



教育部高职高专规划教材

——煤化工系列教材

# 炼焦工艺

LIANJIAO GONGYI

第二版

王晓琴 主编  
郝志强 主审



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材  
煤化工系列教材

# 炼焦工艺

第二版

王晓琴 主编  
郝志强 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容包括焦炭及其性质、室式结焦过程、炼焦用煤的准备、炼焦炉的结构、炼焦炉的机械与设备、炼焦炉热工评定及热工管理、炼焦炉的传热、炼焦炉的加热制度及操作等内容。比较详尽地介绍了焦炭的用途及质量要求、炼焦用煤的预处理技术、炭化室的结焦过程、焦炉结构与生产操作过程、焦炉机械与附属设备及焦炉的加热制度等炼焦生产的基本内容,并介绍了焦炉热工评定、焦炉气体力学、焦炉传热等热工原理。扼要介绍了焦炉机械自动化、焦炉生产过程中的环境污染控制措施、焦炉加热的特殊操作及常见事故处理等知识。本书还结合中国目前的生产实际,介绍了捣固炼焦、煤调湿技术、7.63m 焦炉及清洁型热回收焦炉。

本书可作为高职高专煤化工类专业教学用书,也可供煤炭综合利用、城市煤气化专业和金属材料专业作为教学参考用书。也可作为大中型焦化企业的职工培训教材或焦化企业的工人、工程技术人员参考资料。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

炼焦工艺/王晓琴主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2010. 7  
教育部高职高专规划教材. 煤化工系列教材  
ISBN 978-7-122-08859-8

I. 炼… II. 王… III. 炼焦-工艺-高等学校: 技术学院-教材 IV. TQ520. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 112708 号

---

责任编辑: 张双进  
责任校对: 郑捷

装帧设计: 王晓宇

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 三河市延风印装厂  
787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$  字数 433 千字 2010 年 8 月北京第 2 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 31.00 元

版权所有 违者必究

# 出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

## 第二版前言

随着近几年高职教育的快速发展,各高职高专院校煤化工专业的发展与教学改革,对教材内容的要求也在不断提高。为满足学校教学的需求,同时根据近几年炼焦技术的发展,我们对《炼焦工艺》这本教材进行修订。

本次修订删去了一些陈旧的内容,并根据近几年炼焦工业的不断发展,焦炉炉型、炼焦工艺等方面都有了很大的改进。为了适应炼焦新形势的需要,在第一版内容的基础上,我们进行了适当修改,增加了捣固炼焦、煤调湿技术、7.63m焦炉炉型及清洁型热回收焦炉等内容。

本书第二版由王晓琴、郭玉梅共同策划修订,王晓琴任主编,陈启文和白保平为副主编。参加编写人员有:太原科技大学化工分院赵晓霞(第一章、第二章、第十章)、山西综合职业技术学院陈启文(第三章、第十一章)、河北工业职业技术学院张现林(第四章)、吕梁学院白保平(第五章、第九章)、山西煤炭职业技术学院王晓琴(第六章、第八章)、山西煤炭职业技术学院郭玉梅(第七章)。全书由郝志强主审,在此深表感谢。

本书可作为高职高专煤化工类专业教学用书,也可供煤炭综合利用、城市煤气化专业和金属材料专业作为教学参考用书。由于本书的一个突出特点是注重实用性,故也可作为大中型焦化企业的职工培训教材或焦化企业的工人、工程技术人员参考资料。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足,请读者批评和指正。

编者  
2010年5月

# 第一版前言

随着教育的快速发展,各高职、高专类院校煤化工专业的不断建设与教学用书的缺乏这一矛盾就显得尤为突出。为满足学校对教材的需求,我们根据高职、高专教育的特点,编写了《炼焦工艺》这本教材。

本书可作为高职高专焦化专业教学用书,也可供煤炭综合利用专业、城市煤气化专业和钢铁冶金专业作为教学参考用书。由于本书的一个突出特点是注重实用性,故也可作为焦化企业的职工培训教材或焦化企业的工人、工程技术人员参考资料。

本书由王晓琴主编,陈启文和白保平为副主编。参加编写人员有:山西煤炭职业技术学院王晓琴(第六章、第八章)、山西综合职业技术学院陈启文(第三章、第十一章)、吕梁高等专科学校白保平(第五章、第九章)、太原科技大学化工分院赵晚霞(第一章、第二章、第十章)、河北工业职业技术学院张现林(第四章、第七章)等。全书由吕梁高等专科学校唐福生主审,在此深表感谢。编者根据审稿的意见,对书稿做了最终修改、整理。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足,请读者批评和指正。

**编 者**

**2004 年 9 月**

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 绪言 .....                          | 1  |
| 第一章 焦炭及其性质 .....                  | 3  |
| 第一节 焦炭的通性 .....                   | 3  |
| 一、焦炭的宏观构造 .....                   | 3  |
| 二、焦炭的物理力学性能 .....                 | 4  |
| 三、焦炭的化学组成 .....                   | 5  |
| 四、焦炭的高温反应性 .....                  | 8  |
| 五、焦炭反应性及反应后强度 .....               | 9  |
| 第二节 高炉炼铁 .....                    | 11 |
| 一、高炉冶炼过程 .....                    | 11 |
| 二、料柱构造及对焦炭的要求 .....               | 14 |
| 三、焦炭在高炉内的性质变化 .....               | 16 |
| 第三节 非高炉用焦的特性 .....                | 18 |
| 一、铸造焦 .....                       | 18 |
| 二、气化焦 .....                       | 20 |
| 三、电石焦 .....                       | 20 |
| 第二章 室式结焦过程 .....                  | 22 |
| 第一节 炭化室内的结焦过程 .....               | 22 |
| 一、温度变化与炉料动态 .....                 | 22 |
| 二、炭化室不同部位的焦炭质量及裂纹特征 .....         | 23 |
| 三、工艺条件对结焦过程的影响 .....              | 24 |
| 四、室式结焦过程中煤料硫分、灰分与焦炭硫分、灰分的关系 ..... | 25 |
| 第二节 炼焦过程的化学产品 .....               | 26 |
| 一、化学产品的产生 .....                   | 26 |
| 二、影响化学产品的因素 .....                 | 28 |
| 三、化学产品产率的估算 .....                 | 30 |
| 第三章 炼焦煤料的预处理技术 .....              | 32 |
| 第一节 炼焦配煤 .....                    | 32 |
| 一、单种煤的结焦特性 .....                  | 32 |
| 二、配煤的意义和原则 .....                  | 33 |
| 三、配煤理论与焦炭质量预测 .....               | 34 |
| 四、配合煤的质量指标及其计算方法 .....            | 40 |
| 五、配煤试验 .....                      | 43 |
| 第二节 扩大炼焦配煤的途径 .....               | 44 |
| 一、捣固炼焦 .....                      | 44 |
| 二、配入添加物炼焦 .....                   | 47 |
| 三、干燥煤炼焦 .....                     | 50 |
| 四、煤调湿技术 .....                     | 52 |
| 五、预热煤炼焦 .....                     | 53 |
| 六、配型煤炼焦 .....                     | 57 |
| 七、缚硫焦 .....                       | 58 |
| 第三节 来煤的接受与储存 .....                | 59 |
| 一、来煤的接受 .....                     | 60 |
| 二、煤的储存 .....                      | 60 |
| 三、煤场管理 .....                      | 61 |
| 第四节 炼焦用煤的粉碎与配合 .....              | 62 |
| 一、粒度控制 .....                      | 62 |
| 二、配煤工艺与设备 .....                   | 63 |
| 三、备煤车间的工艺流程 .....                 | 68 |
| 第四章 炼焦炉的结构 .....                  | 71 |
| 第一节 炉体构造 .....                    | 71 |
| 一、炼焦炉的发展阶段及现代焦炉的基本要求 .....        | 71 |
| 二、现代焦炉炉体各主要部位 .....               | 72 |
| 第二节 炉型特性 .....                    | 80 |
| 一、火道形式 .....                      | 80 |
| 二、解决高向加热均匀性的方法 .....              | 81 |
| 三、煤气入炉方式 .....                    | 83 |

|                                 |            |                      |     |
|---------------------------------|------------|----------------------|-----|
| 第三节 炉型举例 .....                  | 84         | 七、7.63m 焦炉 .....     | 95  |
| 一、JN66 型焦炉 .....                | 84         | 八、清洁型热回收焦炉 .....     | 98  |
| 二、JN43-58 型焦炉 .....             | 88         | 第四节 焦炉结构的发展方向 .....  | 101 |
| 三、JNX43-83 型焦炉 .....            | 90         | 一、增大炭化室的几何尺寸 .....   | 101 |
| 四、JNX60-87 型焦炉 .....            | 91         | 二、采用下喷及下调式焦炉结构 ..... | 102 |
| 五、新日铁 M 型焦炉 .....               | 92         | 三、研制大容积高效焦炉 .....    | 103 |
| 六、TJL43-50D 型捣固焦炉 .....         | 93         | 四、研制节能焦炉 .....       | 105 |
| <b>第五章 炼焦炉的机械设备</b> .....       | <b>108</b> |                      |     |
| 第一节 筑炉材料 .....                  | 108        | 三、废气导出及其设备 .....     | 126 |
| 一、耐火材料的性质 .....                 | 108        | 四、交换设备 .....         | 127 |
| 二、焦炉用耐火材料 .....                 | 110        | 第四节 焦炉机械 .....       | 130 |
| 第二节 护炉设备 .....                  | 115        | 一、装煤车 .....          | 131 |
| 一、护炉设备的作用 .....                 | 115        | 二、推焦车 .....          | 132 |
| 二、保护板、炉门框及炉柱 .....              | 116        | 三、拦焦车 .....          | 132 |
| 三、拉条及弹簧 .....                   | 119        | 四、熄焦车 .....          | 133 |
| 四、炉门 .....                      | 120        | 五、捣固站 .....          | 133 |
| 第三节 煤气设备 .....                  | 122        | 六、装煤推焦车 .....        | 134 |
| 一、荒煤气导出设备 .....                 | 122        | 七、四大车联锁 .....        | 134 |
| 二、加热煤气供入设备 .....                | 124        |                      |     |
| <b>第六章 炼焦炉的生产操作</b> .....       | <b>135</b> |                      |     |
| 第一节 焦炉装煤 .....                  | 135        | 五、出焦过程的烟尘治理 .....    | 147 |
| 一、装煤要求 .....                    | 135        | 第三节 熄焦和筛焦 .....      | 149 |
| 二、焦炉装煤过程的烟尘控制 .....             | 138        | 一、湿法熄焦设施与操作 .....    | 149 |
| 第二节 焦炉出焦 .....                  | 140        | 二、干法熄焦 .....         | 150 |
| 一、出焦操作要求 .....                  | 140        | 三、低水分熄焦 .....        | 153 |
| 二、推焦串序 .....                    | 142        | 四、熄焦过程的防尘 .....      | 154 |
| 三、推焦计划 .....                    | 143        | 五、焦炭的分级与筛焦系统 .....   | 154 |
| 四、推焦工艺要求 .....                  | 146        | 六、筛焦系统的粉尘捕集 .....    | 156 |
| <b>第七章 炼焦炉的开工准备及日常维护</b> .....  | <b>157</b> |                      |     |
| 第一节 炼焦炉的筑炉及开工准备 .....           | 157        | 二、烘炉准备 .....         | 164 |
| 一、筑炉准备 .....                    | 157        | 三、烘炉管理 .....         | 169 |
| 二、炉体砌砖 .....                    | 158        | 第三节 炼焦炉的维护与修理 .....  | 176 |
| 三、收尾工作 .....                    | 160        | 一、焦炉损坏的原因 .....      | 176 |
| 第二节 炼焦炉的烘炉 .....                | 162        | 二、焦炉维护的主要措施 .....    | 177 |
| 一、几种不同燃料的烘炉方法 .....             | 162        | 三、炼焦炉的修理 .....       | 177 |
| <b>第八章 炼焦炉内煤气的燃烧及热工评定</b> ..... | <b>182</b> |                      |     |
| 第一节 炼焦炉加热用煤气 .....              | 182        | 三、煤气的密度 .....        | 184 |
| 一、几种煤气的组成 .....                 | 182        | 第二节 煤气的燃烧 .....      | 185 |
| 二、煤气的发热值 .....                  | 184        | 一、煤气的燃烧反应和燃烧极限 ..... | 185 |

|                                     |     |                                 |     |
|-------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 二、着火温度 .....                        | 186 | 四、煤气的燃烧特性 .....                 | 196 |
| 三、点火与爆炸 .....                       | 186 | 第四节 焦炉的热平衡及热工评定 .....           | 197 |
| 四、燃烧方式 .....                        | 187 | 一、焦炉的物料平衡及热平衡 .....             | 197 |
| 第三节 燃烧计算 .....                      | 188 | 二、焦炉的热效率及热工效率 .....             | 199 |
| 一、空气过剩系数 .....                      | 188 | 三、炼焦耗热量 .....                   | 200 |
| 二、空气需要量和废气生成量的计算——<br>燃烧的物料平衡 ..... | 190 | 四、降低炼焦耗热量、提高焦炉热工效<br>率的途径 ..... | 204 |
| 三、燃烧温度——燃烧的热平衡 .....                | 192 |                                 |     |
| <b>第九章 炼焦炉的气体力学原理及其应用</b> .....     | 206 |                                 |     |
| 第一节 焦炉实用气流方程式及其应用 .....             | 206 | 二、烟囱计算 .....                    | 215 |
| 一、流体力学基本知识 .....                    | 206 | 第三节 动量原理在焦炉上的应用 .....           | 218 |
| 二、焦炉内气体流动的特点 .....                  | 207 | 一、废气循环的意义和原理 .....              | 218 |
| 三、焦炉实用气流方程式及其应用 .....               | 209 | 二、废气循环的基本方程式 .....              | 218 |
| 四、阻力、压力差与气体流量的对比<br>关系 .....        | 211 | 三、废气循环量的计算 .....                | 219 |
| 第二节 烟囱的原理和计算 .....                  | 214 | 四、废气循环和防止短路的讨论 .....            | 221 |
| 一、烟囱的工作原理 .....                     | 214 | 五、变量气流 .....                    | 222 |
| <b>第十章 炼焦炉的传热</b> .....             | 226 |                                 |     |
| 第一节 焦炉内的传热 .....                    | 226 | 三、不稳定传热的基本概念和结焦<br>时间的计算 .....  | 235 |
| 一、对流传热 .....                        | 226 | 第三节 蓄热室的传热 .....                | 239 |
| 二、辐射传热 .....                        | 227 | 一、蓄热室的传热及其计算 .....              | 239 |
| 第二节 炉墙和煤料的传热 .....                  | 233 | 二、提高蓄热室换热效率的途径 .....            | 241 |
| 一、稳定热传导及其基本方程式 .....                | 233 |                                 |     |
| 二、焦炉内的热传导 .....                     | 234 |                                 |     |
| <b>第十一章 炼焦炉的加热制度及特殊操作</b> .....     | 243 |                                 |     |
| 第一节 温度制度及其调节 .....                  | 243 | 三、看火孔压力 .....                   | 256 |
| 一、标准温度 .....                        | 243 | 四、全炉压力（五点压力）分布 .....            | 256 |
| 二、直行温度 .....                        | 245 | 五、例题 .....                      | 257 |
| 三、冷却温度 .....                        | 249 | 第三节 炼焦炉加热的特殊操作 .....            | 264 |
| 四、横排温度 .....                        | 250 | 一、延长结焦时间和停产保温 .....             | 264 |
| 五、炉头温度 .....                        | 251 | 二、焦炉停产加热和重新供热 .....             | 268 |
| 六、焦饼中心温度 .....                      | 251 | 三、焦炉更换加热煤气 .....                | 269 |
| 七、蓄热室顶部温度 .....                     | 252 | 第四节 焦炉常见事故及处理 .....             | 269 |
| 八、小烟道温度 .....                       | 252 | 一、出炉操作中，全厂突然停电 .....            | 269 |
| 九、炉顶空间温度 .....                      | 252 | 二、下暴雨时的处理 .....                 | 270 |
| 第二节 压力制度及其调节 .....                  | 253 | 三、推焦杆掉到炭化室内的处理方法 .....          | 270 |
| 一、集气管压力 .....                       | 253 | 四、炼焦炉局部损坏的处理 .....              | 270 |
| 二、蓄热室顶部吸力 .....                     | 254 |                                 |     |
| <b>参考文献</b> .....                   | 271 |                                 |     |

# 绪 言

烟煤隔绝空气加热到  $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$ ，经过干燥、热解、熔融、黏结、固化、收缩等过程最终制得焦炭，这一过程叫高温炼焦（高温干馏）。由高温炼焦得到的焦炭可供高炉冶炼、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、精制可得到各种芳香烃和杂环化合物，供合成纤维、染料、医药、涂料和国防等工业做原料；经净化后的焦炉煤气既是高热值燃料，也是合成氨、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，也是冶金工业的重要组成部分。

早在 16 世纪人们就已经开始发展高温炼焦，它始于炼铁的需要，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。目前，虽然炼焦工业取得了很大成就，炼焦技术达到了一定的发展水平，但由于种种原因，炼焦工作者仍需不断地研究和开发炼焦新技术。

到目前为止，虽然世界上已经研制出一些铁矿石直接还原的中间试验设备，但预计在今后 20 年，甚至更长时期内，还不可能用新的冶炼工艺取代传统的冶炼工艺，高炉仍将是炼铁的主要设备，焦炭仍将是炼铁的主要燃料。

近年来高炉炼铁技术发展相当迅速，高炉已进入大型化和电子计算机控制的年代，许多国家已建造了大容积高炉。由于高炉冶炼技术的发展，对焦炭质量的要求也日益严格。传统的冷态强度、化学组成、筛分组成等指标已不能全面评定焦炭质量。焦炭的高温性能、显微结构和其他新的检验和评定焦炭质量的方法逐步得到应用。

焦炉大型化对焦炉操作的机械化和自动化提出了更高的要求。电子计算机开始用于焦炉生产（操作和加热管理）。焦炉机械化和自动化为改善环境污染创造了有利条件，各种装煤出焦的防尘措施不断出现。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，成为中国焦化工业今后发展的一个方向。

在现有的水平室式炼焦炉生产冶金焦的方法中，焦炭质量的优劣，在很大程度上取决于炼焦煤料的质量。钢铁工业的发展，对冶金焦的数量和质量将提出更高的要求，其结果势必增加对优质炼焦煤（低灰、低硫、强黏结性的煤）的依赖程度，而世界优质炼焦煤明显短缺更突出了这一矛盾，它推动着配煤炼焦和非炼焦煤炼焦技术的发展。为了扩大炼焦煤源，将弱黏结煤或不黏结煤用于炼焦，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、配用人造黏结煤或抗裂剂等）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 20 多年的试验和发展，世界上已有年产 20 万 $\sim$ 50 万吨的工业性试验装置，这将成为今后发展冶金和非冶金用焦的重要方向。

因此，为使中国焦化工业的发展适应时代发展的要求，让更多的焦化工作者学习和掌握专业知识，用现代的技术装备中国的焦化工业，使中国从焦炭生产大国快速成为焦炭生产强国，也是加速我国钢铁工业发展的重要途径之一。

本书对炼焦生产的工艺和技术进行了较为详细的论述，希望本书的出版能对中国焦化工业的发展起到积极的推动作用。

# 第一章 焦炭及其性质

## 第一节 焦炭的通性

### 一、焦炭的宏观构造

焦炭是一种质地坚硬，以碳为主要成分的、含有裂纹和缺陷的不规则多孔体，呈银灰色。其真密度为  $1.8 \sim 1.95 \text{g/cm}^3$ ，视密度为  $0.80 \sim 1.08 \text{g/cm}^3$ ，气孔率为  $35\% \sim 55\%$ ，堆密度为  $400 \sim 500 \text{kg/m}^3$ 。用肉眼观察焦炭都可看到纵横裂纹。沿粗大的纵横裂纹掰开，仍含有微裂纹的是焦块。将焦块沿微裂纹分开，即得到焦炭多孔体，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。焦炭的裂纹多少直接影响焦炭的粒度和抗碎强度。焦块微裂纹的多少和焦体的孔胞结构则与焦炭的耐磨强度和高温反应性能有密切关系。孔胞结构通常用焦炭的裂纹度、气孔率、气孔平均直径和比表面积等参数表示。

#### 1. 裂纹度

裂纹度即焦炭单位面积上的裂纹长度。裂纹分纵裂纹和横裂纹两种，规定裂纹面与焦炉炭化室炉墙面垂直的裂纹称纵裂纹；裂纹面与焦炉炭化室炉墙面平行的裂纹称横裂纹。焦炭中的裂纹有长短、深浅和宽窄的区分，可用裂纹度指标进行评价。

焦炭裂纹度常用测量方法是方格（ $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ ）框架平放在焦块上，量出纵裂纹与横裂纹的投影长度即得。所用试样应有代表性，一次试验要用 25 块试样，取统计平均值。

#### 2. 焦炭气孔率

焦炭的气孔率是指气孔体积与总体积比的百分数，焦炭的气孔有大有小，有开口的有封闭的。气孔率可以利用焦炭的真密度和视密度的测定值加以计算。焦炭的气孔数量还可以用比孔容积来表示，即单位质量多孔体内部气孔的总容积，可用四氯化碳吸附法测定。

$$\text{气孔率} = \left(1 - \frac{\text{视密度}}{\text{真密度}}\right) \times 100\% \quad (1-1)$$

#### 3. 气孔平均直径与孔径分布

焦炭中存在的气孔大小是不均一的，一般称直径大于  $100\mu\text{m}$  的气孔为大气孔， $20 \sim 100\mu\text{m}$  的为中气孔，小于  $20\mu\text{m}$  的为微气孔。焦炭与  $\text{CO}_2$  作用时，仅大的气孔才能使  $\text{CO}_2$  进入，因此焦炭的孔径分布常用压汞法测量。

$$r = \frac{75000}{p} \quad (1-2)$$

式中  $r$ ——外加压力为  $p (\text{kgf/cm}^2)$  ① 时，汞能进入孔中的最小孔径。

设半径在  $r$  到  $r+dr$  范围内的孔体积为  $dV$ ，孔径大小的分布函数为  $D(r)$ ，则

$$dV = D(r)dr$$

①  $1\text{kgf/cm}^2 = 98066.5\text{Pa}$ ，后同。

对式 (1-2) 微分得 
$$dr = -75000 \frac{dp}{p^2}$$

代入上式得 
$$D(r) = \frac{dV}{dr} = -\frac{p^2}{75000} \times \frac{dV}{dp} \quad (1-3)$$

$p$  和  $dV/dp$  可由实验测出, 由此可按式 (1-2)、式 (1-3) 分别得出  $r$  和  $D(r)$ , 按  $D(r)$  对  $r$  绘图, 即得孔径分布曲线, 进而算出气孔平均直径。

#### 4. 比表面积

指单位质量焦炭内部的表面积, 其单位是  $m^2/g$ , 一般用气相吸附法或色谱法进行测定。

### 二、焦炭的物理力学性能

焦炭由于用途不同, 对其质量要求也不同。高炉生产对焦炭的质量指标要求最高, 其基本要求是: 粒度均匀, 耐磨性和抗碎性强。焦炭的这些物理力学性能主要由筛分组成和转鼓实验来评定。

#### 1. 筛分组成

焦炭是外形和尺寸不规则的物体, 只能用统计的方法来表示其粒度, 即用筛分实验获得的筛分组成计算其平均粒度。一般用一套具有标准规格和规定孔径的多级振动筛将焦炭筛分, 然后分别称量各级筛上焦炭和最小筛孔的筛下焦炭质量, 算出各级焦炭的质量分数简称焦炭的筛分组成, 国际标准允许筛分实验用方孔筛 (以边长  $L$  表示孔的大小) 和圆孔筛 (以直径  $D$  表示孔径的大小)。相同尺寸的两种筛, 其实际大小不同, 实验得出两者关系为

$$D/L = 1.135 \pm 0.04 \quad (1-4)$$

即圆孔直径为 60mm 时, 对应的方孔筛  $L = 60/1.135 = 52.86\text{mm}$ , 通过焦炭的筛分组成计算焦炭的平均粒度及粒度的均匀性, 还可估算焦炭的比表面积、堆积密度, 并由此得到评定焦炭透气性和强度的基础数据。

(1) 平均粒度 根据筛分组成及筛孔的平均直径可由式 (1-5)、式 (1-6) 来计算焦炭的平均粒度

$$d_s = \sum w_i d_i \quad (1-5)$$

或 
$$d_b = \left( \sum \frac{w_i}{d_i} \right)^{-1} \quad (1-6)$$

式中  $w_i$ ——各粒度级的质量分数, %;

$d_i$ ——各粒度级的平均粒度, 由粒级上、下限的平均值计算, mm;

$d_s$ ——算术平均直径, mm;

$d_b$ ——调和平均直径 (是以实际焦粒比表面积与相当球体比表面积相同的原理确定的平均粒度), mm。

(2) 粒度均匀性 粒度均匀性可由下式计算

$$k = \frac{w_{40 \sim 80}}{w_{>80} + w_{25 \sim 40}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中  $k$ ——粒度均匀性指数, %;

$w_{25 \sim 40}$ 、 $w_{40 \sim 80}$ 、 $w_{>80}$ ——分别表示焦炭中 25~40mm、40~80mm 和 >80mm 各粒级的质量分数, %。

$k$  值愈大, 粒度愈均匀。对中、小型高炉也可按  $k = \frac{w_{25 \sim 40}}{w_{>40} + w_{10 \sim 25}} \times 100\%$  计算。

#### 2. 耐磨强度和抗碎强度

(1) 转鼓实验方法 焦炭强度通常用抗碎强度和耐磨强度两个指标来表示。焦炭无论在

运输途中还是使用过程中，都会受摩擦力作用而磨损，受冲击力作用而碎裂。焦炭在常温下进行转鼓实验可用来鉴别焦炭强度。因焦炭在一定转速的转鼓内运行，可以模仿其在运输和使用过程中的受力情况。当焦炭表面承受的切向摩擦力超过气孔壁的强度时，会产生表面薄层分离现象，形成碎屑或粉末，焦炭抵抗摩擦力破坏的能力称为焦炭的耐磨强度，用  $M_{10}$ （质量分数，下同）表示。

$$M_{10} = \frac{\text{出鼓焦炭中粒度小于 } 10\text{mm 的质量}}{\text{入鼓焦炭质量}} \times 100\% \tag{1-8}$$

当焦炭承受冲击力时，焦炭沿结构的裂纹或缺陷处碎成小块，焦炭在外力冲击下抵抗碎裂的能力称焦炭抗碎强度，用  $M_{25}$  ( $M_{40}$ )（质量分数，下同）表示。

$$M_{25} = \frac{\text{出鼓焦炭中粒度大于 } 25\text{mm 的质量}}{\text{入鼓焦炭质量}} \times 100\% \tag{1-9}$$

焦炭的孔孢结构影响耐磨强度指标  $M_{10}$  值，焦炭的裂纹度影响其抗碎强度指标  $M_{25}$  值。 $M_{25}$  值和  $M_{10}$  值的测定方法很多，中国多采用德国米库姆转鼓实验方法，如表 1-1 所示。

表 1-1 米库姆转鼓实验方法

| 转 鼓 特 性    |            |      | 焦 炭 试 样 |       | 筛 分 |       | 强 度 指 标          |                  |
|------------|------------|------|---------|-------|-----|-------|------------------|------------------|
| (直径/长度)/mm | 转速/(r/min) | 转数/r | 质量/kg   | 粒度/mm | 孔形  | 筛孔/mm | 耐磨强度 $M_{10}/\%$ | 抗碎强度 $M_{25}/\%$ |
| 1000/1000  | 25         | 100  | 50      | >60   | 圆形  | 25,10 | <10              | >25              |

(2) 焦炭在转鼓内的运动特征 焦炭在转鼓内要靠提料板才能提升，故转鼓内均设有不同规格的提料板。焦炭在转鼓内随鼓转动时的运动情况可由图 1-1 表示，装入转鼓的焦炭在转鼓内旋转时，一部分被提料板提升，达到一定高度时被抛出下落（图中位置 A），使焦炭受到冲击力的破碎作用，一部分超出提料板的焦炭在提料板从最低位置刚开始提升时，就滑落到鼓底（位置 B），这部分焦炭仅能在转鼓底部滚动和滑动（位置 C），故破坏作用不大，当靠到下一块提料板时再部分被提起。此外转鼓旋转时焦炭层内焦炭间彼此相对位移及焦炭与鼓壁间的摩擦，则是焦炭磨损的主要原因，鼓内焦炭的填充量愈多，这种磨损作用就愈明显。

焦炭的机械强度是在冷态下实验的结果，不能准确地反映焦炭在高炉内二次加热下的热强度。

三、焦炭的化学组成

焦炭的化学组成主要用焦炭工业分析和元素分析数据来加以体现。

1. 工业分析

焦炭的工业分析包括焦炭水分、灰分和挥发分的测定以及焦炭中固定碳的计算，焦炭工业分析方法见国家标准 GB/T 2001—1991。

(1) 水分 ( $M_t$ ) 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数。生产上要求稳定控制焦炭的水分，水分波动会使焦炭计量不准，并且引起炉况波动。此外，焦炭水分提高会使  $M_{25}$  偏高， $M_{10}$  偏低，给转鼓指标带来误差。但水分也不宜过低，否则不利于降低高炉炉顶温度，且会增加装卸及使用中的粉尘污染。焦炭的水分与炼焦煤料的水分无关，也不

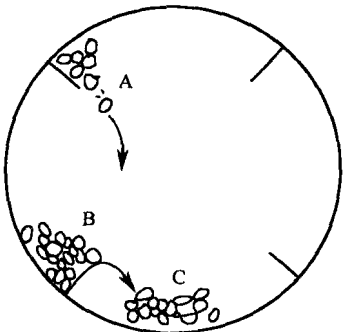


图 1-1 焦炭在转鼓内的运动情况

取决于炼焦工艺条件，焦炭的水分因熄焦方式而异，并与焦炭粒度、焦粉含量、采样地点、取样方法等因素有关。湿熄焦时，焦炭水分（质量分数，下同）约 2%~6%，因喷水、沥水条件和焦炭粒度不同而波动；干熄焦时，焦炭在储运过程中也会吸附空气中水汽，使焦炭水分达 0.5%~1%，干焦炭比湿焦炭容易筛分。中国规定冶金焦水分为：>40mm 粒度级为 3%~5%；>25mm 粒度级为 3%~7%，含有适量水分，有利于降低高炉炉顶温度。

(2) 灰分 ( $A_d$ ) 灰分是指焦炭试样在规定条件下燃烧后所得的残留物。灰分是焦炭中的有害杂质，主要成分是高熔点的  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  等酸性氧化物，在高炉冶炼中要用  $CaO$  等熔剂与它们生成低熔点化合物，才能以熔渣形式由高炉排出。如果灰分高，就要适当提高高炉炉渣碱度，不利于高炉生产。此外，焦炭在高炉内被加热到高于炼焦温度时，由于焦质和灰分热膨胀性不同，会沿灰分颗粒周围产生并扩大裂纹，加速焦炭破碎或粉化。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。

因此，一般焦炭灰分（质量分数，下同）每增加 1%，高炉焦比（每吨生铁消耗焦炭量）约提高 2%，炉渣量约增加 3%，高炉熔剂用量约增加 4%，高炉生铁产量约下降 2.2%~3.0%。

几个国家冶金用焦炭与精煤灰分国家标准 ( $A_d$ ) 见表 1-2。

表 1-2 冶金用焦炭与精煤灰分国家标准

| 国别     | 中 国   |       |       | 美 国     | 俄罗斯     | 德 国     | 法 国  | 日 本     |
|--------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|------|---------|
|        | I 级   | II 级  | III 级 |         |         |         |      |         |
| 焦炭灰分/% | ≤12.0 | ≤13.5 | ≤15.0 | <7.0    | <10.0   | <8.0    | <9.0 | <10.0   |
| 精煤灰分/% | <12.5 |       |       | 5.5~6.5 | 8.0~8.5 | 6.0~7.0 | <7.0 | 6.6~8.0 |

可见，中国高炉焦的灰分指标与其他一些国家相比偏高，它是焦炭质量差的主要原因，焦炭灰分高的原因是炼焦精煤的灰分高所致。若能将焦炭灰分由 14.5% 降至 10.5%，以年产 7000 万吨生铁的高炉计算，可以节约熔剂 227 万吨、焦炭 385 万吨，同时可以增加生铁 1015 万吨，还可大大降低铁路运输量。

精煤合理灰分要从煤炭资源特点，如煤的可选性、各级选煤的回收率，并结合选煤技术、中煤和矸石的合理利用等方面，进行综合经济技术分析加以确定，炼焦精煤的灰分以 7% 左右为宜。

(3) 挥发分 ( $V_{daf}$ ) 和固定碳 [ $w(FC)$ ] 挥发分是指焦炭试样在规定条件下隔绝空气加热，并进行水分校正后的质量损失。挥发分是衡量焦炭成熟程度的标志，通常规定高炉焦的挥发分（质量分数，下同）应为 1.2% 左右，若挥发分大于 1.9%，则表示生焦，其不耐磨，强度差；若挥发分小于 0.7%，则表示过火，过火焦裂纹多且易碎。焦炭的挥发分同原料煤的煤化程度及炼焦最终温度有关，炼焦煤挥发分高，在一定的炼焦工艺条件下，焦炭挥发分也高。随着炼焦的最终温度升高，焦炭挥发分降低。如图 1-2、图 1-3 所示。

焦炭挥发分也是焦化厂污染控制的指标之一，挥发分升高，推焦时粉尘放散量显著增加，烟气量及烟气中的多环芳烃含量也增加。

固定碳是煤干馏后残留的固态可燃性物质，可由下式计算

$$w_{ad}(FC) = 100 - M_{ad} - A_{ad} - V_{ad} \tag{1-10}$$

式中  $w_{ad}(FC)$ ——固定碳含量，%；

$M_{ad}$ ——水分含量，%；

$A_{ad}$ ——灰分含量，%；

$V_{ad}$ ——挥发分含量，%。

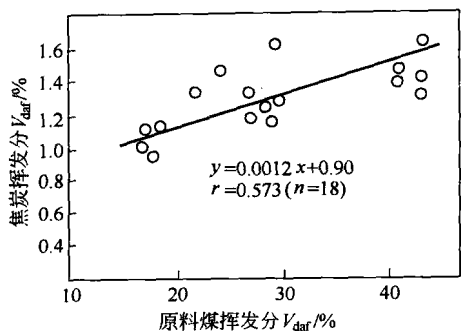


图 1-2 焦炭挥发分与原料煤挥发分的关系

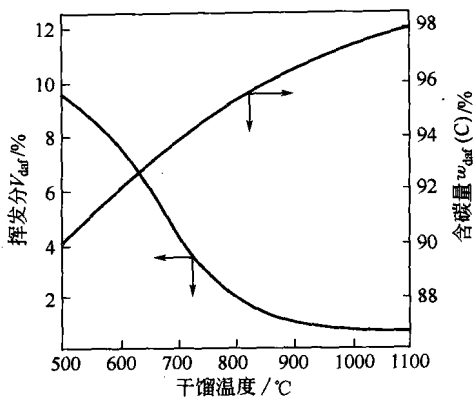


图 1-3 焦炭挥发分与炼焦温度的关系

2. 元素分析

焦炭按碳、氢、氧、氮、硫和磷等元素组成确定其化学成分时，称为元素分析。

(1) 碳和氢 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，将焦炭试样在氧气中燃烧，生成的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  分别用吸收剂吸收，由吸收剂的用量确定焦样中的碳和氢的含量（质量分数，下同）。其成分为碳含量 92%~96%，氢含量 1%~1.5%。结焦过程中，不同煤化程度的煤中碳、氢、氮含量随干馏温度升高而变化的规律如图 1-4 所示。

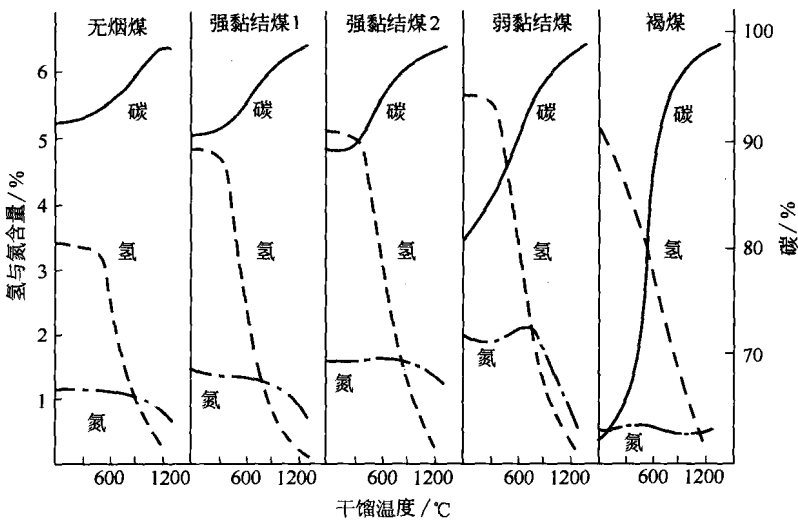


图 1-4 各种煤的 C、H、N 含量随干馏温度升高而变化的规律

从图 1-4 可以看出，由不同煤化程度的煤制取的焦炭，其含碳量基本相同。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 焦炭中的氮是焦炭燃烧时生成  $\text{NO}_x$  的来源，结焦过程中氮含量（质量分数，下同）变化不大，仅在干馏温度达 800 $^{\circ}\text{C}$  以上时才稍有降低。

焦样在催化剂 ( $K_2SO_4 + CuSO_4$ ) 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  $NH_3$  分解出来。经硼酸溶液吸收, 最后用硫酸标准溶液滴定, 以确定焦样中的氮含量, 其含量为  $0.5\% \sim 0.7\%$ 。

(3) 氧 焦炭中氧含量很少, 常用减差法计算得到, 其含量 (质量分数, 下同) 为  $0.4\% \sim 0.7\%$ 。

(4) 硫 焦炭中的硫包括: 煤和矿物质转变而来的无机硫化物 ( $FeS$ 、 $CaS$  等), 熄焦过程中部分硫化物被氧化生成的硫酸盐 ( $FeSO_4$ 、 $CaSO_4$ ), 炼焦过程中生成的气态硫化物在析出途中与高温焦炭作用而进入焦炭的有机硫, 这些硫的总和称全硫。工业上通常用质量法测定, 其含量 (质量分数, 下同) 为  $0.7\% \sim 1.0\%$ 。高炉焦的硫 (质量) 约占整个高炉炉料中硫的  $80\% \sim 90\%$ , 炉料中的硫仅有  $5\% \sim 20\%$  随高炉煤气逸出, 其余的硫靠炉渣排出。

一般焦炭含硫 (质量分数, 下同) 每增加  $0.1\%$ , 高炉焦比约增加  $1.2\% \sim 2.0\%$ , 高炉熔剂用量约增加  $2\%$ , 生铁产量约减少  $2.0\% \sim 2.5\%$ 。一些国家对高炉焦含硫指标规定如表 1-3 所示。

表 1-3 一些国家的高炉焦硫分指标

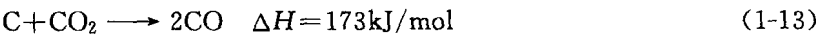
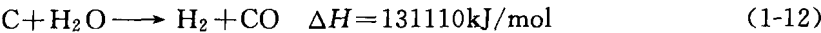
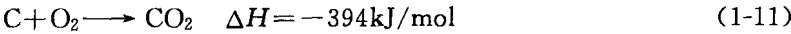
| 国别    | 中 国  |      |       | 美 国 | 德 国 | 法 国 | 英 国 | 日 本 |
|-------|------|------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
|       | I 级  | II 级 | III 级 |     |     |     |     |     |
| 指标值/% | <0.6 | <0.8 | <1.0  | 0.6 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 0.6 |

(5) 磷 焦炭中的磷主要以无机盐类形式存在。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 (质量分数, 下同)。通常焦炭含磷约  $0.02\%$ 。高炉炉料中的磷全部转入生铁, 转炉炼钢不易除磷, 要求生铁含磷低于  $0.01\% \sim 0.015\%$ 。煤中含磷几乎全部残留在焦炭中, 高炉焦一般对含磷不做特定要求。

四、焦炭的高温反应性

1. 反应机理

焦炭的高温反应性是焦炭与二氧化碳、氧和水蒸气等进行化学反应的性质, 简称焦炭反应性, 反应如下



反应 (1-11) 称焦炭的燃烧性, 高炉内主要发生在风口区  $1600^\circ C$  以上的部位;

反应 (1-12) 称水煤气反应;

反应 (1-13) 称碳素溶解反应 (高炉内主要发生在  $900 \sim 1300^\circ C$  的软融带和滴落带)。

焦炭在高炉炼铁、铸造化铁和固定床气化过程中, 都要发生以上三种反应。由于焦炭与氧和水蒸气的反应有与二氧化碳的反应类似的规律, 因此大多数国家都用焦炭与二氧化碳间的反应特性评定焦炭反应性。

焦炭是一种碳质多孔体, 它与  $CO_2$  间的反应属气固相反应, 其反应是通过到达气孔表面上的  $CO_2$  和  $C$  反应来实现的, 所以反应速率不仅取决于化学反应速率, 还受  $CO_2$  扩散影响。当温度低于  $1100^\circ C$  时, 化学反应速率较慢, 焦炭气孔内表面产生的  $CO$  分子不多,  $CO_2$