

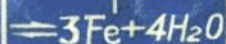
技术培训进修教材

高炉炼铁技术理论讲座

重庆大学冶金及材料工程系 编
重庆钢铁设计研究院

Fe

Fe_3O_4



四川省金属学会

76.213
409

高炉炼铁技术理论讲座

重庆大学冶金及材料工程系 编
重庆钢铁研究设计院

36524/31

四川省金属学会



前 言

本书是根据一九八一年四川省金属学会炼铁委员会和重庆市金属学会联合举办的第一次炼铁技术理论讲习班的讲稿，经过修改和充实编成的。本书由林衍先教授主编。主要内容分十讲，分别论述：炼铁技术理论的发展、铁矿石还原的动力学、炉渣的结构和性质、烧结和球团、高炉内碱金属的行为、高炉气体动力学、高炉操作线图、炼铁能源与能量利用、高炉设计和环境保护。书尾还附有两份资料——我国小高炉生产的实践经验、高炉特种生铁及铁合金，供读者参考。

本书可供炼铁技术人员自学提高使用，可作学会或企事业单位举办炼铁技术人员进修班教材，也可供大专院校、职工大学和中技校师生教学参考。由于炼铁技术和理论在不断发展，并且我们的水平有限，书中不免存在缺点和错误，敬希读者批评指正。

本书的编写和出版，承蒙四川省金属学会、四川省冶金情报标准研究所、重庆市金属学会、四川省冶金炼铁科技情报网和省内外炼铁界的鼓励和支持，编者深表感谢。并对重庆大学印刷厂的同志，在本书印刷工作中付出的辛勤劳动，表示感谢。

编 者

一九八二年十月

36849

目 录

1. 炼铁技术理论的发展	1
一、炼铁技术发展的概况	1
二、高炉的解体研究	3
三、高炉内碱金属的行为和危害	5
四、关于焦炭的强度	9
2. 铁矿石还原的动力学	11
一、还原过程的组成环节及速度特征	11
二、氧化铁还原的机理	13
三、铁矿石为气体还原剂还原的一界面数学模型	15
四、铁矿石还原的三界面未反应核心模型	22
3. 炉渣的结构及性质	25
一、炉渣结构的理论	25
二、高炉渣的物理性质	31
三、高炉渣的化学性质	37
四、炉渣的热学性质	39
4. 烧结和球团	43
一、烧结概况	43
二、烧结的热力学过程	43
三、烧结生产中的几个问题	50
四、球团工艺发展概况	56
五、球团焙烧固结机理	58
六、球团还原时的行为	62
七、球团矿的冶金性能	65
5. 高炉内碱金属的行为	68
一、高炉内碱金属的循环	68
二、高炉内碱金属的挥发速度	69
三、各种因素对高炉内碱金属富集量的影响	72
四、碱金属循环对高炉过程的影响	73

6. 高炉气体动力学	77
一、高炉气体动力学的基本方程.....	77
二、气体运动失常.....	82
三、软融带的压头损失.....	84
四、气体流动对炉顶布料的影响.....	89
7. 高炉操作线图	96
一、操作线图的基本原理.....	96
二、操作线的作法.....	99
三、操作点的求法.....	101
四、操作线图的应用.....	102
五、操作线图作法和应用实例.....	110
8. 炼铁能源与能量利用	118
一、能量需要与能量平衡.....	118
二、能源与经济.....	120
三、高炉能量利用.....	124
四、节能技术.....	127
9. 高炉设计	136
一、设计阶段和专业分工.....	136
二、关于高炉车间总体设计.....	138
三、关于炉体.....	139
四、关于送风及煤气系统.....	143
五、关于原料及装料系统.....	146
六、关于渣铁处理.....	147
七、结束语.....	148
10. 环境保护	150
一、废水处理.....	150
二、废气处理.....	157
三、渣治理.....	160
四、噪声防治.....	160
五、绿化.....	161
六、环境标准.....	161
附 录	
1. 我国小高炉生产的实践经验.....	163
2. 高炉特种生铁及铁合金.....	172

1. 炼铁技术理论的发展

重庆大学 林衍先

一、炼铁技术发展的概况

自本世纪以来,高炉炼铁得到了迅速的发展,从而充分保证了炼钢的需要,使全世界的钢产量,由1900年的3,700万吨增加到1980年的约8亿吨。五十年代以后,又由于氧气转炉炼钢的成功,世界上大多数国家都以高炉—氧气转炉为钢铁生产的主要流程,而氧气转炉炼钢比其他方法需要较多的铁水为原料,因此更推动了高炉炼铁的向前发展。与此同时,高炉炼铁的技术也相应地有了很大的发展。五十年代以后高炉炼铁技术的发展,涉及的范围很广,包括从采矿、选矿、原料准备、高炉及其附属设备的改进、高炉操作和参数的计算机分析、数学模型等到炼焦、自动化和环境保护。

对变化着的高炉炼铁技术要想一一列举,是有困难的。因此,只能就其主要方面和重大成就,加以说明。

高炉炼铁在原料方面的技术,一直是朝着精料发展。五十年代和以后,对矿石的选矿加强了,选矿既可保证扩大炼铁的矿石资源,又可改善入炉矿石的质量。在发展选矿的同时,对入炉矿石实行了破碎、筛分和分级,并采用了堆矿机和取矿机;按平铺切取的原则,对矿石进行中和混匀,以保证入炉矿石的粒度均匀、粉末少和成分稳定,使炉内料柱的透气性好和高炉操作稳定。最近的发展是,对原料在入炉前实行进一步筛分(槽下筛分),除去原料中的粉末,并对炉料按成分变化进行自动控制,使炉料性能波动最小。

熟料入炉有许多优点,主要是使高炉操作稳定和焦比降低。因此,随着时代和技术的发展,入炉的熟料比越来越高。现在有些国家的高炉已达到全部熟料入炉。

烧结矿生产早在五十年代前已经开始,但是铁矿石烧结从五十年代起才有很大的发展。这一方面表现在产量的不断增加,另一方面表现在质量的不断改善。随着烧结矿产量的不断提高,烧结机的生产能力在不断地扩大。带式烧结机的烧结面积,在五十年代最大为183米²,六十年代最大达290米²,七十年代内则由500米²、550米²,一直扩大到600米²。

最初生产的烧结矿,一般是酸性的,随后因性能的改善,相继出现了自熔性的和高碱度烧结矿,最近又出现了氧化镁烧结矿,高氧化镁烧结矿的出现,是为了建立高炉的低硅操作制度。高炉生产低硅生铁被看作是降低焦比的一项重要措施,而且低硅铁水又是氧气转炉炼钢所需要的。

试验证明,烧结矿中加入氧化镁能改善烧结矿的高温性能。氧化镁的加入使烧结矿的软化温度和熔化温度均有所提高,从而可使炉内软熔带下移。高炉解体取样分析并且发现,氧化镁有防止炉渣在金属中凝聚的作用,所以炉渣与金属混合良好,保证炉渣与金属间的反应(例

如脱硫)能很好地进行,同时也防止了金属的渗碳,使金属的熔化温度提高而与炉渣同时滴落,并且抑制了渗碳时的氧化硅还原反应。因此,氧化镁烧结炉是保证低硅操作的一个有力手段。

球团矿生产是从五十年代开始的,它在发展过程中的主要变化是在生产设备上。先是竖炉焙烧,继之是带式焙烧机,最后是连篦机—回转窑。最近又有转向带式焙烧机的倾向。球团矿在质量方面也有不断的改进,其经过是由普通球团矿而自熔性球团矿,最近也出现了氧化镁(白云石)球团矿。近年来,有的工厂还在生产多孔球团矿与冷固球团矿。

高炉本身,在五十年代已出现了大型化的趋势。在六十年的初期,高炉容积冲破了2000米³大关,随后不断扩大,到现在已冲破5000米³大关,高炉的最大容积达到了5070米³。

在高炉结构上,最突出而又多样的变化反映在炉顶装置上。六十年代以来,炉顶装料装置在不断变化,而在炼铁技术上最有意义的发展,是炉喉设置可调护板和采用无料钟旋转溜槽布料。可调护板可以用来合理地控制炉身边缘、中间和中心三部分的炉料分布,建立以煤气利用和透气性为主的炉料分布管理制度。溜槽布料可以根据炉料块度不同,灵活地控制炉料的分布。

从五十年代起,高炉操作总的方针,可以说是向“三高”发展。这里所说的“三高”是指高温、高压和高喷吹率而言。热风温度在五十年代里因加湿鼓风而有较大的提高,从以前的风温平均为700~800℃,提高到了1000℃左右。从六十年代起,因高炉喷吹辅助燃料成功,为高炉接受高温创造了更有利的条件,热风温度便因而争取尽可能的提高,现在的热风温度已达1300℃以上。

为了实现高温,热风炉除了在构造型式上有所改革外,所用蓄热砖的形状和材质也有改进。在操作上还实行了交叉并联储风和通过计算机控制加强燃烧管理等措施。

高炉喷吹辅助燃料为高炉操作技术中一大突破。从六十年代起,世界各国都在向这一方面发展。所喷吹的燃料包括天然气、油、焦油、煤、煤和油的混合物,最近又有胶质燃料。高炉喷吹辅助燃料虽使设备复杂化,但对节省冶金焦而言,具有深远的意义。

高炉喷吹辅助燃料后,除了为高炉接受高温创造条件外,并对富氧鼓风提出了要求。因此,许多高炉辅助燃料的喷吹率高,而热风温度又不足时,便采取了富氧鼓风。

高炉鼓风最近的发展是脱湿。这一措施首先是由日本发起的。现在日本已有若干高炉实行了鼓风脱湿,使鼓风的湿度既低而又稳定,这就既保证高炉操作的稳定,又使燃料比降低。据日本的统计,将年平均大气湿度从12克/标米³降低到6克/标米³,则燃料比可减少4~5公斤/吨铁。

高压操作长期停止不前,但是近年来则突飞猛进。现在美国少数高炉的炉顶煤气压力为2.5公斤/厘米²稍多一点,苏联高炉的炉顶煤气压力已达2.5~3.0公斤/厘米²,日本高炉炉顶煤气压力也达到了3.0公斤/厘米²。

随着高炉高压操作的发展,近年来出现了利用炉顶煤气压力发电节能的设施。办法是利用高压的炉顶煤气推动涡轮机发电机组,进行发电。目前美国、苏联和日本都有高炉设置了顶压发电装置。据了解,日本高炉的设备发电能力一般在8,000~12,000瓩,最大为17,000瓩,节能效果可达10公斤标准煤/吨铁。

近年来,高炉技术的一大特点是向自动化发展。目前除了烧结生产已利用计算机控制全

部实现自动化外,高炉的给料、装料和热风炉操作也分别实现了自动化。

在高炉技术发展的同时,对高炉冶炼的基础理论的研究也在不断地进行,这些基础理论的研究包括矿石的还原、 SiO_2 的还原、渣铁间的反应、还原动力学、炉渣理论、炉渣脱硫等等。

但是,对高炉操作最有意义的是,近年来对高炉这个“黑箱”已经揭露,各种调查研究使高炉炼铁理论有了新的发展,高炉操作将会更有把握,冶炼的各项技术经济将会有更大的改善。下面谈几个高炉理论发展中的重要问题。

二、高炉的解体研究

长期以来,高炉工作者对炉内各种复杂的物理化学现象,一直是不清楚的。为了弄清楚到底是怎么回事,以便准确地判断生产高炉的炉内状况,掌握高炉冶炼的规律,首先由日本从1968年起,对工业生产高炉进行了一系列的解体研究。高炉在解体前,先灌入树脂,然后通氮气冷却。解体之后,即对炉内状况进行观察、取样检验和科学分析,根据取得的数据和科学分析的结果,描绘出高炉内的实际状况。据报导,到1974年止日本已先后对广畑、东田、洞岗、川崎、小仓、尼崎、千叶等厂九座高炉(容积大多是1000米³以上)进行了解体研究。所得结果揭示了许多是高炉工作者至今仍模糊不清的问题,发现了许多新的问题,对以往的炼铁理论发生了很大的冲击。因此,世界各国都对高炉解体研究工作十分重视,并对日本的工作给予很高的评价,认为它是对炼铁理论发展的重大贡献。

高炉解体后发现,炉内炉料在下降过程中,在炉料熔化之前,实际上矿石与焦炭仍保持着明显的层次,只是各层的厚度随炉内直径的逐渐扩大而逐渐变薄,各层且由倾斜逐渐变得平坦起来而已。这说明,矿石的超越现象和矿与焦炭相混合的现象未明显发生。

高炉解体并且发现,高炉内的炉料明显地存在三个不同的带:块状带,其中一切炉料仍然是块状固体;软熔带,带内矿石处于由软化到熔化的状态,中间保持着焦炭夹层,高炉下部的煤气要通过软熔带的焦炭夹层才能进入块状带;滴落带,实际上由焦炭填充,熔融的金属和炉渣系通过焦炭之间的空隙往炉缸内滴落。在高炉解体的许多重大发现中,软熔带的存在及其对高炉冶炼的作用,被认为是最重要的,有人把它看成是高炉冶炼史上划时代的发现。

软熔带的形状

在操作稳定的高炉内发现的软熔带,有倒V、正V与W型三类形状(图1)。软熔带与炉内的温度分布相对应,其形状及其在炉内的位置,因高炉操作条件的不同而出现差异。在炉况稳定的情形下,当操作条件使中心煤气流发展时,因高炉中心温度高于边缘,所以软熔带呈倒V形。当中心和边缘煤气流均适当发展时,则软熔带呈W形。如果边缘煤气流大量发展,则出现正V形软熔带。

软熔带的形状及其位置高低,与控制炉内煤气流分布和煤气利用,密切相关,从而对高炉的强化、产量和焦比都很重要。

倒V形软熔带,由于中心煤气流较强,有利于疏通和活跃中心,有利于冶炼强化(实际上高冶炼强度操作的高炉具有倒V形软熔带)。同时,由于边缘煤气流相对削弱,减轻了炉墙热负荷,既有利于保护炉墙,又有利于减少热损失。具有此类软熔带的高炉,炉缸工作稳

定、均匀、活跃，风、渣口的烧损亦可减少。

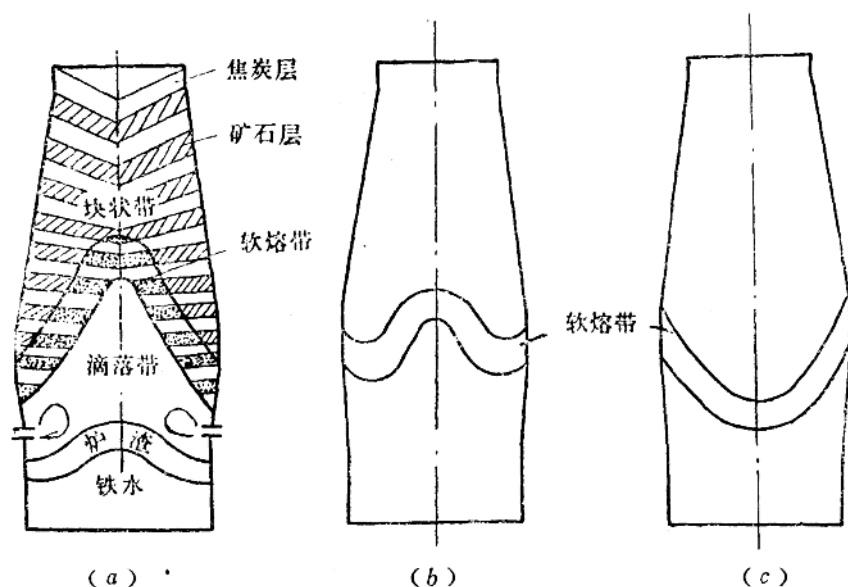


图1 软熔带形状示意图

a—倒V型；

b—W型；

c—正V型

倒V型软熔带符合当代高炉生产的要求，但随着软熔带位置的不同，气流分布和煤气利用也就不一样。软熔带位置高时，高炉更容易强化，但因煤气利用不良，焦比要升高。

W型软熔带能维持高炉顺行，并在一定程度上改善煤气的利用，但不利于强化。

软熔带呈V形时，边缘煤气流大量发展，炉墙热负荷大，同时炉缸发生堆积，生产指标不好。

控制适宜软熔带的措施

通过理论分析和科学实验可知，控制适宜软熔带，应从操作条件着手，其中包括：

1. 上部调节 通过改变炉身上部炉料沿径向的分布，可以改变径向的煤气分布，从而改变温度分布。

2. 下部调节 例如采取提高风口风速和鼓风动能，有利于中心煤气流的发展，从而可使倒V型软熔带发展。

3. 改善原料的性质 矿石的熔化温度升高，则软熔带的位置下移。以前已提到过氧化镁烧结矿有使软熔带位置下移的作用。此外，烧结矿的碱度 (CaO/SiO_2) 在1.5~1.8的范围时熔化温度最高，在炉料中此种烧结矿的配比增高时，矿石的熔化温度也要升高，软熔带的位置也将下移。

矿石的高温性能不仅影响软熔带的位置，而且能影响软熔带的厚度。高炉生产要求软熔带的厚度薄，以便减少阻力。实验证明，在烧结矿的碱度和 SiO_2 含量一定的情况下，氧化

镁的含量增加时,可使矿石的开始软化的温度提高而熔化区间缩小,软熔带的厚度便因之减薄。

三、高炉内碱金属的行为和危害

近年来,炼铁界对碱金属在高炉内的行为和危害进行的研究和得到的认识,也是炼铁理论上的重大发展。长期以来,高炉工作者对高炉冶炼经常遇到的一些问题,例如入炉原料虽经严格筛分,而炉料透气性依然恶化,出现难行、风渣口大量烧损、高炉频繁结瘤等异常现象,一直弄不清楚原因。最近几年,炼铁界已开始发觉碱金属对高炉的危害。1973年在加拿大的 *McMaster* 大学召开了一次高炉内碱金属学术讨论会。在这次会议以后,世界各国都对高炉中的碱金属极为重视,加强了研究,并且许多企业单位都根据各自的条件,制定了碱金属(以 $K_2O + Na_2O$ 表示)负荷的严格限制。例如:

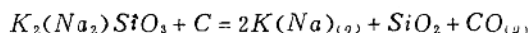
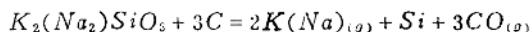
限额碱金属负荷, 公斤/吨铁	
新日铁	2.5
日本川崎制铁	3.1
加拿大 <i>Dofasco</i>	2.8
加拿大 <i>Stelco</i>	3.0
美国 <i>J & L</i> (阿里奎帕)	5.0
西德 <i>ATH Schwelgern</i>	4.0
瑞典 <i>Granges Steel</i>	7.5

高炉冶炼的各种原料和燃料都或多或少地含有碱金属。我国某些单位高炉冶炼原燃料的碱金属含量列于表1中。在普通情况下,即使入炉原料燃料本身的碱含量比较低,而碱金属也会在炉内引起危害,这是跟碱金属在炉内的行为分不开的。

高炉内碱金属的行为

碱金属在高炉内的行为,虽在旧的教科书中略有提及,但长期无人注意。自从高炉解体研究以来,已发现碱金属在高炉冶炼过程中,有循环富集现象。经过进一步研究,现已有人提出了碱金属在炉内行为的模式。

炼铁各种原料和燃料中碱金属一般是以复杂的硅酸盐存在,根据热力学分析,在高炉冶炼的条件下,碱金属硅酸盐在温度低于 1500°C 时是稳定的,温度高于 1500°C 时,即开始分解。因此,高炉炉料内的碱金属硅酸盐进入高温区时就要按下列反应进行分解:



这些反应进展的程度取决于温度和炉内 CO 的分压。但是由于条件的限制,反应是不会完全的,所以总有一部分未分解的硅酸盐随炉渣排出炉外。

由上述反应所得碱金属蒸气要随煤气流迅速向炉子上部运动,而有一部分碱蒸气要在高

温区（风口氧化区以外）与焦炭中的碳和煤气中的氮，发生反应生成氰化物，其反应如下：

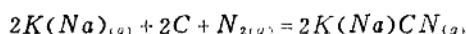
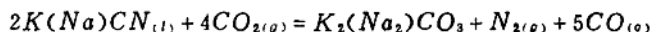
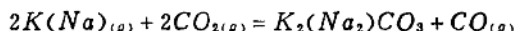


表 1 我国某些厂高炉入炉原料的碱含量，%

单 位	原 料	K_2O	Na_2O	$K_2O + Na_2O$	备 注
武 钢	烧 结 矿	0.22	0.16	0.38	1980年3月分析
	球 团 矿	0.255	0.16	0.415	
	石 灰 石	0.008	0.023	0.031	
	块 矿	0.11	0.05	0.16	
包 钢	焦 炭	0.085	0.085	0.17	焦基 1979年12月分析
	烧 结 矿	0.19	0.17	0.36	
	球 团 矿	0.24	0.30	0.54	
	块 矿			0.60	
马 钢	石 灰 石	0.12	0.01	0.13	1979年一烧结 1979年二烧二车间 焦基
	白 云 石	0.18	0.34	0.52	
	焦 炭	0.45	0.32	0.77	
	烧 结 矿	0.159	0.072	0.231	
	烧 结 矿	0.076	0.142	0.218	
	焦 炭	0.109	0.042	0.151	
	石 灰 石	0.15	0.69	0.219	
	桃 冲 块 矿	0.036	0.03	0.066	
酒 钢	中 山 块 矿	0.843	0.048	0.891	
	烧 结 矿	0.34~0.51	0.08~0.13	0.42~0.64	
	焦 炭	0.37~0.5	0.3~0.5	0.67~0.97	
	镜 铁 山 矿	0.92	0.12	1.04	
新 钢	烧 结 矿	0.4	0.85	1.25	1979年分析 焦基
	焦 炭	0.12	0.16	0.28	

由于氰化物的沸点高（ KCN 的沸点为 $1625^{\circ}C$ ， $NaCN$ 沸点为 $1530^{\circ}C$ ），可以想到在炉身部分的煤气中将含有碱金属蒸气（ K 和 Na 的沸点分别为 $750^{\circ}C$ 和 $880^{\circ}C$ ）和雾状液体的氰化物。

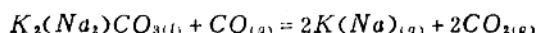
在炉身上部温度较低的区域，由于那里的煤气已具有足够的氧化性，碱金属蒸气以及液态的氰化物，均被氧化成较稳定的碳酸盐：



钾和钠的碳酸盐的熔点分别为 $890^{\circ}C$ 和 $850^{\circ}C$ 。

大部分的碳酸盐和未氧化的氰化物要附着在炉料上随炉料下降到高温区，由于那里的条

件适含碳酸盐的还原，所以又被还原生成碱蒸气：



碱蒸气又随煤气上升到炉子上部，再一次被氧化成碳酸盐，如此进行循环。

在炉子下部未被还原的碳酸盐则进入炉渣。沉积在炉料上的氧化物，或者被氧化成碳酸盐，或者下降到高温区化为蒸气随煤气上升，也可能有一部分进入炉渣。

由于炉内的碱金属循环，所以炉内的碱金属要逐渐积累和富集，使碱金属的危害加剧。根据探测的结果，认为碱金属的循环和富集发生在700~1200℃的温度范围。因此，可认为在这个温度范围内，碱金属将发生最大影响。

碱金属的危害

现在已公认，高炉结瘤、炉墙耐火材料损坏、炉料透气性的恶化等，都和碱金属的作用有关。

1. 高炉结瘤 我国有许多工厂的高炉，因碱金属的影响，曾频繁结瘤。例如，宣化钢铁公司、包头钢铁公司、马鞍山钢铁公司、湖南涟源钢铁厂、新疆钢铁公司、甘肃东方红铁厂的高炉，都因为碱负荷高（见表2），高炉结瘤成为严重问题。

由碱金属引起的炉瘤，多生于高炉的中上部，甚至结在炉喉钢砖部位，瘤质疏松，易脱落，多呈环状。瘤中除含有大量碱金属外，还含有大量炭粉。至于碱质炉瘤形成的机理，至今众说不一，有待进一步研究。

2. 炉衬损坏 碱金属对炉衬耐火材料的破坏作用相当严重。以新疆钢铁公司为例，炉衬寿命特短，据认为这主要是碱金属与粘土质耐火材料形成低熔点物质造成的。试验研究证明，碱金属要引起高铝砖胀裂。据国内外的试验，碱金属对炭质耐火材料也有破坏作用。

3. 炉料透气性的恶化 现在国内外都很重视碱金属对炉料透气性造成的恶果。在生产实践中，许多高炉都因为碱负荷高，出现炉料透气性恶化、高炉长期处于压差较高的情况下操作、炉况不顺、产量低、焦比高等情形。突出的是在比利时 Ougree 地方的国际试验高炉，当装入含碱（ $K_2O + Na_2O$ ）为1.2%的烧结矿进行试验时，开炉8小时后，即因透气性恶化，被迫停炉。

表2 我国某些高炉的碱负荷

单位与炉号	计算时间	碱负荷， 公斤/吨铁	备 注
宣 钢	1980	23.4	使用硫酸渣、含碱高 用鲕状赤铁矿、含碱高
包 钢	79年10月 10~17日	7.47	
马钢12号	65年1月 12~15日	16	
高 炉	80年8月	~10	
涟 钢	1979	16.88	
新 钢	1979	~20	
东方红			

近年来，不论从生产高炉或从高炉解体中取样分析的结果证明，炉内的炉料（包括烧结矿、球团矿和焦炭）在碱金属循环过程中拾取了大量的碱金属，使其碱金属含量大大超过入炉时的含量，有时达数十倍之多。分析的结果并且表明，碱金属是在炉料内部均匀分布的，但是球团矿拾取的碱金属要比同重量的烧结矿拾取的少一些，其原因可能是球团矿的单位容积的表面积较小的缘故。

为了查明碱金属对烧结矿和球团矿的影响，国内外许多单位和个人在实验室内进行了实验研究。结果证明，这些原料中加入碱金属盐类后，还原时的膨胀性能便加剧了，碱金属含量在一定范围内时，膨胀率是随着碱含量增加而增加。当碱含量超过一定值时，便出现粉碎现象。实验结果还表明，碱金属对烧结矿和球团矿的低温还原强度也是不利的。

在炉身上部煤气中有相当碱金属碳酸盐细粉存在，大量的碱金属碳酸盐附着在接近炉顶的原料上，在低温区域便引起原料膨胀粉化是完全可能的。

碱金属引起炉内料柱透气性恶化，一部分是碱金属对焦炭性能的影响所造成的。关于此点将于下一问题中说明。

减少碱金属危害的措施

1. 限制碱负荷 现在已公认，高炉冶炼必须限制碱负荷，以免碱金属在炉内引起危害。但是碱负荷的限定，可因各厂的操作条件不同而不同。从前面提出的各厂碱负荷限额来看，从2.8公斤/吨铁到7.5公斤/吨铁，相差悬殊，这也是因为各厂的操作条件不同所致。

对碱负荷有很大影响的是冶炼时的渣量。在操作条件一定的情况下，渣中的碱金属含量差不多是一定的，所以渣量大时，随炉渣排出炉外的碱金属量便相对地多些，对碱金属负荷限额便可适当地放宽些。因此，也有人认为，碱负荷应相对炉渣而言，不应象硫负荷那样对铁而言。

碱金属主要是在矿石脉石和焦炭灰份中存在，因此，要减低碱金属负荷，应加强选矿。在一般情况下，烧结过程除去碱金属的能力有限，据国外的经验，烧结过程中碱金属的除去不超过20%。

洗煤炼焦降低灰份也是降低碱负荷的重要途径。当然，降低焦比和喷吹天然气、油等不含灰份的辅助燃料，都对降低碱负荷具有重要意义。

2. 控制炉渣碱度 高炉实践证明，炉渣碱度对碱金属在炉内发生危害有重大影响。例如，加拿大 Dofasco 三号高炉的碱金属负荷不高，只有1.2~2.3公斤/吨铁，但因操作时的炉渣碱度高和温度高，碱金属随炉渣排出的量少，而造成操作不顺，炉况失常。又如我国梅山钢铁厂高炉的碱负荷虽然低，但在冶炼铸造铁时，为了脱硫，炉渣碱度偏高，由于炉渣排碱不力，也造成碱金属发生危害，炉况难行，风口大量烧损；可是在炉渣碱度因加硅石而降低时，炉况好转，燃料比反而有所降低。

从热力学分析可知，炉渣碱度低时，渣中的 SiO_2 的活度大，对碱金属硅酸盐的还原分解不利。渣中可以保留大量的碱金属随渣排出炉外。这个问题也可这样理解：由于钙和镁的硅酸盐较碱金属硅酸盐稳定，所以在碱性渣中可与碱金属相结合的 SiO_2 较少，从而对碱金属的还原分解有利，所以碱性渣中的碱金属含量要低，炉渣排碱不力。图2所示，为不同工厂高炉渣中碱金属含量随碱度的变化。由图可见，渣中碱金属含量随碱度的提高而减低。但因各厂操

作条件不尽相同,所以虽然炉渣的全碱度相同,而其碱含量却完完全不同。此外,也有人提出,全碱度相同的炉渣,其化学成分并非一样,为这种现象的主要原因。

3. 保持适当的风温 前面已经指出,碱金属的复杂硅酸盐只有在温度高时才能还原分解,并且温度愈高,分解的愈多。高炉内风口前的燃烧带温度最高,所以风口理论燃烧温度是与碱金属硅酸盐还原分解有关的重要问题。

从碱金属硅酸盐还原分解反应中可知,一氧化碳为反应的产物,CO的分压对反应起抑制作用。炉内CO的分压可大致计算如下:

$$P_{CO} = \frac{2\sigma}{1+\sigma} \cdot \frac{BP+1}{1+\sigma} = \frac{2\sigma(BP+1)}{(1+\sigma)^2}$$

式中 σ 为鼓风中 O_2 的体积分数; BP 代表鼓风的压力,单位为大气压。

由上式可见,高压操作和富氧鼓风都可使 P_{CO} 升高。

以上分析已说明,热风温度必须与碱负荷、渣量、渣碱度,还必须与鼓风的压力、燃料喷吹、富氧等因素,综合考虑,才不致引起碱金属的危害。所以,只有象日本的高炉那样,在碱负荷低、炉渣碱度低、实行高压、富氧和喷吹大量重油的情况下,入炉风温才可保持相当高地高。

四、关于焦炭的强度

近年来,随着高炉大型化的发展,对焦炭的强度越来越重视。事实证明,焦炭强度的好坏对高炉生产十分重要。焦炭强度低时,在炉内产生碎焦和粉末多了。要恶化炉料透气性,而且在炉子下部,焦粉将使炉渣变稠失去流动性,从而引起炉缸堆积、炉况不顺、大量磨损风渣口等事故。

平常从风口放出的焦炭中碎焦特多,与装入的焦炭相比,风口焦的平均粒度有很大缩小。国内外的高炉解体研究也发现,焦炭的平均粒度一般是到炉腰以下逐渐变小,接近风口循环区域减小最快。

高炉内焦炭破坏的原因

1. 静压力作用 以前有人持这种观点,但是根据实验研究计算,在较大的高炉内(4185 米^3),焦炭承受的最大静压力只有 0.7 公斤/厘米^2 稍多一点,在没有气流作用下也不过 1.3 公斤/厘米^2 ,而实际上现在冶金焦的抗压强度一般都有 $50 \sim 60 \text{ 公斤/厘米}^2$ 。

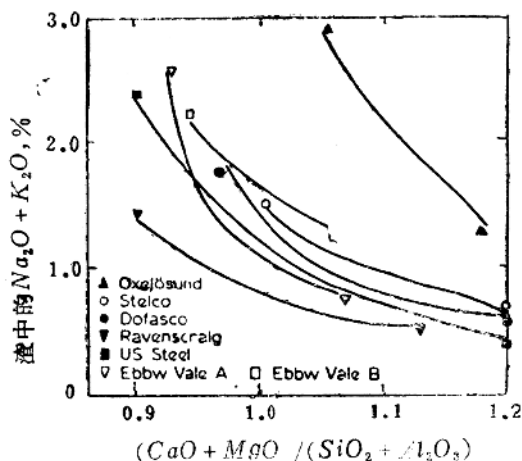


图2 不同高炉的渣中碱含量

2. 磨损作用 高炉解体证明, 高炉内不存在矿石的超越现象。因此焦炭受到磨损作用只限于风口前的循环区。

3. 高温作用 最近有人提出, 大块焦炭在高温(1500℃以上)作用下, 因温度应力会引起焦炭内部发生微观龟裂, 造成强度减低, 从而导致破碎。但是实验研究的结果表明, 高温的作用对不同煤种生产的焦炭有不同的影响, 所以有的焦炭冷强度与高温下的强度无差别, 而有的焦炭则冷强度虽好, 而热强度降低。

4. 碱金属的作用 现在有大量事实证明, 焦炭经过在炉内吸收大量碱金属后, 强度大为减低。实验研究的结果证明, 碱金属有催化焦炭中碳的气化反应($C + CO_2 = 2CO$)的作用, 使焦炭的强度减低。但是, 也有人认为, 侵入焦炭内部的碱金属能与碳生成化合物而起主要的破坏作用。

就目前来看, 对高炉内焦炭强度降低、发生破碎原因的研究, 方兴未艾, 所得认识, 尚有待进一步研究。

参 考 文 献

1. K. Sanpongi, K. Komoda: 炼铁和炼钢技术的变化, 《八十年代钢铁工业》国际会议论文选, 冶金部情报研究总所, 1980。

2. 冶金部考查组: 《日本高炉冶炼技术和装备》, 冶金部情报标准研究所, 1977。

3. The Future of Ironmaking in the Blast Furnace, Iron Steel Institute, London, 1962。

4. J. Szekely: 《Blast Furnace Technology》, 1972。

5. 杜鹤桂、车传仁: 软熔带对高炉强化的影响, 中国金属学会学术论文集炼铁文集, 1979, 下册, 155

6. Hans vom Ende, et al: Alkalien als Ursachen von Schwell und Zerfalls Vorgawn bei der Reduction von Eisenspellets, Stahl und Eisen, 1970, №13, 667。

7. 林衍先、裴鹤年、徐楚韶等: 攀枝花球团矿的膨胀性能的研究, 《四川冶金》, 1979, №1, 1。

8. J. Davies, et al: Alkalies in the Blast Furnace, Ironmaking and steelmaking, 1978, №4, 151。

9. 杨永宜等: 高炉碱金属循环和富集的动力及数学模型, 冶金反应动力学及第二届炼钢理论讨论会论文集, 1982。上册, 16。

10. 崔光辉: 碱金属与高炉反常, 武汉钢铁设计研究院资料, 1980。

11. 杨永宜、孔令坛: 论发展大型高炉的焦炭质量问题, 《钢铁》, 1979, 14, №1, 1。

12. J. Monson: Behavior of coke in furnace, Ironmaking and steelmaking, 1980, №6, 4。

2. 铁矿石还原的动力学

重庆大学 黄希祐

铁矿石还原动力学的研究在炼铁生产和技术的改进及发展上起着指导性的作用。近年来除了研究气体还原剂还原铁矿石的机理外,还着重研究了还原的限制环节及描述还原速度的数学模型。利用这种数学模型可以确定各种条件下还原的时间与还原度的关系,计算铁矿石还原的速度,而且也能用来确定反应速度的限制环节,探讨各种因素对还原速度的影响。此外,还原过程的数学模型又是计算机控制炉况的基础,并能用来计算高炉内反应完成的情况。

一、还原过程的组成环节及速度特征

由实验研究得知,氧化铁的还原是逐级进行的,即还原是经过 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ ($570^\circ C$ 以上) 或 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe$ ($570^\circ C$ 以下) 诸阶段完成的。另一方面,由于铁矿石的还原是由矿块外层向其中心推进的,因此在还原过程中,每个上列氧化物形成了包围着价数比较高的氧化铁,而中心是未还原的最高价氧化铁,如 Fe_2O_3 或 Fe_3O_4 , 最外层则是金属铁层。随着还原反应向矿块中心推移,外面的金属铁层及次层的低价氧化铁层的厚度不断地增加,而内层的较高价氧化铁层的厚度则依次缩小。整个矿球具有如图 1 所示的层状结构。

位于还原性气体(如 CO 或 H_2) 中的铁矿石,它的还原反应过程是由下述环节组成的:

(1) 气相中 CO (或 H_2) 通过矿球外的气相边界层向矿球表面的扩散;

(2) CO (或 H_2) 通过矿球表面和其内反应界面之间的产物层的内扩散;

(3) CO (或 H_2) 在反应界面上发生的界面化学反应,这包括 CO (或 H_2) 在相界面上的吸附,吸附的还原剂与矿石晶格上氧的结合,生成的气体还原产物(如 CO_2 或 H_2O) 的脱附,固相还原产物的结晶化学变化等。

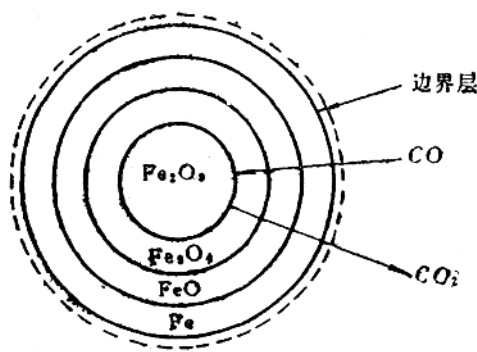
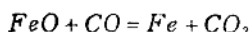


图 1 矿球还原过程中的结构

(4) 形成的气体还原产物 (CO_2 或 H_2O) 通过反应界面外的还原层、边界层向外的扩散。

因此, 整个还原过程可看做由气体还原剂向反应界面扩散、界面化学反应、气相还原产物离开反应界面的外扩散等三个环节所组成, 而还原过程的总速度则是和此等环节的速度有关的。

界面反应的速度根据质量作用定律可以求得。例如, 对于反应



有
$$v_{\text{化}} = - \frac{dc}{d\tau} = kc_{\text{CO}}$$

式中 $v_{\text{化}}$ —— 即 $-\frac{dc}{d\tau}$ 为单位相界面上化学反应的速度;

k —— 反应速度常数, 它是反应物 CO 的浓度为 1 单位时的化学反应速度;

c_{CO} —— 反应物在反应时间 τ 的浓度。

物质的扩散速度或称为扩散通量是根据菲克定律求得的, 即物质的扩散速度正比例于扩散的物质通过的截面积和浓度梯度 (单位距离上的浓度差):

$$J = \frac{dn}{d\tau} = -DA \frac{\partial c}{\partial x}$$

式中 J —— 物质的扩散通量, mol/s ; A —— 扩散物质通过的垂直于扩散方向上的截面积, cm^2 ;

D —— 扩散系数, 是 A 及浓度梯度 $\left(\frac{dc}{dx}\right)$ 为 1 单位时的扩散速度, cm^2/s 。

扩散物质通过的截面积为 1 单位, 浓度差为 Δc , 扩散层的厚度为 Δx 时, 上式变为

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} = -\frac{D}{\Delta x} \Delta c = \beta \Delta c$$

式中 $\beta = \frac{D}{\Delta x}$ 称为传质系数。

当还原过程由扩散环节和界面化学反应串联组成, 且在反应进行中物质的流动具有稳定态的特征, 即各环节没有出现物质的积累时, 根据质量守恒定律, 各环节的速度和总过程的速度相等:

$$v = v_1 = v_2 = v_3 = \dots, \quad \overline{k} \Delta c = \beta_1 \Delta c_1 = \beta_2 \Delta c_2 = kc = \dots$$

各环节速度常数或传质系数的倒数相当于各环节的阻力。如用 R 表示此等阻力, 则

$$R_1 = \frac{1}{\beta_1}, \quad R_2 = \frac{1}{\beta_2}, \quad \dots, \quad R_3 = \frac{1}{k}$$

此时总过程的阻力为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{k} + \dots,$$