

冶金过程自动化技术丛书

# 炼铁生产 自动化技术

---

马竹梧 编著

刘玠 主编

冶金工业出版社



## 冶金过程自动化技术丛书

冶金过程自动化基础

冶金原燃料生产自动化技术

● 炼铁生产自动化技术

炼钢生产自动化技术

连铸及炉外精炼自动化技术

热轧生产自动化技术

冷轧生产自动化技术

冶金企业管理信息化技术

ISBN 7-5024-3639-1



9 787502 436391 >

ISBN 7-5024-3639-1

TF·679 定价 46.00 元

销售分类建议:工业自动化/冶金工程

冶金过程自动化技术丛书

# 炼铁生产自动化技术

刘 玠 主编

马竹梧 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2005

## 内 容 提 要

本书为《冶金过程自动化技术丛书》之一,内容包括:高炉生产工艺简述,高炉生产的基础自动化,高炉生产的过程自动化,高炉生产的管理自动化和非高炉炼铁生产自动化技术。

本书可供从事冶金自动化和冶金工程技术的科研、设计、生产维护人员使用,也可供大专院校自动化专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

炼铁生产自动化技术/刘玠主编. —北京:冶金工业出版社,2005.8

(冶金过程自动化技术丛书)

ISBN 7-5024-3639-1

I. 炼… II. 刘… III. 炼铁—自动化技术  
IV. TF5-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 107499 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 戈 兰 美术编辑 王耀忠

责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 牛晓波

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

2005 年 8 月第 1 版,2005 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;16.25 印张;388 千字;244 页;1—4000 册

46.00 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)

# 《冶金过程自动化技术丛书》

## 编 委 会

主 编 刘 玠

副主编 孙一康 马竹梧 蒋慎言 漆永新

编 委 (以姓氏笔画为序)

马竹梧 王 京 刘 玠 刘文仲

孙一康 杨 荃 杨卫东 杨传福

陈大刚 蒋慎言 童朝南 漆永新

# 序

建国以来,冶金工业在我国国民经济的发展中一直占据很重要的位置,1949年我国粗钢产量占世界第26位,到1996年粗钢产量为一亿零一百万吨,上升到世界第1位。预计今年钢产量能达到二亿六千万吨左右,稳居世界第1位。根据国家统计局数据,2003年我国冶金工业总产值为4501.74亿元,占整个国内生产总值的4.8%。

统计表明,国民经济增长和钢材需求之间有着非常紧密的关系。2000年我国生产总值增长率为8.0%,钢材需求增长率为8.0%。2002年我国生产总值增长率为7.5%,钢材需求增长率为21.3%。预计今年我国生产总值增长率为7.5%,而钢材需求增长率为13%。据美国《世界钢动态》杂志社的研究,钢材需求受经济增长的影响是:如果经济年增长率为2%,钢材需求通常没有变化,但是如果经济增长为7%,钢材需求可能会上涨10%。这也就是20世纪90年代初期远东地区和中国钢材需求量迅猛上涨的原因。

从以上的数据中我们可以清楚地看出冶金工业在国民经济中的地位和作用。在中国共产党的正确领导下,经过半个世纪,尤其是改革开放的20多年来的努力奋斗,我国已经成为世界的钢铁大国,但还不是钢铁强国,有许多技术经济指标还落后于技术发达的国家。如我国平均吨钢综合能耗,在1995年为1516kg/t,2003年降低为778kg/t,而日本在2003年为658kg/t。很显然是有差距的,

要缩小这些差距,除了进行产品结构的调整,新工艺流程的研究与开发,建立现代企业管理制度以外,很重要的一条,就是要遵循党的十六大所提出的“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,走新型工业化道路”的伟大战略。

众所周知,自从电子计算机诞生半个世纪以来,尤其是近几年来信息技术和自动化技术的迅猛发展,为提高冶金企业的市场竞争力,缩短技术更新周期与提高企业科学管理水平提供了强有力的手段,也使得冶金企业得以从产业革命的高度来认识信息技术和自动化技术所带来的影响。各冶金企业,谁对信息技术、自动化技术应用得好,谁的产品质量就稳定,谁的竞争优势就增强,谁的市场信誉就提高,谁就能在激烈的市场竞争中生存、发展。因此这种“应用”就成了一种不可阻挡的趋势。

2003年,中国钢铁工业协会信息与自动化推进中心及信息统计部就全国65家主要冶金企业的信息与自动化现状进行了调查,调查的结果表明:

第一,我国整个冶金企业在主要的工序流程上,基本普及了自动化级(L1),今后仍将坚持和普及;

第二,过程控制级(L2)近年也有了一定的发展,但由于受到数学模型的开发及引进数学模型的消化、吸收较为缓慢的制约,过程控制级仍有较大的发展空间,今后应关注控制模型的引进、消化和开发,它是提高产品质量重要的不可替代的环节;

第三,生产管理级(L3)、生产制造执行系统(EMS)尚处于研究阶段,还不足以引起企业领导的足够重视,这一级在冶金企业信息化体系结构中的位置和作用是十分重要的,它是实现控制系统和管理信息系统完美集成的关键。

由此可见,普及、提高基础自动化,大力发展生产过程自动化,重视制造执行系统(EMS)建设,加快企业信息化、自动化的建设进程,早日实现我国冶金企业信息化、自动化及管、控一体化,是“十五”期间乃至今后若干年内提升冶金工业这一传统产业,走新型工业化道路的重要目标和艰巨任务。

为了加速这一重要目标的实现和艰巨任务的完成,我们组织编写了这套《冶金过程自动化技术丛书》。根据冶金工业工艺流程长,

而每一个工序独立性、特殊性又很强,要求掌握的技术很广、很深的特点,为了让读者能各取所需,本套丛书按《冶金过程自动化基础》、《冶金原燃料生产自动化技术》、《炼铁生产自动化技术》、《炼钢生产自动化技术》、《连铸及炉外精炼自动化技术》、《热轧生产自动化技术》、《冷轧生产自动化技术》、《冶金企业管理信息化技术》等8个分册出版,其中《冶金过程自动化基础》是论述研究一些在冶金生产自动化方面共性的问题,具有打好基础的作用,其他各册是根据冶金工序的不同特点编写的。

这套丛书的编著者都是在生产、科研、设计、领导一线长期从事冶金工业信息化及自动化工作的专家,无论是在技术研究的高度上,还是在解决复杂的实际问题方面都具有很丰富的经验,而且掌握的实际案例也很多,因此书中所介绍的内容也是读者感兴趣的,在实际工作中需要的,同时书中所讨论的问题也是当前冶金企业进行大规模技术改造迫切需要解决的问题。

时代的重任,国家的需要,要求我们每一个长期从事冶金企业信息化自动化的工程技术人员,以精湛的技术、刻苦求实的精神,搞好冶金企业的信息化及自动化,无愧于我们这一伟大的时代。相信,这套丛书的出版,会对大家有所帮助。

中国工程院院士 刘阶

2004年仲夏



# 前言

---

冶金工业自动化不仅是冶金工业现代化的标志,而且是冶金生产操作必须的技术,离开自动化就难以获得良好的技术经济指标,达到高产优质、高效、节能降耗的效果。冶金工业自动化几十年来得到了很大的进展,从热工监督和工艺参数自动化,发展为 EIC 一体化系统,又进而成为包括管理自动化的广义 EIC 一体化系统,更有学者认为管控一体化,以至 CIMS 到包括电子商务的 WIMS (网络集成制造系统)都是 EIC 一体化的范畴。国外公司例如德国西门子公司,对冶金机组自动化(例如连续铸钢自动化)的推荐方案许多年前都是带有生产控制级的三级系统,今天则是包括制造执行级 MES 的三级系统,这也是要适应激烈市场竞争的需要。故本书也是根据目前的发展、需要和趋势,对炼铁生产自动化也是以此为目标。

目前国内外有关钢铁工业自动化的书籍大都是局部的,即自动化仪表、计算机控制、电力传动等某一方面的,而本书的特点是从系统工程出发,使读者对钢铁工业自动化有完整的概念,从而全面了解钢铁工业自动化的内容和 技术,其中不仅包括仪表、电气传动以及计算机控制技术、基础自动化、过程自动化以及管理自动化等概念,而且包括工艺简述、数学模型、人工智能和先进控制的应用、管理-控制一体化等。此外,还列出近年来国内外建设的各工序、各机组的典型三电自动化系统结构与配置,并叙述了各工序、各机组的检测、自动化特别是数学模型、人工智能和先进控制的内容,从而对管理决策、设计、生产、教学甚至对工程引进都有所帮助。

本书是作者根据多年从事设计、科研开发和调试的经验并考察和收集了国内外资料,特别是宝钢及国内外大、中型钢铁厂的情况和有关报告等资料编写而成的,可供从事钢铁工业自动化包括研究、设计、生产维护等

工作人员使用,也可供各级领导干部以及大专院校自动化、计算机和工艺专业的师生参考。

在本书的编写和评审过程中承蒙各方面专家、学者提供帮助、咨询和指导,编者特此致谢。

本书编写过程中,尽管编者付出了较大努力,但限于水平和时间紧迫,书中难免有不妥之处,恳请专家、学者、老师和广大读者指正。

马竹梧  
2005年1月

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 炼铁生产工艺简述 .....	2
1.1.1 高炉生产工艺简述 .....	2
1.1.2 非高炉生产工艺简述 .....	4
1.2 炼铁生产信息化、自动化系统的构成 .....	8
1.2.1 基础自动化系统的构成 .....	8
1.2.2 过程自动化级的构成 .....	12
1.3 炼铁生产信息化、自动化的发展、现状和趋势 .....	14
1.3.1 高炉生产信息化、自动化的发展、现状和趋势 .....	14
1.3.2 非高炉生产信息化、自动化的发展、 现状和趋势 .....	21
1.4 炼铁生产自动化的最低功能配置 .....	21
<b>第 2 章 高炉生产的基础自动化</b> .....	23
2.1 高炉专用检测仪表 .....	23
2.1.1 概述 .....	23
2.1.2 炉内状况检测 .....	25
2.1.3 渣铁状态检测 .....	48
2.1.4 各风口热风热量分布检测 .....	57
2.1.5 热风温度检测 .....	58
2.1.6 风口及冷却壁等漏水的检测 .....	58
2.1.7 高炉炉衬、炉底耐火材料烧损检测 .....	59
2.1.8 焦炭水分检测 .....	62
2.1.9 煤粉喷吹量检测 .....	62
2.2 仪表控制系统 .....	65
2.2.1 高炉本体检测仪表及控制系统 .....	65
2.2.2 热风炉检测仪表及控制系统 .....	72
2.2.3 喷吹煤粉检测仪表及控制系统 .....	78
2.2.4 煤气清洗检测和自动控制系统 .....	83
2.2.5 原料检测仪表及控制系统 .....	86
2.2.6 高炉水渣检测及自动控制系统 .....	86

2.2.7	给排水检测及自动控制系统	88
2.2.8	高炉炉顶余压透平发电装置(TRT) 检测和自动控制系统	88
2.2.9	高炉鼓风机检测仪表及自动控制系统	92
2.3	电气传动及其控制	98
2.3.1	上料设备顺序控制系统	98
2.3.2	无料钟炉顶自动控制系统	108
2.3.3	热风炉换炉自动控制系统	111
2.3.4	煤粉喷吹电气传动控制系统	114
2.3.5	煤气布袋除尘净化系统的电气传动控制系统	116
2.3.6	给排水电气传动控制系统	118
2.3.7	出铁场除尘电气传动控制系统	125
2.3.8	高炉炉顶余压透平发电装置(TRT)电力传动控制系统	128
2.3.9	高炉出铁场各机械吹笛控制	132
2.4	监控画面(人机接口 HMI)	133
<b>第3章</b>	<b>高炉生产的过程自动化</b>	<b>135</b>
3.1	过程自动化级计算机系统的功能	135
3.1.1	宝钢高炉过程计算机系统的功能	135
3.1.2	芬兰罗德洛基钢铁公司赫拉厂高炉过程计算机系统的功能	140
3.1.3	奥钢联林茨厂高炉过程计算机系统的功能	141
3.2	高炉过程自动化级的数学模型及其实践	143
3.2.1	数据有效性和可靠性检验模型	144
3.2.2	配料计算与优化数学模型	145
3.2.3	炉热判定模型	146
3.2.4	铁水含硅量预报模型	149
3.2.5	高炉炉况预测数学模型	150
3.2.6	无料钟布料控制数学模型	156
3.2.7	热风炉控制数学模型	162
3.2.8	软熔带形状推断数学模型	169
3.2.9	高炉炉底侵蚀推断模型	174
3.2.10	碳-直接还原率(C-DRR)模拟模型	176
3.2.11	高炉操作预测模型	178
3.2.12	热风炉操作预测模型	179
3.3	人工智能在高炉中的应用	180
3.3.1	概述	180
3.3.2	人工智能系统的开发工具	183
3.3.3	专家系统的知识获取和规则编制以及数据预处理	184
3.3.4	日本钢管公司的 BAISY 高炉操作专家系统	186

3.3.5	日本钢铁公司君津厂 ALIS 系统 .....	188
3.3.6	日本川崎钢铁公司的 AI 系统 .....	190
3.3.7	日本住友金属工业公司的高炉操作混合专家系统 .....	192
3.3.8	日本神户钢铁公司 3 号高炉炉热预报系统 .....	193
3.3.9	日本钢铁公司大分厂的 SAFAIA 系统 .....	195
3.3.10	我国武汉钢铁公司 4 号高炉专家系统 .....	196
3.3.11	我国鞍山钢铁公司 11 号高炉人工智能系统 .....	198
3.3.12	我国莱芜钢铁公司 750m <sup>3</sup> 高炉智能控制专家系统 .....	199
3.3.13	瑞典钢铁公司的铁水含硅量预报神经元网络系统 .....	201
3.3.14	印度维萨卡帕特南钢工程公司的预报焦比神经网络系统 .....	202
3.3.15	日本川崎钢铁公司千叶厂 6 号高炉热风炉燃烧模糊控制系统 .....	202
3.3.16	日本川崎钢铁公司水岛厂 3 号高炉热风炉燃烧 AI 控制系统 .....	204
3.3.17	日本钢管公司京滨厂 1 号高炉的热风炉燃烧自动控制系统 .....	205
3.3.18	水渣脱水槽分配控制专家系统 .....	207
3.3.19	料槽料罐等排出原料速度模糊控制系统 .....	208
3.3.20	炉顶布料控制的 AI 系统 .....	209
3.3.21	出铁操作指导 ES 系统 .....	211
3.4	高炉长寿与监控 .....	213
<b>第 4 章</b>	<b>高炉生产的管理自动化 .....</b>	<b>217</b>
4.1	高炉生产管理自动化的必要性和类型 .....	217
4.2	炼铁制造执行系统简介 .....	217
4.3	管理自动化数学模型及其建立 .....	221
<b>第 5 章</b>	<b>非高炉炼铁生产自动化技术 .....</b>	<b>223</b>
5.1	概述 .....	223
5.2	直接还原自动化 .....	224
5.2.1	煤基直接还原自动化 .....	225
5.2.2	气基直接还原自动化 .....	230
5.3	熔融还原自动化 .....	231
5.3.1	工艺流程简述 .....	231
5.3.2	国外熔融还原自动化 .....	232
5.3.3	国内熔融还原自动化 .....	234
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>237</b>

# 第 1 章 概述

炼铁就是通过冶炼铁矿石,从中得到金属铁的过程。现代炼铁法不外高炉炼铁法和非高炉炼铁法。高炉炼铁法,即传统的以焦炭为能源的炼铁法。由于高炉炼铁技术经济指标好,工艺简单、可靠,产量大,效率高,能耗低,这种方法生产的铁占世界生铁总产量 90%以上,高炉炼铁这种主导地位预计在相当长时期之内不会改变,但是一些缺乏焦炭资源的国家和地区,也使用不同形式的非高炉炼铁法。非高炉炼铁法,即高炉以外的,不用焦炭,而以煤、燃油、天然气、电为能源基础的炼铁方法。非高炉炼铁法主要有直接还原法和熔融还原法,此外还有电炉炼铁法。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,其产品是直接还原铁,也称海绵铁。它有气体直接还原法(竖炉法)和固体还原剂直接还原法(主要是回转窑法)。近年来,直接还原法发展迅速,在世界钢铁工业已有一定地位,而在一些国家则居主要地位。熔融还原法是指一切不用高炉冶炼液态生铁的方法,发展熔融还原法的目的在于取代目前的高炉炼铁法,它是用高品位铁精矿,经预还原在高温熔融状态下直接还原成液态金属。熔融还原法是正在发展的、很有前途的一种方法。电炉炼铁法是以电热代替焦炭燃烧,但仍用少量焦炭或炭素作还原剂,产品是液态生铁,它只用于水电资源丰富而又缺乏焦炭的地区和国家。

基于下列原因:

(1) 炼铁工业是能耗大户,高炉炼铁占整个钢铁企业的 60%,因此有效节能经济意义很大,是关系钢铁工业稳定发展必不可少的因素,而自动化技术对节能起了关键作用。

(2) 设备大型化。现代高炉容积已超过 4000m<sup>3</sup>,稍一不正常就损失很大,例如某钢厂 1700m<sup>3</sup>高炉,据统计每悬料一次平均减产 103t/d,每崩料一次减产 16t/d,而以计算机为中心的异常炉况预报系统命中率高于 90%,从而使工长预先采取措施,避免事故。

(3) 工艺连续化与前后工序关联化。无论高炉还是非高炉炼铁都要为后续工序炼钢提供及时的、优质的钢水,后续工序的产品质量、操作都受由前列工序来料的影响,没有自动化和信息化系统,难以为后续工序提供及时的质量均一的原料。

(4) 工艺操作复杂。要求产品高质量、高效率、高收得率和低耗。例如高炉生产需要:正确的配料和及时的装入炉内、保持煤气流与炉料良好的接触、使炉料均匀下降,维持一定的炉缸热状态,人工操作时很难达到,此外,高炉是密闭的,必须借助于许多检测仪表才能判断其内部情况,故自动化是必不可少的。

(5) 原料用量大,运输量大。例如一个 2500m<sup>3</sup>高炉,一昼夜需装料 4200~6000t,且要按严格的配比和顺序装入,没有自动配料装料和批重以及水分补正系统就不仅耗费人力,且无法获得良好技术指标。

(6) 设备要有高的运转率同时要长寿。例如要减少高炉的休风率,就得自动监视设备

状态,出现故障先兆时就设法排除。要高炉长寿,就得监视砌体烧损情况,炉体温度和煤气流分布,并依此而及时调整。

因此,炼铁生产应用自动化已成为必然趋势,它不仅是炼铁工业现代化的标志,且投入产出比显著,据奥钢联的报道,其高炉自动化系统 VAIRON 在林茨厂和南非 ISCOR 厂运行结果取得良好的结果和效益:(1)生产率平均提高 5%;(2)煤气利用率至少提高 1%;(3)总燃料消耗量减少  $3\text{kg}/\text{t-铁水}$ ;(4)喷煤率提高  $10\text{kg}/\text{t-铁水}$ ;(5)硅标准偏差小于 0.15%;(6)投资回收期不到 4 个月(以年产 2 百万 t 铁水的高炉为基础,(1)项的年经济效益为 5 百万美元,(4)项为 2 百万美元,(3)项等为 1.3 百万美元,总计为 8.5 百万美元/年)。

现代钢铁工业自动化包括:基础自动化、过程自动化、管理自动化,即众所周知的三级结构的 CIMS 系统(计算机集成制造系统,流程工业称 CIPS,国内在钢铁工业有学者称为综合管理控制系统),三级结构就是把 CIMS 分为 BPS/MES/PCS 三级,其中 BPS (Business Planning System)级是单纯考虑企业经营管理问题的企业资源规划(ERP),主要是利用以财务分析决策为核心的整体资源优化技术, MES (Manufacturing Execution System,即制造执行系统)级是考虑生产与管理结合问题的中间层制造执行系统,主要利用以产品质量和工艺要求为指标的先进控制技术和以生产综合指标为目标的生产过程优化运行、优化控制与优化管理技术, PCS(Process Control System)级是单纯考虑生产过程问题的过程控制系统,即过程自动化和基础自动化系统。近年来由于要适应激烈的市场竞争需要,互联网和信息技术的发展,全球化的趋势,钢铁公司的信息化和自动化已从钢铁公司内部到顾客和社会。实行生产—物流—销售一体化,不仅生产部门与公司销售部门联网,且与外界贸易公司,最终用户(汽车、家电、机电制造等工厂)以至税务部门和海关联网甚至和国外的有关部门通信,使信息更广域化和高效化,甚至通过卫星监视船舶到达地点,以向用户报告使之作接受准备。此外,电子商务的发展等等,这就要求信息化、自动化系统能适应这些进展,为此,出现 WIM(网络集成制造系统)系统。WIM 的功能已远远超出 CIMS(计算机集成制造系统)的功能,它是以 Web 和智能技术为基础,能充分利用互联网的资源,能实现全球化供销链、远程技术支持和远程诊断等,包括常规控制和智能控制、监控、复杂的优化数学模型和人工智能模型等运算、智能信息处理(运行生产经营管理软件如 ERP、MES 等)以及电子商务等。

炼铁生产的信息化、自动化系统也如钢铁工业自动化系统同样包括:基础自动化、过程自动化、管理自动化,应该是钢铁工业 CIMS 的一部分,但管理自动化中的 BPS 级是全钢铁厂的范围,故本书的信息化、自动化系统只叙述到制造执行级为止。

## 1.1 炼铁生产工艺简述

### 1.1.1 高炉生产工艺简述

现代大型高炉车间生产工艺流程见图 1-1,包括主体和辅助系统,主体系统如图 1-2 所示,包括五部分:高炉本体、贮矿槽、出铁场、除尘器和热风炉。辅助系统则有煤气清洗、炉顶煤气余压发电(TRT)、水渣、水处理和制煤粉车间等。

炼铁是在高炉内进行还原反应过程,如图 1-2 所示,炉料——矿石、燃料和熔剂从炉顶

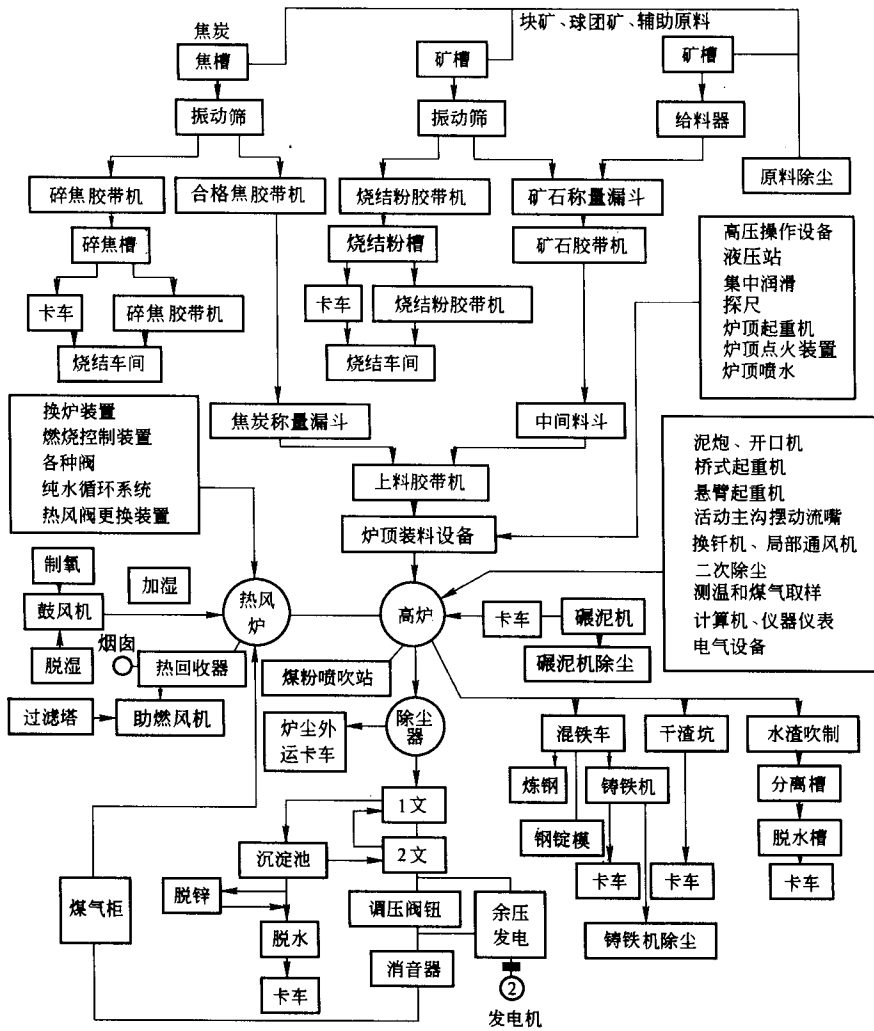


图 1-1 典型高炉炼铁工艺流程及其主要设备示意框图

(有料钟型和无料钟型两种)装入炉内,从鼓风机来的冷风经热风炉后,形成热风从高炉风口鼓入,随着焦炭燃烧,产生热煤气流由下而上运动,而炉料则由上而下运动,互相接触,进行热交换,逐步还原,最后到炉子下部,还原成生铁,同时形成炉渣。积聚在炉缸的铁水和炉渣分别由出铁口和出渣口放出。

高炉操作主要是解决下列四个问题:(1)正确的配料并以一定的顺序及时装入炉内;(2)控制炉料均匀下降;(3)调节料柱中炉料分布及保持与煤气流良好的接触;(4)保持合适的热状态。(2)、(3)、(4)可归结为要求炉况稳定顺行。只有在炉况稳定顺行的状态下,才能达到优质、低耗、高产的目的,为确保高炉炉况稳定必须随时掌握炉内各参数的变化情况,及时予以调整,这就有赖于自动控制技术。高炉自动化主要是指仪表检测及控制系统、电气控制系统和计算机,即基础自动化、过程自动化和管理自动化。仪表控制系统和电气控制系统通常由 DCS 或 PLC 来完成。



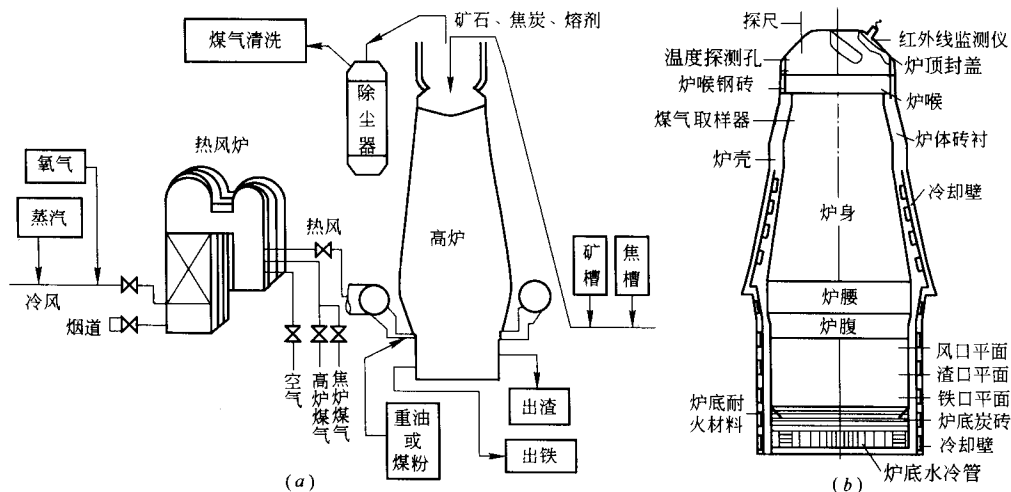


图 1-2 高炉主体工艺流程示意图  
 (a)—高炉主体工艺流程及主要设备；(b)—现代高炉内型剖面图

### 1.1.2 非高炉生产工艺简述

非高炉炼铁虽然有多种方法，但主要是直接还原法和熔融还原法。

#### 1.1.2.1 直接还原法生产工艺简述

##### A 煤基直接还原法工艺简述

煤基直接还原法主要是使用回转窑把固体还原剂进行直接还原，按照炉料出料温度，可以生产海绵铁、粒铁及液态铁，而回转窑海绵铁法是应用最广的直接还原方法。其原理见图 1-3，由焦粒(煤粒)、块状铁矿及石灰石粒(或白云石)等组成的固体炉料由窑尾加入回转窑，窑体稍有倾斜，在窑转动时把炉料推向窑头，窑头外设有烧嘴燃烧燃料(煤粉、煤气或燃油)，废气由炉尾排出，炉气与炉料逆向运动，炉料在预热段被加热，蒸发水分及分解石灰石，温度达 800℃后，在料层内进行固体炭还原，放出的 CO 在空间氧化区被氧化，并提供还原反应需要的热量，在还原区与氧化区中间有一个由火焰组成的中性区，使料层表面仅有不强的氧化层，炉料翻转后再被还原。

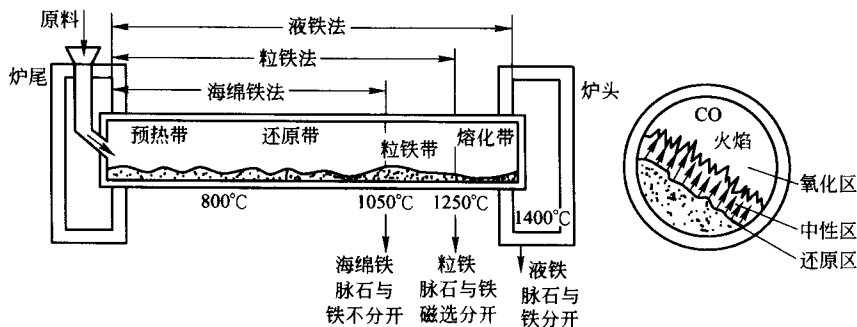


图 1-3 回转窑炼铁过程示意图