

非高炉炼铁 工艺与理论

(第2版)

方觉 等著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

非高炉炼铁工艺与理论

(第2版)

方 觉 等著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2010

内 容 提 要

本书第1版于2002年出版,已不能满足当前形势的需要,很多内容亟待更新和增补。第2版是在原书结构的基础上,增加和修改了部分内容,将近几年来非高炉炼铁生产的新技术、新工艺进行了补充,并对有些章节进行了修改。

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进行了详细的论述和讨论。

本书可作为钢铁冶金专业科研和教学的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非高炉炼铁工艺与理论/方觉等著. —2版. —北京:
冶金工业出版社, 2010. 1

ISBN 978-7-5024-5103-5

I. ①非… II. ①方… III. ①直接炼铁 IV. ①TF55

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第215562号

出 版 人 曹胜利

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 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 杨秋奎 王之光 美术编辑 李新 版式设计 葛新霞

责任校对 石静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5103-5

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2002年1月第1版, 2010年1月第2版, 2010年1月第4次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.75印张; 307千字; 191页; 5501-8000册

39.00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 王杏娟 石 焱
时国松 张志霞

第2版前言

强大的工业是一个国家强盛的基础，钢铁工业则是基础的基础。炼铁是钢铁工业不可缺少的一环，即使是电炉工艺使用的废钢也来源于铁。高炉炼铁是炼铁工业的主体工艺，它的主要燃料是焦炭。目前，焦炭的供应存在两大问题：其一，焦煤资源的分布很不均匀，世界上很多地区甚至大部分地区的焦煤储量很小，甚至根本没有；其二，焦煤资源丰富地区的焦炭供应也因钢铁工业的发展而日趋紧张。钢铁工业的发展需求与焦炭供应的紧张是研究和发展非高炉炼铁工艺的基本动力。因此，非高炉炼铁工艺的基本特征之一就是不用或仅少量使用焦炭。

炼焦工业是环境污染的主要源头之一，而焦炭则主要应用于高炉炼铁。因此，使用非高炉工艺代替高炉工艺可有效地消除或减少环境污染源。

我国是焦煤资源丰富的国家，因此非高炉炼铁工业发展比较困难。过去虽然有一些小规模的生产，但大多数均不能经受住时间的考验。直至宝钢C3000熔融还原工程建成投产我国才有了真正意义上的非高炉炼铁工业。但要使非高炉炼铁在我国得到发展和推广还需要进行大量的研究和开发工作，其中最重要的是将炼铁能耗和成本降低至能够与高炉竞争的水平。

本书第1版出版于2002年，出版后受到读者的认可。非高炉炼铁工业自本书出版以来发生了很多变化，其中最引世人注目的有COREX流程第一座C3000装置在中国的建成投产、FINEX流程F1.5装置的建成投产以及流化床直接还原流程FINMET代替FIOR法实现工业化等事件。因此，对《非高炉炼铁工艺与理论》一书有必要适时补充新内容，以满足读者需求。

第2版是在原书结构的基础上，将近几年来非高炉炼铁生产的新技术、新工艺进行了补充，并对有些章节进行了修改，修改内容如下：

(1) 对非高炉炼铁的资料进行了更新；

(2) 根据 COREX 的生产实践对相关设备的运行参数进行了修订；完善了重要参数的计算方法；增添或强化了对熔融还原流程优化的论述；

(3) 增添了对 FINMET 流程、FINEX 流程的介绍；对 COREX 流程的论述进行了较大幅度的修改。

作者衷心感谢读者对本书的鼎力支持，希望第2版内容能够更好地满足读者在科研、教学或生产中的需要。

方 觉
2009年8月

第 1 版前言

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，目前唯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 是唯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	8
1.3.3 非高炉炼铁的发展环境	12
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	27
2.3 动力学基础	32
2.3.1 化学反应动力学基本参数	34
2.3.2 传质基本参数	36
2.3.3 铁矿石还原与缩核模型	38
2.3.4 气固催化反应与还原气的制取	42
2.3.5 煤的气化	47
2.4 还原气及其利用率	55
2.4.1 还原气的热力学利用率	55
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	59
2.4.4 决定气体利用率的主要因素	60
3 重点设备及工艺分析	63
3.1 还原竖炉	64
3.1.1 温度分布	64

3.1.2	能耗分析	68
3.1.3	压力分布	73
3.1.4	竖炉还原过程中的矿石强度	74
3.2	还原流化床	75
3.2.1	流态化现象及流化床类型	75
3.2.2	流化参数	77
3.2.3	黏结失流问题	81
3.2.4	还原速度与还原气利用率	86
3.3	煤炭流化床与熔炼造气炉	88
3.3.1	熔炼煤的有效热值	89
3.3.2	矿石熔炼热	92
3.3.3	煤耗与产气量	94
3.3.4	与还原竖炉的配合	95
3.3.5	与还原流化床的配合	97
3.3.6	原燃料性质对燃料消耗的影响	98
3.3.7	流程优化	102
3.4	铁浴炉	110
3.4.1	铁浴炉形式	110
3.4.2	影响熔炼煤有效热值的参数	111
3.4.3	二次燃烧对有效热值的影响	112
3.4.4	与还原单元的配合	113
3.4.5	煤气物理热的利用	113
4	直接还原流程	116
4.1	重点流程 MIDREX	116
4.1.1	流程概述	116
4.1.2	MIDREX 原料	117
4.1.3	还原竖炉基本结构及运行概况	119
4.1.4	气封系统	119
4.1.5	还原段	120
4.1.6	冷却段	121
4.1.7	MIDREX 装置与能耗	123
4.1.8	MIDREX 重要工艺参数	125
4.1.9	流程分支	126
4.2	BL	128
4.2.1	造气系统	128
4.2.2	还原气加热系统	128
4.2.3	还原系统	128
4.2.4	尾气清洗系统	130

4.2.5	原燃料性质	130
4.2.6	主要工艺参数	131
4.3	其他竖炉直接还原流程	132
4.3.1	HYL III (Energiron)	132
4.3.2	ARMCO	133
4.3.3	PUROFER	135
4.3.4	WIBERG-SÖDERFORS	137
4.3.5	PLASMARED	138
4.3.6	EDR	138
4.3.7	KINGLOR METOR	139
4.4	流化床流程	140
4.4.1	FINMET	140
4.4.2	FIOR	141
4.4.3	H-IRON	143
4.4.4	NU-IRON 和 HIB	144
4.4.5	NOVALFER	145
4.5	反应罐流程 HYL	146
4.6	回转窑流程	147
4.6.1	SL-RN	147
4.6.2	CODIR	149
4.6.3	ACCAR	150
4.6.4	SPM	151
4.7	外热反应罐流程 (HÖGANÄS)	152
4.8	转体炉流程	153
4.8.1	INMETCO	153
4.8.2	FASTMET 及其衍生流程	154
5	熔融还原流程	156
5.1	重点流程 COREX	156
5.1.1	流程概述	156
5.1.2	原料	157
5.1.3	熔炼造气煤	159
5.1.4	铁矿还原	162
5.1.5	熔炼与造气	165
5.1.6	脱硫与熔剂在竖炉中的分解	169
5.1.7	冷却气的使用及碱金属循环	171
5.2	其他三段式流程	171
5.2.1	FINEX 流程	171
5.2.2	川崎法	172

5.2.3 XR 法	174
5.2.4 SC 法	175
5.3 铁浴一步法流程 ROMELT	177
5.4 铁浴二步法流程	178
5.4.1 COIN	178
5.4.2 HISMELT	179
5.4.3 AISI	181
5.4.4 DIOS	182
5.5 电热法流程	184
5.5.1 ELRED	184
5.5.2 INRED	186
5.5.3 PLASMAMELT	188
5.5.4 COMBISMELT	189
参考文献	191

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关系。这一点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时间的考验，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，但它们的产品不同。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。

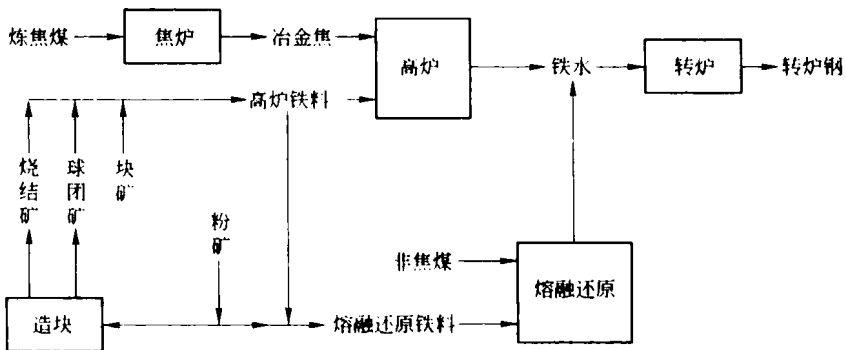


图 1-1 熔融还原与高炉-转炉冶炼流程的关系

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

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，但已充分注视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，电炉炼钢的主要原料是废钢，主要能源是电力，产品是电炉钢。

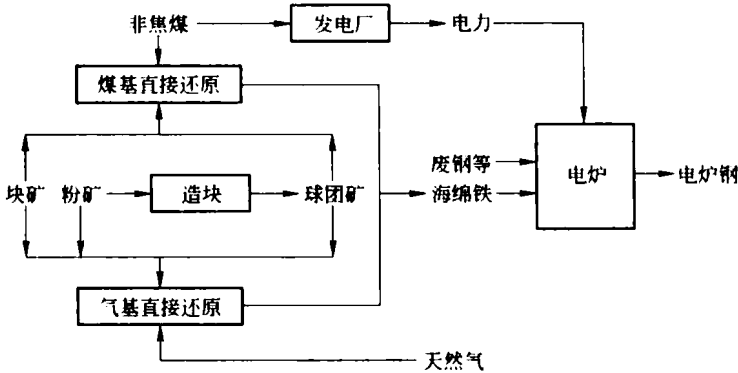


图 1-2 直接还原与电炉炼钢的关系

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。

如果适当提高直接还原生产中的温度，使产品处于半熔化的状态，则可实现或部分实现渣铁分离。得到的产物是粒状的金属铁，称为粒铁。粒铁流程在历史上曾得到过小规模的发展，但由于成本和技术上的原因逐渐被直接还原法代替，目前已经不存在工业化的生产。随着近几年来转体炉被引进直接还原领域，粒铁法又有恢复活力的趋势。最明显的例子就是 ITmk3 流程的开发和大型工业试验的实施。粒铁的性能优于海绵铁，但成本较海绵铁高。粒铁法不是本书的重点，仅在讲述转体炉直接还原流程时加以适度的介绍。

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使用非焦煤为主。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较容易的事情。

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。宝钢对 COREX 熔融还原技术的引进及 C3000 装置的投产可以说是我国在非高炉炼铁事业方面的第一个突破性进展。

1.2 非高炉炼铁的分类

1.2.1 分类标准

首先我们应当为非高炉炼铁流程作出一个明确的定义：

不使用高炉，使用非金属铁原料生产金属铁产品的流程称为非高炉炼铁流程。

在非高炉炼铁的范畴内，产品性质是分类的最重要依据：生产铁水的流程是熔融还原流程；生产海绵铁的流程是直接还原流程；生产粒铁的流程是粒铁流程。以此为标准，首先可将具有工业化生产规模的流程划分为熔融还原和直接还原两大类（或许在不久的将来还要加上粒铁流程）。

次一级的分类标准并不固定，人们往往根据论述的重点和兴趣来进行流程的划分。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。

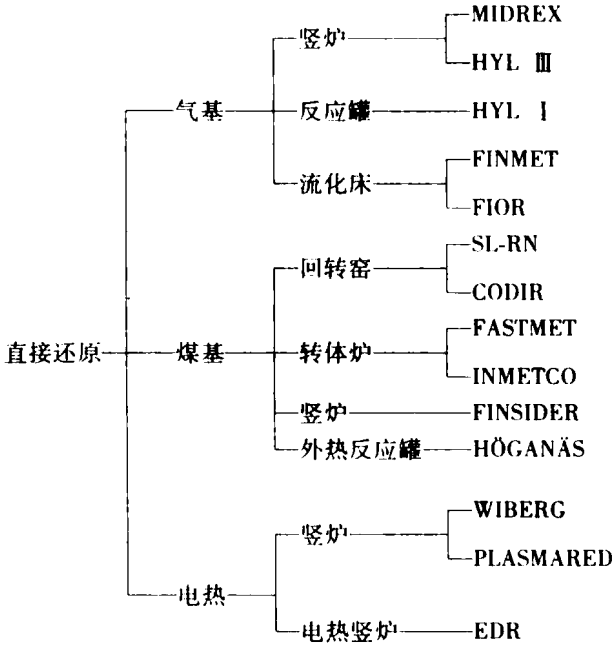


图 1-3 直接还原分类

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定床非连续生产方式，正处于逐渐被淘汰的过程中。第三种是流化床，目前的唯一代表是 FINMET 流程。

煤基直接还原中只有回转窑流程拥有可观的生产能力。代表性的回转窑流程是 SL-RN 法。回转窑流程在印度得到了大规模的发展，使印度 2008 年的海绵铁产量达到 2120 万 t，成为第一海绵铁生产大国。

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。该流程一般被用于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。

1.2.3 熔融还原

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，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。为了

克服这一不足，可根据工艺模式将熔融还原划分为四大类：三段式、二段式、一段式和电热法。

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熔炼造气炉（melter-gasifier）中的煤炭床。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。

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，结果见图 1-4。

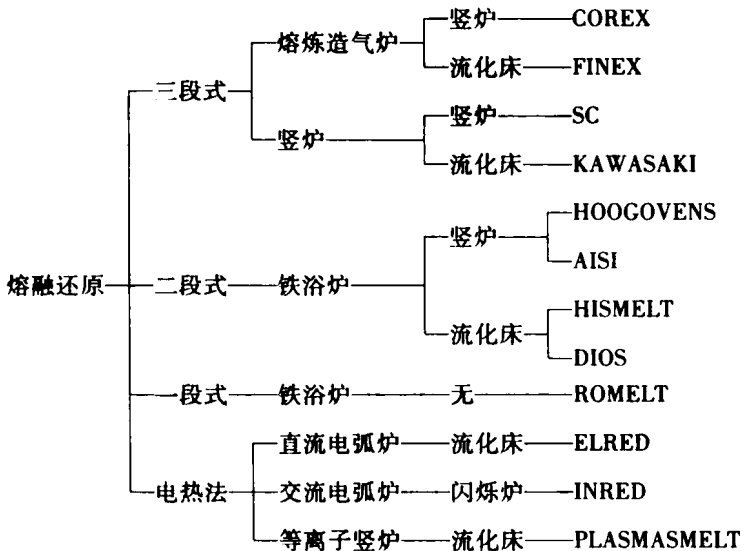


图 1-4 熔融还原分类

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。自此以后已有数百种直接还原