

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地阐述了锅炉受热面及热交换器内烟侧飞灰的沾污、积灰、高低温腐蚀、磨损、空气动力振动过程的原理、计算方法及预防措施。

全书共十章。第一章探讨了煤及煤灰特性对受热面积灰、腐蚀及磨损的影响；第二章研究了炉内燃烧时煤灰中各种矿物质的行为，灰粒沉积和粘结的受力分析以及受热面沾污、积灰、结渣过程的动态特性；第三章讨论了积灰、结渣对炉内传热及对流受热面传热的影响；第四章阐述了根据煤灰特性及运行特性对锅炉受热面结渣进行预测的方法；第五章探讨了锅炉受热面烟侧的高温腐蚀过程及其影响；第六章分析了受热面的低温腐蚀过程及其计算方法；第七章叙述了飞灰对受热面的磨损机理及用 CAT 计算磨损的方法；第八章讨论了锅炉各种受热面布置磨损过程的计算方法；第九章分析了锅炉受热面空气动力振动的原因、计算方法及防止措施；最后一章提出了四管爆漏及炉内燃烧事故的分析原理及预测。

书中汇集了作者多年来在该领域内的研究成果，同时还引用了近年来国内外最新的试验研究资料，力图使本书更具有理论结合工程应用的实用价值。

本书可供在动力、化工、冶金、建材、轻工、环保、石油等领域内从事炉、室及热交换器的设计和运行的科技工作者参考，也可作为高等院校热能工程、电厂热能动力、工程热物理等专业的研究生和本科生的教材或教学参考书。

锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损 和腐蚀的防止原理与计算

岑可法 樊建人 著
池作和 沈璐嫒

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994 年 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1994 年 6 月第一次印刷 印张：38

印数：1—2 850 字数：882 000

ISBN 7-03-004129-1/TK·11

定价：38.80 元

前 言

我国是产煤大国，煤炭资源非常丰富。煤种品位高低不等，变化范围很宽。根据我国能源政策，火力发电厂应以煤作为主要燃料，且动力用煤应尽量使用低品位劣质煤，加之现有供煤和配煤系统有许多不完善之处，电站锅炉燃用煤质难以得到保证，锅炉燃煤多变且灰份有不断升高、热值有不断降低的趋势。燃煤总体品位下降使锅炉受热面产生磨损、积灰、结渣、腐蚀等一系列问题，受热面使用寿命降低，锅炉管子爆漏现象频繁。根据1992年我国火电设备事故的统计表明，当年锅炉事故占全部发电事故的56%，而锅炉四管爆破事故却占到了全部锅炉事故的64.2%，其中省煤器占35.3%，过热器占29.8%，水冷壁占27.8%，再热器占7.1%。产生事故的原因除管材和焊接质量问题外，主要是由于锅炉积灰、结渣、高低温腐蚀、磨损及振动所引起。由此可见，四管爆漏已成为妨碍提高机组利用率和安全性的重要因素。这个问题在国际上也显得十分严重。

为此，国外对磨损、积灰、结渣、腐蚀和振动进行了大量的理论研究和实践探索，取得了丰富的研究结果和实践经验。国内有关大专院校和科研单位也正在积极开展研究之中，但这些成果和经验散见于各专业杂志、鉴定资料、论文及研究报告中，尚缺少人对之进行系统归纳和总结。本书作者早有撰写关于磨损、腐蚀、积灰、结渣、振动这方面专著的打算，但因种种原因使这一夙愿迟迟未能实现。近年来，电力工业发展迅速，锅炉磨损、腐蚀、积灰、结渣等问题变得更为突出，作者深感撰写这一专著的必要性和迫切性。为此，作者结合浙江大学热能工程研究所长期来在此领域研究所取得的成果，参考作者逐年搜集的国内外研究资料，组织撰写了这一专著。本专著系统论述了锅炉受热面磨损、积灰、结渣、腐蚀、振动产生机理以及防止措施。在计算分析锅炉受热面的磨损和结渣过程时，引入了作者所提出的计算机辅助优化数值试验方法（Computer Aided Testing，简称CAT），使各种参数变化对锅炉受热面的磨损和结渣的影响过程得以量化。

本书主编岑可法，由岑可法、樊建人、池作和、沈珞婵共同撰写。在撰写过程中作者逐章逐节进行分析、讨论，相互启发，紧密合作，因此这本书可以说是集体完成的著作。我们在撰写中引用了浙江大学热能工程研究所同事们及研究生们的大量研究资料，并得到他们的许多帮助。为此，作者要特别感谢曹欣玉教授、倪明江教授、姚强博士、周俊虎博士、朱珍锦博士、潘卫国硕士、曾克立硕士、张新育硕士，以及蒋啸、金军、陈玲红等老师。同时我们还要感谢在本领域和作者紧密合作的广东省电力试验研究所卢家煊高工、方江涛高工、杨华工程师、阮中坚工程师，浙江省电力局张慰文高工、陈积民高工、朱吉灿高工、吴德诚高工、章森珍工程师，以及半山电厂陈遇龙高工、朱达工程师，电力试验研究所吴贤权高工、谢国兴工程师、郑晓康工程师，电力部科技司陈兆鲲高工、谢长军工程师。没有他们的帮助是不可能完成现场试验及数据采集的任务的。

作者承担国家自然科学基金项目“四角切向燃烧锅炉CAT数值试验研究”和“用多相流动理论对锅炉尾部受热面磨损进行理论研究”、电力部项目“大容量电站锅炉数值试验专家系统”的任务，其部分研究成果已反映在本书中。最后，作者还要特别感谢科学

出版社陈文芳副编审，没有她热情鼓励和支持，没有她的精心编辑，本书是很难迅速和读者见面的。

尽管我们在撰写中通过试验研究和计算机数值试验分析，尽可能做到理论结合实际，解决锅炉四管爆破的问题，但由于受热面沾污、积灰、结渣、磨损等问题极为复杂，很多问题目前尚未得到解决，因此本书所提出的某些分析或计算，不少是属于探索性的。限于我们的水平，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

1993年10月于浙江大学求是园

主要符号表

A 燃烧灰份, %	k 辐射减弱系数, $1/(\text{MPa} \cdot \text{m})$
a 黑度	l 长度, m
B 燃烧消耗量, kg/a (t/h)	Nu 努赛尔数
Bi 毕奥特数	P 压力, MPa
C 常数, 修正系数	Q 热量, kJ ; 燃料发热量, kJ/kg
D 锅炉蒸发量, kg/s (t/h)	q 热通量, W/m^2
d 管直径, 喷嘴直径, mm	R 热阻; 反应速率常数
DT 灰开始变形温度, $^{\circ}\text{C}$	Re 雷诺数
E 磨损量	r 汽化潜热, kJ/kg ; 燃料, 燃烧, 燃烧器
Eu 欧拉数	S 管距, mm
F 面积, m^2 ; 力, N	s 辐射层厚度, m
f 频率, Hz	Sc 施密特数
FT 灰流动温度, $^{\circ}\text{C}$	ST 灰开始软化温度, $^{\circ}\text{C}$
G 流量, kg/s	T 温度, K ($^{\circ}\text{C}$)
H 辐射式对流受热面积, m^2 ; 硬度	t 温度, $^{\circ}\text{C}$
h 高度, m	V 容积, m^3 ; 燃料工业分析中挥发份, %
I 空气、烟气焓, kJ/kg	v 速度, m/s
i 工质 (水、蒸汽) 焓, kJ/kg	u 比容, m^3/kg
K 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	x 水冷壁、受热面的角系数

希腊字母符号

α 过量空气系数	γ 运动粘度
α 放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$	ρ 密度, kg/m^3
β 过剩空气系数	Σ 总和符号
δ 灰层及管壁厚度	σ 强度, 应力, Pa
ϵ 灰污层热阻, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$	σ_0 玻耳兹曼辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
ζ 辐射受热面灰污系数	τ 时间, s
μ 烟气中飞灰浓度	φ 保热系数
η 效率; 热力不均匀系数	ψ 热有效系数
λ 波长; 热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	ω 振动角频率, 旋转角速度
γ 动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ $[(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2]$	

脚注符号

a 理论值	b_s 饱和水
b_q 饱和汽	dl 当量

dp 顶棚
DW 低位
f 辐射
fh 飞灰
GW 高位
gl 锅炉
gr 过热
H 受热面
h 火焰; 灰
hb 灰壁
hy 火焰
hz 灰渣
j 计算值
k 可溶

ky 空预
l 炉
ld 露点
lk 冷空气
pj 平均
rk 热空气
sm 省煤
ts 投射
w 壁面
xd 悬吊管
y 烟气
zf 制粉
zr 再热
zs 折算

目 录

主要符号表

第一章 煤及煤灰特性对受热面积灰、腐蚀、磨损的影响	(1)
第一节 ✓积灰、腐蚀、磨损对锅炉运行的影响.....	(1)
第二节 煤及其破碎过程中矿物成份的分布.....	(5)
第三节 煤灰的矿物质成份及其微观结构	(15)
第四节 煤灰矿物成份对沾污、结渣的影响✓.....	(24)
第五节 煤灰特性对受热面磨损的影响✓.....	(33)
第六节 灰的熔化特性及其与成份的关系	(39)
第七节 灰的粘度特性及其与成份的关系	(49)
第八节 灰渣及灰垢的物理特性	(58)
第二章 受热面的积灰、结渣特性	(69)
第一节 煤燃烧过程中硅酸盐类矿物质在高温中的行为	(69)
第二节 燃烧过程中硫化物在高温中的行为	(77)
第三节 燃烧过程中碳酸盐类矿物质在高温中的分解	(95)
第四节 煤粉燃烧过程中微细飞灰的形成.....	(100)
第五节 受热面积灰、结渣的特性及其影响✓.....	(105)
第六节 灰粒向受热面沉积运动的力分析.....	(130)
第七节 灰粒在受热面上沉积和粘结过程及其粘结力分析.....	(145)
第八节 受热面积灰和结渣厚度的计算.....	(155)
第九节 锅炉受热面沾污、积灰、结渣的动态特性及其计算.....	(168)
第三章 炉内积灰、结渣时传热的计算	(175)
第一节 炉膛传热过程的计算.....	(175)
第二节 受热面积灰、结渣对炉膛传热的影响.....	(176)
第三节 火炬热流密度对膜式水冷壁温度场变化的影响.....	(189)
第四节 区域法传热计算原理.....	(197)
第五节 区域法计算实例用于分析积灰、结渣对炉膛传热的影响✓.....	(202)
第六节 用蒙特卡洛法计算积灰、结渣对炉膛传热的影响.....	(209)
第七节 积灰、结渣对锅炉对流受热面传热的影响✓.....	(223)
第四章 锅炉受热面结渣预测方法	(237)
第一节 根据煤灰物理特性对受热面积灰、结渣、沾污进行预测✓.....	(237)
第二节 根据煤灰成份特性对受热面沾污、积灰、结渣的预报✓.....	(246)
第三节 根据锅炉运行特性的变化对受热面沾污、积灰进行预测✓.....	(265)
第四节 用气动方法对受热面进行吹灰的原理及装置.....	(277)
第五节 用水射流方法对受热面进行吹灰的原理及装置.....	(291)
第六节 用振动方法对受热面进行吹扫的原理.....	(304)

第七节	从设计和运行方式上减少锅炉受热面沾污、积灰、结渣的措施.....✓	(310)
第五章	锅炉受热面烟侧的高温腐蚀及其预防.....	(333)
第一节	SO ₂ 、SO ₃ 的生成及其对腐蚀的影响	(333)
第二节	H ₂ S 的生成及其对腐蚀的影响	(340)
第三节	HCl 在炉内的生成及其对受热面腐蚀的影响	(345)
第四节	硫酸盐型的高温腐蚀.....	(347)
第五节	硫化物型的高温腐蚀.....	(349)
第六节	碱土金属和钒盐类对受热面的高温腐蚀.....	(350)
第七节	水冷壁的高温腐蚀.....	(354)
第八节	防止高温腐蚀的可能措施.....	(361)
第六章	受热面的低温腐蚀及其预防.....	(377)
第一节	SO ₃ 的冷凝过程及硫酸蒸气的热力学露点	(377)
第二节	硫酸蒸气向低温受热面沉积的热质交换过程.....	(382)
第三节	低温受热面的积灰和腐蚀机理.....	(387)
第四节	烟气露点的测试方法.....	(391)
第五节	运行参数对低温受热面的积灰和腐蚀的影响.....	(393)
第六节	防止低温受热面积灰、腐蚀的措施.....	(401)
第七章	对流受热面受飞灰磨损的理论基础.....	(413)
第一节	对流受热面受飞灰磨损的类型.....	(413)
第二节	含灰气流对金属管壁的磨损理论及近似计算.....	(418)
第三节	飞灰冲击对流受热面磨损的数值计算原理及方法.....	(427)
第四节	各种空气动力参数对飞灰冲蚀磨损的影响.....	(436)
第五节	受热面壁温变化及烟气成份对飞灰磨损的影响.....	(443)
第八章	含灰气流对受热面的磨损计算及防磨原理.....	(446)
第一节	错列对流管束间的灰粒运动规律及磨损机理.....	(446)
第二节	烟气流过顺列和错列管束的磨损数值试验.....	(450)
第三节	烟气由上向下和由下向上流动对受热面磨损的影响.....	(457)
第四节	对流管束安全长期运行允许烟速的确定.....	(459)
第五节	烟气走廊引起对流管束的磨损机理及防止措施.....	(463)
第六节	采用加翅片管束的防磨理论及计算方法.....	(474)
第七节	横向冲刷的对流受热面防磨措施.....	(482)
第八节	管式空气预热器烟侧的磨损机理及计算方法.....	(486)
第九节	空气预热器的防磨机理及其措施.....	(491)
第九章	锅炉受热面空气动力振动原理及其防止.....	(495)
第一节	炉膛及热交换器空气动力振动的分类.....	(495)
第二节	气流旋涡诱发振动的原理.....	(499)
第三节	湍流颤振诱发振动的原理.....	(510)
第四节	流体弹性扰动诱发振动的原理.....	(513)
第五节	声激振的原理.....	(517)

第六节	换热器管束及烟道的固有频率及其阻尼计算·····	(523)
第七节	振动疲劳与磨损·····	(530)
第八节	燃料燃烧诱发噪音、炉膛振动的原理及其预防·····	(534)
第九节	过热器、省煤器、空气预热器及尾部烟风道的空气动力 振动及其预防·····	(547)
第十节	烟道和风箱的空气动力诱发振动·····	(550)
第十章	结渣、腐蚀、磨损引起锅炉管子爆破事故的分析方法·····	(553)
第一节	炉内严重结渣,大量掉渣砸坏水冷壁的可能性分析·	(553)
第二节	炉膛外爆和内爆分析·····	(560)
第三节	炽热灰渣掉入渣池引起水蒸发及炉内压力升高过程分析·····	(562)
第四节	炉管破裂事故后汽包水位变化计算·····	(565)
第五节	炉管爆裂喷出水汽使炉内压力升高的动态分析·····	(569)
第六节	爆管后饱和水喷至热渣表面产生的水蒸发量计算·····	(570)
第七节	爆管后蒸汽引起炉内温度变化·····	(571)
第八节	煤粉和可燃物在炉内爆炸引起超压分析·····	(574)
参考文献	·····	(586)

第一章 煤及煤灰特性对受热面积灰、腐蚀、磨损的影响

第一节 积灰、腐蚀、磨损对锅炉运行的影响

一、概述

我国电站锅炉和工业锅炉以燃煤为主,而动力用煤质量偏劣,含灰量和含硫量等均较高,容易形成受热面的沾污、积灰、腐蚀和磨损。

众所周知,煤中都含有一些矿物质,当煤在炉膛燃烧时,这些矿物质就转化为灰,煤灰会沉积在锅炉的各种受热面上,影响锅炉的正常运行。为此,需要解决如下几个问题:

(1)积灰的清除问题。如何在锅炉运行中自动或人工清除受热面的积灰和沉积物,以保持烟气畅通、安全运行。

(2)传热条件变差问题。由于受热面所沉积的灰层绝热性很强,使锅炉远离设计值运行,不能达到相应的出力。

(3)受热面的寿命下降问题。由于积灰层或熔渣有较强的腐蚀性,致使金属被强烈腐蚀,管壁减薄而爆管。因为积灰使炉内传热恶化,炉膛出口温度升高,所以高温过热器容易形成局部超温,从而引起金属强度降低而爆管。

此外,由于烟气中含有大量飞灰(煤质越劣,飞灰浓度越高),使得锅炉受热面受到严重的磨损,因为在烟速相同的情况下,其磨损量与总飞灰量成正比。

目前,随着锅炉容量的增大,炉内沾污、结渣、腐蚀等问题更为严重。这是由于如下诸因素引起的:炉膛容积增大,清灰困难,烟道尺寸增大,烟速和烟温容易分布不均匀;大容量锅炉蒸汽参数高,壁温升高,易引起积灰和结渣;大容量锅炉对运行安全性要求高等。

二、飞灰流经锅炉各受热面的形态和特性

煤粉中的灰分经燃烧后有下列三种形式:

(1)保持固体状态,以飞灰形态通过锅炉各受热面,引起炉管磨损。这些飞灰颗粒由大小不同的分散相组成,在经过火焰高温区时,灰粒可被熔化成球形,或局部熔化成钝角形,或全不熔化而以原来带有的不规则尖角形式,不同的灰粒形状所引起的磨损严重程度亦不相同。

(2)熔化成液态,然后粘在炉膛受热面上,经逐步沉积而形成焦块,通常称之为结焦,使锅炉负荷降低。

(3)在高温下挥发成气态,然后在较冷的水冷壁、过热器或再热器管面上凝结,并与飞灰相结合一起沉积于管子上,形成受热面的沾污。

由此可见,锅炉内沿着烟气流程由高温受热面向低温受热面,所沉积在受热面处的飞

灰均具有不同的特性. 在图 1-1 中示出了飞灰的变形温度 t_1 、软化温度 t_2 和流动温度 t_3 沿流程的变化. 由图可见, 随烟气流动过程, 灰渣熔点逐步升高.

三、锅炉受热面结渣、沾污的含义及影响因素

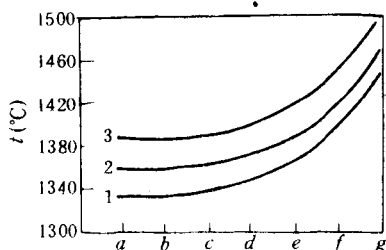


图 1-1 沿锅炉烟气流程灰渣的熔点变化
1—— t_1 , 2—— t_2 , 3—— t_3 ; a——粒化渣, b——渣池样, c——熔渣段渣样, d——后墙渣样, e——冷却室渣样, f——煤灰样, g——飞灰

结渣和沾污是在锅炉内烟气侧出现的两种既不相同但又有所联系的现象. 由于本书好几章中都将用到这两个概念, 故在此加以说明.

(1) 结渣. 它主要由烟气中夹带的熔化或部分熔化的颗粒碰撞在炉墙、水冷壁或管子上被冷却凝固而形成, 结渣的形态主要是以粘稠或溶融的沉淀物形式出现, 结渣主要出现在辐射受热面上.

(2) 沾污. 也称沾灰或积灰. 它指的是温度低于灰熔点的灰粒在受热面上沉积. 沾污

可分为高温灰沉积和低温灰沉积两种类型, 前者的形成温度处于灰粒的变形温度下的某一范围内, 这类沉积多发生在屏式过热器、对流过热器等对流受热面上; 后者则主要出现在温度可能低于酸露点的管壁表面上, 如低温省煤器和空气预热器, 它是由酸液与飞灰凝聚而成.

由此可见, 炉内及受热面积灰可分为三种类型:

(1) 熔融性结渣. 它通常与烟气所携带的熔化或粘性灰粒的物理迁移有关, 当烟气冷却时, 被火焰蒸发的物质会冷凝, 使这些元素在炉膛融渣上积聚. 因此对于液态排渣炉, 通常设计得使连续流动的渣层避免处在或接近燃烧区域.

(2) 高温粘结性积灰. 在对流受热面上形成的积灰程度与煤种有很大的关系, 也受炉膛水冷壁工况的影响. 这些积灰可能会阻塞烟气通道, 而且有时难以用通常的除灰装置把它们清除掉. 对多种情况的粘结性积灰试验表明, 其成份包括碱、钙、磷和硅等化合物, 其区别就在于粘结物种类的不同. 由粘结所引起的沾污及其严重程度取决于煤灰的组成, 而燃烧方式、机组设计、运行工况对于沾污也会有影响. 在锅炉过热器和再热器部位发生的积灰, 一般是由内外两层组成. 表 1-1 给出了国外某台锅炉上所形成的内外积灰层和飞灰的成份. 由表可知, 内层积灰中 Na_2O 、 K_2O 、 SO_3 的含量较高, 它对受热面具有高温腐蚀作用, 而外层有着类似于飞灰的成份. 进一步分析表明, 在工作温度下, 内层是以液相形态存在着, 对过热器管和烧结飞灰的外层之间起到一种粘结剂的作用, 而在一定条件下形成块状沉积物.

(3) 低温积灰. 在低温区省煤器和空气预热器上, 形成的积灰与冷却表面上发生的酸或水蒸气凝结有关. 沉积在管子表面上的积灰可由三类物质构成: 第一类是酸腐蚀所产生各种数量的腐蚀产物, 其多少取决于产生酸腐蚀的量、温度以及金属的类型; 第二类是形成的低温积灰所捕获的碰撞到管子上的大部分飞灰; 第三类是酸与飞灰中的铁、钠、钙等起反应形成的硫酸盐, 它增加了积灰量. 低温积灰可通过控制金属表面温度适当高于烟气中酸露点的温度来消除, 但这会导致锅炉效率的明显下降.

由上述分析可见,锅炉受热面的结渣、沾污、积灰、腐蚀及磨损,不仅与煤和煤灰的熔点和成份有关,而且还与锅炉的设计参数有关(诸如燃烧器的布置方式、炉膛热负荷、炉膛出口烟温、过热器的布置位置、各部分的烟气流速和烟温、锅炉的蒸汽参数和管壁温度、受热面的排列节距和布置形式,等等),同时还受锅炉的运行工况影响(诸如负荷的变化及变化频率、煤种的变化及变化频率、炉内空气动力结构及飞灰的多相流动特性、炉内的传热特性及热流分布特性、吹灰的布置及其吹扫频率、过量空气系数及煤粉燃烧过程的控制、炉膛出口烟温及排烟温度的控制,等等)。因此,锅炉受热面的结渣、积灰、腐蚀及磨损是一个多学科交叉、相互渗透的实际问题,它涉及到锅炉原理、煤及灰渣化学及反应动力学、多相流体力学、传热传质学、燃烧理论与技术、材料科学等诸多学科,其复杂可想而知。尽管这些问题严重影响到电站和工业锅炉的安全运行,但目前对本领域的研究和认识水平还远远不能解决实际中所发生的大量问题,这也正是我们学习和研究本领域的目的所在。

表 1-1 过热器积灰层和飞灰成份分析

灰的组份 (重量%)	飞灰	过热器积灰	
		外层	内层
SiO ₂	37.4	36.2	15.8
Al ₂ O ₃	15.3	12.9	9.0
Fe ₂ O ₃	20.8	19.9	11.8
TiO ₂	1.0	1.1	0.5
CaO	5.2	9.1	3.9
MgO	0.9	1.0	0.3
Na ₂ O	3.8	4.3	5.9
K ₂ O	2.7	2.4	9.0
SO ₃	9.6	13.1	43.0
其它	3.3	0.0	0.0
总计	100.0	100.0	100.0
水浓度(%)	—	12	60

四、锅炉结渣、沾污、腐蚀、磨损所引起的问题

锅炉内结渣、沾污、腐蚀及磨损所引起的主要问题有:

(1)沾污、结渣会降低炉内受热面的传热能力。灰污在受热面沉积后,由于其导热系数很低,热阻很大,一般沾污数小时后水冷壁的传热能力会降低 30%—60%,使得炉内火焰中心后移,炉膛出口烟温相应提高。

(2)由于炉膛出口烟温提高,使得飞灰易粘结在对流和屏式过热器上,引起过热器的沾污和腐蚀。

(3)积灰会使省煤器和空气预热器堵塞、传热恶化,从而提高排烟温度,降低锅炉运行经济性。

(4)由于总的传热阻力增大,会使锅炉可能无法维持在满负荷下运行,只好增加投煤量,引起炉膛出口烟温进一步提高,使灰渣更容易粘在受热面上,形成恶性循环,导致发生一系列锅炉恶性事故,如过热器、省煤器管束堵灰、爆裂,空气预热器大量漏风,出渣系统堵死。烟温升高还会导致蒸汽过热汽温偏高,使金属管子处超温运行状态。

(5)在高温烟气作用下,粘结在水冷壁或高温过热器上的灰渣会与管壁发生复杂的化学反应,形成高温腐蚀。发生高温腐蚀时的平均水冷壁管腐蚀量可达 $0.8\sim 2.6\text{ mm/a}$ ^①。如燃用高硫煤时,腐蚀区受火焰的直接冲刷,其腐蚀速度可达 5 mm/a 以上,运行不当时经常发生爆管停炉。因此,沾污、结渣可看作高温腐蚀的前兆。

(6)由于积灰、结渣、腐蚀及磨损而造成经济损失这可归纳如下:

(a)经国内外资料统计,由于炉膛及排烟温度的提高,致使锅炉平均效率降低 $1\sim 2\%$,并增加了煤耗;

(b)只能低负荷运行。如某台 200 MW 锅炉燃用灰熔点低的煤($t_1=1140^\circ\text{C}$),结渣严重时只能在 40% 负荷下运行,还经常被迫停炉;

(c)要经常停炉检修,因少发电而带来了很大的经济损失。国外统计表明, 500 MW 机组每停运一天就要损失 10 万美元以上;

(d)要增加大量的检修费用,如清渣、更换炉管等所需费用。据国外估计,美国每年因锅炉受热面沾污、结渣而带来的各种经济损失总和达 $20\sim 100$ 亿美元。

我国由于燃用煤种较国外为劣,问题更为严重。我国电站锅炉受热面“四管”因积灰、腐蚀和磨损泄漏爆管而引起的事故也是十分惊人的。所谓“四管”,是指水冷壁管、过热器管、再热器管及省煤器管。在 $1982\sim 1985$ 年的 4 年间,全国 50 MW 以上火电厂共发生锅炉事故 949 起,其中“四管”的泄漏爆管事故就占 305 起,达 32% ,成为影响锅炉安全运行的主要原因。“四管”爆裂、泄漏事故的分布情况,可以安徽省所属电厂的统计数据作为例子,见表 1-2。

表 1-2 安徽省火电厂“四管”爆裂、泄漏统计表

四管		水冷壁		过热器		再热器		省煤器		合计	
年 份		1989	1990	1989	1990	1989	1990	1989	1990	1989	1990
100—600 MW 锅炉		7	10	9	17	8	3	10	19	34	49
		21%	20%	26%	35%	24%	6%	29%	39%	100%	100%
100 MW 以下 锅炉		15	13	6	5	—	—	13	16	34	34
		44%	38%	18%	15%	—	—	38%	47%	100%	100%
合 计	次数	22	23	15	22	8	3	23	35	68	83
	比例	32%	28%	22%	26%	12%	4%	34%	42%	100%	100%

由表可见,“四管”泄漏事故有逐年增高的趋势,而且 1990 年增加幅度较大; 100 MW 以上大机组中以过热器及省煤器爆管泄漏最为严重,再热器事故较少,而小机组中则以省煤器及水冷壁事故为主,因为通常情况下省煤器中磨损和腐蚀同时发生。表 1-3 中列出了

① a——年的单位符号。

泄漏和爆管事故的原因。

表 1-3 泄漏和爆管事故的原因统计表(1990 年)

		磨损	腐蚀	过热	焊接	其它	合计
100—600 MW 机组	次数	17	2	2	24	7	52
	比例 (%)	33	4	4	46	13	100
全部机组	次数	31	7	4	24	17	83
	比例 (%)	37	8	5	30	20	100

由表可见,磨损而引起爆管是最为严重的。如果把磨损、腐蚀、过热归结为积灰、结渣和磨损所引起的,则占总事故的 50%。其次是焊接质量(特别是 100 MW 以上机组的高温高压炉子较为严重)。

第二节 煤及其破碎过程中矿物成份的分布

一、煤的形成

成煤的原始物质是植物。植物的成煤过程大致可归纳成两个阶段(见表 1-4)。

第一阶段:植物转变成泥炭,即称为泥炭化过程。由表 1-4 可见,泥炭中含有较多数量的腐植酸。

第二阶段:泥炭逐渐变成褐煤,褐煤再转变成烟煤和无烟煤,这个过程也叫做成岩。

表 1-4 植物及煤的组成

组成物质	C ^{r1)} (%)	H ^r (%)	O ^r (%)	木质素 (%)	纤维素 (%)	腐植酸 (%)
树 木	50	6	44	20—30	40—60	30—70 1—60
泥 炭	50—65	5—6	25—35	6—40	0—15	
褐 煤	62—77	4.5—6.5	15—25	2—30	0—30	
烟 煤	77—92	4—6.5	5—15			
无烟煤	90—98	1—4	1—3			

1) C^r, H^r, O^r 的右上角 r 表示可燃基。

煤的显微组成可分为无机组成(无机矿物质)和有机组成。煤的有机组成可分为两部分:一部分是保持植物原来的组织形态,叫做形态分子;另一部分是植物残体已分解的产物,它已失去原来的形态,叫做基质。基质又有透明基质和不透明基质之分,基质把矿物质、形态分子结合起来。

二、煤中矿物质的组成

1. 煤中所含元素的主要分布

在煤形成过程中,带入大量元素,除碳氢化合物可燃成份以外,还含有硅、铝、铁、钙、

硫、钠、钾、钛、镁、磷、锰、氟、硼、锆等所组成的各种形式的矿物质和复杂化合物。对积灰、腐蚀影响较大的是硅、钠、铝、硫、钙等元素,因此研究它们在煤中的粒度分布是很重要的。作为例子,在图 1-2 中示出了用电子探针扫描所得到的有关矿物元素在煤中的粒度分布。在所示的例子中钙、钠、硫以较均匀的形式分布于煤中;硅和铝(特别是硅)的探针图出现很多尖峰,这表明 SiO_2 以几微米至十几微米的粒径散布于煤中,即使把煤磨成粉,它们还是有机结合在煤灰之中。

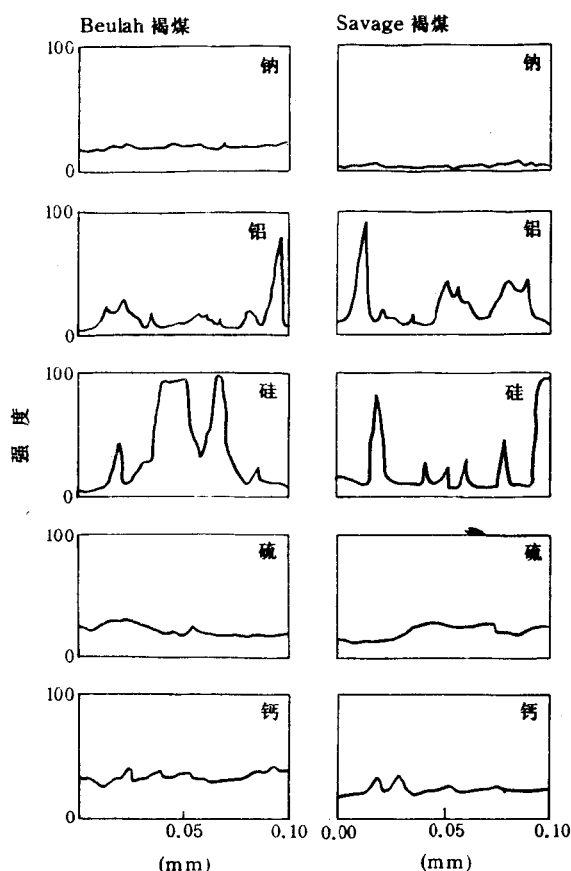


图 1-2 矿物元素在煤中的粒度分布

2. 煤中的矿物质组成

煤中的矿物质是指存在于煤中的所有无机的非煤物质,同时也包括那些存在于煤有机化合物中的无机元素成份。通常,煤中的无机物可分为三类,即原生矿物质、次生矿物质和外来矿物质。原生矿物质主要来源于形成煤的植物生长过程,基本上以分子状态均匀分布于煤中,其在煤中的含量很少有超过 2%—3%;次生矿物质是指在成煤过程中,因地壳变动使外界泥沙混入到煤层中的矿物质;而外来矿物质一般是采煤时混入煤层周围大块或层状的顶底板或夹碱石,它具有原矿物质的一般特性,在煤破碎时有些外来矿物质可能会从煤中分离出来。通常,炉内积灰结渣是由煤中外来矿物质和次生矿物质在燃烧中发生选择性沉积所造成的。

外来矿物质在煤中以聚生体和单一矿物粒子存在。聚生体包括矿物聚生体及煤与矿物质聚生体两种。单个煤粒可能有表 1-5 的成份。

由表 1-5 可知,单一矿物粒子(特别是黄铁矿)和矿物聚生体的密度较纯煤大,可以进行分离。纯煤及煤与矿物聚生体不能分离。

表 1-6 为煤中矿物质的成份。主要成份是 SiO_2 (20—60%)、 Al_2O_3 (10—35%)、 Fe_2O_3 (5—20%)、 CaO (1—20%),还有少量的 MgO 、 TiO_2 、 K_2O 、 P_2O_5 和 SO_3 等氧化物。在表 1-7 中示出了这些氧化物的特性。

表 1-5 煤粒成份

成 份	密 度 (kg/m ³)	熔 化 温 度 (°C)
纯 煤	1300	
单一矿物粒子:		
1. 黄铁矿	5000	1150
2. 石 英	2700	1700
矿物聚生体	2500—3000	1200—1600
煤与矿物聚生体	1500—2000	1200—1500

表 1-6 煤中矿物质

矿 物 质	分 子 式	在煤中占的比例
油页岩群	$(K, Na; H_3C_3; Ca)_2(Al, Mg, Fe, Ti)_4$ $(Al, Si)_3(OH, F)_4$	占矿物质的 50—90% 铁 0—20%, 钠和钾 0—4%, 硫 0.5—10% 钙 0—20%, 镁 0—8%
粘土群 (高岭土)	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot xH_2O$	伴生矿物质通常包括下 列元素:
硫 群	$FeS_2, FeSO_4, Na_2SO_4$	钠钾 0—4% 钛 0—2% 锰 少量 P, Ni, B, Zr 少 量(<1%)
碳酸盐群	$CaCO_3, CaCO_3 \cdot MgCO_3$	
石 英	SiO_2	
斜长石	$(K, Na)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	
金刚砂	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$	
闪 石	$CaO \cdot 3FeO \cdot 3SiO_2$	
石 膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	
磷灰石	$9CaO \cdot 3P_2O_5 \cdot CaF_2$	
锆 石	$ZrSiO_4$	
绿帘石	$4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$	
黑云母	$K_2O \cdot MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$	
斜辉石	$CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	
绿泥石	$2FeO \cdot 2MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	
水铝石	$Al_2O_3 \cdot H_2O$	
纤铁矿	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$	
磁铁矿	Fe_3O_4	
蓝晶石	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	
十字石	$2FeO \cdot 5Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	
黄 玉	$(Al, F)_2 \cdot SiO_4$	

表 1-7 煤中各种氧化物的特性

成 份	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃
熔化温度 (°C)	~1700	2050	2570	2800	1570	1560
化学特性	酸性	两性	碱性	碱性	碱性	碱性
成 份	FeO	FeS	FeS ₂	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
熔化温度 (°C)	1030	1195	1172		800—1000	1820
化学特性	碱性				碱性	酸性

表 1-8 原煤灰质的主要物相组成及化学分子式

序号	类 别	典型的矿物质及近似的化学分子式
1	页岩	钾云母石(绢云母) $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ 钠云母石 $Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ 高岭石(粘土) $(Mg, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$
2	高岭土	高岭土 $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$
3	碳酸盐	石灰石 $CaCO_3$ 白云石 $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ 铁白云石 $2CaCO_3 \cdot MgCO_3 \cdot FeCO_3$ 菱铁矿 $FeCO_3$
4	硫化物	黄铁矿, 白铁矿 FeS_2
5	氯化物	岩 盐 $NaCl$ 钾 盐 KCl
6	其它矿物质	与页岩同时存在的少量矿物质, 如: 石 英 SiO_2 长 石 $(K, Na)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ 石榴石 $3CaCO_3 \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$ 角闪石 $CaO \cdot 3FeO \cdot 4SiO_2$ 石 膏 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 氟磷灰石 $9CaO \cdot 3P_2O_5 \cdot CaF_2$ 锆 石 $ZrSiO_4$ 水铝石 $Al_2O_3 \cdot H_2O$ 磁铁矿 Fe_3O_4 赤铁矿 Fe_2O_3

煤中矿物质可以由多种形式所组成,但大体上可以分成六类,即页岩、高岭土、碳酸盐、硫酸盐、氯化物和其它成份,其中尤以页岩和高岭土含量为最多.硫化物主要包括黄铁矿和白铁矿,它们是同素异物体.煤中硫酸盐含量一般很低,因此无机硫主要是硫铁矿.碳酸盐主要是白云石、方解石和菱铁矿.煤中次要矿物如石英、钠长石和正长石,它们是碱金属最常见的存在形式.

六类矿物质所包括的典型矿物质及其化学分子式见表 1-8. 页岩通常是泥浆,流沙和粘土固化而成,它有许多矿物质成份,包括钾云母石、钠云母石和高岭石等.碳酸盐主要是石灰石、白云石等.

我国电厂入炉煤中典型矿物质组份见表 1-9. 而我国烟煤和贫煤按不同比重氧化物成份的分布见表 1-10.

表 1-9 电厂入炉煤中矿物组份 (%)

煤 种 组 份	焦 作 电 厂 炉 前 煤	大 同 二 电 厂 炉 前 煤	富 拉 尔 基 二 电 厂 炉 前 煤
高 岭 土	9.2	6.6	8.5
石 英	3.4	5.0	4.9
石 膏	0.5	1.0	1.1
方 解 石	1.0	—	0.5
水 云 母	2.2	—	—
铁 白 云 石	0.8	0.6	—
铁 氧 化 物	—	1.1	0.8
黄 铁 矿	0.10	0.35	—
长 石	—	—	0.5

三、煤中硫的分布

硫是煤中一个有害元素,它所产生的不良影响为:

- (1)对于煤的贮存来说,特别是黄铁矿多的煤易使煤堆自燃.
- (2)作为电厂燃料时煤中的硫燃烧生成二氧化硫,它不仅腐蚀锅炉设备,易引起结渣和积灰,而且含二氧化硫的废气污染空气而造成公害.
- (3)煤气化制成煤气时所产生的二氧化硫,不仅腐蚀设备,而且使催化剂中毒,影响操作和产品质量.

煤中硫含量的高低与成煤时的古地理环境有密切关系.我国地质情况复杂,煤炭储量很大,煤质种类多,煤中硫的分布也不均.

我国把含硫量大于 2%的煤称为高硫煤.它主要是烟煤,高硫无烟煤数量不多,褐煤含硫较低.我国高硫煤占总产量的 20%.对 180 个动力用煤矿进行统计,生产高硫煤的矿点占 27.6%,其中西南地区占 10%.统计了 376 个高硫煤层中硫的形态分析数据,结果表明黄铁矿硫在全硫中所占比例平均为 51.7%,最高可达 98.6%.

煤中有四种主要形式的硫,即硫酸盐硫(SLY)、硫铁矿(SLT)(是硫化物硫的一种,由