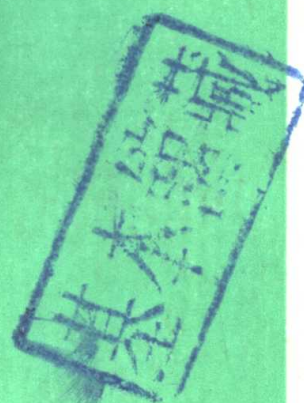


974658

TF053
4435

• 中等专业学校教学用书 •

炼焦工艺学



冶金工业出版社



ZHONGDENG ZHUANYE
XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

中等专业学校教学用书

炼焦工艺学

河北省冶金工业学校 苏宜春 编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

中等专业学校教学用书

炼焦工艺学

河北省冶金工业学校 苏宜春 编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

河北省三河市印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张27.75 字数663千字

1994年5月第一版 1994年5月第一次印刷

印数 1~1500册

ISBN 7-5024-1327-8

TQ·60 (课) 定价12.85元

前 言

炼焦工艺学内容包括炼焦用煤的准备，焦炉结构及生产工艺，焦炉热工和应用劣质煤炼焦的型焦生产等四个部分。本书较详尽地介绍炼焦煤的准备，结焦原理，炼焦配煤，焦炉生产的工艺原理及焦炉气体力学、焦炉传热等热工原理。在工艺原理中介绍煤岩学配煤、液晶（中间相）成焦机理，焦炭的显微结构和高温反应性能等炼焦技术的新发展。本书还介绍焦炉结构发展的方向，如我国研制的 JNX60-87 型全下调式焦炉等。本书并扼要介绍煤场机械，焦炉机械，焦炉煤气设备及焦炉机械自动化，环境污染控制等一般知识。

本书为中等专业学校焦化专业教学用书，也可供煤的综合利用专业、城市煤气化专业和钢铁冶金专业作为教学参考书。同时也可供焦化厂的工人、工程技术人员参考。

本书由河北省冶金工业学校苏宜春编写。由唐山矿冶学院李寿军、河北冶金企业集团公司寿建平、石家庄焦化厂李秀清等同志组成的审稿小组对本书初稿进行了审查。编者根据审稿的意见，对书稿作了最终修改、整理。本书在编写过程中还得到了石家庄焦化厂、唐山矿冶学院一些同志的支持和协助，在此一并表示感谢。

编 者

1992年12月

目 录

绪言	1
第一章 焦炭及其性质	3
第一节 高炉的生产原理及焦炭的作用	3
第二节 焦炭的组成、性质及质量指标	9
第二章 煤的成因性质及分类	22
第一节 煤的成因及种类	22
第二节 煤的性质	23
第三节 煤的分类和我国的煤炭资源	42
第三章 煤的结焦过程	53
第一节 煤的结构及煤的热解过程	53
第二节 烟煤的结焦过程	62
第三节 炼焦过程的化学产品	68
第四章 炼焦配煤	75
第一节 炼焦配煤	75
第二节 扩大炼焦配煤的途径	88
第五章 煤的洗选和干燥	101
第一节 煤的洗选	101
第二节 煤的脱水和干燥	108
第六章 炼焦用煤的准备	112
第一节 备煤车间的工艺流程及平面布置	112
第二节 煤的接受和贮存	115
第三节 煤场机械	117
第四节 贮煤场设计	129
第五节 煤的解冻	136
第六节 配煤设备和配煤操作	137
第七节 贮煤塔	145
第七章 炼焦炉	147
第一节 焦炉的基本结构和我国现有焦炉的炉型	148
第二节 二分式火道焦炉	160
第三节 双联火道式焦炉	165
第四节 焦炉结构发展的方向	172
第八章 炼焦炉的机械设备和操作	182
第一节 护炉设备	182
第二节 煤气设备	193
第三节 焦炉机械	207

第四节	炼焦炉的出炉操作·····	218
第九章	炼焦炉的砌筑、烘炉和开工·····	234
第一节	筑炉材料·····	234
第二节	炼焦炉的砌筑·····	243
第三节	炼焦炉的烘炉·····	247
第四节	炼焦炉的开工·····	260
第十章	炼焦炉的维护和修理·····	262
第一节	炼焦炉的维护·····	262
第二节	炼焦炉的修理·····	264
第十一章	炼焦炉内煤气的燃烧及热工评定·····	269
第一节	炼焦炉加热用煤气·····	269
第二节	煤气的燃烧·····	273
第三节	燃烧计算·····	277
第四节	焦炉的热平衡及热工评定·····	284
第十二章	炼焦炉的气体力学原理及应用·····	293
第一节	焦炉内气体用柏努力方程式·····	293
第二节	焦炉实用气流方程式及应用·····	304
第三节	阻力、压力差与气体流量的对比关系·····	309
第四节	烟囱的原理及计算·····	315
第五节	焦炉的废气循环·····	319
第六节	变量气流方程式及其应用·····	324
第十三章	炼焦炉的传热·····	331
第一节	焦炉的传热概述·····	331
第二节	炉墙和煤料的导热·····	334
第三节	焦炉内的对流传热·····	342
第四节	火道内废气对炉墙的辐射传热·····	346
第五节	蓄热室的综合传热及传热面积的计算·····	354
第十四章	炼焦炉的加热调节·····	367
第一节	确定加热制度的方法·····	367
第二节	温度制度及其调节·····	376
第三节	压力制度及其调节·····	384
第四节	焦炉热工管理自动化·····	390
第五节	长结焦时间下生产和焖炉保温·····	393
第十五章	扩大炼焦煤源——型焦生产·····	395
第一节	冷压型焦·····	395
第二节	热压型焦·····	400
第三节	工艺条件对型焦质量的影响·····	405
第四节	型焦生产的主要设备及计算·····	410

绪 言

焦化工业为冶金工业的重要组成部分，其主要任务是为钢铁企业提供燃料（焦炭、焦炉煤气）。焦炭、焦炉煤气及炼焦过程中所得的各种化学产品，又为化肥、农药、医药、染料、合成纤维和橡胶工业等提供原料。此外，还为城市煤气化提供煤气等。

烟煤在隔绝空气的条件下，加热到 $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$ ，经过干燥、热解、熔融、粘结、固化、收缩等阶段最终制成焦炭，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、铸造和气化。炼焦过程中产生的经回收、净化后的焦炉煤气既是高热值的燃料，又是重要的有机合成工业原料。

早在16世纪已经开始出现高温炼焦，它始于炼铁的需要。焦炉的发展经历了：土法炼焦、早期室式倒焰式炼焦炉、废热式焦炉（不能回收废气余热）和现代的蓄热式焦炉（可回收废气余热）。工艺技术上也从最早的不回收化学产品、热效率极低的土法炼焦发展到今天的回收化学产品和充分利用废气余热的高效焦炉。

为实现焦炉高效低耗，焦炉日趋大型化，炭化室有效容积从早期的 $2\sim 3\text{m}^3$ 发展到今天的 $70\sim 80\text{m}^3$ 。由此在焦炉结构的发展上，愈来愈多地采用分段加热和空气贫煤气全下喷方式。加热设备也向全自动调节和程序加热的方向发展。为了实现焦炉的高效率，应减薄炭化室炉墙，提高燃烧室的温度，为此须研制既能保护炉体坚固严密，又能提高炉温和传热速率的高密度高强度的硅砖，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，是我国焦化工业今后发展的一个方向。

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、显微结构和其它新的检验和评定焦炭质量的方法逐步应用。

由于我国优质炼焦煤的明显短缺，配煤炼焦和非炼焦煤炼焦技术的发展成为必然趋势。为了扩大炼焦煤源，将弱粘结煤和不粘结煤用于炼焦，适合于常规焦炉的配煤炼焦新技术不断出现，如捣固炼焦、配型煤炼焦、配入各种粘结剂炼焦、预热和干燥煤炼焦等，均已达到工业化水平。

应用劣质煤的另一个有效方法是型焦的生产，经过多年的试验和发展，世界上已有年产 $20\sim 50\text{万t}$ 的工业试验装置，这将成为今后发展的重要方向。

随着焦炉大型化和对焦炭质量要求的进一步提高，大型卸煤机和处理量达每小时几千吨原煤的大型堆取料机等煤场机械已用于煤的装卸和贮运，备煤过程的全部机械化和自动化也将逐步实现。

为在本世纪内把我国建设成为工业、农业、国防和科学技术现代化的社会主义国家，为使我国焦化工业的发展适应“四化”的要求，用现代化的技术装备我国的焦化工业，是加速我国钢铁工业发展的重要途径之一。

第一章 焦炭及其性质

第一节 高炉的生产原理及焦炭的作用

焦炭主要用于高炉冶炼，其次还用于铸造、气化、有色金属生产和生产电石。它们对焦炭有不同的要求，但以高炉炼铁用焦（冶金焦）的质量要求为最高，为此应首先了解高炉的生产原理及焦炭在其中的作用。

一、高炉的生产原理

高炉是中空的竖炉，由上至下可分为炉喉、炉身、炉腰、炉腹和炉缸五段。高炉本体由下列各部分组成：钢筋混凝土制成的炉基，钢板焊成的炉外壳，耐火砖砌成的炉衬，冷却设备以及框架和支柱。从炼铁的工艺过程来看它有上料、鼓风、出铁排渣和煤气等系统组成。耐火衬砖围成的空间称为高炉炉型，是进行炼铁过程的所在。根据炼铁过程的特点，炉型各段结构不同，如图 1-1，高炉炉料；铁矿石（天然矿、烧结矿或球团矿）、熔

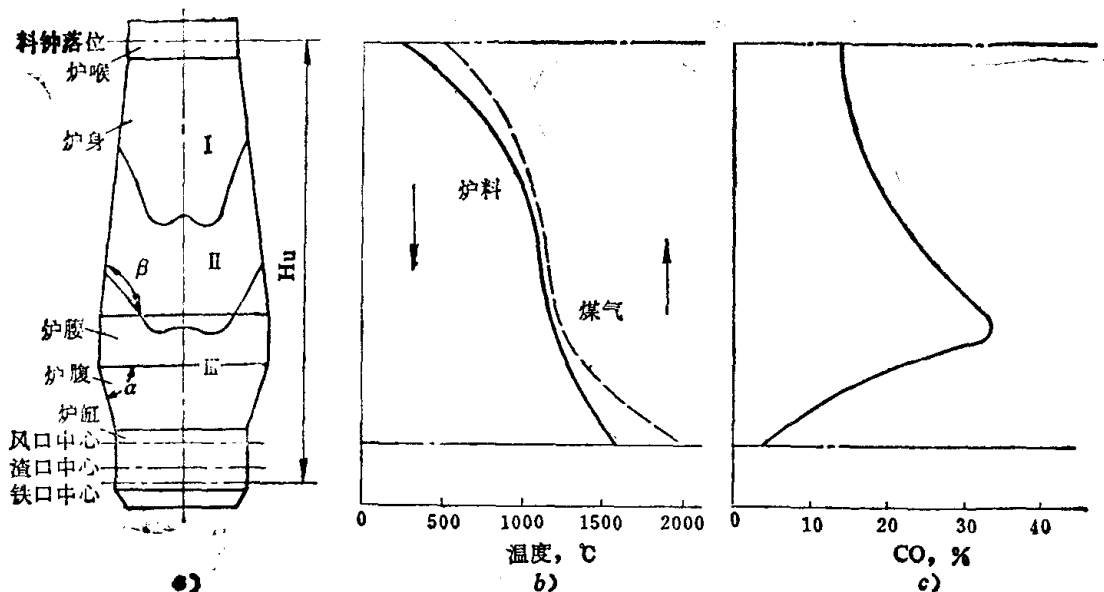


图 1-1 高炉炉型及各部位温度与煤气组成

a) —炉型；b) —高炉内温度沿高度的变化；c) —煤气中CO沿高度的变化；I—800℃以下区域，II—800~1100℃区域；III—1100℃以上区域；Hu—有效高度； α —炉腰角； β —炉身角

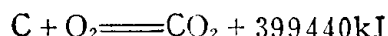
剂（石灰石、白云石）和焦炭由上料系统布入炉内，送风系统将 800℃ 以上的空气或富氧空气送入炉内，使焦炭在风口前的回旋区猛烈燃烧。

燃烧产生的热能是高炉冶炼过程中的主要热源，燃烧反应后生成的 CO 作为高炉冶炼过程的主要还原剂，由于焦炭的燃烧及大部分炉料在高炉下部转变成液态的铁水及炉渣，并周期的从炉缸处放出，使炉缸下部不断形成空间，上部的炉料连续稳定地下降，使过程连续进行。为降低焦炭消耗可将重油、无烟煤粉从风口喷入或将重油、天然气在炉外转化成高温的 CO 和 H_2 后再吹入炉内。炼铁过程产生的高炉煤气从炉顶导出，经冷却除尘，制成含尘低于 $15\text{mg}/\text{m}^3$ ，发热值为 $3559\sim 4396\text{kJ}/\text{m}^3$ 的净煤气。净煤气产率约为 $2000\sim 3000$

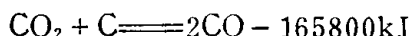
m^3/t 铁, 其中40%用于热风炉, 余者可作炼焦炉等工业炉的燃料, 粗煤气的含尘量及炉尘的含碳量是炼铁过程检验焦炭耐磨强度的重要指标。

1 高炉炼铁的化学反应

焦炭在风口前燃烧, 生成 CO_2 并放出大量热:

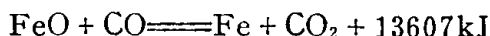
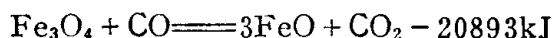
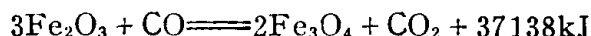


使风口区达到 $1500\sim 1800^\circ\text{C}$ 的高温, 使铁、渣完全熔化而分离, 高温煤气迅速上升在 1100°C 以上的Ⅲ区内, 煤气中的 CO_2 与焦炭作用生成 CO 并吸收热量:



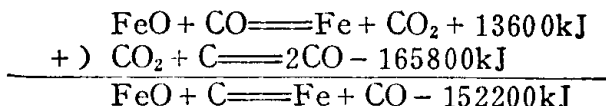
煤气温度逐渐降低而 CO 的含量迅速增加, 高温煤气继续上升与下降的炉料进行热交换而使温度降低, 与铁的氧化物进行还原反应, CO 含量降低。焦炭燃烧后形成的空间, 使炉料得以借重力下降, 高炉炼铁过程就是在下降的炉料和上升的煤气间相对运动中进行的, 过程的起点是焦炭在风口区的燃烧。

炉料边下降边升温膨胀, 为此炉身以炉身角 β 向下逐渐扩大, 以利顺行, 炉身上部, 温度低于 800°C 的Ⅰ区内, 过程的主要变化是铁的氧化物等与 CO 之间的间接还原反应:



间接还原反应的特点是得到气体的 CO_2 , 总的热效应是放热。

炉身下部温度为 $800\sim 1100^\circ\text{C}$ 的Ⅱ区内, 同时存在铁的氧化物与碳之间的直接还原反应, 到 1100°C 以上因 CO_2 几乎100%与焦炭作用生成 CO , 从全过程看是直接还原反应:



直接还原反应的特点是得到的气体产物为 CO , 且大量吸热, 显然适当提高间接还原反应速度, 既可降低焦炭的消耗, 又使氧化铁大部分在炉身上部还原, 有利于炉料下降。

温度在 1100°C 以上的炉腹及附近的Ⅲ区内, 由炉缸内焦炭燃烧生成的 CO_2 和直接还原反应的中间产物 CO_2 在此与焦炭反应生成 CO , 焦炭的消耗约为35%, 同时未被还原的 FeO 与 SiO_2 作用生成炉渣并开始熔化, 还原后生成的海绵铁与焦炭作用, 渗碳熔化, 炉料体积变小, 为此炉腹按炉腹角 α 向下逐渐收缩, 以利炉料稳定下降。

整个高炉整体, 从料钟落位高度到铁口中心线的距离称为有效高度(H), 其间的容积称为高炉的有效容积(V), 我国定型设计的中小型高炉有 55m^3 , 255m^3 和 620m^3 等, 大型高炉有 1053m^3 , 1513m^3 , 2500m^3 及近期国外引进的 4000m^3 的大高炉。有效高度是决定 CO 和热能利用效率的主要因素, 高炉产量则决定于有效容积及它的利用率。衡量高炉操作水平的主要技术经济指标有高炉有效容积利用系数(η),

$$\eta = \frac{\text{高炉产铁量 } P[\text{t}/(24\text{h})]}{\text{高炉的有效容积 } V(\text{m}^3)} \quad \text{t铁}/(\text{m}^3 24\text{h}) \quad (1-1)$$

焦比(c)

$$c = \frac{\text{高炉24小时耗焦量 } G[\text{t}/(24\text{h})]}{P(\text{t}/24\text{h})} \quad \text{t焦}/\text{t铁} \quad (1-2)$$

冶炼强度 I

$$l = \frac{G[t/(24h)]}{V(m^3)} \quad t_{\text{焦}}/(m^3 \cdot 24h) \quad (1-3)$$

$$\text{将式 (1-2) 和 (1-3) 合并得: } P = \frac{l}{c} V \quad (1-4)$$

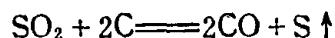
式 (1-4) 表明: 扩大高炉生产能力的途径是增大炉容 (V), 降低焦比和提高冶炼强度。

当高炉容积增大到原炉容积的 2 倍时, 风口个数最多增加到原风口个数的 $\sqrt{2}$ 倍, 所以在增大炉容的同时, 提高冶炼强度的可能性不大, 因此应该设法提高焦炭质量从而降低焦比。

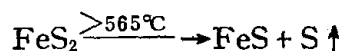
2 造渣脱硫

造渣的主要目的, 一是使铁矿石中的脉石和焦炭中的灰分 (其中大部分为高熔点的酸性氧化物, 如 SiO_2 是 1713°C , Al_2O_3 是 2025°C) 与熔剂 (如 CaO 、 MgO) 作用, 生成熔点较低, 流动性好的液态炉渣, 从而与铁水分离, 由炉中放出, 以去除炉料带入的杂质; 二是利用造渣脱硫和控制硅、锰等元素的还原, 以获得合格的生铁。

(1) 高炉冶炼过程中硫的动态高炉中的硫主要由焦炭带入, 一般为炉料中总硫量的 80% 以上, 焦炭中的硫, 大多以硫碳复合体形态与焦炭物质结合在一起, 也有一些硫化铁和硫酸盐存在于灰分中, 铁矿石和熔剂中的硫, 主要呈 (FeS_2) 形态, 也有少量的 CaSO_4 等硫化物, 在高炉中焦炭带入的硫约有 10~20% 以 SO_2 和 H_2S 的形态随煤气流出炉外, 约有 50~70% 在风口燃烧生成 SO_2 , 但在随煤气流经高炉下部高温区时, 被焦炭还原成硫蒸汽:



铁矿石和熔剂中的 FeS_2 也被高温煤气加热分解:



这些硫蒸汽在随煤气上升过程中又被 CaO 、海棉铁和铁氧化物吸附而随炉料下降。生铁中的硫以 FeS 的形态溶于铁水中, 只能在铁水滴穿渣层时被部分脱除。

(2) 影响生铁含硫的因素铁水和熔渣互不相溶, 脱硫反应只能在铁水和炉渣的接触面上进行:



在高炉操作条件下, 由于渣铁间接触面小, 接触时间短, 扩散慢, 故上述可逆反应远不能达到平衡, 铁水中的硫就不能全部转入炉渣中。生铁中的含硫量可由下式计算:

$$[\text{S}] = \frac{S_{\text{气}} - S_{\text{灰}}}{n l_s + 1} 100\% \quad (1-5)$$

式中 $[\text{S}]$ ——生铁含硫量, %;

$S_{\text{灰}}$ 、 $S_{\text{气}}$ ——为炉料带入和煤气带走的硫分, kg;

$Q_{\text{生}}$ ——生铁量, kg;

$n = \frac{Q_{\text{渣}}}{Q_{\text{生}}}$ 为渣铁比 (%) $l_s = \frac{(S)}{[\text{S}]}$ 为硫的分配系数,

() 表示渣中, [] 表示铁水中。

由式(1-5)可见: 1) 当其它条件一定时, 炉料带入的硫分越多, 则生铁含硫量越高, 为了制得低硫生铁, 首先应力求降低硫负荷(炼一吨生铁所需炉料带入的硫分, kg硫/t生铁)。因此铁矿石宜用经过焙烧的人造富矿, 焦炭要控制硫分, 降低焦比是降低硫负荷的重要途径。2) 随煤气流走的硫越多, 生铁含硫量就越低, 采用自熔性烧结矿, 大大减少炉料中游离的CaO是增加煤气中硫含量的有效途径。3) 渣铁比高, 则脱硫效率高, 但焦比增加。4) 硫的分配系数越大, 则脱硫效率越高, 生铁含硫量就越低。 l_s 值主要取决于炉渣的流动性, 即取决于其组成和温度。

(3) 炉渣脱硫的实质: 硫化物的稳定性排列次序是CaS、MnS、MgS、FeS。炉渣脱硫的目的是将熔于铁水中的FeS, 转化为不熔于铁水中的硫化物, 并转入炉渣。首先铁水中的FeS向炉渣内扩散, 即 $[FeS] \rightleftharpoons (FeS)$, 已扩散到炉渣中的FeS与炉渣中的氧化物作用, 生成更稳定的硫化物。例如: $(FeS) + (CaO) = (CaS) + (FeO)$ 由于炉渣中的FeO又与焦炭或铁水中的碳作用, $FeO + C = Fe + CO$, 从而促使反应向脱S方向进行。因此反应的全过程是: $FeS + CaO + C = CaS + Fe + CO - 141230kJ$

其中提高硫化铁从铁水中向炉渣扩散的速率, 是整个过程的关键。提高炉缸和炉渣的温度, 一方面有利于吸热的脱硫反应向右进行; 另一方面降低炉渣粘度, 有利于铁水中的FeS通过界面向炉渣扩散。

炉渣组成主要由总碱度 $\left(\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}\right)$ 或碱度 $\left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)$ 表示。一般低硫焦炼铁, 总碱度约为1.1~1.25, 碱度为1.2~1.4。适当提高碱度和总碱度有利于脱硫, 但碱度过高会使炉渣粘度增加, 影响料柱的透气性, 引起结瘤, 烧坏风口渣口, 焦比过高等不正常炉况, 脱硫效率反而降低。

用白云石($MgO \cdot CaCO_3$)代替部分石灰石来增加炉渣中MgO的含量, 可提高炉渣的稳定性, 使之具有良好的流动性, 有利于造渣脱硫。

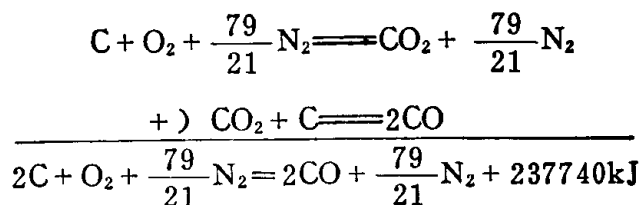
炉渣中的CaS含量高于6.5%时, 炉渣粘度和熔化温度明显提高, 故一般规定炉渣中CaS的许可浓度为5.5~6.5%。但实际生产条件下, CaS的浓度远低于该值。此外由于渣铁界面上脱硫条件很差, 一般硫的分配系数 l_s , 炼钢用生铁约为10~30%, 而铸造用生铁约为30~70%。

二、冶炼过程中焦炭的作用

在高炉冶炼过程中焦炭除提供热能和作为还原剂外, 还起着支撑料柱的骨架作用。

1 高炉内料柱的动态及焦炭的作用

高炉冶炼的始点是焦炭在风口处的燃烧, 产生CO和热能, 促使炉料下降完成生产循环。风口前的主要反应是:



焦炭在风口前的燃烧不是静止不动的, 焦炭在高速热空气流的吹动下, 形成一个近乎

球型的回旋区(图1-2)。

在回旋区内部,热风挟着焦炭进行剧烈的循环运动,同时猛烈燃烧。包围着回旋区的是一层厚100~200mm的中间层。它一方面承受着高速热气流及焦炭的离心冲击力,另一方面又承受着外围炉料的向心压力,因此形成相对静止又比较疏松的料层,随着循环运动的焦炭不断烧掉,中间层两侧的力平衡遭到破坏,中间层的焦炭被热风不断卷入回旋区内,而外层焦又不断向中间层补充,如此形成动平衡。

在回旋区内,氧过剩,燃烧产物主要是 CO_2 , CO_2 离开回旋区就与灼热的焦炭作用,几乎全部转化为 CO 。炉缸内 O_2 、 CO_2 和C作用生成 CO 的区域,称为燃烧带,通常比回旋区大一些。

高炉内炉料与煤气相对运动,气体通过散料层的阻力与流量的平方成正比,如料柱空隙断面大而均匀,阻力和炉缸风口处的压力会降低,料柱向下的压力与向上的煤气压力之间的压力差就会减小,有利于料柱的下降。因此,冶金焦的松散骨架作用越好,料柱透气性就越高,也就可以提高冶炼强度,缩短冶炼周期。在燃烧带上缘,焦炭因自身参与直接还原已消耗掉30%左右,而且在这远高于炼焦温度的高温下,焦炭内部因膨胀性能不同,会沿着灰分颗粒周边扩大裂纹,并因焦炭中灰分部分被碳还原,产生新的结构缺陷。总之到达燃烧带上缘时,焦炭强度已被大大削弱,但此时的骨架作用却又最突出;一是炉壁与焦炭及焦炭之间的摩擦阻力,并受大料柱的重力,二是受热及挟带之焦炭的冲击,粘稠的炉渣及铁水寻间隙迂回向下流动,高温煤气由间隙猛烈上升,风量越大,温度越高,这种情况就越剧烈。

在高炉中上部的不同部位,同一断面的不同点上,炉料下降速度不同,燃烧带正上方最快,边缘次之,炉中心最慢。

不同的炉料,下降速度也不同,密度大、块度小、表面光滑的下降快,因此产生超越现象引起炉料之间的剧烈摩擦,这种摩擦不但阻碍炉料下降,更重要的是破坏炉料,使其变成小块和粉末,降低炉料的透气性,炉料下降越快,这种情况就越强烈。

由此可见,冶金焦的疏散骨架作用是提高冶炼强度,缩短冶炼周期的关键,随着高炉冶炼过程强化,迫切需要提高冶金焦的块度均匀性和机械强度。

2 氧化还原反应与冶金焦的关系

高炉内的氧化还原反应过程有三个特点;相对运动中的气固相反应;间接还原反应放热并产生 CO_2 ;而直接还原反应吸热并产生 CO ;锰、硅、磷的还原多为直接还原,冶金焦的质量和焦比与此有密切关系。

(1) 气固相反应机理与冶金焦的作用 不论间接还是直接还原反应,直接同铁的氧

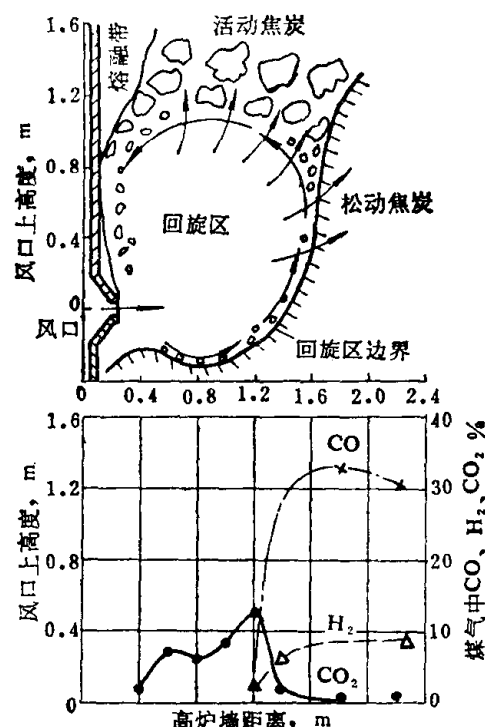


图 1-2 回旋区结构及区内外煤气组成的变化

化物作用的都是CO，都是气固相反应，此类反应大体上经历如下几个阶段：CO的分子被铁的氧化物吸附；CO分子与铁氧化物分子中的氧结合；反应的气体产物CO₂脱附。当铁矿石表面已被还原，反应逐步深入到固体铁矿石内部时，CO分子必须先穿过固体产物层才能到达内部，而后与铁氧化物作用，反应生成的CO₂也必须穿过固体产物层才能进入上升气流，让新的CO分子继续如此同铁氧化物反应。

高炉内由料线到风口炉料下降所需时间叫冶炼周期，约需4~7h，而煤气通过料柱的时间仅几分钟，因此煤气能否均匀通过料柱，将直接影响氧化还原过程，特别影响间接还原反应。由于高炉炉料的堆密度相差悬殊，天然铁矿石为2~2.8t/m³，人造富矿为1.6~2.0t/m³，石灰石为1.4~1.7t/m³，而焦炭只有0.45~0.55t/m³，因此在高炉上部，焦炭体积约占炉容的一半以上，而在高炉下部则唯有焦炭仍以固体状态存在。所以焦炭作为骨架，不仅要求强度高，还应块度均匀，尺寸适当，才能使煤气在料柱截面上均匀分布，使铁氧化物与CO紧密接触改善还原反应。

(2) 间接还原反应与冶金焦质量的关系 增加间接还原反应速度，一方面因其总效应为放热，可以降低焦比；另一方面因其在炉身进行，可以缩短冶炼周期，增加产量。

在一般高炉操作中，间接还原反应的产物CO有相当一部分是直接还原的产物，增加间接还原反应是有限的，目前看来，很有希望的一个方法是将天然气和重油等在炉外裂解转化，制成约1000℃的高温还原性气体(CO+H₂)，从炉子下部喷入，大幅度增加间接还原反应，使绝大部分铁在高炉上部还原出来。这样焦炭燃烧所产生的热能将主要用于铁和渣的熔化和过热，通常直接还原度(指氧化铁在高炉中有多少是以直接还原的方式被还原的)下降1%，焦比可降低约5kg。采用上法，可将直接还原度从40~50%降低到10~15%左右，由于焦比大幅度下降，对冶金焦硫分的要求可以适当放宽，而对冶金焦的机械性能要求将越来越高。

(3) 焦炭的粒度对料柱透气性的影响 焦炭和矿石是外型不规则，粒度不均一的散状物料，散料层的相对阻力与散料平均当量直径之间有如图1-3所示的关系，所以高炉炼铁的炉料粒度不能太小，矿石应筛出<5mm的矿粉，焦炭应筛出<10mm的焦粉。

散料层的透气性还同散料粒度的均匀性有关，随着散料粒度均匀性的提高，散料层的空隙度增加，如图1-4，料柱的透气阻力系数减小，料柱的透气性改善。

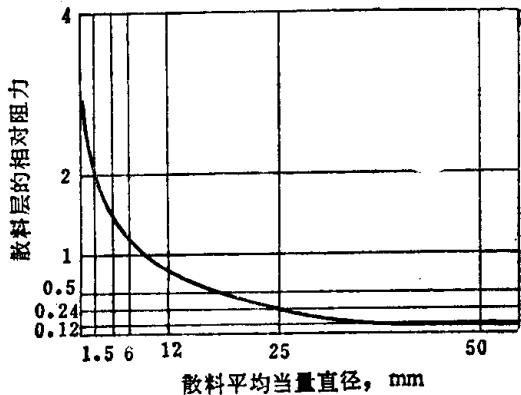


图 1-3 散料层相对阻力与散料平均当量直径的关系

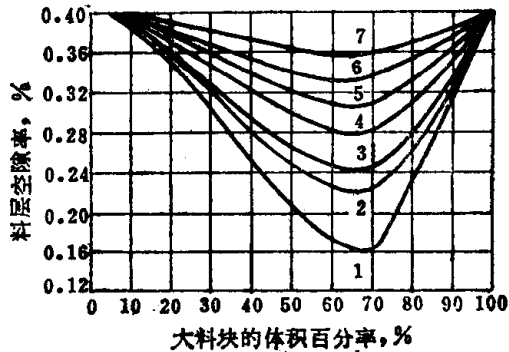


图 1-4 散料层的空隙率与粒度均匀性的关系

$D_{\text{小}}/D_{\text{大}}$: 1—0.01 2—0.05 3—0.1

4—0.2 5—0.3 6—0.4 7—0.5

因此焦炭粒度不应比矿石粒度大得过多，一般认为入炉焦炭的平均粒度以40mm左右为宜。结合炭化室炼焦特点，粒度范围可为25~70mm，入炉前焦炭还需整粒、筛分以减少焦粉，提高40~60mm粒度的百分率，这样可以改善粒度的均匀性和块状带的透气性，从而有助于间接还原。

焦炭在高炉内由于受到高温作用和碳熔反应，焦炭发生碎裂和粉化，松动的焦炭柱内还会混入缓慢滴落的熔渣和铁水，使料柱结构恶化，阻力增大，透气性变坏，煤气和温度分布不均匀程度加剧。这样煤气经过滴落带的量减少，部分煤气经过软融带下部靠炉墙处的焦炭空隙流出，因而减少了中心气流，增大了炉墙的热负荷，严重时还会烧坏风口。此外为了使高温煤气流适度的向中心发展，希望回旋区的深度大一些，高温煤气通过回旋区边界层和界层的阻力小一些，这就要求该处的焦炭具有适宜的粒度（一般认为风口焦平均粒度不应小于25mm），并尽可能减少回旋区内小于5mm的粉焦，由此要求全面改善焦炭质量，尤其是降低焦炭的反应性，提高焦炭反应后强度和高温强度，从而使焦炭在高炉内始终保持合适而均匀的粒度，粉焦量少，以保证高炉料柱具有良好的透气性。

第二节 焦炭的组成、性质及质量指标

一、焦炭的化学组成

1 工业分析

焦炭按固定碳、水分、灰分、挥发分测定其化学组成时，称为焦炭的工业分析。

(1) 水分 全水分以 W 表示，湿法熄焦时，为充分熄焦，焦炭水分约为2~6%，因喷水，沥水条件和焦炭块度不同而波动，干法熄焦时，焦炭在贮存期间也会吸附空气中的水汽，使焦炭水分达到1~1.5%。高炉用冶金焦含有适量水分，有利于降低高炉炉顶温度，但应力求稳定，以免引起炉况波动，我国规定冶金焦水分： $>40\text{mm}$ 粒级为3~5%， $>25\text{mm}$ 粒级为3~7%，水分的测定方法见国标 GB2002—80。

(2) 灰分 焦炭灰分以 A 来表示，焦炭灰分的主要成分是 SiO_2 （二氧化硅）、 Al_2O_3 等酸性氧化物，熔点高，只能用 CaO 等熔剂与它们反应生成低熔点的化合物才能以熔渣的形态排出炉外。

焦炭在高炉内被加热到高于炼焦温度时，由于焦炭和所含灰分的膨胀性不同，焦炭沿灰分颗粒周围产生大裂纹，使焦炭碎裂和粉化。此外焦炭灰分高则要求适当提高高炉炉渣碱度，高炉煤气中钾、钠含量也增高，这些均加速焦炭与 CO_2 反应而消耗。

因此一般焦炭灰分每增加1%，高炉熔剂的消耗量增加4%，炉渣量约增加3%，焦比增加1.7~2%，而生产能力将降低2.2~3%。

我国高炉焦的灰分指标与其它一些国家相比表1-1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，可以节省熔剂227万吨、焦炭385万吨、同时可以增产生铁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，进行综合的经济技术分析加以确定，炼焦精煤的灰分

表 1-1 几个国家的焦炭与精煤灰分指标

国 别	中 国			美国	前苏联	德国	法国	日本	英国
	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	8.0
炼焦精煤灰分(%)	<10.5			5.5~6.5	8.0~8.5	6.0~7.0	<7.0	6.6~8	~

以 7% 左右为宜。

灰分的测定方法见：国标 GB2002-80。

(3) 挥发分 (V) 和固定碳 (C) 焦炭的挥发分是焦炭成熟的标志，通常规定焦炭的挥发分为 1~1.2%，太高表示焦炭强度差，太低(如 <0.7%)则表示焦炭过火，过火焦炭裂纹多易碎。焦炭挥发分的高低同原料煤的煤化度及炼焦最终温度有关。图 1-5、图 1-6。

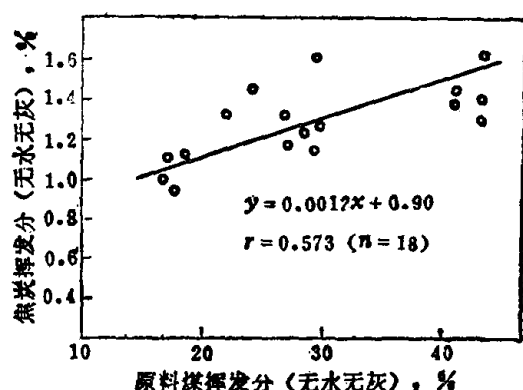


图 1-5 焦炭挥发分与原料煤挥发分的关系

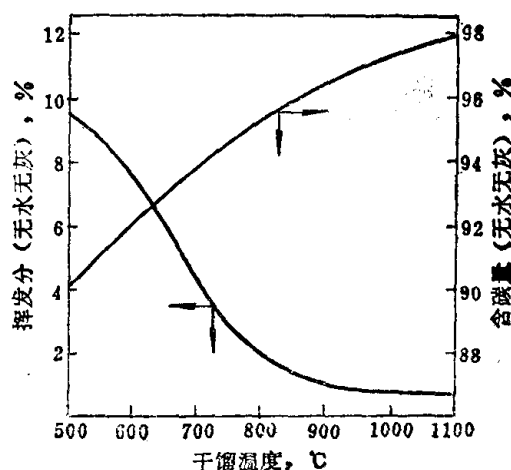


图 1-6 焦炭挥发分与炼焦温度的关系

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。

焦炭去掉水分，灰分和挥发分后剩余部分即为固定碳含量。

$$\text{固定碳 } C = 100 - (\text{水分} + \text{灰分} + \text{挥发分}) \% \quad (1-6)$$

焦炭挥发分的测定方法见国标：GB2003-80。

2 元素分析

焦炭按 C、H、O、N、S 和 P 等元素组成确定其化学成分时，称为元素分析。

(1) 碳和氢 碳是焦炭气孔壁的主要成分，氢则包含在焦炭内残留的挥发分中。结焦过程中，不同煤化度的煤中 C、H、N 元素含量随干馏温度升高而变化的规律如图 1-7 所示。

由图表明：当干馏温度达到 1000℃ 以上时，无论煤化度高低，所生成的焦炭其含碳量几乎相同。但是用偏光显微镜研究碳的结构，及用 x 射线研究碳的结晶化度则有明显的区别，而且它们与 CO₂ 反应时的活化能也不同，因此元素分析值只能反映碳的量而不能反应碳的质。

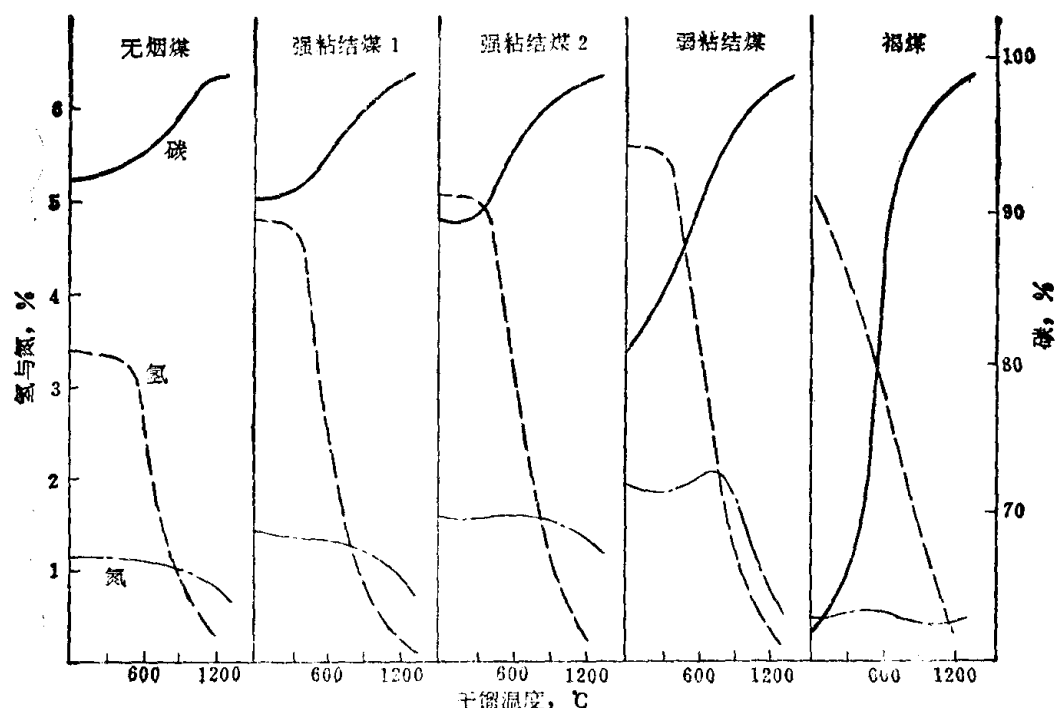


图 1-7 各种煤的 C、H、N 含量随干馏温度升高而变化的规律

比较图 1-6 和图 1-7 可见, 氢元素随干馏温度的变化比挥发分的变化大, 尤其是在 900℃ 以上。另外含氢量测量误差小, 因此用氢含量作为焦炭成熟程度的标志, 可靠性更高一些。

(2) 氮 焦炭中的氮是焦炭燃烧时生成 NO_x 的来源, 结焦过程中氮含量变化不大, 仅在干馏温度达 800℃ 以上时才稍有降低。

(3) 硫 焦炭中的硫有多种存在形态。

1) 煤中矿物质转变而来的硫化物, 如 FeS 、 CaS , 及铁与硫固溶生成的 $\text{Fe}_{n-1}\text{S}_n$ 。

2) 熄焦过程中部分硫化物被氧化生成的少量硫酸盐, 如: FeSO_4 、 CaSO_4 。

3) 炼焦过程中生成的气态含硫化合物在析出途中与高温焦炭作用而进入焦炭的碳硫复合体。高炉内由炉料带入的硫分中仅 5-20% 随高炉煤气逸出, 其余的参加炉内的硫循环, 只能靠炉渣排出。

焦炭含硫高会使生铁含硫提高, 质量降低, 或增加高炉碱度使高炉操作指标恶化。通常焦炭中硫每增加 0.1%, 焦比增加 1.2%~2.0%, 高炉生产能力下降 2%。一些国家对高炉焦含硫指标规定如表 1-2。

表 1-2 几个国家的高炉焦硫分指标

国 别	中 国			美 国	德 国	法 国	英 国	日 本 (大高炉)	原苏联 (大高炉)
	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	0.6

焦炭含硫量的测定方法见国标 GB2286—80 和 GB2287—80。

二、焦炭的物理机械性质

1 焦炭粒度和筛分组成