

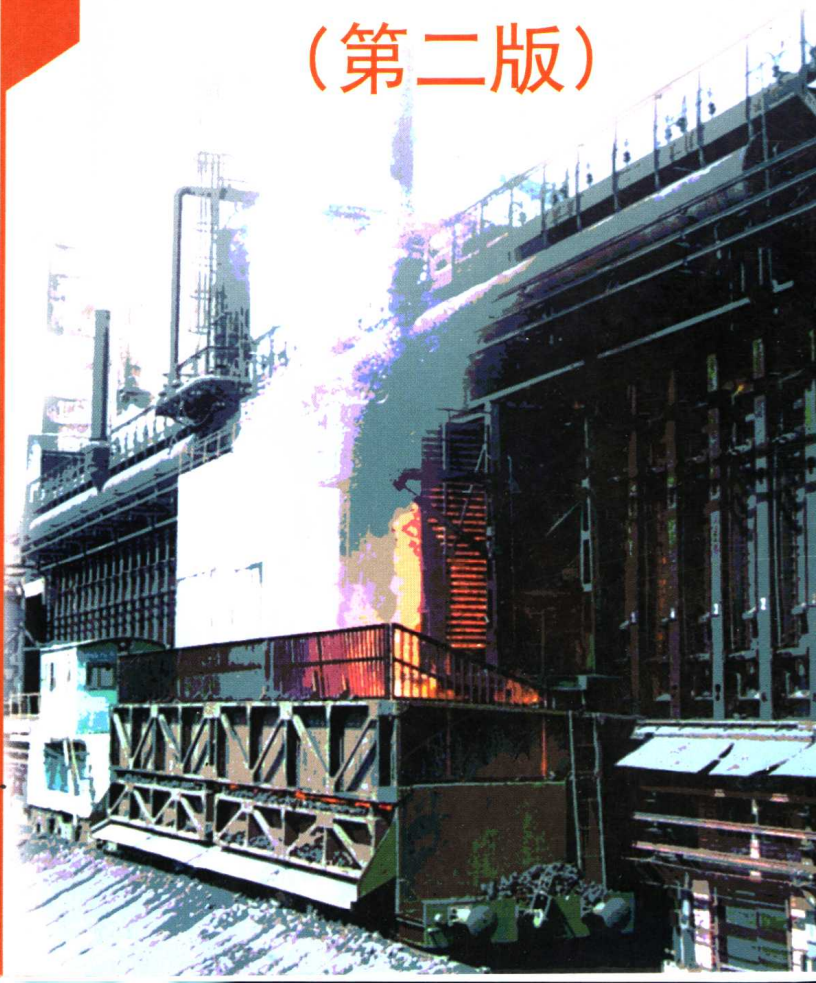
炼焦学

(第二版)

姚昭章

主编

LIANJIAOXUE



冶金工业出版社

31

炼 焦 学

(第 二 版)

姚昭章 主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2003

图书在版编目(CIP)数据

炼焦学/姚昭章主编。-第二版。-北京:冶金工业出版社,1995(2003重印)

ISBN 7-5024-1605-6

I. 炼… II. 姚… III. ①炼焦-理论 ②炼焦-工艺 IV. TQ520

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 12719 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 王耀忠 责任印制 李玉山
北京才智印刷厂印刷; 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, 2003 年 4 月第 7 次印刷
787mm×1092mm 1/16; 26 印张; 619 千字; 405 页; 15701-17700 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)

第二版 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

第一版 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

本社出版的相关书目

| | |
|---------------------------|------------|
| 煤化学产品工艺学 | 肖瑞华 白金峰 主编 |
| 煤焦油化学 | 肖瑞华 编著 |
| 炭素工艺学 | 钱湛芬 主编 |
| 燃气工程 | 吕佐周 王光辉 主编 |
| 煤化学 | 虞继舜 主编 |
| 炼焦工艺学 | 苏宜春 编 |
| 有机化学(第2版) | 朱建光 成本诚 主编 |
| 炼焦生产问答 | 李哲浩 编 |
| 煤的综合利用基本知识问答 | 向英温 等编著 |
| 焦化厂化产生产问答(第2版) | 范伯云 等编 |
| 炼焦炉的特殊操作 ——烘炉、开工、闷炉和冷炉 | 向英温 李静安 编著 |
| 高炉炼铁生产技术手册 | 周传典 主编 |
| 燃料及燃烧(第2版) | 韩昭沧 主编 |
| 钢铁冶金学(炼铁部分)(第2版) | 王筱留 主编 |
| 热能转换与利用(第2版) | 汤学忠 主编 |
| 实用高炉炼铁技术 | 由文泉 主编 |

目 录

| | |
|------------------------------|------------|
| 绪言 | 1 |
| 第一篇 焦炭与炼焦用煤准备 | 3 |
| 第一章 焦炭 | 3 |
| 第一节 焦炭的一般性质 | 3 |
| 第二节 高炉焦 | 5 |
| 第三节 非高炉用焦 | 14 |
| 第四节 焦炭的机械力学性质 | 20 |
| 第五节 焦炭的热性质 | 35 |
| 第六节 焦炭的显微结构 | 43 |
| 第二章 室式炼焦过程与配煤原理 | 57 |
| 第一节 炭化室内结焦过程特点 | 57 |
| 第二节 影响炭化室结焦过程的因素 | 62 |
| 第三节 配合煤的质量 | 64 |
| 第四节 配煤原理 | 67 |
| 第五节 焦炭质量(强度)预测 | 72 |
| 第三章 炼焦煤料的预处理 | 91 |
| 第一节 煤处理过程的基本工艺 | 91 |
| 第二节 炼焦用煤的粒度控制 | 107 |
| 第三节 装炉煤的密实工艺 | 116 |
| 第四节 装炉煤的干燥和预热 | 129 |
| 第五节 添加改质粘结剂炼焦 | 139 |
| 第六节 添加瘦化剂(抗裂剂)炼焦 | 151 |
| 第二篇 炼焦生产 | 154 |
| 第四章 炼焦炉及其设备 | 154 |
| 第一节 炉体构造 | 154 |
| 第二节 筑炉材料 | 175 |
| 第三节 护炉设备 | 187 |
| 第四节 煤气设备 | 195 |
| 第五节 焦炉的砌筑、烘炉、开工和修理 | 206 |
| 第六节 焦炉的大型化和高效 | 215 |
| 第五章 炼焦生产操作 | 224 |
| 第一节 焦炉装煤和出焦 | 224 |
| 第二节 熄焦 | 229 |
| 第三节 装煤和出焦过程的烟尘控制 | 233 |
| 第四节 筛焦 | 238 |
| 第五节 焦炉的加热管理 | 240 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第三篇 焦炉热工 | 254 |
| 第六章 焦炉内煤气燃烧 | 254 |
| 第一节 焦炉加热用煤气 | 254 |
| 第二节 煤气燃烧理论基础 | 265 |
| 第七章 焦炉气体力学原理 | 272 |
| 第一节 焦炉用气体柏努利方程式及其应用 | 272 |
| 第二节 动量原理在焦炉上的应用 | 284 |
| 第八章 焦炉传热和结焦时间计算 | 299 |
| 第一节 燃烧室向炉墙的传热 | 299 |
| 第二节 炭化室炉墙和煤料的传热 | 307 |
| 第三节 炭化室温度场和结焦时间计算 | 314 |
| 第四节 煤结焦过程的热物理参数 | 329 |
| 第五节 蓄热室传热 | 340 |
| 第九章 焦炉热工评定 | 345 |
| 第一节 炼焦热与炼焦耗热量 | 345 |
| 第二节 焦炉的物料平衡和热平衡 | 351 |
| 第三节 降低炼焦耗热量、提高热工效率的途径 | 359 |
| 第四篇 非炼焦煤的干馏工艺 | 362 |
| 第十章 煤的低温干馏 | 362 |
| 第一节 概述 | 362 |
| 第二节 煤低温干馏方法和工艺 | 364 |
| 第三节 填充床原理 | 379 |
| 第四节 流化床原理 | 384 |
| 第十一章 成型燃料技术 | 391 |
| 第一节 成型燃料的类型与工艺 | 391 |
| 第二节 成型用煤料与型焦质量 | 401 |
| 主要参考文献 | 404 |

绪 言

烟煤隔绝空气加热到 950~1050℃, 经过干燥、热解、熔融、粘结、固化、收缩等阶段最终制得焦炭, 这一过程叫高温炼焦(高温干馏)。由高温炼焦得到的焦炭用于高炉冶炼、铸造、气化和化工等工业部门作为燃料或原料; 炼焦过程中得到的干馏煤气经回收、精制得到各种芳香烃和杂环化合物, 供合成纤维、染料、医药、涂料和国防等工业作原料; 经净化后的焦炉煤气既是高热值燃料, 又是合成氨、合成燃料和一系列有机合成工业的原料。因此, 高温炼焦是煤综合利用的重要方法之一。

远在 16 世纪已经开始发展高温炼焦, 它始于炼铁的需要, 是煤综合利用最成熟、应用最广泛的方法。几百年来高温炼焦随冶金、化工的发展而不断变革。近十几年来随高炉技术的发展和能源构成的变化, 高温炼焦技术正在出现新的进展。

高炉大型化和高压喷吹技术的发展, 对焦炭质量的要求日益严格。随着人们对高炉内焦炭行为的深入了解, 传统的冷态强度、化学成分和筛分组成等指标已不足以全面评定焦炭的质量。焦炭的高温性能、显微结构及其他新的检验和评定焦炭质量的方法正在逐步建立, 以适应低燃料比和大型高效高炉稳定操作的需要。另一方面由于世界优质炼焦煤明显短缺, 优质焦炭与低质煤炭间的矛盾日益尖锐。它推动着配煤炼焦和非炼焦煤炼焦技术的发展。

以粘结组分和纤维质组分作为配煤基本概念的配煤原理正在形成, 反映该二种组分的各粘结性参数和煤化度参数, 正由宏观的粘结性指数、流动度、膨胀度和挥发分、发热量、C/H 比等转向以煤岩学为基础的组织平衡指数和强度指数等。这标志着配煤研究从宏观走向微观, 为实验室预测焦炭强度提供了有效途径。与此同时, 中间相(液晶)理论用于煤热解过程的分析, 正在使人们加深对煤向焦转化过程的认识, 并通过对煤的显微组分和焦炭显微结构之间建立定性和定量关系的研究, 寻找它们之间的相关数学模型, 使计算机自动确定配煤组成和控制配煤操作成为现实。

为了扩大炼焦煤源, 将弱粘结煤或不粘结煤用于炼焦。适合于常规焦炉配煤炼焦的各种新技术(煤干燥、预热、选择粉碎、捣固、配型煤、配用人造粘结煤或抗裂剂等)已达到工业化水平, 从而成为解决用较差的炼焦煤炼出优质焦炭的主要方法。型焦作为广泛利用劣质煤的最有效方法, 经过二十多年的试验和发展, 世界上已有年产 20~50 万 t 的工业性试验装置, 这将成为今后发展冶金和非冶金用焦的重要方向。

为使焦炉与大型高炉配套, 实现高效低耗, 焦炉日趋大型化和高效化。焦炉大型化主要在于提高炭化室高度并适当增加长度, 由此在焦炉结构的发展上, 愈来愈多地采用分段加热及贫煤气和空气全下喷的方式。加热煤气设备向全自动调节和程序加热方向发展。为了实现焦炉高效化, 减薄炭化室炉墙, 提高燃烧室温度已属人们最关注的课题, 为此采用既能确保炉体坚固严密, 又能提高炉温和传热速率的高密度高强度硅砖, 这是焦炉用耐火材料的主要研制方向。

焦炉大型化对焦炉操作的全盘机械化和自动化提出了更高要求。各种机械化和自动化方案正在试用, 电算机开始用于焦炉生产(操作和加热管理)。焦炉操作的机械化和自动化为环境保护创造了条件, 各种装煤和出焦的防尘设施不断出现。干熄焦的采用不仅有利于熄焦过程的环境保护, 还可以节约能源、改善焦炭质量和扩大次煤用量, 国内外均愈益

重视。

伴随焦炉大型化和对焦炭质量要求的进一步提高，10万t级以上的大型货轮、卸煤机和处理量达每小时几千吨原煤的大型堆取料机、煤场机械已用于煤的装卸和贮存。分级粉碎和选择粉碎等先粉后配流程正逐渐代替先配后粉流程。备煤过程的全自动作业也成为现实。

用溶剂精制煤、石油残油蒸汽裂解得到的ASP粘结剂等作为配煤或型煤的组分，粉煤快速干馏用于型焦生产或制取优质碳粒，由煤或焦炉煤气制取高炉喷吹或直接还原用的还原性气体……，这些新工艺的出现，标志着传统的高温炼焦工业已开始被煤的液化、气化等工业所渗透。

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冶金工业，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。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及炼焦用煤的预处理工艺，以求创造条件，使不同煤料炼出不同质量要求的各种用途的焦炭。

第一章 焦炭

由烟煤、沥青或其它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，在室式炼焦炉中加热至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）、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。

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，其真相对密度约1.80~1.95，堆积密度约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

焦炭按固定碳、挥发分、灰分和水分测定其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 >40mm 粒级的高炉焦全水分为 3~5%，>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，焦炭灰分每减少 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，焦炭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基挥发分 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})

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

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

2. 元素分析

焦炭按 C、H、O、N、S、P 等元素组成确定化学组成的方法称焦炭的元素分析。

(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，因此以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 ($\text{K}_2\text{SO}_4+\text{CuSO}_4$) 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_x 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，这就要增加溶剂，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

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

$$\text{对于可燃基: } \text{O}_{\text{daf}} = 100 - \text{C}_{\text{daf}} - \text{H}_{\text{daf}} - \text{N}_{\text{daf}} - S_{t,\text{daf}}, \% \quad (1-5)$$

(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。

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。

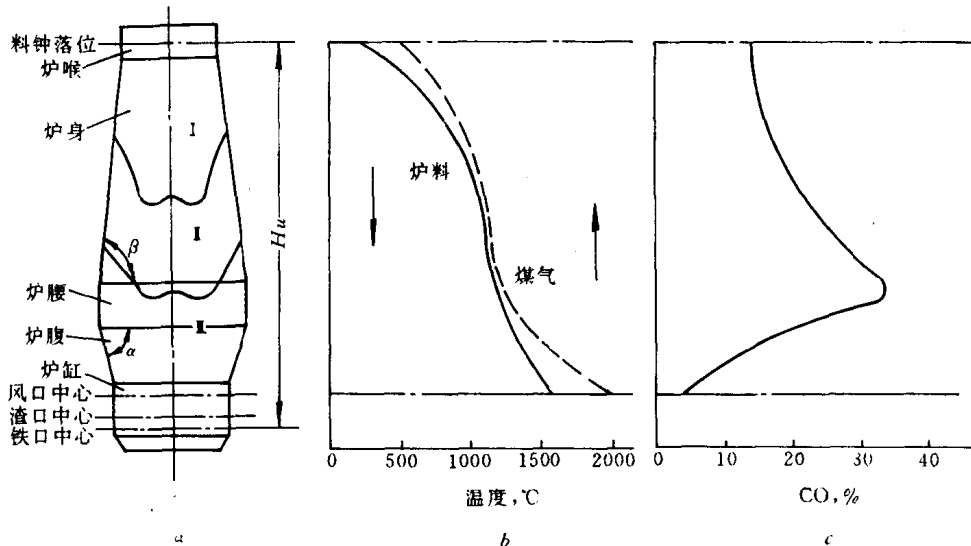


图 1-1 高炉炉型及各部位温度与煤气中 CO 沿炉高的变化

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—800~1100℃区域；III—1100℃以上区域

H_u —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：

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

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

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

将式 (1-7) 和 (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, 风口个数最多增加 $\sqrt{2}$ 倍, 所以在增大炉容的同时, 提高冶炼强度的可能性不大, 因此更有赖于降低焦比, 这就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, 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

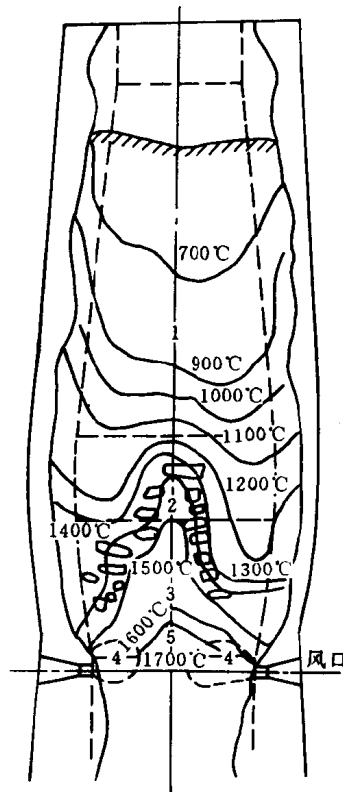


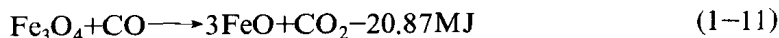
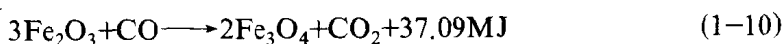
图 1-2 高炉内不同温度区域示意

1—块状带; 2—软融带; 3—滴落带; 4—风口区; 5—呆滞焦炭层

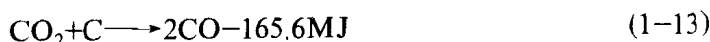
和操作参数等因素, 等温线可呈“W”形或倒“V”形 (图 1-2) 等不同类型。料柱上部低于

1100℃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 1100~1350℃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，由于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℃，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 CO₂，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。

(2) 铁氧化物的还原 可分间接还原和直接还原两种类型。在 800℃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

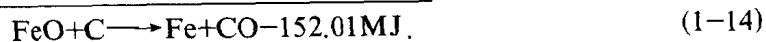
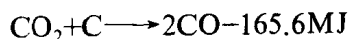
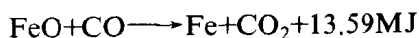


因为其还原剂为 CO，故称间接还原，总热效应为正值。反应生成的 CO₂ 还可能与焦炭发生如下反应



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 和 H₂ 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大量对比试验。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

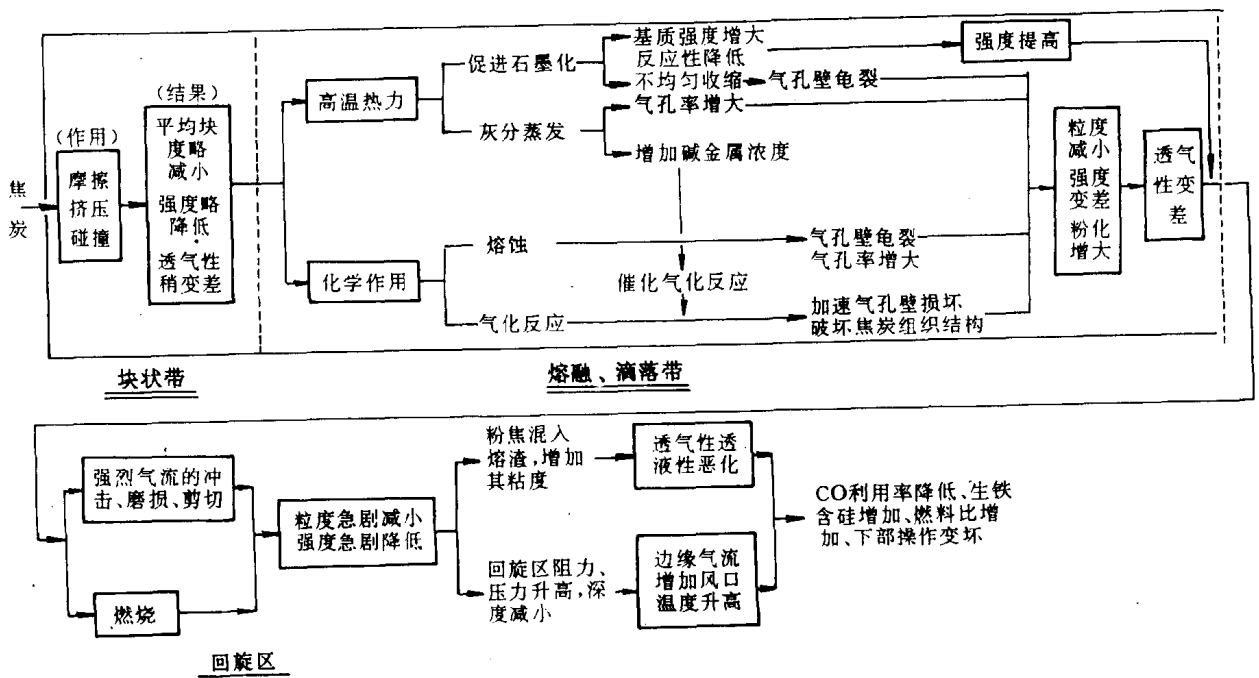


图 1-3 焦炭在高炉内的降解过程