

鋼院译丛

钢铁冶金理论实践

武汉钢铁学院
情报研究室

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X
X 炼铁高炉的理论与实践 X
X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

J. G. 皮斯 W. G. 德温波特著

罗廷和 余明扬译

魏植华校

武汉钢铁学院情报研究室

一九八三年十一月

绪 言

高炉是人类最有用的工具之一。它提供了一种从铁矿石中高效率地还原铁的方法。实际上它又是一切初级炼钢过程的基础。高炉在任何一个国家的经济中都占有重要位置。

高炉的重要性已使它成为一个被详细研究过的课题。尽管如此，由于高炉过程的复杂性，又使得它尚未被彻底研究清楚。高炉内的反应机理和各个环节的反应速率（例如铁氧化物的还原），虽已作过研究；但是，高炉作为整个作业过程而言，尚不能进行定量的描述。

对于高炉已尝试过几种这样的定量描述，其中最成功的是里斯特 (Rist) 及其同事们* 所建立的。他们根据质量平衡、热焓平衡和化学平衡来定量描述高炉。遗憾的是，里斯特的解释尚未如所希望那样被广泛地理解。此外，还有许多根据生产数据设计的关于高炉过程的经验模型。这些经验模型对高炉生产指标的最佳化有一定的意义。但总的来说，这些模型对于解释高炉的实际尚难有甚教益。

在本书中，我们搜集了有关高炉理论方面的、操作经验方面的现有数据。从中提出了一个关于高炉操作的数学校型，并编订了一组方程。这些方程 (i) 准确地描述了高炉过程的化学计算和热焓平衡；

(ii) 与炉身中所观察到的温度和煤气成分相一致。这些方程是根据里斯特的研究导出的，其中并引用了很多作者所提出的概念和实验结果。

* 里斯特 (Rist) 的许多著作曾发表在 1964. 2—1966. 4 的 *Revue de Metallurgie* 的 61~63 卷。

我们专门编订这些方程是要表明改变高炉的某一参数对高炉工艺的其它操作参数的影响。例如，这些方程用分析法和图解法表明增加风温对高炉热焓平衡的影响，从而定量地指出，入炉焦炭和风量降低到什么程度才能使这一影响得到利用。

方程所包括的其它重要变量是：碳氢化物的喷吹，含氧量，鼓风湿度，石灰石的分解，焦炭的反应性和非金属的还原。这些变量的影响，在本书中均用数字举例说明。而其它变量的影响，则通过附在各章后面的习题得到证明。在第223页附有习题答案。这些习题亦将加深和巩固课文中出现的新概念。

希望我们的研究能促进对高炉过程的了解。同时，也希望本书的读者能更好地了解过程变量的个别影响和综合影响。我们还希望这些方程能在高炉操作中得到验证。也希望这些解释与建议对于高炉操作指标最佳化有所裨益。

本书和习题是麦吉尔大学钢铁冶金课程的前半部分教材也可以作为其它地方同一目的使用。

J·G·皮斯（诺兰德研究中心）

W·G·德温波特（麦吉尔大学）

1979年3月

译者序

本书系根据加拿大伯格曼出版社 (PERGAMON PRESS) 出版的 J.G. 皮斯和 W.G. 德温波特所著“炼铁高炉的理论与实践” (The Iron Blast Furnace - Theory and Practice) 一书 (1979年版) 译出。

本书根据高炉解剖研究资料和里斯特 (Rist) 关于高炉数学模型的理论, 以及近年来高炉理论和实践的发展, 通过简明扼要的分析 and 推导, 提出了一组比较完整的高炉操作数学模型方程式。只要知道入炉原料的主要成分、风温以及予定的渣、铁成分等原始数据, 利用这一模型作分析计算或用图解 (操作线) 法, 就能够予测高炉的各个操作参数 (如碳素消耗量、炉风量及其相互之间的关系); 也能予测高炉某一操作条件 (如喷吹燃料、富氧、鼓风湿度、Si 和 Mn 的还原、碳酸盐分解、予还原炉料等) 的改变, 对整个高炉工艺的其它操作参数的影响。此外, 该书还简要介绍了如何用此数学模型借助线性规划使高炉作业最佳化 (如达到最低的生铁成本或者最低的焦炭消耗, 或者最高的生产率, 或者最高的利润等等)。书中所列的许多数据说明, 该模型所予测的工艺操作参数, 与实际生产值吻合良好。

全书共分十四章和七节附录, 每章后均附有习题 (书末附数字答案), 用以巩固和加深概念。前言及第一至第十章由罗廷和译, 第十一至十四章及全部附录由余明扬译, 全书由魏植华总校。

本书第一次于83年元月印出交流后, 很受欢迎, 此次重印以海内各单位需要。

热忱欢迎读者对译文中的错误提出批评和指正。

目 录

绪 言

第一章 高炉工艺过程简述	1
1.1 原料	1
1.2 产品	4
1.3 操作	6
1.4 生产率的提高	10
1.5 高炉投资费	12
1.6 提要	13
习 题	14
第二章 高炉炉内考察	16
2.1 风口前的行为	17
2.2 炉缸、风口回旋区和炉腹区的化学反应	18
2.3 致熔区	19
2.4 致熔区以上的还原作用	20
2.5 焦炭气化反应的动力学	21
2.6 在1200K等温线以上区域的反应	22
2.7 高价氧化物的还原	22
2.8 炉身上部的头四分之一区域和炉顶煤气	24
2.9 炉料和煤气的停留时间	24
2.10 装料设备	25

2.1.1 提 要	26
习 题	27
第三章 高炉过程的热力学	29
3.1 高炉内的热焓需要量	29
3.2 临界炉缸温度	30
3.3 高炉内的温度分布线: 热贮各区	32
3.4 高炉内的自由能研究: 平衡法	33
3.5 高炉内的气体成分曲线: 化学贮各区	35
3.6 提 要	37
习 题	39
第四章 高炉化学计算法	41
4.1 化学计算法研究	41
4.2 化学计算方程	46
4.3 计 算	47
4.4 化学平衡的图解法	48
4.5 提 要	53
习 题	53
第五章 数学模型格式的建立: 简化的高炉热焓平衡	56
5.1 简化的初始热焓平衡	56
5.2 热焓平衡	57
5.3 热供给和热需求	57
5.4 热焓平衡的一般格式	60

5.5 提 要	61
习 题	61
第六章 数学模型格式化学计算方程和热焓平衡方程的组合	63
6.1 化学计算方程和热焓平衡方程的组合: 算法	64
6.2 化学计算和热焓平衡组合方程的图解表达式	65
6.3 图解算法	67
6.4 提要和关于化学计算/热焓平衡图解法的讨论	69
习 题	70
第七章 数学模型化学计算部分的完善: 通过化学贮备区	71
将高炉进行概念性分段	
7.1 将高炉作为两段式反应器	72
7.2 下段的化学平衡	74
7.3 洋士体还原区的化学平衡方程	75
7.4 讨论与提要	77
习 题	78
第八章 高炉下段的热焓平衡	80
8.1 高炉下段的热焓平衡	80
8.2 热焓平衡的供求形式	82
8.3 数值推导	84
8.4 提 要	85
习 题	86

第九章 高炉下段化学计算方程和热焓平衡方程的组合:

高炉参数的先验计算	87
9.1 计算实例	89
9.2 各方程式的含意	91
9.3 方程式的图解表示	92
9.4 图解法计算	96
9.5 操作线的特点	98
9.6 提 要	99

习 题	100
-----------	-----

第十章 数学模型的鉴定及其假设前提的讨论

10.1 热量有效性的检验	102
10.2 炉顶煤气温度计算	104
10.3 化学计算有效性的验证	106
10.4 热力学有效性的检验	107
10.5 模型的假设条件及其预测效果的有效性	108
10.6 在化学贮备区未达到平衡	110
10.7 热贮备温度的影响	111
10.8 提 要	113

习 题	114
-----------	-----

第十一章 风口喷吹对高炉操作的影响

11.1 普遍喷吹物	117
11.2 全化学计算方程式中喷吹物的表达	118

11.3	下段化学计算方程式中的喷吹物表达	121
11.4	下段热焓方程式中的喷吹物表达	123
11.5	简便计算公式	125
11.6	计算举例 I: 富氧	126
11.7	计算举例 II: 喷吹含氢物	132
11.8	图解计算 (一般情况)	135
11.9	有氢喷吹的炉顶煤气成份	138
11.10	喷吹计算讨论及提要	140
习 题		141

第十二章 操作方程式的补充: 热损失, Si 和 Mn 的还原:

碳的溶解: 造渣: 碳酸盐分解	144
12.1 对化学计算的影响	144
12.2 对热焓的影响	148
12.3 提 要	155
习 题	156

第十三章 高炉操作方程式总结: 予报值与实际值的比较

13.1 建立模型的各阶段总结	159
13.2 计算机的计算方法	164
13.3 模型予报与生产高炉数据的比较	164
13.4 风温、风口喷吹物、金属化炉料及生铁 杂质对需要的焦炭量和风量的影响: 予报值与实际值	168

13.5 提 要	172
第十四章 用线性规划使高炉最佳化	173
14.1 简化的最佳化问题	174
14.4 最低成本的图解法	175
14.3 最佳化解析法	181
14.4 计算机输入和输出	184
14.5 更完全的问题	187
14.6 提 要	196
习 题	197
附录 I 风口火焰温度计算	198
A 1.1 线性规划的火焰温度限制方程式	
A 1.2 计算项目补充	
附录 II 风口复杂喷吹物在操作方程式中的表达	207
A II.1 已知燃烧热和化学成分的气体喷吹物	
A II.2 已知碳和氢的重量百分比及已知燃烧热的喷吹物	
附录 III 炉渣需要的热	211
附录 IV 炼铁矿物和化合物的化学计算数据	215
附录 V 温度为 T 时由元素生成化合物的热焓 (H_f^T)	217
附录 VI 元素和化合物的热焓增量方程式 [$H_T^* - H_{298}^*$]	219
附录 VII 鼓风热焓的 $\bar{H}^B$ 值	222
习题答案	223
附录 VIII	228

第一章 高炉工艺过程简述*

高炉是一高而垂直的竖炉。它采用主要以焦炭形式的碳从铁氧化物中还原出铁。产品为液态生铁 (4—5% C, 0.1~1% Si), 适于进一步精炼成钢。图 1.1 为一典型高炉车间流程图。图 1.2 为高炉内型图, 表 1.1 列举了现代大型高炉的操作数据。

高炉的目的就是以高的生产率冶炼出成分一定的铁水。唯一重要的操作参数是渣铁温度。要使渣铁从炉内流出, 渣铁温度必须高于 1700K。由于高炉冶炼的全部生铁实际上都要送去炼钢, 所以生铁成分并不是高炉过程的重要特征; 但是, 应当适当调整高炉炉渣的成分和炉缸温度, 使生铁成分控制在炼钢厂的规格内。

目前, 世界上大约有 1000 座高炉, 每年生铁总产量约为 5 亿吨。

1.1 原料

高炉所用原料是: (i) 固体炉料, 包括矿石、焦炭和熔剂, 这些原料装入高炉上部; (ii) 空气, 它是通过靠近炉底的许多风口鼓入炉内。碳氢化合物 (气态、液态和固态) 和氧, 亦经过风口送入炉内。图 1.3 是一个具有代表性的物料平衡图。

* 欲知高炉操作的详细叙述, 读者可以直接参阅加拿大, 汉密尔顿, 麦克马斯特大学, 与维高 (W.K. Lu) 编的: *Blast Furnace Ironmaking* 1977 和 *Blast Furnace Ironmaking* 1978。

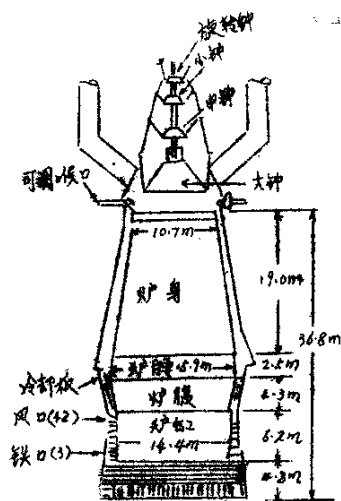


图 1.2 福山 5 号高炉 (sugawara, 1976) 纵剖面示意图

固体炉料包括:

(a) 铁氧化物: 一般为赤铁矿 Fe_2O_3 , 间或为磁铁矿 Fe_3O_4 .

现代高炉操作中, 铁氧化物是以下面三种形式加入高炉: (i) 由细磨精矿 ($5 \sim 10\% \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, 其余为 Fe_2O_3) 生产的 $10 \sim 20 \text{ mm}$ 的球团矿; (ii) 由粉矿生产的 $10 \sim 30 \text{ mm}$ 的烧结矿; (iii) 经过整粒的 $10 \sim 50 \text{ mm}$ 的船运矿石。一座高炉的原料含有上述一种, 两种或所有三种形式的铁氧化物。少量的钢渣和轧钢皮也可以作为炼铁原料。

(b) 冶金焦炭 (90% C, 10% 灰分, 0.5~1% S, 干成分; 此外尚含 5~10% H_2O): 它提供大部分的还原性煤气和热量, 供矿石还原和熔炼。焦炭是将粉状结焦煤 (含有 25~30% 挥发分) 在隔绝空气的条件下进行加热制成, 使煤中的挥发物蒸馏而得到一种多孔的焦炭。它具有 (i) 在高温下良好的反应性; (ii) 足够高的强度, 使它在接近高炉下部时不致被压碎, 后一性质尤为要用。因为随着炉料在高炉下部软熔时, 必须使焦炭块之间, 允许均匀的煤气流通过, 加入高炉的焦炭粒度为 $20 \sim 80 \text{ mm}$ 。

(c) CaO 和 MgO : CaO 和 MgO 将矿石和焦炭中的 SiO_2 和 Al_2O_3 等杂质熔剂化, 生成一种低熔点 ($\sim 1600\text{K}$) 易流动的炉渣。 CaO 的另一个有益作用是将炉料 (主要由焦炭) 带入的部分硫去除到炉渣里, 而不进入铁中。 CaO 和 MgO 以烧结矿或以 $20 \sim 25 \text{ mm}$ 块度的石灰石 (CaCO_3) 和白云石 ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$) 的形式加入高炉。偶

尔也以炼钢炉渣的形式加入高炉。

经风口喷入的原料:

(a) 热风: 予热到 $1200 \sim 1600\text{K}$ 的热风或富氧 $35\% \text{O}_2$ 的热风。在风口前将炽热 ($\sim 1800\text{K}$) 的焦炭燃烧, 供给 (i) 还原反应和 (ii) 加热和熔化炉料及渣铁所需的热量。高温保证渣铁温度超过其熔点。

(b) 气体、液体或固体碳氢化合物: 这又为还原过程提供附加的还原性气体 (CO 和 H_2)。其中燃料油和焦油是最常用的添加燃料, 亦用天然气及煤粉。

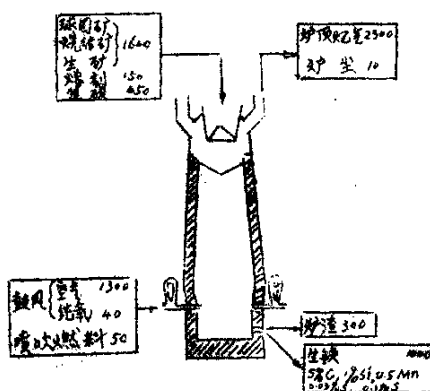


图 1-3 大型高炉的物料平衡

1.2 产 品

高炉主要产品是液态生铁, 它在规定的时间内, 由靠近炉底的几个铁口之一放出 (当高炉很大时, 则连续放出)。下面为一具有

代表性的生铁成分:

元 素	组成, %
C	4—5 (饱和)
Si	0.3—1
S	0.03
Mn	决定于矿石, 为 0.1~2.5
P	决定于矿石, 直至 1
熔 点	1400K

高炉生铁成分的选择是为了满足炼钢需要。生铁成分是通过调整 (1) 炉渣成分和 (ii) 炉温 (尤其是高炉下部的温度) 进行控制。

生铁是以铁水的状态送到炼钢厂, 在炼钢过程中, 生铁中的杂质元素通过用氧精炼被去除到最低水平。在这些情况下, 生铁在氧化精炼前, 先用碳化钙或镁焦进行炉外脱硫。

高炉的两个副产品:

(*) 炉渣 (30~40% SiO_2 , 5~15% Al_2O_3 , 35~45% CaO , 5~15% MgO , 0~1% $Na_2O + K_2O$, 1~2.5% S); 炉渣含有很低的 FeO , 渣中 FeO 的含量低显示出高炉的还原效率极高。炉渣成分的选择原则: (i) 能将 SiO_2 和 Al_2O_3 去除到液态渣中; (ii) 能吸收 K_2O 和 Na_2O (碱), 否则将引起高炉结瘤*; (iii) 能吸收硫, 不使硫熔入生铁; (iv) 控制生铁中 Si 的含量。

当炉渣碱度

$$\frac{\% \text{CaO} + \% \text{MgO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3}$$

在 1.1 ~ 1.2 之间时，看来能很好地满足上述四种需要。固态高炉渣可用于制造普通水泥和团矿。

(b) 煤气：煤气通过炉顶的煤气收集系统逸出。一个具有代表性的现代高炉炉顶煤气成分：23% CO, 22% CO₂, 3% H₂O, 48% N₂，热值约为每 M³ 4000 千焦耳（约为天然气的十分之一），煤气经过除尘后，在热风炉中燃烧，用以加热鼓风。炉尘用烧结或球团的方法进行造块，重新加入高炉或贮存备用。

1.3 操 作

高炉操作由下述几个环节组成：周期地从炉顶装入固体炉料，连续地或周期地从炉底放出液态渣铁，连续从风口鼓入带有碳氢化合物的热风，连续排出煤气和炉尘。

高炉大部分操作程序（例如装料、鼓风和燃料喷吹），都实现了机械化和自动化。现代高炉普遍装有连续的监测仪表，一般所连续监测的高炉操作参数有：

温度检测：热风温度，冷却水温度，炉身砖衬温度和炉顶煤气温度；

* K₂O 和 Na₂O 由焦炭和矿石带入高炉。在靠近炉底时，有一部分被还原为 K 和 Na 蒸汽，这些蒸汽随即上升到高炉温度比较低的区域有部分又重新被氧化，成固体形式进入下降炉料中，形成一种循环过程造成高炉中 K 和 Na 的化合物积累，这种碱金属积累的征兆是炉料下降不顺，煤气上升受阻。SiO₂ 部分还原成 SiO 蒸汽亦认为会引起类似问题。