

TF511

32

高等学校教学用书

高炉炼铁原理 ——理论与实践

〔澳〕A.K.比斯瓦斯 著

齐宝铭 王筱留 等译

6851/10



冶金工业出版社

B

622056

译者的话

随着我国钢铁工业的发展,提高高等学校钢铁冶金等专业学生的教学质量和提高高炉炼铁工作者的素质是极为重要的。这就要求有较新的和较全面的参考书供读者选择。近年来,我国出版了国内外的多种炼铁方面的著作或论文集以适应需要,这里我们翻译了澳大利亚昆士兰大学教授 A.K.比斯瓦斯 (A.K. Biswas) 编著的《高炉炼铁原理——理论与实践》(Principles of Blast Furnace Ironmaking——Theory and Practice)(1981 年版),将它推荐给读者。我们认为它是一本较好的适合于钢铁冶金专业师生和高炉工作者的参考书。

我们认为本书有以下特点:

1. 较全面地概括了世界上各国高炉冶炼的理论研究和实践方面的成就,特别是作者并没有拘泥于某一学派或某一观点,而是博采欧、美、苏、中、日等国的成就,加上作者本人多年研究和实践的结果,融会贯通,完成此书。

2. 理论较好地联系实际。作者在讨论高炉冶炼过程中的重要现象时,以理论为基础,同时注入各国的实践和作者本人的经验,通过简易计算论证,给读者以定量的概念,有深入浅出之功。

3. 从不同角度较全面地对高炉炼铁过程的重要现象进行了讨论和分析,其示范性的论述对培养读者分析问题的能力会有帮助,而且取材于世界各国的资料均有详细文献目录,对读者进一步深入探讨问题有较好的参考价值。

在翻译过程中,已将原书中的公制和一些英制单位尽可能地换算为我国的法定单位(其中将 Nm^3 译为 米^3 , $\text{wt}\%$ 译为 $\%$, gmol 译为克分子或克原子)。

本书由北京科技大学炼铁教研室的齐宝铭(第1~5, 7章),

杨乃伏（第6章），沈甦（第8、9章），王筱留（第10～13章）等翻译，全书由齐宝铭、王筱留通审总校。在翻译过程中得到教研室同志们的多方面支持和协助，在此表示感谢。特别是在译文的定稿过程中，杨传福同志付出了辛勤的劳动，提出了宝贵意见，也在此深表谢意。

书中错误和不妥之处欢迎读者及同行批评指正。

1986年3月于北京

前 言

当我还在炼铁厂和烧结厂工作的时候，就产生了写这本书的念头。高炉的行为对其操作者来说总象是个不可捉摸的谜。高炉的产量和生铁的质量主要取决于操作者的经验和技巧。只在过去的二三十年中，炼铁这门手艺才变成了一门科学。这一变化激励我收集了实验室和工厂的研究室发表的有关研究成果，还有生产经验，以汇编成一本全面而又简明的专著；一方面是为了有助于理解高炉中发生的复杂的变化过程；另一方面也可作为冶金及化工专业的在校大学生、研究生以及研究工作者和教师的教科书或参考书，同时还可供高炉炼铁厂的经理、董事、研究人员、操作人员以及在炼钢厂工作的高级人员使用。

本书的主要目的是从理论和实践经验出发，提出提高高炉生产率的方法和措施，而高炉的生产率是由燃料的利用率以及煤气穿过固相区（干区）和固液两相区（湿区）的运动状况决定的。在教学和生产实践过程中，我深感缺少一本反映最新发展情况的书。这本书应系统地包括各种提高生产率、提高燃料利用率以及降低焦炭消耗的方法和可能达到的限度。所有上述这些问题都包括在本书第10章及第11章中了，而其他章是从理论和实践两方面描述实现上述主要目标的基本先决条件。

炼铁过程主要是由不同组分和不同相之间的相互反应构成的。为了讨论方便，按温度的差别将高炉分成三个区域，而温度的差异则是炉内发生的各种不同反应的必然结果。第2、3及第7章讨论的是高炉反应的热力学和动力学，以利于理解各种反应所涉及的物理化学原理。第4章简要地讨论了炉内固体炉料和煤气的温度分布，这二者在很大程度上决定着燃料的利用率和炉料下降的状况。高炉的气体力学是很重要的，第5章专门讨论这个课题。第6章讨论的是高炉原料及其特性，它对炉内煤气流分布

有很大的影响。第6章还讨论了影响铁矿石还原性的各种元素。第8章叙述的是初渣、炉腹渣和炉缸渣的生成过程及其性能，而这些对于硫分配的影响是第9章讨论的内容。第10章系统地论述了理论焦比的计算方法以及降低焦比和喷吹附加燃料等问题。炉型和炉况失常对高炉生产的影响是第12章和第13章讨论的内容。因为有关的更详细的情况，已在很多地方讨论过了，所以第1章只简要地讨论了高炉及其操作的一般情况，目的是保证全书叙述的连续性以及给在讨论高炉操作章节中没提到的东西提供一些背景材料。

我要特别感谢我的夫人尼里玛 (Nilima) 在我特别需要时给予的支持和帮助，并感谢她在准备和写这本书的过程中的密切合作。我还要感谢杰蒂普 (Jaydeep) 和桑蒂普 (Sandeep) 为本书画了插图并完成了大部分的计算。还要感谢 P.Ch. 乔哈里 (Paresh Ch. Chaudhuri)、J. 乌卡维克 (Joe Vuckovic) 和 S. K. 格普塔 (Gupta) 等教授的鼓励。

最后还要感谢下列诸学会，允许我从他们权威性杂志中引证一些本书所需要的材料。这些学会是：美国金属学会及美国采矿冶金石油工程师联合会 (AIME) 的冶金学会，钢铁研究所，金属学会，印度金属研究所，西德钢铁出版社，化学学会，澳大利亚矿冶研究所，日本钢铁研究所，美国陶瓷学会、约翰·威利父子公司 (John Wiley & Sons) 等。

A.K. 比斯瓦斯

目 录

1 过程的概述	1
1.1 引言	1
1.2 铁氧化物的还原	5
1.3 高炉下部区域中的反应	7
1.4 高炉中部区域中的反应	10
1.5 高炉上部区域中的反应	11
建议的参考书目	12
2 物理化学基本原理	13
2.1 引言	13
2.2 平衡常数及活度	13
2.3 拉乌尔和亨利定律	14
2.4 自由能	17
2.5 氧势	18
2.6 高炉中的氧势	22
2.7 还原性的提高和减弱	23
2.8 气—固相反应的速度	26
2.9 高炉炉渣	48
2.10 渣铁反应的动力学	57
参考文献	61
3 炼铁过程中的重要体系	66
3.1 引言	66
3.2 Fe-C 体系	66
3.3 Fe-C-其他合金元素体系	67
3.4 Fe-O 体系	68
3.5 C-O 体系	71
3.6 Fe-O-C 体系	74
3.7 铁的渗碳	83

3.8	H-O体系	84
3.9	C-O-H体系	84
3.10	Fe-O-H体系	86
3.11	Fe-O-H-C体系	87
3.12	Fe-O-Si-C-渣体系	89
3.13	Fe-O-Mn-C-渣体系	93
3.14	Fe-O-S-C-渣体系	95
3.15	Fe-O-Si-Mn-S-C-渣体系	97
3.16	FeO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 体系	101
3.17	CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ 体系	103
3.18	CaO-MgO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 体系	107
3.19	FeO-CaO-SiO ₂ 体系	110
3.20	FeO-CaO-Fe ₂ O ₃ 体系	112
3.21	碱金属及其化合物	113
	参考文献	118
4	温度分布	122
4.1	引言	122
4.2	两段式热平衡	124
4.3	影响温度分布的因素	128
4.4	赖卡特图	137
4.5	高炉内温度分布与炉料运动的关系	138
	参考文献	139
5	高炉气体力学	141
5.1	引言	141
5.2	煤气流均匀分布的重要性	141
5.3	穿过粒度均匀炉料的固定床的煤气流	144
5.4	穿过不同粒度的填充床的煤气流	151
5.5	料层的不稳定性及流态化	157
5.6	炉腹(两相)区的煤气流	162
5.7	炉顶高压	169
5.8	炉料分布与装料	173
5.9	炉料及煤气的运动	182
5.10	炉料和煤气运动的变化	189

参考文献	190
6 原料及其性能	193
6.1 引言	193
6.2 铁矿石和造块	193
6.3 矿石的准备	196
6.4 造块	198
6.5 破损和软化	212
6.6 矿石、烧结矿和球团矿的检验	218
6.7 影响还原性的因素	226
6.8 鼓风	247
6.9 高炉燃料	252
参考文献	264
7 高炉中的反应	272
7.1 引言	272
7.2 上部区域中的反应	274
7.3 中部区域中的反应	278
7.4 下部区域中的反应	294
7.5 燃烧带	309
7.6 影响燃烧带的因素	313
7.7 金属的再氧化	325
7.8 炉缸的热状态	327
参考文献	331
8 高炉渣	336
8.1 引言	336
8.2 初渣和炉腹渣的生成	337
8.3 炉腹渣的生成	342
8.4 终渣或炉缸渣	349
8.5 炉渣成分和渣的利用	353
参考文献	354
9 脱硫	356
9.1 引言	356
9.2 硫的化学反应	357
9.3 炉身中硫的反应	359

9.4 炉腹中硫的反应	360
9.5 炉缸中硫的反应	364
9.6 硫的控制	373
9.7 炉外脱硫	375
参考文献	378
10 焦比和燃料利用率	381
10.1 引言	381
10.2 最佳焦比的计算	385
10.3 直接还原, 风口碳和热效率	390
10.4 降低焦比的方法	392
10.5 超级炉料	412
10.6 炉身喷吹煤气	413
10.7 鼓风附加物	415
10.8 炉顶高压	430
参考文献	431
11 高炉生产率	434
11.1 引言	434
11.2 高炉生产指数	435
11.3 提高生产率的方法	441
11.4 降低焦比	471
11.5 限制生产率的因素	473
11.6 小结	481
参考文献	481
12 炉型和生产能力	485
12.1 引言	485
12.2 炉型的影响	485
12.3 炉型计算	486
12.4 炉衬磨损的影响	495
参考文献	496
13 炉况失常及其控制	497
13.1 引言	497
13.2 管道行程	497
13.3 上部结瘤	498

13.4 下部炉瘤.....	502
13.5 悬料.....	504
13.6 滑料.....	505
13.7 矿石漂移.....	507
13.8 炉缸堵塞.....	507
13.9 炉缸剧冷.....	508
13.10 风口烧坏	509
13.11 涌焦	510
参考文献	511

1 过程的概述

1.1 引言

高炉生铁的产量在所有的炼铁生产过程中名列第一。这不仅是由于高炉的生产率非常高，还因为高炉中热能利用率也很高。现代化大高炉的产量每日高达12000吨生铁，热能利用率达到85~90%，其原因在于高炉是一个特别有效的逆流式热交换设备，

铁来源于铁矿石，矿石中铁主要以氧化物形式存在，或是赤铁矿(Fe_2O_3)，或是磁铁矿(Fe_3O_4)，有时少量地以氢氧化物和碳酸盐的形式存在。在所有供高炉冶炼用的含铁原料中，赤铁矿所占比例最大。在化学纯状态下，赤铁矿含铁约70%，磁铁矿约为72.4%。但通常，矿石含铁量的范围是，富矿50~65%。贫矿30~50%。其余的叫作脉石，主要由 SiO_2 及 Al_2O_3 组成，还有少量的水分及化学结合水。入炉矿石或直接取自矿山(生矿)，或者正如现在实际生产中那样，大部分制成为烧结矿和球团矿。烧结或球团是将铁矿粉制成大块的过程，加入或不加 CaO 及 MgO 作为熔剂。其他用量较少的含铁原料有废铁、平炉或转炉渣、轧钢的氧化铁屑等。脉石不溶于液态生铁，并具有较高的熔点。但在有熔剂存在的情况下，脉石可在低温下熔化并生成炉渣。 MgO 可以降低炉渣的熔点并改善其流动性。 CaO 、 MgO 是碱性的， SiO_2 和 Al_2O_3 是酸性的，二者之比称为炉渣的碱度。

渣及铁仅能在液态下才能彼此彻底分开，为此需要将其加热到各自的熔化温度以上。通常，热量是靠燃烧焦炭提供的。虽然热能也可以靠电能或其他燃料提供，但在大多数情况下那是不经济的。铁氧化物的还原需要足够高的温度和足够数量的还原剂，这些职能主要是由焦炭中的碳完成的。铁还从焦炭中吸收2~4.5%的碳，使其熔点由1534℃下降了200~350℃，下降的程度取决于含

碳量。焦炭含灰分的量在大多数国家中为6~10%，少数国家，如印度高达20~25%。灰分中主要含有 Al_2O_3 和 SiO_2 ，需要加入一定量的 CaO 或 MgO 以造渣。矿石、焦炭和熔剂中含有Si、Mn、P和S的化合物和其他少量杂质，如Pb、Sn、Cu、Ni、Cr、Ti和碱金属等。这些元素或者部分或者全部还原进入生铁。通常有意地加入锰矿是为了使锰进入生铁，这对铁的性能及炼钢有利。磷几乎全部还原进入生铁。而由 SiO_2 还原为Si、由含Mn原料还原为Mn及由矿石和焦炭带来的S进入生铁的量，取决于温度及炉渣的碱度。在确定炉渣碱度时，首先要考虑的是控制生铁中的硫量。生铁中Fe占92~93%，其他是C、Si、Mn、P及S等。

焦炭燃烧所需的氧来自空气（鼓风），鼓风在蓄热式热风炉中预热，高炉得以从外部取得一定量的显热而降低炉内的焦炭消耗量。空气的预热是靠燃烧高炉煤气实现的（高炉煤气来自高炉炉顶，通常含有20~30%的 CO ，10~20%的 CO_2 ，其余是 N_2 及少量的 H_2 和水分）。这样，煤气中一部分化学热，即未在高炉中利用的 CO ，也被间接地利用了。鼓风通过炉缸上部的水冷风口进入高炉，而炉料则是用料车或胶带机由炉顶装入高炉的。图1.1是高炉的剖面。圆柱形顶部（炉墙由钢板保护，以防耐火砖衬被下落的坚硬炉料破坏）称为炉喉。下面的炉身随着向下延伸而直径加大直到圆柱形的炉腰。再以下的部分直径逐渐缩小，称为炉腹，与最下部的炉缸相联。炉缸是贮存渣铁的。

炉子顶部的开启是靠两个料钟或其他新型设备（例如四个钟或无钟炉顶）实现的，以便将炉料装入炉内。炉料要向下运动约25米，给上升的煤气提供了放出其显热，以及以其还原性组分（ CO 及 H_2 ）将铁的氧化物还原的机会（间接还原）。炉喉部分由炉子的最顶端向下延伸约2~3米。炉身延伸的长度约占炉子全高的3/5，其直径向下逐渐扩大是为了利于受热膨胀的炉料和煤气均匀、稳定地流动。圆柱形的炉腰是炉子直径最大的部分，正常情况下金属和炉渣在此处开始熔化，因而炉料开始收缩。炉腹的形状是倒置的截头圆锥，圆锥的底边与炉腰相联，而圆锥的顶部则与

炉缸顶部相联。鼓风是通过一组沿炉缸圆周等距离分布的水冷风口进入高炉的。风口距炉缸上沿约40~60厘米。鼓风压力为152~253千帕^① (1.5~2.5大气压(表压)), 以克服炉内料层的阻力。鼓风进入炉缸时的速度为150~300米/秒。

高炉的内型, 即各部分的形状和尺寸(例如高度、直径与水平的夹角等) 取决于冶炼的方法、风温、炉料的种类及其他条件。炉身的扩张程度、炉腰直径、炉腹以及炉身角、炉腹角等应这样选择(参见图1.1), 即必须保证炉料顺畅下降, 煤气在整个横断面上尽可能均匀地上升。近代大高炉的炉腹有向矮的较平坦的方向发展的趋势。

出铁口位于炉底之上约50~150厘米处, 渣口比铁口高约1米。由透平鼓风机来的冷风经过热风炉预热, 然后由环绕炉子的热风围管经鹅颈管和直吹管进入高炉。

在高炉顶部有一个防止煤气逸出以及使炉料良好分布的装置。传统的这种装置是由一个小钟和一个大钟组成的。当其中一个放料到大钟上或放入炉内时, 另一个保持关闭状态。小钟随一个布料漏斗一起转动, 为的是按预定的装料循环或装料顺序使炉料在大钟上部均匀分布, 大钟上装满料后再放入炉内。炉料在炉内的分布应当合理, 以保证上升的煤气分布均匀。炉料在炉顶分布的状态除了一些其他因素之外(参见5.7节) 取决于炉料的粒度和其他的物理特性, 以及大钟的直径、角度和炉料自大钟边缘落下的高度等条件。由于炉料在落下的过程中及落下后要发生偏析, 而一旦形成的料面分布形式, 要一直维持到高炉下部, 所以合理的装料制度对高炉的生产率、燃料的节约及顺行的情况都是非常重要的。

高炉炉衬通常是由耐火砖砌成的。高炉下部的高温部分, 如炉腰及炉腹, 应使用高铝的(含 Al_2O_3 40~50%)耐火度高的砖, 而炉身上部的砖只需能抗磨就可以了。对热最敏感的部分是

① 1标准大气压 $\approx$ 101千帕, 下同。——译注

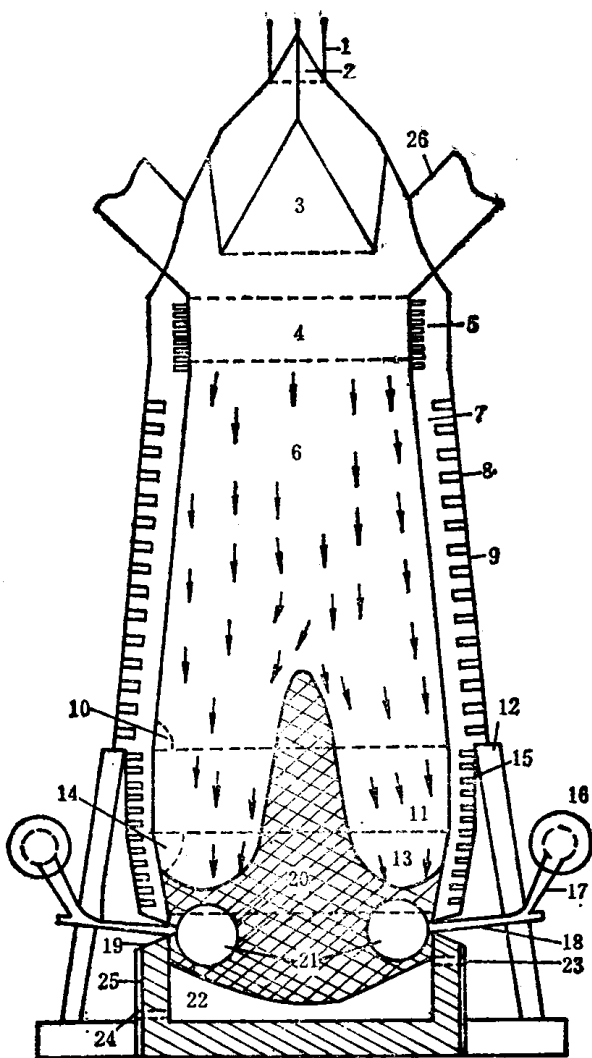


图 1.1 表示了炉料运动、燃烧带等特征的高炉剖面图

1—布料漏斗;2—小钟;3—大钟;4—炉喉;5—护板;6—炉身;7—砖衬;8—炉身冷却板;9—钢壳;10—炉身角;11—炉腰;12—支柱;13—炉腹;14—炉腹角;15—炉腹冷却装置;16—围管;17—鹅颈管;18—直吹管;19—风口;20—死料区;21—燃烧带;22—炉缸;23—渣口;24—铁口;25—炉缸冷却装置;26—煤气上升管

炉缸砖衬，其底部由耐火度很高的硅酸铝或炭砖砌筑。炭砖的耐火度很高，但对低碳生铁及其他氧化物，如对矿石和空气等的破坏作用很敏感。炉基最好用一薄层炭砖砌筑，下面用水或风冷却。因为使用了炉缸、炉腹和炉身水冷却板，从炉缸到炉顶的炉衬寿命才得以延长。

焦炭是炉料中一直降到风口水平都保持固态的唯一组分。除了提供还原剂以及提供将炉料加工成产品所需的热量以外，焦炭还起了支撑炉料的作用，特别需要这种支撑的是炉渣和生铁已成为液态的炉腹部分。液态渣铁穿过焦粒间的孔隙而流入炉缸。每吨生铁的耗焦量可由1000公斤到低达450~500公斤。低焦比是在使用熔剂性烧结矿、球团矿、高温及煤气分布均匀的情况下达到的。

热风通过风口进入炉内，在风口前立刻使焦中碳发生燃烧反应生成 CO_2 。产生的大量的热量使火焰（风口煤气）的温度达到1600~2000℃，具体的温度值取决于风温。在温度高于1000℃及有碳存在的条件下， CO_2 是不稳定的，按 $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ 生成CO。当使用干风时，风口煤气只由CO及 N_2 组成，其含量分别为35%和65%。焦炭不是连续地而是周期性地从上部进入燃烧带。

热还原气经过活跃的焦炭层到达炉腹、炉腰和炉身并将铁的氧化物还原（参见1.3节）。

1.2 铁氧化物的还原

铁的氧化物有三种形式——赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)和浮氏体(FeO)[●]。这些氧化物是逐步被还原的。以下是还原的化学反应式，在900℃时平衡的CO/ CO_2 值以及CO的利用率(η_{CO})的值。 η_{CO} 是CO转化为 CO_2 的份数或百分数，可写为：

$$\eta_{\text{CO}} = 100 \times \frac{\text{CO}_2}{(\text{CO}_2 + \text{CO})}, \% \quad (1.1)$$

为什么下面只选择性地列出了900℃的一些参数值，在本书

● 浮氏体不是一个有固定化学成分的化合物，其平均成分的分子式为 $\text{Fe}_{0.9}\dots\text{O}$ 。为方便起见本书中一律使用分子式 FeO 。

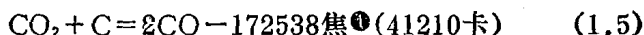
的后面有关章节中可以找到答案。

反 应	900°C时的平衡值		
	CO/CO ₂	η _{CO} , %	
$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	0	约100	(1.2)
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	0.25	80	(1.3)
$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	2.3	30	(1.4)

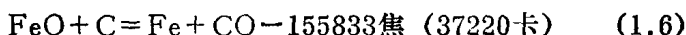
高炉冶炼是个逆流过程，CO含量很高的风口煤气可以与FeO接触。浮氏体需要煤气有很高的还原势才能转变为Fe（式1.4）。还原势已经降低了的煤气再上升遇到磁铁矿及赤铁矿，将这两种高级氧化物还原为低级氧化物所需的平衡CO/CO₂值比较低。所以浮氏体的还原在铁的氧化物的还原过程中是最重要的，特别是因为赤铁矿中O的70%是以浮氏体形式存在的。

CO₂是碳燃烧反应的终点产物，所以由式（1.2）～（1.4）所代表的反应夺取的氧量越多，则碳的热能及化学能的利用越完全。这些反应称为间接还原或气体还原，反应产物为CO₂。式（1.2～1.4）总的反应效果是少量放热的。

如果在高于1000°C的区域内，浮氏体仍未还原完，则按式（1.4）反应生成的CO₂将迅速被C还原：



将式（1.4）、（1.5）相加得到：



反应（1.5）称为波都阿尔（Boudouard）反应，或碳的溶解损失，或碳的气化反应。这是一个强烈的吸热反应，对于提高CO的利用率不利。反应（1.6）称为直接还原，与间接还原相反，是吸热的。但此反应夺取每个分子的氧所消耗的碳量较少，而且其产物CO还可进一步参加气体还原反应。

1800～2000°C的高温风口煤气在上升过程中被冷却，逸出炉外时降至100～250°C；而炉料在下降过程中被加热到1400～

● 1卡 = 4.1868焦，下同。——译注

1450℃。图1.2是理想化的,炉内分成三个明显的不同温度区域的情况(之所以这样划分的原因见第四章)。冶炼过程所需的全部热量是由上升的煤气分别在高炉的上部及下部区域内提供的。中部区域几乎是个等温区(800~1000℃),这里只有很微弱的热交换发生。在三个区域内发生的反应在以下几节中叙述。

1.3 高炉下部区域中的反应

下部区域或称熔化区或加工区,是从风口水平线到其上3~5米的区域。在此区内熔融的炉料达到1400~1450℃,而煤气则冷却到了800~1000℃(见图1.2)。

风口前焦炭的燃烧在炉缸圆周的边缘处连续地产生空间,允许炉料向下运动(见图1.1)。燃烧区的大小和外形轮廓对于煤气的均匀分布和炉料的下降是很重要的。根据鼓风动能的不同,燃烧区的深度在1~2米内变化。所以实际活跃的面积是一个沿炉缸圆周边缘宽度为1~2米的圆环,可称之为循环区或炉缸圆环或活化圆周。在循环区外有一个紧密压实的中心焦炭柱,称为死料区(见图1.1及7.5节)。这个焦炭柱既能浮于液态铁之上又可以直达炉底。一些生铁和炉渣滞留在焦块之间的空隙内,放渣放铁时流出炉外。

脉石与熔剂混合后,在炉腰区开始熔化。两个互不相溶的相,即部分渗碳的生铁和含有一定量CaO的 $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$ 初渣,开始在高于1200℃时生成。继续下降,两个液相彼此分离,渗流过循环区以上的焦层而积聚在炉缸中,然后定期放出。由于风口煤气也是要穿过焦层的孔隙而上升的,所以循环区就象一个由焦炭提供支撑的逆流或液体—气体的交换器。这个区域中物料的流量是很重要的,因为有发生液泛现象的危险(参看5.6节)。

在11.3.2.6和11.5节中将要提到,用急速冷却正在操作的高炉的方法研究其内部结构证明:炉内存在一个较为疏松的中心焦柱,一直向上延伸到炉身下部,这个焦柱以软熔带为界。软熔带是由分层交替的焦炭层及煤气不易通过的半熔融的渣铁层组成。可透气的焦层称为焦窗,象是一个煤气的分配器,允许煤气水平穿