

● 高等学校教学用书

炼焦学

(第3版)

姚昭章 郑明东 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

炼焦学

(第3版)

姚昭章 郑明东 主编

北 京
冶金工业出版社
2005

内 容 提 要

本书为高等学校教学用书,内容分为11章:焦炭室式炼焦过程与配煤原理,炼焦煤料的预处理,炼焦炉及其设备,炼焦生产操作,焦炉内煤气燃烧,焦炉气体力学原理,焦炉传热和结焦时间计算,焦炉的加热管理与热工评定,煤的低温干馏,成型燃料技术。

本书也可供职业技术学院教学之用,或供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炼焦学/姚昭章,郑明东主编.—3版.—北京:冶金工业出版社,2005.9

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-3753-3

I. 炼… II. ①姚… ②郑… III. 炼焦—高等学校—教材 IV. TQ522.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第046459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 宋良 美术编辑 李心

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

1983年5月第1版,1995年5月第2版,

2005年9月第3版,2005年9月第9次印刷

787mm×1092mm 1/16;24印张;636千字;371页;20701~24700册

39.00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)

前 言

《炼焦学》自1983年第1版和1995年第2版以来,已先后发行2万余册,不仅广泛用作各高校焦化及煤综合利用有关专业的教学用书,还被焦化、燃气、钢铁等行业的相关专业科技人员视作重要的技术参考书。

考虑到第2版至今已逾10年,而10年来,在焦炭质量标准、评价和预测、配煤和煤预处理技术、焦炉加热和生产过程的最优化控制和煤结焦过程的新理论、新工艺等方面均有不少的进展,因此有必要对内容进行修订,以适应技术进步的需要。

为组织好本书的修订工作,2004年4月在安徽工业大学召开了修订提纲研讨会,参加会议的除原书编者外,还有宝钢、武钢、马钢等焦化厂的主任工程师(均为教授级高级工程师)和有关高校的教授。与会者对编者提出的修改提纲逐章进行了认真的讨论,归纳出第3版修订的原则如下:

1. 由于第2版已充分考虑了炼焦技术理论、知识、工艺和设备的内在联系,故体系是科学合理的,不宜做明显的体系变动;
2. 适当补充近10年来炼焦技术发展的内容,特别是国内外的成熟经验和科技成果;
3. 考虑到高等学校相关专业课程改革的情况和企业的生产实际,适当精简理论较深的部分,由定量推导改为定性描述,重视企业科技人员掌握新技术、新工艺、新知识,以解决各类技术难题的需求;
4. 更新各类技术规范和质量标准。

在上述原则基础上,在安徽工业大学和鞍山科技大学有关院系的大力支持下,我们经过近一年时间的努力,终于完成了本书的修订工作。

本书由安徽工业大学姚昭章和郑明东主编,第一章由安徽工业大学崔平修改,第二章和第九章一、三、四节由郑明东修改,第三章的一、二节和第五章由鞍山科技大学赵雪飞修改,其余各章、节由姚昭章修改。

编 者
2005年3月

第2版前言

《炼焦学》第一版自1983年出版至今已有十多年。十多年来炼焦技术在理论、工艺及设备方面均有了较大发展,特别是在焦炭质量的评价,焦炭品种的开发,扩大配煤技术,焦炭质量预测,焦炉炭化室传热模拟,焦炉加热计算机控制等方面更有显著进展。第二版在对第一版删繁减旧的基础上加强和补充了上述新内容。此外,考虑到第一版第四篇“炼焦新工艺”中的“扩大炼焦配煤的预处理技术”,已大部分在工业上实施,并成为“炼焦煤料预处理”的组成部分,该篇中“型焦”一章的工艺和设备,不少起源于煤的低温干馏,为此对第四篇的篇名和章、节做了调整。第二版对第一版中比较成熟和传统的内容,基本上保留不变。

《炼焦学》第二版分焦炭与炼焦用煤准备、炼焦生产、焦炉热工以及非炼焦煤的干馏工艺等四篇共十一章,前二篇中“章”的安排与原版相同,“节”作了适当调整和补充;第三篇将第一版中第六章“焦炉内煤气燃烧与热工评定”分为两章,即第六章焦炉内煤气燃烧和第九章焦炉热工评定。第四篇改为“煤的低温干馏”和“成型燃料技术”,第一版第四篇的“扩大炼焦配煤的预处理技术”一章并入第二版的第二章。

本书仍由华东冶金学院姚昭章主(修)编,第二章的一、二、三节,第四章的二、三、四、六节和第五章的一、二、三、四节由鞍山钢铁学院刘述祺修改,其余各章、节由姚昭章修改。修改初稿由武汉钢铁学院、华东冶金学院、鞍山钢铁学院、唐山工程技术学院、马鞍山钢铁公司和鞍山焦化耐火材料设计研究院的同志参加了会审和讨论。在此基础上编者对初稿作了进一步修改。最后全书由主编作最终修改、整理。

编者
1994年4月

第1版前言

《炼焦学》包括高炉焦和炼焦煤、炼焦生产、焦炉热工以及炼焦新工艺四个部分。本书深入阐述了配煤、结焦等工艺原理和煤气燃烧、焦炉气体力学、焦炉传热等热工原理,以及广泛用于炼焦新工艺的竖炉原理和固体流化原理。在工艺原理的论述中介绍了煤岩学配煤、液晶(中间相)成焦机理、焦炭显微结构和高温反应性能等炼焦技术的新成就。本书还比较详细地讲述了焦炉构造及其发展方向,并扼要叙述了煤场机械、配煤粉碎工艺、焦炉煤气设备、护炉设备等方面的基本知识,及有关焦炉机械化和焦炉污染控制的一般知识。根据国内今后炼焦技术发展的需要,对国内外已经得到实际运用或具有发展前途的炼焦新工艺本书亦介绍了其效果、机理和基本工艺。此外,还介绍了一些煤场、配煤和焦炉热工统计管理方面的知识。

本书为冶金高等院校焦化专业用书,也可供其他煤综合利用专业、城市煤气专业和钢铁冶金专业作为教学参考用书。

本书由马鞍山钢铁学院姚昭章同志任主编,第一、二、四章,第九章的第四节,第十一章的第三节由鞍山钢铁学院张家埭同志编写,其余各章节由姚昭章同志编写。本书初稿经华东化工学院杨笈康、鞍山焦耐院王振远、鞍山热能研究所韩文葆等同志为组长的,有武汉钢铁学院、鞍山钢铁学院、马鞍山钢铁学院、河北矿冶学院等院校的有关同志参加的审稿小组进行审查和讨论,并经有关院校试用。根据审稿会的意见和试用中发现的问题,由编者对初稿作了修改,最后由主编对全书作了最终修改、整理和统编。编写过程中得到鞍山焦耐院、鞍山热能所和煤科院北京煤化所等单位一些同志的支持和协助,在此表示感谢。马鞍山钢铁学院焦化教研室的一些同志参加了本书的整理。

编者
1982年8月

目 录

第一篇 焦炭与炼焦用煤准备

第一章 焦炭	1
第一节 焦炭的一般性质	1
第二节 高炉焦	4
第三节 非高炉用焦	11
第四节 焦炭的机械力学性质	16
第五节 焦炭的热性质	29
第六节 焦炭的显微结构	37
第二章 室式炼焦过程与配煤原理	48
第一节 炭化室内结焦过程特点	48
第二节 影响炭化室结焦过程的因素	52
第三节 配合煤的质量	54
第四节 配煤原理	57
第五节 焦炭质量预测	61
第三章 炼焦煤料的预处理	81
第一节 煤料预处理过程的基本工艺	81
第二节 配煤质量与控制	101
第三节 装炉煤的干燥、调湿与预热	111
第四节 配添加物炼焦	118
第五节 装炉煤的密实工艺	130

第二篇 炼焦生产

第四章 炼焦炉及其设备	143
第一节 炼焦炉	143
第二节 筑炉材料	161
第三节 护炉设备	171
第四节 煤气设备	177
第五节 焦炉的砌筑、烘炉、开工和修理	186
第六节 焦炉的大型化和高效	194
第五章 炼焦生产操作	202

第一节	焦炉装煤和出焦	202
第二节	熄焦	208
第三节	筛焦	213
第四节	焦炉生产过程的烟尘控制	216

第三篇 焦炉热工

第六章	焦炉内煤气燃烧	221
第一节	焦炉加热用煤气	221
第二节	煤气的燃烧计算	227
第七章	焦炉气体力学原理	233
第一节	焦炉用气体柏努利方程式及其应用	233
第二节	动量原理在焦炉上的应用	240
第八章	焦炉传热和结焦时间计算	253
第一节	燃烧室向炉墙的传热	253
第二节	炭化室炉墙和煤料的传热	259
第三节	炭化室温度场和结焦时间计算	265
第四节	煤结焦过程的热物理参数	276
第五节	蓄热室传热	288
第九章	焦炉的加热管理与热工评定	292
第一节	焦炉的加热管理	292
第二节	焦炉的加热调节	299
第三节	焦炉加热的自动优化控制	317
第四节	焦炉热工评定	326

第四篇 非炼焦煤的干馏工艺

第十章	煤的低温干馏	340
第一节	概述	340
第二节	煤低温干馏方法与工艺	342
第三节	填充床原理	349
第四节	流化床原理	354
第十一章	成型燃料技术	359
第一节	成型燃料的类型与工艺	359
第二节	成型用煤料与型焦质量	368
参考文献		371

第一篇 焦炭与炼焦用煤准备

焦炭广泛用于高炉炼铁、冲天炉熔铁、铁合金冶炼和有色金属冶炼等生产,作为还原剂、能源和供碳剂,也用于电石生产、气化和合成化学等领域作为原料。对于不同用途的焦炭,均有其特定的要求。由于许多国家焦炭产量的90%以上用于高炉炼铁,且对焦炭质量有严格要求,故本篇以高炉用焦为主,结合各种用途的焦炭,全面介绍焦炭的各种性质;在此基础上,研究焦炭质量与炼焦用煤性质间的内在联系以及炼焦用煤的预处理工艺,以求创造条件,使用不同煤料炼出不同质量要求的用途各异的焦炭。

第一章 焦炭

由烟煤、沥青或其他液体碳氢化合物为原料,在隔绝空气条件下干馏得到的固体产物都可称为焦炭,且随干馏温度的高低又有高温(950~1050℃)焦炭和低温(500~700℃)焦炭之别,后者也称半焦。本章所讨论的焦炭是指以烟煤为主要原料,在室式焦炉中加热至950~1050℃形成的高温焦炭。根据原料煤的性质、干馏的条件等不同,可形成不同规格和质量的高温焦炭,其中用于高炉炼铁的称高炉焦,用于冲天炉熔铁的称铸造焦,用于铁合金生产的称铁合金用焦,还有非铁金属冶炼用焦(以上统称冶金焦),以及气化用焦、电石用焦等。因此对焦炭既要了解其共性,更要掌握不同用途焦炭的特性。焦炭的种类见表1-1。

表 1-1 焦炭的种类

大 类	小 类		
冶金焦	高炉焦	铸造焦	铁合金焦
化工焦	气化焦	电石焦	高硫焦
铝阳焦			
电极焦			
高强度低灰低硫焦			
炭素焦	石油焦	沥青焦	针状焦

第一节 焦炭的一般性质

一、焦炭的宏观结构及其研究方法

焦炭是一种质地坚硬、多孔,呈银灰色并有不同粗细裂纹的碳质固体块状材料,其真相对密度为1.8~1.95,堆积密度为400~520kg/m³。用肉眼观察在炭化室内已经成熟的焦饼,可以看

到明显的纵横裂纹。由焦炉内推出的焦炭,经熄焦、转运,沿粗大的纵、横裂纹碎成仍含有某些纵、横裂纹的块焦。块焦内含有微裂纹。将焦块沿微裂纹分开,即得焦炭多孔体,也称焦体。焦体由气孔和气孔壁构成,气孔壁又称焦质,其主要成分是碳和矿物质。

焦炭的性质取决于上述结构的各个部分(也称不同层次),且彼此间有一定联系,因此对焦炭性质的全面评价,必须建立在对焦炭结构不同层次的研究基础上,并以此作为指导焦炭生产过程的依据。

对不同层次焦炭的性质,目前采用的主要评定和研究方法为:

(1)块焦和焦块 用转鼓或落下方法评定块焦的机械强度,用粒度组成、堆积密度和透气性等研究块焦和焦块的粒度性质,用反应性研究物理化学性质,此外还有各种热性质的研究。

(2)焦炭多孔体 可通过抗拉强度、显微强度、显微硬度、杨氏模量等材料力学性质研究其材料强度。

(3)裂纹 可用单位面积上纵、横裂纹投影的总长度或单位面积上裂纹的面积表示的裂纹率评定裂纹的多少。

(4)气孔 可用气孔率、气孔平均直径、孔径分布、气孔比表面积等表征气孔结构的多种参数来描述焦炭气孔特征。

(5)气孔壁 可用光学组织、反射率、石墨化度等光学性质以及在测量气孔结构参数时得到的气孔壁厚度等评价焦炭气孔壁的性质。

以上所述在本章以下各节将分别介绍。

二、焦炭的化学组成

1. 工业分析

按固定碳、挥发分、灰分和水分测定焦炭化学组成的方法称焦炭的工业分析。

(1)水分 焦炭的水分是焦炭试样在一定温度下干燥后的失重占干燥前焦样的百分率,分全水分(M_t)和分析试样(即空气干燥基)水分(M_{ad})两种。生产上要求稳定控制焦炭的全水分,以免引起高炉、化铁炉等的炉况波动。焦炭全水分因熄焦方式而异,并与焦炭块度、焦粉含量、采样地点、取样方法等因素有关,湿熄焦时,焦炭全水分约4%~6%;干熄焦时,焦炭在贮运过程中也会吸附空气中水,使焦炭水分达0.5%~1%。焦炭用于各种用途时,水分过大会引起热耗增大,用于电石生产时,水分过大还会引起生石灰消化,用于铸造时,焦炭水分也不宜过低,以防冲天炉顶部着火。小粒级焦炭有较大的比表面,故粒级愈小的焦炭,水分愈大,我国规定大于40mm粒级的高炉焦全水分为3%~5%,大于25mm粒级的高炉焦全水分为3%~7%。

(2)灰分 焦炭的灰分是焦炭分析试样在 $850 \pm 10^\circ\text{C}$ 下灰化至恒重,其残留物占焦样的质量百分率,用 A_{ad} 表示。灰分是焦炭中的有害杂质,主要成分是高熔点的 SiO_2 和 Al_2O_3 ,焦炭灰分在高炉冶炼中要用 CaO 等熔剂使之生成低熔点化合物,并以熔渣形式排出。灰分高,就要适当提高高炉炉渣碱度,不利于高炉生产。此外,焦炭在高炉中被加热到高于炼焦温度时,由于焦质和灰分热膨胀性不同,会在灰分颗粒周围产生裂纹,使焦炭加速碎裂或粉化。灰分中的碱金属还会加速焦炭同 CO_2 的反应,也使焦炭的破坏加剧。一般,焦炭灰分每增1%,高炉焦比约提高2%,石灰石用量约增加2.5%,高炉产量约下降2.2%。焦炭用于铸造生产时,其灰分每减少1%,铁水温度约提高 10°C ,还能提高铁水含碳量。焦炭用于固定床煤气发生炉时,其灰分提高将降低发生炉生产能力,焦炭的灰熔点较低时,还会影响发生炉正常排渣。

(3)挥发分和固定碳 挥发分是焦炭分析试样在 $900 \pm 10^\circ\text{C}$ 下隔绝空气快速加热后的失重占原焦样的百分率,并减去该试样的水分得到的数值。挥发分是焦炭成熟度的标志,它与原料煤

的煤化度和炼焦最终温度有关,一般成熟焦炭的空气干燥挥发分 V_{ad} 为 1% ~ 2%。固定碳是煤干馏后残留的固态可燃性物质,由计算得:

$$C_{ad} = 100 - M_{ad} - A_{ad} - V_{ad} \quad (1-1)$$

上述分析基(空气干燥基)可通过下列计算换算成干基(X_d)或可燃基(X_{daf})

$$X_d = \frac{x_{ad}}{100 - M_{ad}}, \% \quad (1-2)$$

$$X_{daf} = \frac{x_{ad}}{100 - M_{ad} - A_{ad}}, \% \quad (1-3)$$

2. 元素分析

按 C、H、O、N、S、P 等元素组成确定焦炭化学组成的方法,称为焦炭的元素分析。

(1) 碳和氢 将焦炭试样在氧气流中燃烧,生成的水和 CO_2 分别用吸收剂吸收,由吸收剂的增量确定焦样中的碳和氢含量。碳是构成焦炭气孔壁的主要成分,氢则包含在焦炭的挥发分中。由不同煤化度的煤制取的焦炭,其含碳量基本相同,但碳结构和石墨化度则有差异,它们同 CO_2 反应的能力也不同。氢含量随炼焦温度的变化比挥发分随炼焦温度的变化明显,且测量误差也小,因此根据焦炭的氢含量可以更可靠地判断焦炭的成熟程度。

(2) 氮 焦样在有混合催化剂($K_2SO_4 + CuSO_4$)存在的条件下,能和沸腾浓硫酸反应使其中的氮转化为 NH_4HSO_4 ,再用过量 NaOH 反应使 NH_3 分出,经硼酸溶液吸收,最后用硫酸标准溶液滴定,以确定焦样中的含氮量。焦炭中的氮是焦炭燃烧时生成 NO_2 的来源。

(3) 硫 焦炭中的硫有无机硫化物硫、硫酸盐硫和有机硫三种形态,这些硫的总和称全硫,工业上通常用重量法测定全硫(S_t)。硫是焦炭中的有害杂质,高炉焦的硫约占整个高炉炉料中硫的 80% ~ 90%,炉料中的硫仅 5% ~ 20% 随高炉煤气逸出,其余的硫靠炉渣排出。这就要增加熔剂,使炉渣的碱度和渣量提高。一般焦炭含硫每增加 1%,高炉焦比约增加 1.2% ~ 2.0%,石灰石用量约增加 2%,生铁产量约减少 2.0% ~ 2.5%。焦炭用于铸造时,焦炭中的硫在冲天炉内燃烧生成 SO_2 ,随炉气上升同金属炉料作用生成 FeS 而进入熔化铁水中,直接影响铸件质量。焦炭用于气化时,使煤气含硫提高,增加煤气脱硫负荷。

(4) 氧 焦炭中的氧含量很少,一般通过减差法计算得到,即

$$O = 100 - C - H - N - S_t - M - A, \% \quad (1-4)$$

对于可燃基: $O_{daf} = 100 - C_{daf} - H_{daf} - N_{daf} - S_{t,daf}, \% \quad (1-5)$

(5) 磷 焦炭中的磷主要以无机盐类形式存在于矿物质中,因此可将焦样灰化后,从灰分中浸出磷酸盐,再用适当的方法测定磷酸盐溶液中的磷酸根含量,即可得出焦样含磷。通常焦炭含磷较低,约 0.02%,一般元素分析不测定磷含量。高炉炼铁时,焦炭中的磷几乎全部转入生铁,转炉炼钢不易除磷,故生铁含磷应低于 0.01% ~ 0.015%,同时采取转炉炉外脱磷技术,降低钢种含磷。高炉焦一般对含磷不作特定要求。

(6) 钾、钠 焦炭中的钾、钠含量在 0.05% ~ 0.3% 之间,它与焦炭灰分中的其他金属氧化物,如 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 一起对焦炭的 CO_2 反应性及反应后强度产生不利影响。对焦炭钾、钠含量的研究,主要基于高炉冶炼的需要,高炉入炉焦炭中的钾、钠来源于原料煤,主要以无机盐的形式存在于矿物质中;高炉风口焦炭中的钾、钠主要来源于高炉内的碱循环。钾、钠含量的测定主要是用原子吸收分光光度法,按照灰分测定方法,将分析焦样灰化后研磨过 160 目筛孔,然后置于灰皿内,于 $815 \pm 10^\circ C$ 灼烧至恒重,经氢氟酸、高氯酸分解,在盐酸介质中,使用空气 3-乙炔火焰进行原子吸收测定。结果以 K_2O 、 Na_2O 的形式表示,并转换为以焦炭为基准。随着高炉焦炭热性质研究的深入,焦炭中钾、钠含量的分析显得尤为重要。

第二节 高炉焦

高炉焦是指供高炉炼铁用的冶金焦。高炉焦的质量要求取决于焦炭在高炉中的行为。

一、高炉冶炼过程与焦炭作用

1. 高炉内总体状况与焦炭作用

高炉系中空竖炉,自上而下分炉喉、炉身、炉腰、炉腹和炉缸五段(图 1-1a)。铁矿石、焦炭和熔剂等块状炉料从炉顶依次、分批装入炉内,高温空气(或富氧空气)由位于炉缸上部的风口鼓入,使焦炭在风口区燃烧放热。

高炉冶炼所需热量由焦炭、风口喷吹的燃料和热风提供,其中焦炭燃烧提供的热量占 75%~80%,因此焦炭是高炉冶炼的主要供热源。焦炭在风口区燃烧生成的高温煤气在上升过程中将热能传给炉料,使炉料升温。焦炭燃烧并与 CO_2 反应生成的 CO 将铁矿石中的铁氧化物还原。因此自下而上煤气温度逐渐降低(图 1-1b),煤气中 CO 含量从风口开始,先由于煤气中 CO_2 与焦炭反应生成 CO 以及铁氧化物被高温焦炭直接还原生成 CO 而逐渐增加,到炉腹以上部位则由于 CO 与铁氧化物间接还原生成 CO_2 而逐渐降低(图 1-1c)。炉料在下降过程中,经预热、脱水、间接还原、直接还原而转化成金属铁,并不断升温和被焦炭渗碳而形成液态铁水。铁矿石中的脉石(主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 等高熔点酸性化合物)则同熔剂作用形成低熔点化合物——炉渣。铁水和炉渣在向下流动过程中相互作用,进行脱硫等反应,到炉缸下部,因互不溶性和密度差异而分离,分别从渣口和铁口定期放出炉外。

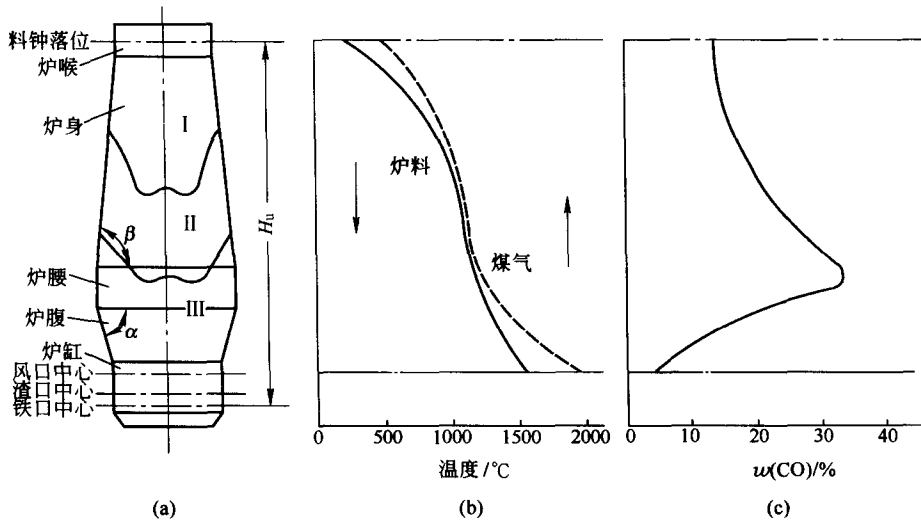


图 1-1 高炉炉型及各部位温度与煤气中 CO 沿炉高的变化

(a) 炉型; (b) 高炉内温度沿炉高的变化; (c) 煤气中 CO 沿炉高的变化;

I—800℃以下区域; II—800~1000℃区域; III—1000℃以上区域; H_0 —有效高度; α —炉腹角; β —炉身角

焦炭堆密度小,在高炉中其体积占高炉总体积的 35%~50%,在风口区以上地区,始终处于固体状态,而在高炉料柱中部铁矿石软化、熔融,在料柱下部金属铁和炉渣已形成液态铁水和熔渣,故焦炭对上部炉料起支承作用,并成为煤气上升和铁水、熔渣下降所必不可少的高温疏松骨架。

焦炭在风口区内不断烧掉,使高炉下部形成自由空间,上部炉料稳定下降,从而形成连续的高炉冶炼过程。

综上所述,高炉的基本功能是将铁矿石加热、还原、造渣、脱硫、熔化、渗碳得到合格的铁水。焦炭在高炉中则起着供热、还原剂、骨架和供碳四个作用。近年来,为降低焦炭消耗,增加高炉产量,改善生铁质量,采用了在风口喷吹煤粉、重油,富氧鼓风等强化技术;焦炭作为热源、还原剂和供碳的作用,可在一定程度上被部分取代,但作为高炉料柱的疏松骨架不能被取代,而且随高炉大型化和强化冶炼,该作用更显重要。

衡量高炉操作水平的主要技术经济指标有:

$$\text{高炉有效容积利用系数 } V = \frac{\text{高炉产铁量 } P[\text{t/d}]}{\text{高炉有效容积 } V_u[\text{m}^3]}, t(\text{Fe})/(\text{m}^3 \cdot \text{d}) \quad (1-6)$$

$$\text{焦比 } C = \frac{\text{高炉每昼夜耗焦量 } G_c[\text{t/d}]}{P[t(\text{Fe})/\text{d}]}, t(\text{coke})/t(\text{Fe}) \quad (1-7)$$

$$\text{冶炼强度 } I = \frac{G_c}{V_u}, t(\text{coke})/(\text{m}^3 \cdot \text{d}) \quad (1-8)$$

$$\text{将式(1-7)和式(1-8)合并得: } P = V_u \cdot \frac{I}{C} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明,扩大高炉生产能力的途径是增大炉容 V_u 、降低焦比 C 和提高冶炼强度 I 。当炉容增大2倍时,风口个数增加2倍,所以在增大炉容的同时,提高冶炼强度的可能性不大,因此更有助于降低焦比,这要求提供优质的高炉焦,以便在焦比较低的条件下起到更好的疏松骨架作用。

2. 高炉冶炼过程和料柱结构

(1) 高炉料柱结构 高炉内自上而下的温度总趋势是逐渐升高。20世纪60年代以来各国通过对高炉进行解剖表明,高炉内的等温线并非沿横截面呈水平状,因高炉炉型、原料品位和操作参数等因素,等温线可呈“W”形或倒“V”形(图1-2)等不同类型。料柱上部低于 1100°C 的区域,炉料保持入炉前的固体块状,该区域称块状带,料柱中部温度 $1100 \sim 1350^\circ\text{C}$ 的部位,矿石从外表到内部逐渐软化融着,故该区域称软融带。高炉内中心气流与边缘气流速度以及温度的差异,使软融带呈倒“V”形或“W”形。料柱中下部温度高于 1350°C ,此处仅焦炭仍呈固块状,熔化的铁水和炉渣沿焦炭层缝隙向下流动并滴落,高温煤气则沿粘附有铁水和炉渣的焦炭缝隙向上流动,该区域称滴落带。在滴落带下方的中心部位,有一个缓慢移动的呆滞焦炭层(也称死料柱)。这主要是当焦炭移动时由软融带上层滑落下来,未经受剧烈碳溶反应的焦炭组成。进入滴落带以下风口前的焦炭在高速热气流的吹动下剧烈回旋并猛烈燃烧形成回旋的风口区。风口区的周边是焦块、焦屑、铁水和熔渣,并随风口区区内焦炭烧掉,边界层的焦炭被热风卷入回旋风口区,同时外围焦炭补入风口区边界层形成动平衡。风口区内焦炭完全燃烧生成的 CO_2 ,在流经边界层时与灼热焦炭反应,几乎全部转化为 CO ,提供铁氧化物还原所需的还原剂。

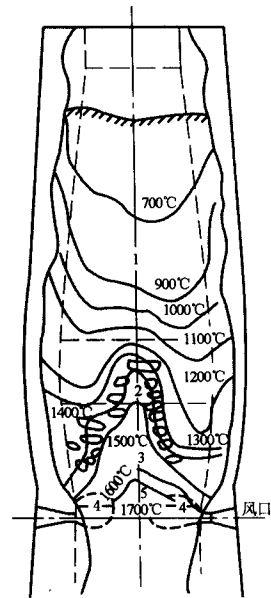
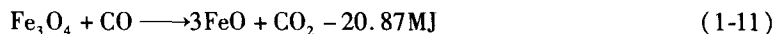
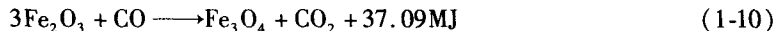


图 1-2 高炉内不同温度区域示意图

- 1—块状带; 2—软融带; 3—滴落带;
4—风口区; 5—呆滞焦炭层

(2) 铁氧化物的还原 可分间接还原和直接还原两种类型。在 200℃ 以下, 铁矿石中的各种铁氧化物与还原性气体(主要为 CO) 发生如下还原反应:

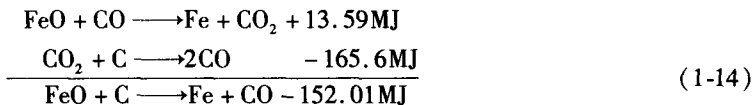


因为其还原剂为 CO, 故称间接还原, 总热效应为正值。反应生成的 CO₂ 还可能与焦炭发生如下反应:



该反应的吉布斯自由能 $\Delta G = 170.61 - 0.174T$, MJ/kmol, 因此当温度高于 800℃ 时, $\Delta G < 0$, 在等温等压条件下, 反应式(1-13)将自发进行, 此反应大量吸热且消耗碳, 并使焦炭气孔壁削弱, 故称此反应为碳素溶解损失反应, 简称碳溶反应。

在温度高于 1100℃ 的软融带, 碳溶反应的平衡常数和反应速度均很高, 因此当铁氧化物被 CO 还原, 并同时生成 CO₂ 时, 该 CO₂ 会立即与焦炭发生碳溶反应, 因此, 铁氧化物反应按以下方式进行。



虽然反应历程仍属两步气固相反应, 但从热力学观点, 恰如铁氧化物被固态碳直接还原。因此在 1100℃ 以上铁氧化物的还原反应称直接还原, 反应大量吸热。直接还原的铁量占铁氧化物还原的总铁量之比称直接还原度 r_d , 一般高炉的 $r_d = 0.35 \sim 0.50$, 由于直接还原反应大量吸热, 不利于高炉内的热能利用; 又因碳溶反应使焦炭气孔壁削弱, 故高炉内应尽可能发展间接还原。间接还原主要在高炉的块状带内通过还原性气体在铁矿石表面进行。块状带的中下部温度已达 800 ~ 1000℃, 因此化学反应速度已相当快。整个反应速度取决于气体中的 CO 向矿石表面的扩散速度, 即属于扩散速度控制。降低扩散阻力或提高扩散推动力, 有利于发展块状带内的还原反应。为此高炉操作可采取以下发展间接还原反应的措施。

1) 采用富氧鼓风和喷吹还原性气体提高煤气中 CO 的浓度。

2) 适当减小矿石粒度, 以增加高炉铁矿石的比表面, 一般中小高炉矿石粒度为 8 ~ 10mm, 大高炉为 10 ~ 25mm, 粒度过小会导致炉料透气性变差。

3) 提高矿石的气孔率, 尽量采用球团矿或烧结矿。

4) 为改善料柱透气性, 入炉料应事先筛除粉尘, 并提高入炉料的粒度均匀性, 故焦炭料层的粒度不宜过大, 一般高炉焦炭的粒度为 25 ~ 70mm, 大高炉以 40 ~ 60mm 为佳, 中型高炉以 25 ~ 40mm 为佳。

5) 通过合适的装料制度和配置合理的风口直径, 改善风口回旋区深度及其边界的均匀性。

6) 在矿石料层中混装 10 ~ 20mm 的小焦粒, 提高炉内 CO 浓度, 还可改善软融带的透气性。

7) 使用反应性适度, 强度好, 含碱量低的焦炭。

二、焦炭在高炉内的行为

1. 焦炭在高炉内的降解过程

国内外通过对高炉风口焦和入炉焦性质的对比试验, 特别是通过高炉解剖试验已经查明, 焦炭在高炉的块状带内虽受静压挤压, 相互碰撞和磨损等作用, 但由于散料层所受静压远低于焦炭的抗压强度, 撞击和磨损力也较小, 故块状带内焦炭强度的降低, 块度的减小以及料柱透

气性的变化均不明显。进入软融带后,焦炭受到高温热力,尤其是碳溶反应的作用,使焦炭气孔壁变薄,气孔率增大,强度降低,并在下降过程中受挤压、摩擦作用,使焦炭块度减小和粉化,料柱透气性变差。碳溶反应还受钾、钠等碱金属的催化作用而加速。焦炭在滴落带内,碳溶反应不太剧烈,但因铁水和熔渣的冲刷,以及温度1700℃左右的高温炉气冲击,焦炭中部分灰分蒸发,使焦炭气孔率进一步增大,强度继续降低。进入风口回旋区边界层的焦炭,在强烈高速气流的冲击和剪切作用下很快磨损,进入回旋区后剧烈燃烧,使焦炭粒度急剧减小,强度急剧降低。焦炭在高炉内的上述降解过程可由图1-3表述。图1-4表明高炉中焦炭沿高向的机械强度、块度、气孔率、反应性和钾、钠元素等的变化情况。由图1-4可见焦炭的各项性质在高炉上部块状带变化不大,

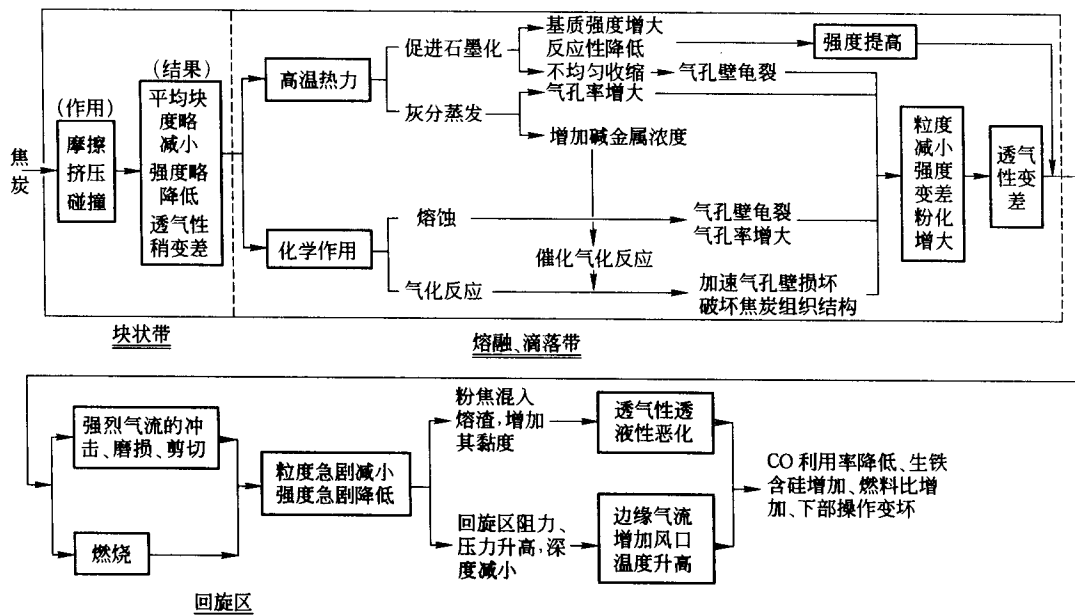


图1-3 焦炭在高炉内的降解过程

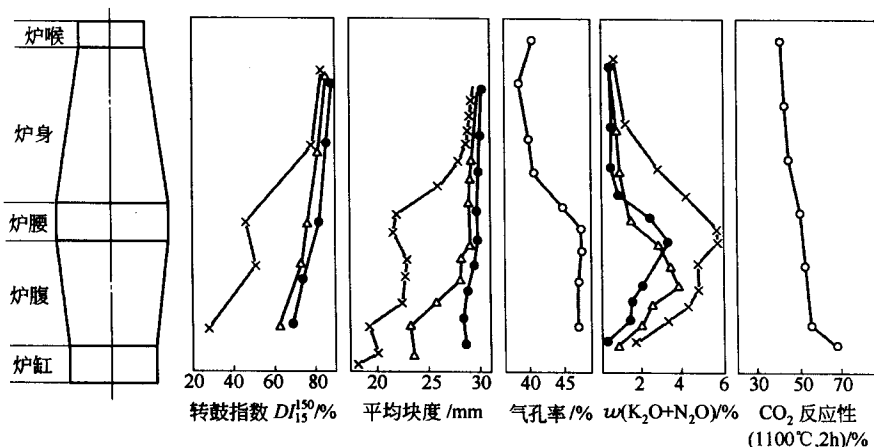


图1-4 高炉中焦炭性质的变化

●—高炉中心试样; △—炉墙与炉中心之间试样; ×—近炉墙试样; ○—平均试样

自高炉中部超过 1000℃ 的区域才开始急剧变化。此外,高炉边缘处焦炭的降解甚于高炉中心部位,这与高炉内气流沿横断面方向的分布有关。

2. 高炉冶炼新技术对焦炭降解的影响

随着高炉富氧喷煤新技术的发展,对焦炭需求量逐渐减少,但对焦炭质量的要求却愈来愈严格。向风口喷煤粉和富氧空气,煤粉在风口区燃烧,大部分或全部代替燃烧焦炭向高炉供热的功能,同时提供固态碳和气体还原剂,使焦比降低。但焦炭作为骨架,保护高炉内透气性和透液性的作用不仅无法由煤粉所取代,反而得到加强。随着焦比的降低,焦炭在高炉骨架区滞留时间延长,荷重增加。焦炭遭受氧化反应、熔渣侵蚀与铁水侵蚀的时间越长,其溶蚀量就越大,强度降低也越多,焦炭粉化加重,细颗粒焦炭增加,骨架区焦炭的工作条件恶化。

3. 高炉内的碱循环及碱对焦炭反应性的影响

碱金属、碱土金属、铁、锰、镍等氧化物对碳溶反应能起正催化作用,其中钾、钠的催化作用最为显著。焦炭本身的钾、钠等碱金属含量很低,一般小于 0.5%,对焦炭还不足以产生有害影响,但在高炉内,矿石和焦炭带入的碱金属盐类会分解成氧化物,并进一步被碳还原和汽化成钾、钠蒸气。这些气态的钾、钠随煤气上升,大部分在高炉上部由于温度降低和 CO₂ 分压升高又生成碳酸盐析出。这些碱金属碳酸盐,一部分粘附在炉壁上侵蚀耐火材料,大部分被焦炭表面吸附或黏附在矿石表面上,又随炉料下降,至温度高于碳酸钾、钠分解温度的区域,又发生分解、还原和气化,如此形成钾、钠等碱金属在高炉内的循环和富集(图 1-5)。由图例表明循环碱量可达入炉焦炭和矿石碱量的 6 倍,而高炉内焦炭的钾、钠含量可高达 3% 以上,这就足以对焦炭的碳溶反应起催化作用,炉料带入的碱量越大,焦炭因加速碳溶反应而被削弱的程度越深。这是因为钾、钠及其氧化物能渗入焦炭的碳结构,形成石墨钾、石墨钠(如 KC₈、NaC₈)等层间化合物,使碳原子间的键松弛而距离增大,使碳结构变形、开裂,从而降低焦炭机械强度,加速碳溶反应。研究表明,焦炭中的钾、钠每增加 0.3% ~ 0.5%,焦炭与 CO₂ 的反应速度可提高 10% ~ 15%,钾、钠含量高时还使焦炭与 CO₂ 的反应开始温度提前。这些将导致焦炭在高炉的中下部,其强度和块度加速恶化,并形成过多的粉化,不利高炉顺行。为此,除了控制炉料带入碱量外,高炉操作应提高炉渣带出碱量,降低高炉上部温度,增强间接还原,减轻焦炭在中、下部的碳溶反应。同时要提供反应性和灰、硫含量较低的焦炭,以提高焦炭的抗碱能力。

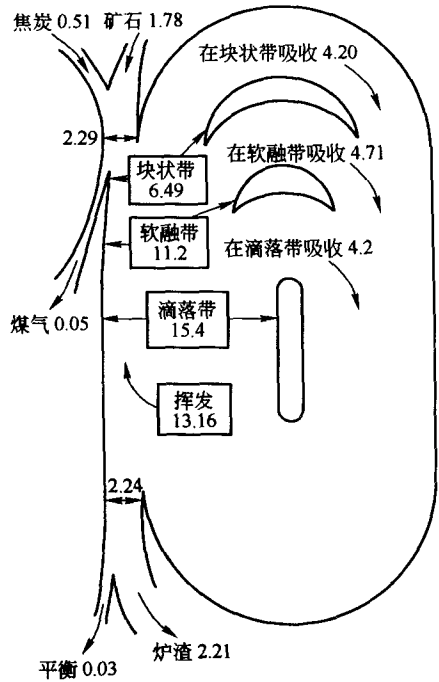


图 1-5 高炉内碱金属循环示例图

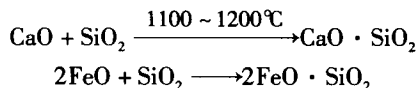
4. 渣渣脱硫过程及焦炭灰分和硫分对高炉内焦炭降解的影响

铁矿石中的脉石和焦炭灰分,其主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃。它们的熔点分别为 1713℃ 和 2050℃,还原温度分别为 1800℃ 和 2400℃ 以上,因此要脱除脉石和灰分,必须加入 CaO、MgO 等碱性氧化物或相应的碳酸盐,使之和 SiO₂、Al₂O₃ 反应生成低熔点化合物,从而在高炉内形成流动性较好的熔渣,借密度不同和互不溶性而与铁水分离。

CaO 和 MgO(或其相应的碳酸盐)称熔剂,每冶炼 1t 生铁所生成的炉渣量称渣比。炉渣内

CaO 量与 SiO₂ 量之比 CaO/SiO₂ 称碱度, 比值 (CaO + MgO)/SiO₂ 称总碱度。

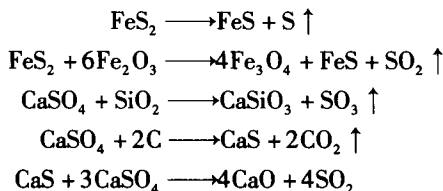
(1) 造渣过程及焦炭灰分对炉渣碱度的影响 造渣的全过程是和铁矿石的还原并形成铁水同步进行的, 在块状带内, 首先产生造渣过程的如下固相反应:



固相反应产物在软融带内与矿石同时软化, 软化的造渣成分在下降到一定温度区域时, 也熔化成液态炉渣称为初渣, 因此对造渣过程而言, 软融带也可称为成渣带。进入滴落带, 初渣熔化而滴落, 一边下降一边同铁水发生硫转移等过程而不断变化其成分和性质, 直到经过风口区时与焦炭灰分作用使成分和性质又一次变化, 因此风口区以上的炉渣称中间渣, 落入炉缸后称终渣。

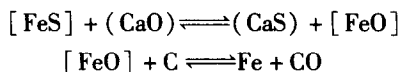
由于焦炭是在回旋区燃烧时才将灰分转入炉渣, 所以中间渣的碱度比终渣高。焦炭灰分越高, 为将此灰分造渣, 中间渣的碱度也要越高。

(2) 脱硫过程及焦炭硫分对炉渣碱度的影响 高炉炉料中 60% ~ 80% 的硫来自焦炭。焦炭中的硫一部分以硫化物和硫酸盐形态存在于灰分中, 大部分呈硫碳复合物形态与焦质紧密结合。铁矿石和熔剂中的硫以黄铁矿 (FeS₂) 和硫酸盐形态存在, 在高炉冶炼过程中发生如下反应:



焦炭中的硫, 一部分 (主要是有机硫) 在下降过程中挥发, 大部分在到达风口时被氧化生成 SO₂, 继而在高温下与固态碳和氢反应生成 S、CO₂ 和 H₂S 等气态硫和硫化物。

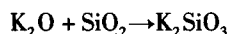
以上反应或挥发生成的气态硫及其硫化物在上升煤气流中大部分被上部炉料中的 CaO、FeO 和金属铁吸收, 并随炉料下降, 只有一小部分 (约 5% ~ 20%) 随煤气排出高炉。因此始终有一部分硫在高炉内循环。高炉内脱硫主要靠炉渣将硫带出, 脱硫过程是通过铁水和熔渣之间硫的以下转移反应来实现:



式中, [] 表示铁水中; () 表示渣中。

提高硫在熔渣和铁水中的分配系数, $L_s = \frac{w(\text{S})}{w[\text{S}]}$, 有利于硫从铁水中转移到熔渣中的转移过程。研究表明, 硫的分配系数与温度和碱度有关 (图 1-6), 因此当焦炭或矿石含硫较高时, 必须提高炉缸温度和炉渣碱度。

(3) 炉渣碱度对焦炭降解的影响 碱金属氧化物与炉渣接触时会发生如下反应



反应结果可使碱金属转入炉渣, 并随炉渣排出炉外。当炉渣碱度大时, 即 CaO 相对过剩, 炉渣中 SiO₂ 处于较完全的束缚状态, 发生上述反应的几率降低, 这将增加高炉内碱金属的循环量, 从而

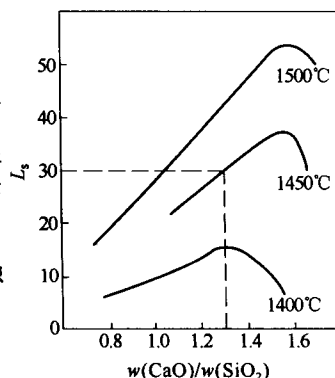


图 1-6 硫的分配系数与温度、炉渣碱度的关系