而这些含铁原料都是高炉炼铁无法处理的。

④ 科学技术的发展，对钢材质量和品种要求不断提高。电炉炼钢技术迅速发展又为优质钢生产提供了有效手段。然而，由于大量合金钢的生产和应用，回收废钢中杂质元素富集，严重危及废钢质量。美国 25 年内平炉炉料的废钢率由 66% 下降为 47%，碳素钢中 Cu 上升了 20%、Ni 增加了 1.2 倍、Sn 增加了 2 倍。苏联战后钢中 Cu 增加到 0.15%~0.25%，Ni 上升到 0.15%。由此可见，用纯洁的直接还原铁 (DRI) 代替被污染的废钢，改善钢的化学成分，生产优质钢种已是势在必行。

⑤ 传统钢铁生产工艺经济生产规模过大，工艺环节多，需要巨额投资，一座 $200 \times 10^4 \text{t/a}$ 级的钢铁厂需要 20~30 亿美元的投资。还必须有充足的原料供应和产品销售市场保证，技术要求高。小型非高炉炼铁法钢铁厂投资少、周期短、可因地制宜地利用当地原料、能源和确定产品方向，灵活性大，适应性强。

1.1.1 非高炉炼铁法的历史及现状

早在 18 世纪，直接还原法的设想就提出来了。在英国，1770 年申报了第一个直接还原法专利。1857 年提出了第一个完整的近代直接还原法 (Chenot) 的构思。1873 年建成第一座非高炉炼铁法装置，但不久便宣告失败。以后的 50 年发展缓慢，虽有数百种非高炉炼铁法见诸文献，但有价值的仅 40 余种，也只是处于试验研究和小规模试验生产阶段。本世

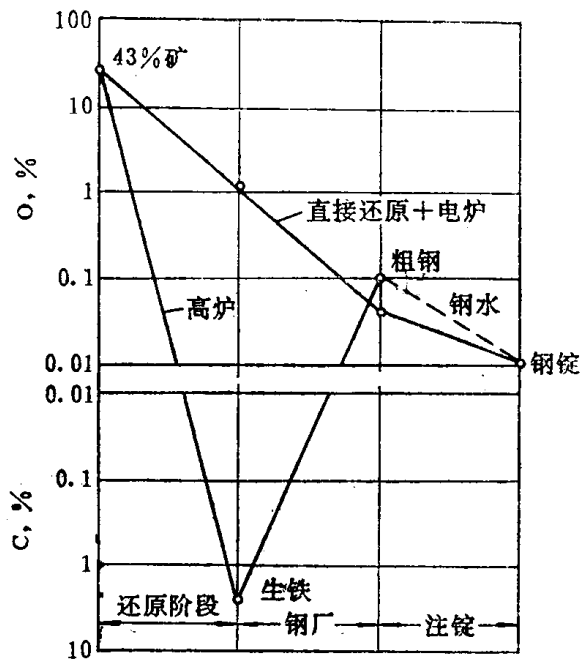


图 1-1 钢铁生产过程产品中氧量、碳量的变化

纪 20 年代开始, 由于电力工业发展, 大功率自焙电极矿热电炉的开发, 实现了工业化电炉炼铁, 从此非高炉炼铁法走向工业化生产阶段。1930 年德国克虏伯(Krupp) 公司开发了回转窑粒铁法 (Krupp-Renn), 用于处理低品位含硅脉石铁矿。它既是一种还原方法, 又是一种选矿方法, 曾一度在世界范围内得到大规模发展。1932 年瑞典人开发了维伯尔法 (Wiberg), 使生产海绵铁的直接还原法步入现代工业生产阶段。

到 50 年代, 非高炉炼铁法生产总量不足铁总产量的 1%, 主要工艺是电炉炼铁和粒铁法, 海绵产量仅为非高炉炼铁法产量的 5%。

60 年代石油和天然气大量开发, 为钢铁生产提供了来源丰富、价格便宜的新能源, 有力地促进了气体直接还原技术的开发; 选矿技术的进步, 为直接还原生产提供了脉石少、铁品位高的铁精矿原料; 氧气转炉的开发和电炉炼钢的迅速发展, 导致优质废钢供应紧张、价格上涨, 这些因素进一步推动了直接还原法的发展, 使多种有重大价值的直接还原法相继被开发出来。如 1957 年开发的 HYL 法, 特别是 1968 年开发的以 Midrex 法为代表的竖炉法。

70 年代, 在许多国家和地区建设了一批不同类型的直接还原厂, 规模从数万吨直到百万吨级, 并很快形成了直接还原—电炉炼钢新流程。世界海绵铁生产能力增加如图 1-2 所示。这一时期, 虽然资本主义国家经济萧条, 钢铁产量增长缓慢, 直接还原法生产能力却增长了 10 余倍。据不完全统计, 到 1984 年全世界直接还原设备能力已达 $2860 \times 10^4 \text{t}$, 见表 1-1, 实际直接还原铁产量近 $1000 \times 10^4 \text{t}$, 充分显示了直接还原法的巨大潜力。

以 Midrex 法为代表的竖炉法工艺成熟、操作简单、能耗低、生产率高, 在直接还原工艺中占主导地位。

该法在短短 10 年里, 实现了装置的系列化和大型化, 最大单机能力为 $60 \times 10^4 \text{t/a}$ (实际已达 $67.5 \times 10^4 \text{t/a}$), 目前正在设计生产能力为 $100 \times 10^4 \text{t/a}$ 的 1000 型装置。

Midrex 法生产初期用瑞典球团为原料, 限制了该工艺发展。目前可使用世界各地 35 种球团矿和块矿, 炉料搭配合理, 作业温度提高, 竖炉作业指标改善, 产品金属化率稳定控制在 86%~96%, 竖炉容积利用系数最高已达 $12 \text{t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 每吨直接还原铁能耗降至 10.63GJ 。

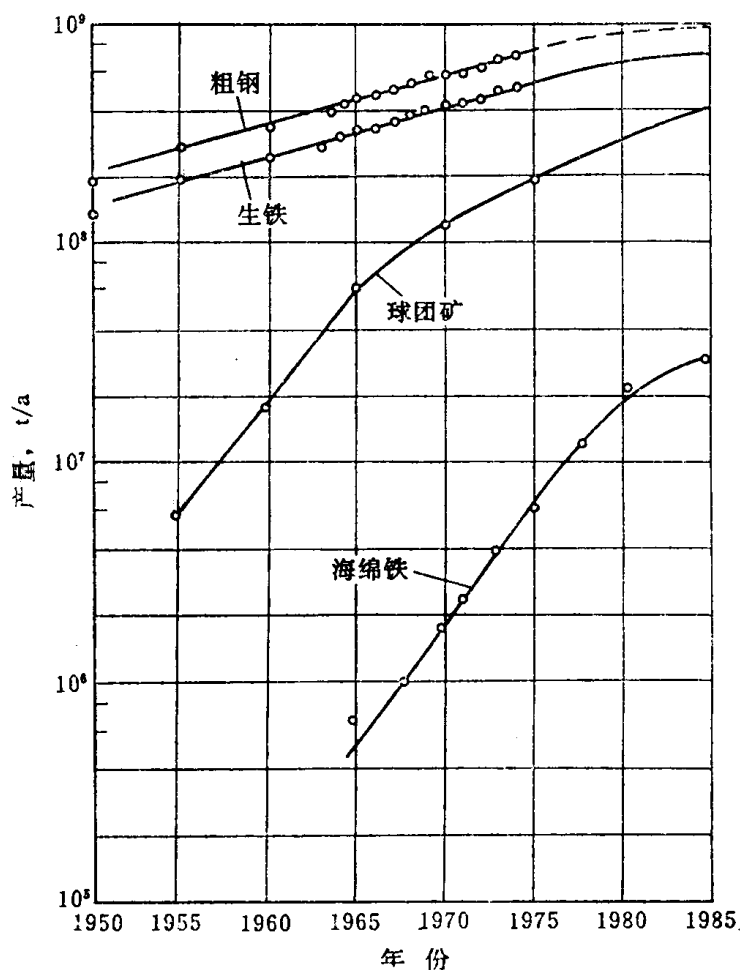


图 1-2 世界上海绵铁生产能力的提高与球团矿、生铁和粗钢产量的比较

表 1-1

各种直接还原法的生产能力 ($\times 10^4$ t/a)

年 份	气 体 还 原 法				回 转 窑 还 原 法				总 计
	HYL	Midrex	其 他	小 计	低还原度	处理工 厂废物	高金属化	小 计	
1970	90	30	30	150	100	10	30	140	290
1971	90	110	30	230	100	10	30	140	370
1972	90	110	60	260	100	40	30	170	430
1973	90	150	130	370	100	40	50	190	560
1974	170	150	130	450	100	80	50	230	680
1975	170	150	130	450	100	120	90	310	760
1976	170	180	210	560	100	120	100	320	880
1977	280	280	270	830	130	140	100	370	1 200
1978	530	370	300	1 200	130	140	100	370	1 570
1979	690	690	300	1 680	130	140	110	380	2 060
1980	920	730	300	1 950	130	140	120	390	2 340
1984	1 030	1 130	310	2 470	130	140	120	390	2 860
1990	预 测								3 500

HYL 法原为气体罐式法,为间歇式作业,操作简单、设备可靠,但能耗较高。近年来,HYL 法在总结原工艺优点的基础上,完成了用一座竖炉取代四座罐式反应器的重大改进。改进后的 HYL-III 型装置对碳量具有更高的适应性,可以进行高温高压作业,有效地缩短了还原时间,能耗已降至 10.84GJ/t。

固体还原法主要是回转窑法。目前工艺日益成熟,克服了技术难点,实现了作业正常化,得到了稳定的发展,年作业日已达 310~320 天,单机最大能力达 35×10^4 t/a。

回转窑法还成功地实现实现了多种共生矿、钢铁厂粉尘、含铁废渣的综合处理。不仅扩大了原料范围,并已成为含铁资源实现综合利用的重要手段之一。

大量生产实践证明,回转窑法可以使用性能和质量相差甚大的煤作为燃料和还原剂,并且能获得好的技术指标和经济效益。

针对回转窑法利用系数低、能耗高、还原用煤变化等多问题,研制成可控气氛的 ACC-AR 回转窑法,加之采用窑头喷吹高挥发分煤,窑尾设置埋入式喷嘴,窑尾废气废热回收、高挥发分煤的干馏及炉料预热预还原等措施,保证了回转窑的稳产、高产和低耗(12.1GJ/t)。

1.1.2 直接还原法分类

直接还原法已有百余年历史,提出过数百种,由于技术或经济的原因多数方法未经试验就被淘汰了,不少方法通过试验也夭折了。只有少数方法在吸收其他方法的优点、不断加以完善和改造后,发展成有工业价值的生产方法。按照它们所用还原剂类型分为:气体还原剂法和固体还原剂法;按反应器形式又可分为:竖炉法、回转窑法、流化床法和固定床法等。表 1-2 列出主要直接还原方法的分类。

1.1.3 直接还原法发展方向

直接还原法从 60 年代进入工业化阶段后,得到了迅速发展,各种工艺逐步完善、技术逐渐成熟、生产可靠、规模不断扩大。虽然它不能取代生产技术完备、产量大、效率高的高炉炼铁法,但已成为钢铁工业中不可缺少的组成部分。从钢铁工业发展看,直接还原法还会有很

表 1-2

直接还原法分类

还原剂种类	还原装置类型	方法名称	产品、用途	现状
固体还原剂	回转窑	SL-RN	海绵铁	工业化
		Krupp CODIR	海绵铁	工业化
		DRC	海绵铁	工业化
		Kawasaki (川崎)	粉尘、海绵铁	工业化
		SPM	粉尘、海绵铁	工业化
		SDR	粉尘、海绵铁	工业化
		KOHO	粉尘、海绵铁	工业化
	NIPPON	粉尘、海绵铁	工业化	
	固定床	Höganäs	海绵铁、粉末冶金	工业化
		Echeveria	海绵铁、粉末冶金	半工业化
旋转床	Heat Fast	海绵铁、粉末冶金	半工业化	
竖炉	Kinglor-Metor	海绵铁	工业化	
	Midrex-EDR	海绵铁	半工业化	
回转窑	ACCAR	海绵铁	工业化	
气体还原剂	竖炉	Midrex	海绵铁	工业化
		Armco	海绵铁	工业化
		Purofer	海绵铁	工业化
		HYL-Ⅱ	海绵铁	工业化
		NSC	海绵铁	工业化
		Wiberg	海绵铁	工业化
		流化床	HIB.(Nu-Iron)	海绵铁、炼铁
Fior	海绵铁		工业化	
H-Iorn	海绵铁		工业化	
Novalfer	海绵铁		工业化	
固定床	HYL-Ⅰ、Ⅱ	海绵铁	工业化	

大发展。特别是由于：

① 电炉炼钢具有节能、生产率高、污染少的优点。今后世界电炉钢比重将持续上升，到 1990 年电炉钢产量将增长 50%，占世界钢产量 30% 左右。

面临废钢需求量不断增加、废钢质量日益恶化的形势，直接还原铁必将是电炉炼钢的重要原料。它不仅能弥补优质废钢的不足，还有扩大废钢使用范围、改善电炉炼钢经济效益的作用。因此，对直接还原铁需求的增长必然极大地促进直接还原的发展。

② 发展中国家对钢铁需求量的迅速增长，要求加速本国钢铁工业的发展。近年来，发展中国家的钢产量和消费量在世界钢产量和消费量中所占比重增长情况如下：

年份	钢产量比例(%)	消费量比例(%)
1960	5	9.0
1977	11.3	17.5
1985	15.5	24.0

发展中国家发展钢铁工业的特点是：立足本国资源、能源条件。

直接还原法可以不用焦炭炼铁，以天然气、石油、非焦煤等为能源。如中东、拉美地区拥有丰富的天然气、石油资源，为发展直接还原提供了充分的有利条件。对缺少焦煤、石油

和天然气的地区，可大力发展非焦煤为能源的固体还原剂直接还原法，如印度、南非、东南亚地区等。

可以根据自己的资源条件选择适宜的直接还原工艺方法，有效地处理多金属共生矿、钢铁粉尘和含铁尾渣。实现资源综合利用，也有利于环境保护。

③ 建立大型钢铁厂需要巨额投资，要有充足的原料、能源资源以及很大的销售市场，技术水平要求也高。

直接还原法的工业化，形成了直接还原—电炉炼钢流程，该流程很适于发展中国家和地区性钢铁工业。它可以根据本地区能源、资源条件确定适宜规模，建设周期短，生产灵活，易于根据市场需求调节产品和生产能力，投资省（大约为大型企业的 $1/3 \sim 1/2$ ），这对于发展中国家更具有吸引力。近些年来，发达国家中、小钢铁厂发展也甚为迅速，1960年只有60~80家，1979年达275家，1981年又增加到350家，其产量占世界钢总产量的10%~12%。在日本，小钢厂产量占全国钢产量的26.7%。

由此可见，随着生产需要、能源结构以及钢铁工业结构变化，直接还原法必将根据原料、能源变化和技术、经济条件开创自己的未来，其发展方向是：

① 加速煤基直接还原的发展

从能源观点看，世界上天然气和石油资源同煤焦一样，储量不多、分布不均，又是化工的重要原料，据预测到2000年将消耗殆尽，未来能源将以煤为主。70年代世界性石油危机，天然气、石油价格大幅度上涨，迫使人们考虑以天然气为一次能源的气体还原法的经济性。炼铁又是能源消耗大户，除在拥有丰富天然气资源的地区，气体还原法还能得到较大的发展外，在世界范围内它将受到很大限制。相反，以非焦煤为能源的直接还原法将有广阔的前途，因此不断完善现有煤基直接还原法和开发新的煤基直接还原法是十分有意义的。

② 不断扩大原料来源

生产炼钢用直接还原铁要求高品位原料。随着大规模的开发，富矿资源逐渐减少，必须进一步发展选矿、球团生产技术，扩大贫矿资源的开发利用。

除单纯铁矿资源外，多金属共生矿、有色矿尾矿、冶金化工含铁废物和粉尘都是重要的铁资源，因此应发挥直接还原技术特长，搞好各类资源综合利用，回收有用元素。

③ 扩大单机生产能力

与高炉炼铁法的竞争中，生产规模小，仍是直接还原法的弱点，目前直接还原法的单体设备生产能力达到500~2000t/d。竖炉法产量潜力较大，回转窑法继续扩大炉容稍有困难，但可以从改进窑体结构和作业技术来提高生产能力。

④ 加快煤的气化技术的研究

气体还原法的优点是能耗低、生产率高。因此，将煤气化技术用于气体还原竖炉，用煤气取代天然气，是煤基直接还原的重要方向之一。目前已开发的煤气化工艺不是技术上行不通，而是生产量小、投资大、生产成本低。因此突破煤的气化技术，不仅能使气体还原法在盛产天然气地区得到发展，也会在煤炭资源丰富的地区得以广泛推广。

1.1.4 熔融还原法的兴起

直接还原法步入工业生产阶段后，得到迅速发展，已成为钢铁工业中不可缺少的一部分。然而并未达到预期的目标，其原因在于直接还原法中发展最快、工艺最成熟的气体还原

剂法立足于以天然气和石油为能源，70年代能源危机，石油和天然气价格上涨，使其生产和发展受到严重冲击。通过世界矿物能源储备和消耗的分析，人们已明确地看到，未来钢铁工业的能源战略必须是以非焦煤为基本能源。气体还原剂的直接还原法只能有限地、在具有丰富油、气资源的地区或国家发展。另外直接还原法所要求的富矿和精矿的获得也不容易。由此可见，直接还原法只能作为传统高炉炼铁法的一个补充，特别是在特殊钢和优质钢的生产中发挥其特殊作用。

熔融还原法，能克服高炉炼铁法和直接还原法的弱点和发展中遇到的困难，使钢铁生产摆脱对昂贵焦炭以及天然气和石油的依赖，立足于丰富的非焦煤；可以直接使用粉矿（或块矿），省去繁杂的原、燃料加工工序；减少污染；节省工艺重叠的能量消耗；在铁渣熔点以上进行高温作业，可实现渣铁分离和去除杂质的目标，液态铁水适用于转炉精炼；工艺过程简化，是一种高效低耗的炼铁新方法。

熔融还原法是本世纪20年代提出的。1924年，Hoesch钢铁厂提出在转鼓形回转炉内用碳和氧还原铁矿石得到铁水的方案。以后开发有Stara法、Sturzeberg法，均未成功。60年代瑞典冶金学者S.Ekeforp提出了熔融还原理论，明确以炭做唯一能源，在熔融状态下依靠 $C \rightarrow CO$ 反应实现铁氧化物的还原，并依靠 $CO \rightarrow CO_2$ 的燃烧放热解决熔炼过程所需要的热量。

50年代研究开发的熔融还原法大多设想在一个反应器内完成全部熔炼过程，称一步法，如Dored法、Retored法、CIP法、Ekeforp—Vallak法等。但由于还原反应产生的CO的燃烧热不能迅速传递到吸热的还原反应区，迫使熔炼中止而告失败。70年代以来掀起了熔融还原研究的高潮；普遍采用了两步法原则：即将整个熔炼过程分成固态预还原和熔态终还原两步，分别在两个反应器内进行。预还原装置充分吸收了直接还原法的成功经验，有回转窑、流化床和竖炉等形式，其中以流化床和竖炉型为多。终还原装置为：吸收炼铁高炉能量利用好、作业稳定、寿命长的竖炉型终还原装置；炼钢转炉高温熔池传热传质快、反应速度高的转炉型终还原装置；此外还有电炉型终还原装置。至今，KR(COREX)法、Plasmasmelt法、Inred法、Elred通过了较大规模的半工业或工业试验；川崎法、住友法、COIN法、MIP法、CGS法和CIG法进行了单环节或联动半工业试验。值得提出的是KR法已在1985年完成 $6 \times 10^4 t/a$ 规模工业试验基础上，在南非ISCOR公司建造了一座 $30 \times 10^4 t/a$ 的工业生产装置，1989年投入生产。

60年代我国就开始了转炉型熔融还原试验研究。近几年来，国内广泛地开展了熔融还原技术探讨和基础研究，相继提出和研究了多种熔融还原方案，并取得了许多有价值的阶段成果。在集中国家财力、人力、加速熔融还原技术的基础上，完全有可能较快的进入工业规模试验和实用阶段。

1.2 我国非高炉炼铁的发展前景

1.2.1 我国非高炉炼铁的基本情况

非高炉炼铁在我国已有几十年历史，30~40年代，我国鞍山、抚顺和大连曾使用过回转窑粒铁法，回转窑海绵铁法和竖炉海绵铁法。

50年代后，对非高炉炼铁法开展了广泛的试验研究。1971年肖山铁厂完成了回转窑生

铁—水泥法(Basset)试验; 1974年在广东梅县粒铁法试验成功,建立了回转窑粒铁—电炉炼钢生产流程,成为地方钢铁工业的一个范例; 1975年在成都钢铁厂建造了以天然气为能源的 0.2m^3 竖炉,进行了攀枝花钒钛磁铁矿生产海绵铁和回收钒、钛的研究,随后又建造了 5m^3 竖炉; 1975年在广东韶关完成了水煤气 0.5m^3 海绵铁竖炉试验, 1976年在佛山建造了 100t/d 级水煤气竖炉; 1976年在河北沧洲、以后又在山东枣庄建造了用化肥尾气做还原气的 1t/d 级流化床海绵铁试验装置。

此外,广大冶金工作者从我国能源和铁矿资源实际出发,对以非焦煤为能源的回转窑直接还原法进行了长期的研究。从70年代开始,先后在北京、杭州、福州、云和及西昌地区进行了规模不等、旨在利用本地原燃料的回转窑直接还原半工业和工业试验。试验中除使用高品位精矿球团生产直接还原铁外,还用含铁粉尘生产高炉用还原炉料,去除了含有的Pb、Zn等有害元素;用轧钢铁鳞生产出粉末冶金用海绵铁球团。70年代针对攀枝花钒钛磁铁矿综合利用进行了多种工艺方案的试验研究,并在半工业试验中取得了综合回收铁、钒、钛的良好效果,为攀枝花资源综合开发开创了新途径。

我国对直接还原产品的使用也做了大量试验研究。1974年广东梅县将粒铁用做电炉炼钢原料投入生产。在首钢、福州、杭州等地进行了多次直接还原铁炼钢试验,证明直接还原铁是电炉的优质原料,适于生产各种牌号钢,电炉作业得到优化,通过轧材质量检测,各种性能均很理想。1980年在杭州钢铁厂中型高炉进行了使用金属化炉料的试验,结果表明:炉料中金属铁量每增加10%,高炉产量提高10%~11%,焦比下降9%~10%。

长期的研究实践中,在回转窑直接还原工艺技术和理论方面也取得了大量有价值的成果。其中工艺技术方面有:采用大填充率作业;强化和改善回转窑热交换和还原过程;用无烟煤、烟煤或褐煤做还原剂的工艺技术;选择适合原料特性的脱硫方法;制定不同炉料的温度和还原作业参数;确定适宜的窑体结构参数等。理论研究方面有:回转窑物料运动规律及偏析、回转窑内热过程、回转窑内还原过程、回转窑结圈机理与防止以及回转窑工艺控制原理等。

20多年来,我国始终坚持的原则是:立足非焦煤,改变现在钢铁能源结构,开发适于我们自己的直接还原法;立足于丰富的多元素共生矿综合利用,兼顾对含铁尾矿、尘泥的合理利用;为改善钢材质量和发展优质钢生产提供原料,减少进口、节省外汇。所有这些,为我国发展直接还原做好了技术和理论准备,也培养和锻炼了一支科技队伍。

1.2.2 发展非高炉炼铁的可行性

非高炉炼铁在我国是否有发展前途?发展什么工艺?这要从我国实际条件出发,应从以下几个方面考虑:

1. 能源状况

我国能源十分丰富,煤炭、石油、天然气和水电资源的蕴藏量都很多。

初步探明煤炭资源储量为 $5.4 \times 10^{11}\text{t}$,煤炭品种齐全,可供炼焦用煤约占39%,褐煤和无烟煤各占14%和17.5%。但煤炭资源分布很不均匀,华北地区煤炭资源占全国资源的三分之二,西南地区占10%,东北和西北地区分别占9%和8%,而华东和中南地区只占6.5%和3.7%。

从煤种分布看就更为突出。焦煤总储量的62%集中在华北地区,仅山西省就占有全国

的一半以上，其他地区储量较少，特别是福建、广东、广西、浙江等省。显然在这些地区采用高炉炼铁法是有困难的。褐煤大部分集中在内蒙，在东北、华南和西南地区也都有较大储量。无烟煤资源则分布在全国各个省份。

丰富的煤炭资源决定了我国未来能源将以煤为主。焦煤分布极不均匀的特点又决定了我国不应该采用单一的高炉炼铁法。即使由国家组织协调，但交通运输能力也难以承担，也会提高生铁成本。大量实践证明，过去被认为是劣质煤、仅能用于发电的褐煤是回转窑直接还原的适宜还原剂。因此储量大、分布广泛的非焦煤资源为我国发展煤基直接还原提供了充足的廉价能源。

我国石油和天然气资源陆续被发现，前景很好，很可能成为一个油气资源丰富的国家，但目前开采规模不大，而石油和天然气还是主要的化工原料。从我国未来能源构成来看，天然气和石油不可能广泛用做直接还原炼铁能源。另外，天然气的使用还要受到其地理分布的限制。

我国水电资源十分丰富，可开发的水力资源约 $370 \times 10^6 \text{kW}$ ，但分布很不平衡，80% 分布在川、滇及西北地区，目前全国水电装机容量不到 $20 \times 10^6 \text{kW}$ ，只占总资源的 6% 左右。由于开发周期长，投资大，水电近期不可能成为我国的主要能源。从长远看，在西南、西北地区水电会发展为重要能源，对发展直接还原—电炉炼钢流程极为有利。

根据我国能源储备情况和能源政策，今后我国钢铁工业的发展除以高炉—转炉流程为主外，应积极发展煤基直接还原工艺，充分发挥遍布各地的非焦煤资源的作用。由于我国油、气资源并不十分丰富和分布所限，只能在极少数地区实施气体直接还原法。

2. 铁矿资源

我国铁矿资源居世界第三位，仅次于苏联和巴西。但富矿少，贫矿、共生矿多，另一特点是分散、不利开发。此外还有相当数量的有色金属尾矿、钢铁厂粉尘、化工厂含铁废物等也都是重要的含铁资源。

充分利用多元素共生矿和贫矿以及其他含铁资源，寻求恰当的工艺方法，回收各种有用金属元素，实现综合利用，这不仅有巨大的经济价值，从充分利用资源，发挥资源优势来说，也具有特殊战略意义。以往就是由于没有找到合适的综合利用工艺而造成大量有用矿物流失，浪费极大。

国内外研究表明，回转窑直接还原法是目前处理共生矿、难选矿，实现综合利用的有效方法之一。近些年我国在这方面也进行了大量的工作，取得的成果是：

采用回转窑直接还原工艺与水法、火法冶金方法有机组合，成功地处理了攀枝花钒钛磁铁矿，回收了铁、钒、钛三种元素，实现了资源综合利用；

回转窑—电炉熔分工艺用钛铁矿为原料制取高钛渣、生产高档钛白或人造金红石。我国有丰富的钛铁矿资源，应使其得到更充分的利用；

钢铁厂含铁粉尘的处理一直是冶金厂的老大难问题，既造成了资源浪费，又污染了环境。近年来日本、联邦德国等国都采用回转窑直接还原工艺，成功地回收了有用金属，并为高炉提供了优质原料，改善了高炉技术经济指标。我国已成功用轧钢铁鳞做原料生产出粉末冶金铁粉，用转炉、平炉尘泥生产出供优质钢生产用的高金属化海绵铁球团。

3. 废钢资源

炼钢中多用废钢可以节能、降低成本，因此提高炼钢废钢比是提高经济效益的重要措

施。1971~1979 年我国与国外吨钢消耗废钢情况对比如下：

国 别	美 国	日 本	联邦德国	美 国	中 国
废钢消耗(kg/t钢)	497~556	277~349	382~413	521~568	277~313
废钢比(%)	43.7~47.1	25.6~30.7	35.9~38.0	47.0~50.0	24.6~28.3

与主要产钢国相比，我国的废钢比低 10%~20%。

今后随着成材率、连铸比及炼钢废钢比的提高，废钢供应会越来越紧张，质量亦要下降。我国 1973~1989 年间连铸比的增长情况如下：

年 份	1975	1980	1985	1986	1987	1988	1989
连铸坯产量($\times 10^4$ t/a)	83	230	501	622	724	832	1004
连铸比(%)	3.5	6.2	10.2	11.9	12.9	14.7	16.4

连铸比每提高 1%，成材率提高 0.44%。以年产钢 6000×10^4 t 计算，仅此一项，废钢量将减少 63×10^4 t。据初步预测 1990 年我国约缺废钢 300×10^4 t，到 2000 年缺废钢 500×10^4 t。

以 1985 年为例，1985 年进口废钢 70×10^4 t，当时国外还原铁价为 90~130 美元/t，废钢价为 90~120 美元/t。据粗略估算，当时用进口矿为原料，采用回转窑直接还原法生产直接还原铁的成本为 175 元/t，折合美元为 60.28 美元/t。远低于国际废钢价，也比当时的国内废钢价(240 元/t)要低。由此可见在国内发展直接还原是十分有利的，可为国家节省外汇，降低炼钢成本。

另外，不应该把直接还原铁看做一般的废钢代用品，因为它成分稳定，夹杂元素少，硫、磷低，是理想的特殊钢原料。实践证明，用直接还原铁生产的高级特殊钢材，经过热处理后，其韧性比用其他原料生产的特殊钢好得多。特别是对高硬度、高比强度材料，其效果就更加明显。如瑞典用直接还原—电炉炼钢流程生产的高级特殊钢，质量誉满全球。苏联发展直接还原炼铁主要是为了发展优质钢生产。另外如我国某地计划引进石油管生产项目中，为了保证钢管质量，要求炉料中配加 30%~50% 的直接还原铁。

4. 钢铁工业布局的改善

由于原料资源、能源条件和技术经济发展的影响，造成我国钢铁工业布局很不均衡。某些地区过分集中，许多省份又十分薄弱，影响到工农业经济发展。立足于各地的非焦煤能源和小型、分散的铁矿资源，建立起以回转窑为骨干的小型钢铁厂是十分必要的。既可以充分发挥地区有限资金和资源的效用，又能为促进地区性经济发展提供充分的钢铁材料。

特别是近几年，我国实行开放改革政策，许多地区正在或将要兴建一批中、小型电炉钢厂。这些钢厂的建成势必加剧国内废钢短缺的形势，进口废钢又受到国际废钢市场的控制。因此从客观上宜利用本地能源和资源发展直接还原法。

5. 工艺技术成熟性和可靠性

任何一种新工艺被工业生产采用，不仅看它是否具有基本的生产条件，还必需考察工艺本身的技术成熟程度和可靠性。因为它决定了这种工艺技术是否能被采用，还决定了能否长期地、经济地进行生产。这对于资金投入和生产规模较大的钢铁工业来说，就显得更为突出和重要。

直接还原法和熔融还原法是冶金生产技术发展的必然。就目前情况看，它们的技术成熟程度、可靠性和生产能力等诸方面都还不能取代高炉炼铁，短期内只能成为高炉炼铁法的

补充。

直接还原法开发较早，经历了工业化生产的考验，工艺技术日益成熟。其中气体还原竖炉法，在生产规模、生产效率、能源消耗、装备水平和产量质量等方面都达到了相当高的水平，具有较强的竞争能力。煤基直接还原法，70年代后期经过对还原用煤的选择、合适热制度和还原制度的确定、原料和还原剂性质及加入方式以及废热回收技术的采用等措施后，使回转窑直接还原法进入了稳妥发展阶段。除生产规模较小外，生产效率、设备作业、产品质量、能量消耗等方面取得很大进步。总的看来直接还原法在钢铁工业中开始起着愈来愈重要的作用，地位日益巩固。

熔融还原法开发较晚，除个别方法外，多数还处于研究开发阶段。但由于它以便宜的、储量丰富的非焦煤为能源；可以使用粉矿或块状原料；工艺过程可控性好，对原燃料适应性强；液态铁水，适用于氧气转炉精炼；可使用高密度能量、传热传质好，适于强化生产；工艺过程简单、能耗低、投资少；适于小型化生产等一系列优点，已引起了世界范围的重视。人们预测，在不久的将来熔融还原会成为高炉法的竞争对手。

通过上述几个方面的分析，使我们看到：

我国拥有丰富的焦煤资源，高炉炼铁法是生产铁的主要手段。但由于焦煤分布不均衡，在我国单一发展高炉炼铁也是不合理的，存在着许多实际困难。然而全国各地分布有丰富的非焦煤资源，为发展非高炉炼铁造成了良好的能源条件，因此加速我国非高炉炼铁的发展对我国钢铁工业的发展有着积极而重要的意义。

从世界范围看，直接还原法已经跨越了试验研究阶段，进入到技术成熟、工艺装置可靠时期，达到了相当的生产规模和水平，形成了独立的直接还原—电炉炼钢流程。与高炉—转炉流程相比具备了相当的竞争能力，在钢铁工业中占据了一定地位。熔融还原法虽然有更多的优点，但目前尚处于开发试验阶段，不能广泛地应用于工业生产。从这点看，当前我国应以推广和发展直接还原法（包括天然气丰富的地方发展气体还原法）为主，作为钢铁工业发展的补充。另一方面则应该集中人力、财力加速熔融还原法的开发研究，争取尽快进入工业应用阶段。

据根我国铁矿资源特点，非高炉炼铁法应着重多元共生矿的综合利用，适于地区性小型开发，以及含铁尾渣和粉尘的处理。

随着我国钢铁工业的发展，特别是一些中、小型电炉钢厂的建设，废钢短缺形势必将加剧，特别是好废钢不足，因此应加速直接还原法的发展，弥补废钢不足、减少进口，促进特殊钢生产的发展。

四个现代化的加速进行，国家资金严重不足。因此，吸收地方分散资金，发挥积极性，加速建设一批直接还原—电炉炼钢—轧钢流程的中小型钢铁厂，满足地区对钢材的急需，促进地方经济发展，是积极而稳妥地加速发展我国钢铁工业的方向。

1.3 非高炉炼铁法的主要技术经济指标

非高炉炼铁是与高炉炼铁比较而存在的，种类繁多。为了评价和考核其优劣常需要统一的技术指标，其中常用的有：

设备效率方面:

① 单位容积利用系数: 与高炉冶炼有效容积利用系数定义相同, 即每立方米反应器有效容积每天的产品量, 即

$$\eta = \frac{Q}{V_u}, \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

式中 Q —— 产品日产量, t/d;

V_u —— 反应器有效容积, m^3 ;

② 单位容积出铁率: 每立方米反应器容积每天生产产品中的金属铁量。因非高炉炼铁法的产品含铁量差别很大, 可用它补充容积利用系数的不足。这里

$$\eta_{Fe} = \eta \cdot \eta_M, \text{ t}_{Fe}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

式中 η_{Fe} —— 单位容积出铁量;

η_M —— 产品金属化率, %。

③ 矿石处理量: 当选用的矿石品位差别很大时, 可用反应器每天处理的矿石量代替产量。

能量利用方面:

④ 煤气利用率: 参与还原反应的气体与还原反应生成气体之比:

$$\eta_g = \frac{\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}}{\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}}, \%$$

此指标表示还原气化学能的利用程度。CO 和 H_2 的利用率分别表示如下:

$$\eta_{\text{H}_2} = \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}}; \quad \eta_{\text{CO}} = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2}$$

式中 $\text{H}_2, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ —— 分别表示相应成分的百分浓度。

还原气利用率指标有时也用来表示还原气质量, 此时称之为还原气氧化度。氧化度愈高则还原气质量愈差。

⑤ 能耗: 或称总能耗。非高炉炼铁法使用燃料的种类很多, 无法用燃料比这一标准。故此用各工艺过程使用的一次能源的总发热值来表示工艺能量消耗水平。它包含了用于反应过程的化学能消耗、热量消耗、流化载体消耗及用于还原气重整转化的全部热量消耗等在内。

产品质量方面:

⑥ 产品金属化率: 指所得产品中金属铁量与含全铁量之比, 即表示了产品被还原到金属铁的程度, 即

$$\eta_M = \frac{\text{Fe}^\circ}{T_{Fe}}, \%$$

式中 Fe° —— 产品中金属铁含量, %;

T_{Fe} —— 产品中总铁含量, %。

⑦ 产品还原度: 表示在还原过程中总失氧率, 即

$$R = \frac{\text{失去氧量}}{\text{矿石中铁氧化物总氧量}} \times 100\%$$

上面所列各项指标并不能全面评价各种方法的优劣。随着原、燃料的差异和政治、经济等因素的变化, 考察因素也应多方面和因地制宜。