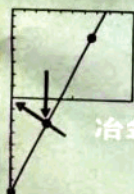


高炉炼铁理论与实践

J.G.皮西
W.G.达文波特 著
傅松龄
徐广尧
钟肇贤 译



冶金工业出版社

中文版序

这本书用中文出版，使我们非常高兴，因为它为把书中的思想扩散到世界工业更广阔的和日益重要的地区创造了潜力。

本书英文版曾受到世界各地工业界和大学的欢迎。前三章简要地介绍了高炉工艺学，从第四章开始介绍的数学推导对钢铁冶金教学和工业的过程控制及最优化操作选择有广泛的用途。最后，每章后面的习题对巩固各章的概念和掌握计算技能是很有益的。

世界钢铁工业正在经历着重大的变化，尤其是生产率的改善和能耗、成本的降低。本书提供了有关这些课题的知识，并将不断显示它的重要性。我们希望中文版读者对这本书感兴趣，并且是有使用价值的。

诺兰德研究中心 J.G.皮西

亚利桑那大学教授 W.G.达文波特
冶金工程系主任

1985年5月

译者的话

法国 Chatenay-Malabry 中央工艺及制造工业大学冶金系 A. 里斯特 (A. Rist) 教授和他的研究小组, 从六十年代初开始研究“高炉过程控制”。虽然至今高炉生产全部自动化技术尚待开发和完善, 但里斯特教授的研究工作为高炉(包括其他冶金炉)的还原过程控制建立了理论基础, 完成了有效的开拓工作, 为各国的冶金工作者所重视。

本书在里斯特操作线图原理的基础上, 由基本定义出发, 深入浅出、循序渐进地利用炉内碳、氧平衡和热平衡原理, 推导了一系列基础方程和实用的数学模型。进而, 为利用电子计算机进行操作参数预测以及高炉过程最优控制创造了条件。

本书把高炉看成两个串连的反应器, 以基太也夫热储备带为界, 将高炉划分成上部区和下部区。假定: (1) 在高炉上部区全部高价氧化铁都还原成浮氏体, 而不生成金属铁; (2) 在储备带内及其以上没有碳的气化反应, 并且, 在储备带内 $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{Fe}_{0.94}\text{O}/\text{Fe}$ 及 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{Fe}_{0.94}\text{O}/\text{Fe}$ 均趋近平衡。基于这种假定, 对分析高炉操作做出了巨大贡献。我国冶金工作者已经结合我国实际情况加以运用。但尚未达到应有的普及。

本书各章均编制了计算习题, 通过求解习题将有利于加深理解炉内化学平衡和热平衡过程, 这对解决炼铁生产实际问题将是十分有益的。

本书蒙北京钢铁学院冶金系杨永宜教授写序, 炼铁教研室宋建成同志提供了宝贵意见, 在此一并致以衷心感谢。

冶金部钢铁研究总院

傅 松 龄

1983年2月于北京

译 序

由于竖炉中多相反应的传热—传质效率较其他冶金炉高许多，高炉作为现代钢铁工业的主要炼铁设备，仍将继续存在并发展下去，对高炉内复杂冶炼过程的深入研究必然会对高炉生产技术的提高作出贡献。

A.里斯特于1964~1966年期间陆续发表了他提出的操作线图，或叫操作方程式或叫模型，一开始就受到世界炼铁工作者的重视并得到广泛运用。他的特点是在高炉众多复杂的反应中抓住了Fe-O-C体系这一最本质的变化或主要矛盾，达到了把基础的定比化学、化学反应平衡及热化学，物料平衡和高炉生产主要技术参数及指标，用最简单确切的方式联系和表达了出来。同M.A.巴甫洛夫关于高炉中氧化铁的直接还原率理论一样，里斯特的图解法或模型在高炉工艺发展史上将是同样值得称赞的。当然，里斯特的操作线图还不能代替其他基础研究，它是把高炉当作一个整体，分析其中各冶炼参数之间内在关系的方便有用的工具。

本书是加拿大诺兰德(Noranda)研究中心J.G.皮西先生和麦基尔大学W.G.达文波特教授合著的，以里斯特操作线图为纲的炼铁参考书，书中循序渐进地介绍了操作线图的推导，即从定比化学、反应平衡、热化学、物料和热量平衡出发导出方程；进而对利用操作线图分析高炉生产过程中的各种现象，理论预测与生产实际的比较，以及运用操作线图和线性规划探讨高炉生产的最佳工艺制度等作了阐述。

W.G.达文波特在麦基尔大学从事教学工作，故在每一章中都列有很好的计算习题，对帮助读者理解和掌握有关内容非常有利。

傅松龄等同志把本书译成中文，冶金工业出版社出版，给国

内大专院校钢铁冶金专业师生提供了一本很好的参考书；从事炼铁生产和科研工作的工程技术人员，如果对里斯特模型还不够了解，从中也是会得到有益启发的。

北京钢铁学院冶金系

杨 永 宜

1982年11月于北京

原 序

炼铁高炉是人类非常有用的工具。它提供了从矿石还原铁的有效方法，并且是钢铁冶炼的基础。在任何国家的经济领域中，高炉都是一个重要的组成部分。

高炉的重要作用使它成为深入细致的研究课题。但是，高炉过程的复杂妨碍了我们对它全面的探索。虽然每一步骤（例如氧化铁的还原）的反应机理和反应速度均已明了，但对一个操作正常的高炉工艺过程还难于作出定量的描述。

曾经有人进行过几种这样描述的尝试，最成功的是由里斯特[●]和他的同事们根据物料平衡、热平衡和反应平衡进行的描述。然而里斯特的解析没有象我们希望的那样通俗明了。他们还根据生产数据对过程设计了许多经验模型，这些模型对高炉操作的最优控制具有相当重要的意义。而通常有些模型，不能确切反映高炉的实际工作性能。

本书收集了现有关于高炉理论的、实验的和操作的数据，把这些数据综合起来对高炉操作进行数学解析。具体地说，我们出了一组方程，它们（1）准确地描述过程的化学平衡和热平衡；（2）与实测的炉身温度和煤气成分相符。这些方程是根据里斯特的研究作出的，也利用了参考书目中提到的许多其他作者的思想 and 实验结果。

这些方程是想要说明改变高炉的任何一个变量对过程的其他操作参数的影响。例如，它们以数学解析和图解法表示出提高风温对过程热平衡的影响，定量地提出了利用鼓风热函的作用怎样才能减少加入高炉的焦炭和风量。

● 里斯特的著作系统地发表于 *Revue de Métallurgie*, Vol. 61~63 (1964.2~1966.6)

这些方程式包括的其它重要变量是：喷吹碳氢化物、富氧鼓风、鼓风湿分、石灰石分解、焦炭反应性和非金属的还原。书中许多变量的影响以数量表示，而有一些变量则在各章后面的习题（答案在书末）中加以说明。当文中出现新概念时，习题也用于进一步明确这个新概念。

希望我们的研究有助于增进对高炉的探索，读者将更好地理解每一过程变量单独的和综合的作用。也希望我们的方程在生产高炉上得到检验，这些解析和建议对选择炉子的最优操作条件将是有益的。

本书曾在麦基尔（McGill）大学作为钢铁冶金学教程的前半部分，在其他地方作教材也是可以的。

诺兰德研究中心

J.G.皮西

麦基尔大学

W.G.达文波特

1979年3月

目 录

第一章 高炉冶炼过程概述	1
第一节 原 料	1
第二节 产 品	6
第三节 操 作	7
第四节 生产率的提高	9
第五节 高炉费用	10
第六节 小 结	10
习题	12
第二章 炉内状况	14
第一节 风口前状况	14
第二节 炉缸、风口回旋区和炉腹的反应	15
第三节 软熔带	16
第四节 软熔带以上的还原	18
第五节 焦炭气化反应动力学	20
第六节 1200K等温线以上的反应	20
第七节 高价氧化物的还原	20
第八节 炉身上部和炉顶煤气	22
第九节 停留时间	22
第十节 炉料分布	23
第十一节 小 结	23
习题	25
第三章 高炉过程热力学：热量与平衡	27
第一节 炉内的热量需要	27
第二节 炉缸临界温度	28
第三节 炉内温度分布图：热贮备带	30
第四节 炉内自由能的研究：对平衡状态的探讨	30
第五节 炉内煤气成分分布图：化学贮备带	32
第六节 小 结	34

习题	37
第四章 高炉化学平衡计算	39
第一节 化学平衡计算式的推导	39
第二节 化学平衡计算方程	43
第三节 计算	44
第四节 化学平衡计算方程的图解形式	45
第五节 小结	47
习题	49
第五章 模型结构推导: 简化高炉热平衡	51
第一节 基础热平衡的简化	51
第二节 热平衡	51
第三节 热量的收入与支出	52
第四节 一般热平衡结构	54
第五节 小结	55
习题	55
第六章 模型结构: 化学平衡和热平衡计算联合方程	57
第一节 化学平衡与热平衡计算联合方程: 计算	57
第二节 化学平衡和热平衡计算联合方程的图解形式	59
第三节 图解法的一个计算实例	61
第四节 小结和化学平衡/热平衡计算图的讨论	62
习题	63
第七章 化学平衡计算模型的完成: 通过化学贮备带划分高炉	65
第一节 把高炉看作两个反应器	66
第二节 下部区域的化学平衡计算	67
第三节 浮氏体还原带的化学平衡计算方程	69
第四节 讨论和小结	70
习题	71
第八章 高炉下部区域热平衡	72
第一节 下部区域热平衡	72
第二节 热平衡方程的收支方式	74
第三节 数字推导	75
第四节 小结	76

习题	77
第九章 下部区域化学平衡计算和热平衡计算联合方程:	
操作参数的预测	78
第一节 计算实例	80
第二节 方程的含义	81
第三节 方程的图解形式	82
第四节 图解计算	83
第五节 操作线的特性	86
第六节 小结	88
习题	88
第十章 数学模型的验证及其前提的讨论	90
第一节 热量条件的验证	90
第二节 炉顶煤气温度的计算	91
第三节 化学平衡条件的验证	93
第四节 热力学条件的验证	94
第五节 模型假设和预测的准确性	95
第六节 化学贮备带尚未达到平衡状态	96
第七节 热贮备温度的影响	97
第八节 小结	99
习题	100
第十一章 喷吹对高炉操作的影响	101
第一节 综合喷吹	102
第二节 在总化学平衡方程中喷吹物的表示方法	102
第三节 喷吹物在高炉下部区化学平衡方程中的表现形式	105
第四节 喷吹物在下部区热平衡方程中的表现形式	106
第五节 一个便于计算的形式	109
第六节 计算实例 I: 富氧	110
第七节 计算实例 II: 喷吹碳氢化物	113
第八节 图解计算 (综合喷吹)	116
第九节 喷吹含氢物质的炉顶煤气成分	119
第十节 喷吹计算的讨论与小结	121
习题	122
第十二章 操作方程的附加项: 热损失、Si和Mn的还原、	

生铁渗碳、造渣、碳酸盐分解	125
第一节 对化学平衡的影响	125
第二节 对热平衡的影响	128
第三节 小结	133
习题	135
第十三章 高炉操作方程总结：理论预测与生产实践的比较	137
第一节 模型推导步骤总结	137
第二节 计算机的计算方案	140
第三节 模型预测同高炉生产数据的比较	141
第四节 风温、喷吹物、预还原矿石、生铁成分对焦炭消耗量 和 风量影响：预测和生产实践	143
第五节 小结	146
第十四章 用线性规划求解高炉最优化问题	148
第一节 简单的最优化问题	148
第二节 最低费用图解法	150
第三节 最优化方法解析法	155
第四节 计算机输入和输出	155
第五节 更加完整的题目	160
第六节 小结	165
习题	166
附录 I 火焰温度计算	168
一、线性规划中火焰温度的约束条件方程	171
二、计算的附加项	173
附录 II 综合喷吹在操作方程中的表示方法	175
一、已知气体喷吹物的燃烧热和化学成分	175
二、已知喷吹物的碳和氢的重量百分比及燃烧热	176
附录 III 炉渣的热消耗量	179
附录 IV 炼铁常用矿物和化合物的化学平衡计算数据	182
附录 V 温度 T 下各种化合物的生成热 (H_f°)	183
附录 VI 元素和化合物的热函增量方程: $[H_f^\circ - H_{298}^\circ]$	185
附录 VII 鼓风热函 E^B	187
习题答案	187
符号一览表	191

第一章 高炉冶炼过程概述

高炉是利用碳（主要以焦炭形式）从铁的氧化物矿石中还原铁的竖炉。高炉的产品是适于进一步炼成钢的液态生铁（4~5% C, 0.5~1.0% Si）。典型的炼铁厂工艺流程示意图示于图1.1, 高炉剖面图示于图1.2。大型现代化高炉操作数据列于表1.1。

高炉的主要任务是高效率地生产成分稳定的铁水。最关键的操作参数是铁水和炉渣的温度, 为了使渣、铁以液态从炉内放出, 其温度必须高于1700 K。铁水的成分不是高炉冶炼过程的严格特征, 因为实际上几乎全部高炉生铁都是要进一步炼成钢的。然而, 通过适当地调节炉渣成分和炉温可以控制铁水成分使其达到炼钢厂规定的范围。

全世界大约有1000座高炉, 年总产量大约为5亿吨铁水。

第一节 原 料

高炉原料是: (1) 固体原料(矿石、焦炭、熔剂)从炉顶加入; (2) 风通过风口鼓入。也从风口喷入碳氢化物(气态、液态和固态)和氧气。有代表性的物料平衡示于图1.3。

固体原料的组成有:

1) 铁的氧化物: 通常为赤铁矿(Fe_2O_3), 有时为磁铁矿(Fe_3O_4)。现代高炉操作中, 加入的铁氧化物有三种形式: (1) 用精矿粉(5~10% $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, 其余都是 Fe_2O_3)生产的直径为1~2厘米的球团矿; (2) 用粉矿生产的块度为1~3厘米的烧结矿; (3) 粒度为1~5厘米直接入炉的原矿。一座高炉的原料可以用含有这三种铁氧化物的一种、两种, 甚至三种。少量的炼钢炉渣和轧钢皮也可作为炼铁原料。

2) 冶金焦(90% C, 10% 灰分, 0.5~1% S, 干基: 5~

表 1.1 现代化高炉操作数据

福山 5 号高炉和意大利冶金公司 5 号高炉的数据分别来源于 Higuchi (1977) 和 Marchi (1978)。其他数据是由高炉操作人员直接提供的。

炉 别	伯恩斯港 D 高炉 1977	加拿大 1977	福 山 5 号高炉 1976	千 叶 5 号高炉 1976	意大利 冶金公司 5 号高炉 1976
产量 (生铁), 吨/昼夜	5700	2500	9900	4900	8100
生产率 (按工作容积计) 吨/昼夜·米 ³	2.4	1.6	2.5	2.7	2.4
炉子尺寸					
炉缸直径, 米	10.7	8.5	14.4	11.1	14.0
工作容积, 米 ³ (风口到料线)	2430	1580	3930	1820	3360
风口数目, 个	28	20	42	N.A	36
输入物 (均以吨铁为基础)					
铁矿, 公斤					
烧结矿	610	0	1290	1160	1500
球团矿	850	1330	40	45	150
原 矿	0	70	270	350	0
其 它 ^①	50	0	0	30	0
熔 剂 ^② , 公斤	120	180	0	0	0
干焦比, 公斤	415	440	405	430	420
风 量 ^③ , 标米 ³	1220	1690	1040	1040	1020
富 氧 量, 标米 ³	20	0	10	30	15
油 比, 公斤	75	120	55	40	60
鼓风湿分, 公斤	35	30	12	12	15
风 温, K	1360	1340	1550	1330	1520
风口压力, 大气压 (表压)	2.5	2.0	3.4	N.A	3.4
输出物					
铁水温度, K	1800	1770	1760	1780	1780
渣 量, 公斤/吨铁	290	210	320	300	380
炉 渣 $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$	1.1	1.0	1.2	1.2	N.A
炉顶煤气成分, % (体积)					
CO	20	22	22	23	N.A
CO ₂	20	16	22	22	21
H ₂	5	5	3	3	3
炉顶煤气温度, K	420	470	400	400	390
炉顶压力, 大气压 (表压)	1.1	0.3	2.2	N.A	1.7

① 预还原矿石、废铁、轧钢皮等；② 石灰石、白云石、转炉炉渣；③ 273K, 1个大气压, N.A. 表示没有收集到数据。

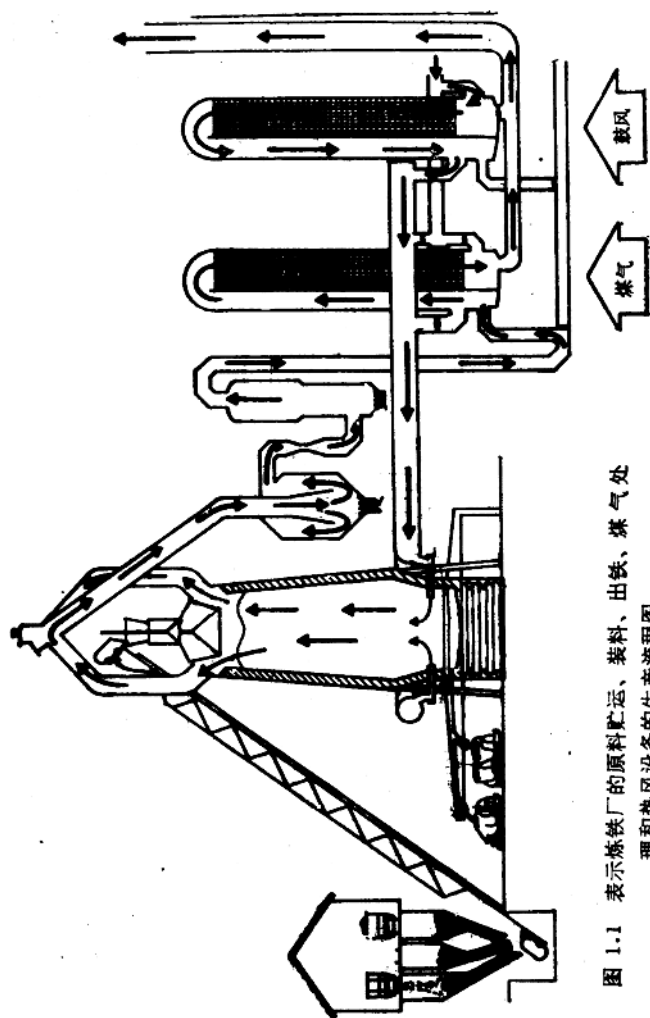


图 1.1 表示炼铁厂的原料贮运、装料、出铁、煤气处理和热风设备的生产流程图

10% H₂O): 它提供矿石还原和熔化所需的还原气和热量。冶金焦是粉状烟煤(挥发物含量25~30%重量)的混合物在隔绝空气的条件下加热生产的,挥发物蒸馏出去,得到多孔的焦炭。它具有:(1)一定的高温反应性;(2)足够的强度,在高炉下部不致被压碎。由于在炉子下部软熔带必须使气流均匀通过,后一特性是非常重要的(Nakamura,1978)。入炉焦炭块度为2~8厘米。

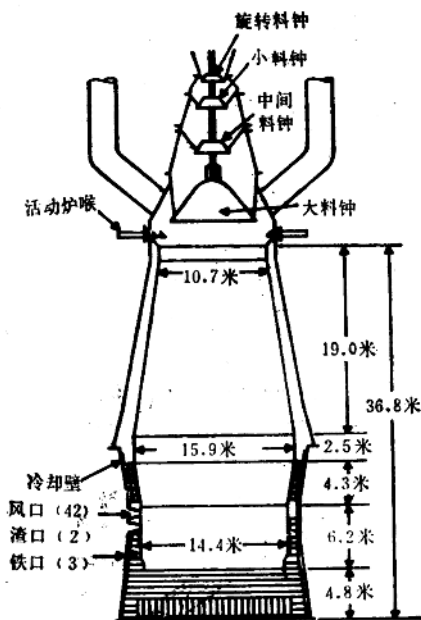


图 1.2 福山 5 号高炉剖面图 (Sugawara, 1976)

两个明显的特点: 炉顶是高压操作的最新式四钟系统; 为均匀布料使用了活动炉喉。从风口到料线的工作容积和从炉底到料线的总容积分别为3930和4620米³。

3) CaO和MgO: 它可使矿石和焦炭中的二氧化硅和三氧化二铝等杂质组成低熔点($\approx 1600\text{K}$)的液态炉渣。CaO还有第二

个作用，即将炉料中的一部分硫（主要是焦炭带入的）转移到炉渣中，而防止进入生铁。 CaO 和 MgO 是以熔剂性烧结矿的形式加入，或以2~5厘米的石灰石（ CaCO_3 ）和白云石（ $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ）加入炉内；有时以炼钢炉渣形式加入。

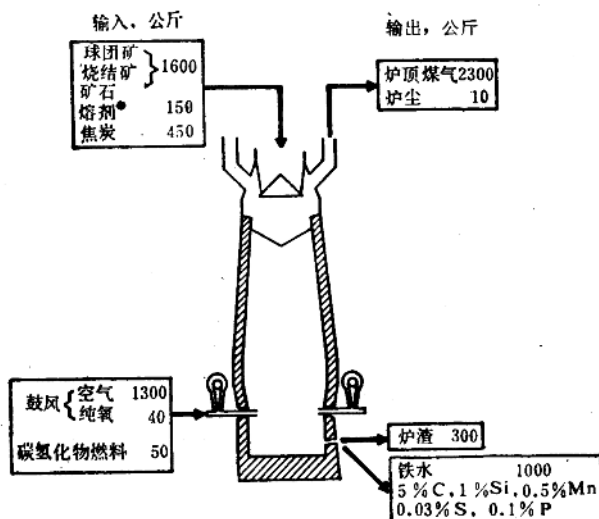


图 1.3 大高炉有代表性的物料平衡（炉渣和煤气成分在第二节中已给出）

• 熔剂的主要成分是以自熔性烧结矿或石灰石和白云石的形式加入的
 CaO 和 MgO ，有时以炼钢炉渣形式加入。

从风口喷入的原料：

1) 热风：它加热到1200~1600K，有时用富氧鼓风，使风中含氧量达25%（体积）。在风口前，热风使炽热（ $\approx 1800\text{K}$ ）的焦炭燃烧，为还原反应和炉料、产品的加热和熔化提供热量。高温可保证铁水和炉渣的温度都高于它们的熔点。

2) 气态、液态或固态碳氢化合物：它为还原过程提供附加的还原气体（ CO 和 H_2 ）。重油和焦油是最常用的喷吹物，有时也

喷吹天然气和煤粉。

第二节 产 品

高炉的主要产品铁水，每隔一定时间（对巨型高炉几乎是连续地）由靠近炉缸底部的铁口放出。具有代表性的铁水成分是：

元素	含量，（重量）%
C	4~5（饱和的）
Si	0.3~1.0
S	0.03
P	取决于矿石，最高达 1
Mn	取决于矿石，0.1~2.5
熔点	1400K

每座高炉的生铁成分是根据炼钢厂的要求选定的，并且由调节炉渣成分和炉温（特别是炉子下部温度）来控制。

生铁以液态运往炼钢厂进行精炼，用氧气把杂质去除到最低水平。在一些情况下（Lu, 1975），铁水在精炼前，用碳化钙或镁焦处理进行脱硫。

高炉有两种副产品：

1) 炉渣 (30~40% SiO_2 , 5~15% Al_2O_3 , 35~45% CaO , 5~7% MgO , 0~1% $\text{NaO} + \text{K}_2\text{O}$, 1~2.5% S, 重量%)：这种炉渣含有很少量的氧化铁，表明高炉有非常好的还原效率。选择炉渣成分要考虑 (Thom, 1977)：(1) 将 SiO_2 和 Al_2O_3 转移到渣中；(2) 吸收 K_2O 和 Na_2O (碱金属)，否则它们在炉内将会富集[●]；(3) 吸收硫不使它溶于生铁；(4) 控制生铁的硅含量

● K_2O 、 Na_2O 由焦炭和矿石带入炉内。在炉子下部一部分还原成 K、Na 蒸气 (Lowing, 1977)，蒸气上升到低温区进行再氧化，并以固态存在于下降炉料中。这个过程形成循环，使钾和钠的化合物在炉内累积。这一累积的物理征兆是煤气流通过炉料时阻力增大和炉料下降不规律。这种循环富集过程与部分 SiO_2 还原成 SiO 蒸气引起的问题类似 (Elliott, 1977)。