

146662

TK229.6
5803

高等学校教材

锅炉受热面外部过程

东南大学 撒应禄 编



京电力大 00049148

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书在《锅炉原理》的基础上,系统地介绍了燃煤锅炉受热面外部工作过程。其内容包括:煤及煤灰特性;矿物质在炉内的物理化学过程;锅炉结渣和积灰;高低温受热面沾污、腐蚀;金属的磨损。本书具有系统性、新颖性和实用性的特点。

本书系高等学校电厂热能动力工程专业的选修课程教材,也可供火力发电厂和锅炉制造行业的工程技术人员参考。



高等学校教材

锅炉受热面外部过程

东南大学 撒应禄 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12.25印张 273千字

1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数 0001—1370 册

ISBN7-120-01959-7/TK·299

定价5.70元

前 言

本书系根据原能源部高等学校热能动力类教材编审委员会的决定编写的。

锅炉受热面的外部工作过程，与锅炉的安全和经济运行密切相关。我国尚无这方面的专著，本书的出版有着填补空缺的作用。

全书共12章。首先介绍煤及煤中矿物质的特性，然后介绍矿物质在炉内物理化学过程，最后介绍矿物质对锅炉受热面外部工作的影响及其防止措施。

全书具有较强的系统性、新颖性和实用性。此外，全书还引用了作者及很多其他学者的基础研究成果，具有一定的先进性。书中相当篇幅介绍了国内外最新的研究和不同学派的观点，亦有较好的启发性。

该书不仅可作热动专业学生的选修课教材，而且对从事锅炉设计、运行和检修的技术人员也有参考价值。

本书由东南大学撒应禄编写。

全书由东北电力学院胡荫平同志主审。对他详细的审阅，在此表示衷心感谢。

在编写过程中，对张军同志协助整理付出的辛勤劳动，以及盛昌栋、王斌、陈鸿伟、宋慧英、徐生荣和龙佩文等同志给予的支持，在此亦予以致意。

书中缺点难免，恳请读者批评指正。

作 者

1991年10月于东南大学

主要符号说明

A	酸性成分, 灰分, 常数, 投影面积	c	比热, 磨损系数
B	碱性成分, 常数	d	管径, 直径
C	系数	e	飞灰撞击系数
D	负荷, 组成, 筛分份额, 扩散系数	g	积灰生长量, 重力加速度
E	辐射力, 电势梯度, 活化能, 杨氏模量, 磨损速度	h	积灰层生长高度
F	力	l	石英颗粒质量份额, 气体分子平均自由行程
G	指数, 沉降参数, 飞灰质量流速	m	质量, 指数
H	硬度, 常数	n	指数, 飞灰均匀性系数
I	磨蚀指数, 指标	p	压力
J	管壁表面磨损量, 介电常数	q	换热量, 热负荷
K	系数, 常数	r	半径, 水汽化潜热
L	摩尔潜热	s	管间节距, 壁厚
M	金属, 原子量, 分子量	t	温度
$M \cdot M$	原煤中矿物质含量	w	速度
$M \cdot P$	熔点	x	份额, 距离, 自由行程
P	磨损参数, 粘度指数	δ	颗粒界限尺寸, 磨损厚度
Q	热量, 发热量	ε	辐射强度, 灰污系数, 发射率
R	沉积量, 筛余量, 指数, 曲率半径, 气体常数	ζ	沾污系数
X	腐蚀量	η	动力粘度, 或然率系数, 效率
Y	污染量, 胶质层最大厚度	θ	润湿角
a	频谱拟合常数, 系数, 固有灰分, 份额	λ	波长, 导热系数
		μ	浓度
		ξ	利用系数
		σ	表面张力
		ψ	热有效系数

主 要 符 号 说 明

<i>AD</i>	酸露点, 粘结	<i>m</i>	金属, 物质, 运动量滑动, Magnus 效应
<i>B</i>	布朗运动, Basset 力	<i>ox</i>	氧化物
<i>DP</i>	露点	<i>p</i>	颗粒
<i>L</i>	液	<i>pr</i>	黄铁矿, 颗粒径向
<i>T</i>	温度, 热泳	<i>q</i>	石英
<i>a</i>	空气, 飞灰, 灰	<i>s</i>	结渣, 烧结, 沉积表面, 壳壁
<i>b</i>	拦截, 脉动, 堆积, 收集	<i>t</i>	总, 热滑动
<i>c</i>	挥发, 腐蚀, 切削, 沉降, 临界	<i>vm</i>	虚假质量
<i>d</i>	管径, 变形	<i>w</i>	磨损
<i>e</i>	火焰, 电泳	<i>wg</i>	排烟
<i>f</i>	分析基, 沾污, 炉膛	<i>z</i>	管排磨损
<i>fb</i>	炉底	<i>a</i>	管周界磨损
<i>g</i>	干燥基, 烟气, 气流, 玻璃, 重力		

目 录

前言

主要符号说明

主要角码说明

第一章 绪论——研究锅炉受热面外部过程的目的和意义	1
第一节 研究的对象和任务	1
第二节 受热面灰污、磨损和腐蚀的危害	2
一、受热面灰污；二、受热面磨损；三、受热面腐蚀	
第三节 对一些常见分析方法的评价	4
一、煤常规分析；二、灰污受热面的附加热阻	
第四节 研究煤灰特性的必要性	7
第二章 煤的组成、特性和分类	8
第一节 煤的成因	8
第二节 煤化度与煤有机物	8
第三节 影响锅炉受热面外部工作的煤中的主要成分	14
一、灰分；二、硫	
第四节 煤的分类	23
第三章 煤灰特性	35
第一节 煤中矿物质	35
一、矿物质的来源；二、矿物质的组成与类别；三、矿物质中主要元素及其存在形式；四、矿物质的表示方法	
第二节 煤在破碎过程中矿物质的偏析	39
一、研究的意义；二、偏析原理；三、重力分离法及其效应	
第三节 灰渣熔融特性	45
一、灰熔点；二、炉内气氛对灰熔融性的影响；三、煤灰成分对灰熔融性的影响	
第四节 灰渣粘度	56
一、灰渣粘度；二、灰渣粘温特性的类型；三、煤灰成分对灰渣粘度的影响	
第五节 灰渣烧结特性	62
一、目的和意义；二、烧结机理与烧结过程；三、影响锅炉受热面灰污烧结的因素；四、烧结模型	
第四章 煤中矿物质在炉内的物理化学过程	68
第一节 概述	68
第二节 煤粉颗粒在加热过程中的球化	69
第三节 矿物质在加热过程中的化学反应	70
第四节 煤中某些矿物质成分在加热过程中的挥发	72
第五节 煤-渣界面现象	76
第五章 飞灰	78
第一节 飞灰形成和飞灰特性	78
一、形成与组成；二、飞灰颗粒分布特性；三、飞灰量	

第二节 亚微尺寸颗粒的形成	83
第三节 煤胞性质、组成和形成机理	84
一、煤胞的物理性质；二、煤胞的化学组成；三、煤胞形成机理；四、影响煤胞形成的因素；五、煤胞形成速度	
第六章 灰颗粒在受热面上的沉积与粘附	92
第一节 沉积方式	92
一、扩散沉积；二、重力沉积；三、惯性沉积；四、拦截沉积；五、热泳力沉积；六、电泳力沉积；七、压力梯度力；八、Saffman升力；九、Magnus效应；十、Basset力；十一、虚假质量力；十二、其它力	
第二节 粘附力	98
一、范德华力；二、静电力；三、表面张力；四、化学力	
第三节 影响粘附强度的因素	100
一、沉积物状态及成分；二、受热面状态；三、沉积物与受热面相容性；四、炉内气氛；五、烧结	
第七章 松散性积灰	103
第一节 松散性积灰的形状与特征	103
第二节 影响松散性积灰的因素	107
一、灰浓度；二、气流速度；三、管径；四、管子排列方式及相对管节距；五、灰分颗粒组成；六、气流方向	
第三节 松散性积灰的灰沉积量	112
第八章 炉膛结渣	114
第一节 结渣的形成过程	114
第二节 黄铁矿引起结渣的机理	115
第三节 影响结渣的因素	118
一、煤灰成分与组成；二、炉膛环境温度；三、炉内空气动力场	
第四节 防止结渣的措施	121
一、降低炉膛环境温度方面的措施；二、改善炉内空气动力工况方面的措施；三、其它方面的措施	
第五节 结渣判别方法	126
一、常规方法；二、非常规方法；三、判别方法示例	
第九章 高温受热面的沾污与腐蚀	136
第一节 高温受热面沾污的形成	136
第二节 受热面高温腐蚀的基本概念	137
第三节 不同类型的高温腐蚀过程	139
一、硫酸盐型腐蚀；二、氯化物型腐蚀；三、硫化物型腐蚀	
第四节 高温受热面沾污和腐蚀的判别方法	142
一、沾污判别方法；二、腐蚀判别方法	
第五节 防止高温沾污、腐蚀的措施	143
第十章 低温受热面的腐蚀与积灰	146
第一节 概述	146
第二节 烟气中三氧化硫浓度与煤质的关系	147
第三节 燃煤锅炉酸沉积的确定	148

第四节 硫酸浓度对腐蚀速度的影响	150
第五节 低温腐蚀的规律	151
第六节 计算烟气露点的经验式	152
一、Р.А.Лероеян式；二、А.Ф.Гаврилов式；三、简化式	
第七节 低温积灰的原因和特征	155
一、管式空气预热器；二、回转式空气预热器；三、热管式空气预热器；四、铸铁省煤器	
第八节 低温积灰与腐蚀的减轻和防止	161
一、减少烟气中 SO_3 含量；二、提高受热面的壁温；三、其它措施	
第十一章 对流受热面磨损	164
第一节 原煤中磨蚀性矿物质及粉煤灰的磨损特性	164
一、原煤中的磨蚀性矿物质；二、粉煤灰的磨蚀特性	
第二节 飞灰的撞击磨损	169
第三节 对流受热面的磨损特征	173
第四节 防止对流受热面磨损的方法	175
一、选用适当的烟气速度；二、防止局部地区飞灰速度和浓度过高的措施；三、防磨装置	
第十二章 煤灰渣沉积物的热物理性质	179
第一节 概述	179
第二节 灰沉积物的辐射特性	179
一、灰沉积物的发射率和吸收率；二、灰沉积物对辐射特性的影响	
第三节 灰沉积物的导热特性	182
一、灰沉积物的空隙率；二、灰沉积物对导热系数的影响	
第四节 灰沉积物的其它热物理参数	186
一、密度；二、定压比热；三、表面张力	
主要参考文献	188

第一章 绪 论

——研究锅炉受热面外部过程的目的和意义

第一节 研究的对象和任务

锅炉是耗用大量燃料的热力设备。就燃煤消耗量而言,在我国1989年采煤量为10亿t中,用于发电、工业生产和生活取暖等锅炉的耗煤量要超过一半以上。其中,40万台工业锅炉的耗煤占总采煤量的 $\frac{1}{3}$,发电锅炉占 $\frac{1}{5}$ 。到本世纪末,仅发电的年耗煤量将增至5亿t,占全国原煤产量的40%左右。

为了保证锅炉工作的安全可靠和节约能源,当今锅炉工作者的工作重点往往着眼于锅炉受热面外部过程,即燃烧产物对锅炉受热面烟气侧工作的影响。

燃用化石燃料的锅炉,其受热面或多或少都会遭受到烟气流中固体质点和酸性有害气体的污染。燃煤锅炉的炉膛结渣,对流受热面的积灰、磨损和烟气侧腐蚀,是屡见不鲜的。随着燃烧煤质的下降和煤种的多变,这类现象更是普遍发生。

锅炉燃油虽含灰很少,不会引起受热面结渣和磨损,但灰中的钠、钒和硫等物质对受热面积灰和腐蚀却要带来很大的危害。

工业窑炉排出的含有大量烟尘和腐蚀性介质的气体,是关系到余热锅炉能否成功运行的关键所在。余热锅炉的发展,可以说是不断克服受热面积灰、磨损与腐蚀的过程。

60年代出现的热管技术,经不断改进已日臻成熟。目前价廉的钢-水热管,虽在热能领域上的应用价值可与其它换热部件相竞争,不过其肋片管普遍出现较多的积灰却应急待解决。

此外大气污染的日益加重,要求严格限制锅炉污染物的排放,这是我国急需关注的问题。为了进一步开展除尘和脱硫脱硝技术的研究,了解锅炉受热面外部过程是必要的。

锅炉混煤燃烧现象很普遍。怎样配煤,除影响燃料燃烧性能外,还与受热面灰污、腐蚀及磨损有关。过去配煤多多少少带有盲目性,原因是与对锅炉受热面外部工作过程掌握不够有关系。

再者,用于锅炉设计与运行的煤分类方法;热力计算的灰污系数、热有效系数、利用系数等数值;清除炉内灰污的化学添加剂的成分等方面,其适用性和精确性的提高,以及更好地了解煤里矿物质对煤燃烧微观过程的影响,这诸多方面都要求加强或依赖于锅炉受热面外部过程的基础知识。

锅炉受热面外部过程主要研究的对象,是受热面的灰污、腐蚀和磨损。力求消除或减轻灰污、腐蚀和磨损是研究锅炉受热面外部过程的主要任务。而燃料特性,尤其是燃料中矿物质特性,则是构成和研究受热面外部过程的基础。

第二节 受热面灰污、磨损和腐蚀的危害

受热面烟气侧的灰污、磨损和腐蚀是令人憎恶的。它轻则降低传热效能，增加锅炉排烟热损失与通风电耗，和影响受热面内部汽水正常工况；重则将堵塞烟道，爆管停炉，破坏机组连续运行。

燃料品质变差，设计欠妥，运行不良，或不按规定定期吹灰等，都将导致受热面的灰污、磨损和腐蚀加剧。随着锅炉容量的增大，这些问题更加突出，设备可利用率明显降低（图 1-1）。

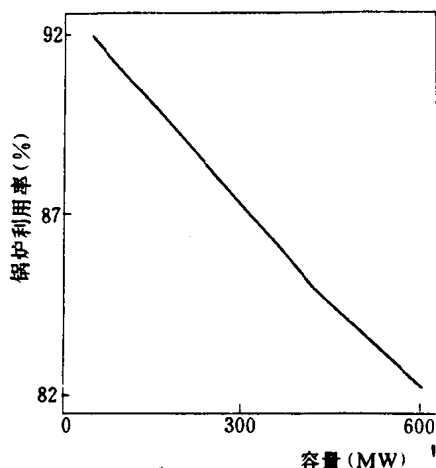


图 1-1 燃用化石燃料的锅炉
容量和利用率（英国）

一、受热面灰污

锅炉辐射受热面和对流受热面都会存在着灰污。

按沉积层强度和沉积层颗粒粘附特征——两个主要因素所表征的沉积层性质，灰污可分为松散性灰污和粘结性灰污两类。松散性灰污又称松散性积灰。粘结性灰污有弱粘结性、强粘结性和熔融粘结性灰污。按受热面所在处烟温的高低，则又分称做炉膛结渣、高温粘结性积灰（又称沾污）和低温粘结性积灰。

灰污受热面的灰污层的导热系数比金属管壁的导热系数低百倍以上，一般小于 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。受热面即使是轻度积灰（灰污层厚度 $\approx 0.5 \text{ mm}$ ），灰污层带来的附加热阻也将占汽水受热面内外总传热热阻的 $1/2 \sim 1/3$ 。如不予以清除，就首先反映出锅炉排烟热损失的增加。对于燃烧煤、油的锅炉，当各级受热面不吹灰时，排烟温度将普遍升高 $15 \sim 30^\circ \text{C}$ ，相当于锅炉效率降低 $1\% \sim 2\%$ 。国内某台 850 t/h 煤粉炉，吹灰停用3天后，排烟温度升高近 7°C ，每年多耗煤 5400 t 。

结渣是熔融或半熔融灰渣沉积在壁面上的灰污，通常只发生在炉膛温度高的燃烧区附近，但严重的结渣会延伸至炉膛出口烟窗和炉膛底部的冷灰斗区域。因为结渣属于粘结性灰污，其带来的危害程度往往要比松散性灰污严重得多。如 DG300/100 型锅炉是由 220 t/h 锅炉略加改造而增容至 300 t/h 的，所采取的主要措施是：提高炉膛热负荷参数 q_v 、 q_r 和加大各对流受热面的烟速。该炉在燃烧高硫、高铁和高钠的低熔点煤种时，曾普遍地发生了炉膛结渣，燃烧器烧坏，过热器变形、堵灰、腐蚀、磨穿，冷灰斗大量堆渣等现象，锅炉安全受到严重威胁，锅炉出力被迫降到 $220 \sim 250 \text{ t/h}$ ，经济性大为降低。

受热面出现大量结渣后，再采用蒸汽或压缩空气吹灰，效果一般不大。

灰污与腐蚀会相互促进、加剧。积灰或结渣的受热面将产生或增加金属的腐蚀损坏。

二、受热面磨损

金属的磨损，在燃用固体矿物燃料的锅炉上，占有很大的维修和折旧费比例。其中受

危害最大的是中低温对流受热面。

受热面严重磨损的起因，主要是燃料灰分大、烟尘含量多和取用的烟速高，其次是受热面结构布置不合理和运行因素的影响。国内一些配125MW机组的超高压煤粉炉和上述的DG300/100型高压煤粉炉，其省煤器均都发生过严重磨损。

省煤器管磨损泄漏，将引起其下部的空气预热器堵灰。未堵灰的管子和受热元件，则易于磨损、漏风。

三、受热面腐蚀

受热面腐蚀有高温腐蚀和低温腐蚀之分。

高温腐蚀是指水冷壁、高温对流受热面的烟气侧腐蚀。液态排渣炉的水冷壁管的腐蚀，固态排渣炉燃煤中含有较多的碱金属、硫和燃油炉燃油中含有较多的钒、硫等而引起水冷壁、过热器、再热器管的高温腐蚀，都时有发生。高温腐蚀可导致在短时间内出现爆管事故。我国电站锅炉多采用超高参数，当燃用腐蚀性强的燃料时，必须加以重视。

低温对流受热面烟气侧的低温腐蚀，主要是由于烟气中硫酸蒸汽凝结在受热面上。在烟气中硫酸蒸汽遇到温度过低的受热面时会凝结，发生低温腐蚀。受热面出现低温腐蚀后，往往伴随着积灰的粘性增加和硬结堵灰。严重的低温腐蚀在很短时间内即需更换受热面。过去山东地区燃用含硫量高的淄博煤与新汶煤的锅炉，其管式空气预热器，有的不到小修周期就停炉清除堵灰。有的更换了新管，也仅使用一年。西南某电厂燃用折算含硫量 $S_{\text{折}} = 0.82\% \sim 0.92\%$ 的煤的煤粉炉，有的空气预热器新管甚至运行两个月就发生了严重堵灰并腐蚀穿孔，导致通风阻力增加，炉膛负压难以维持，锅炉出力被迫下降，热空气温度降低，磨煤出力不足，燃烧恶化。

低温腐蚀往往成为现今影响锅炉技术经济指标的重要因素。锅炉由于考虑到受热面的低温腐蚀，不得不牺牲排烟温度进一步降低的可能性和必要性来予以防止。但即使这样，对于燃用高硫固体燃料和液体燃料的锅炉，受热面低温腐蚀一般仍难以消除。

图1-2示出燃煤锅炉烟气侧污染产生的危害过程。

图1-3为国外一台350MW机组褐煤锅炉产生的结渣、积灰、磨损和腐蚀的区域示意图。从图可以看出：炉内结渣是烧褐煤的首要问题。其次是积灰，积灰发生在炉膛上部和整个对流受热面。高温腐蚀出现在炉膛上部和水平烟道中的末级过热器和再热器上。金属磨损发生在较高烟速区域，危险位置有：炉膛上部折焰角、末级过热器前管束、尾部烟道后墙及其相邻管束。低温腐蚀只在空气预热器上产生。

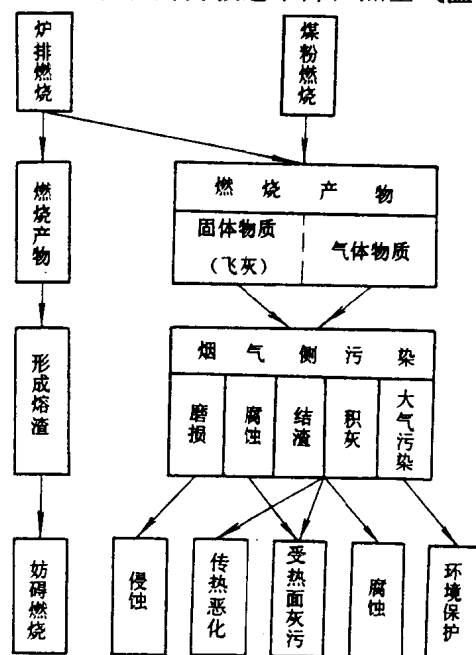


图 1-2 燃煤锅炉烟气侧污染危害

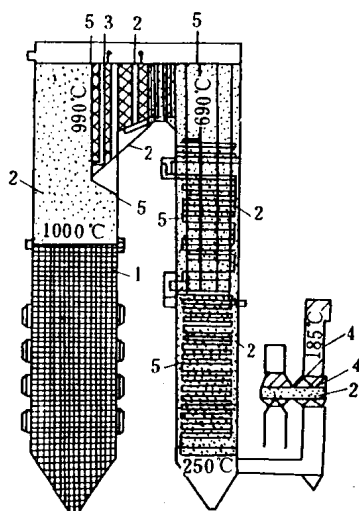


图 1-3 锅炉燃用褐煤的结渣、积灰、磨损和腐蚀区域

1—结渣；2—积灰；3—高温腐蚀；4—低温腐蚀；5—磨损

第三节 对一些常见分析方法的评价

一、煤常规分析

判断受热面灰污轻重与磨损、腐蚀特性，采用普通沿袭的煤的工业分析、元素分析、灰熔融特性和灰成分分析等实验室中的分析结果，虽有一定价值，但不能很好地满足要求，且有时会导致错误的应用。

1. 煤的工业分析和元素分析

工业分析、元素分析对煤的分类、锅炉设计和计算等是基本的原始资料。焦炭的物理性质和燃料水分、灰分、挥发分的高低，是预测煤着火和燃烧性能的重要指标。但它们对锅炉受热面灰污往往无法作出正确的判断。

煤中矿物质燃烧后形成灰的数量的多少，只对灰污层强度高的粘结性灰沉积有影响。灰的数量多，沉积速度快，沉积量增加。而对灰污层强度低的松散性灰沉积，从空气动力学观点分析却无什么关系。它只改变达到灰沉积动平衡状态的速度，基本上不改变灰沉积量。

焦炭的焦结性密切联系着层状燃烧方式的燃料床的工作，而与室燃炉工作和炉壁面的灰污染并没有什么联系。

以单位质量百分比表示的可燃基挥发分 V' ，对 V' 高灰分亦高的煤，其应用基挥发分 V 却很低，燃烧后呈实心片块状和无孔或少孔的球状的灰粒着火和燃烧性能的变坏，应主要看作是属于燃烧热力工况和矿物质受热的理化过程的范畴，与受热面灰污无关。

受热面磨损虽与燃料中含灰量有很大关系，但不能忽视灰的灰分组成，特别是灰中石英(SiO_2)与硫铁矿(FeS_2)硬性物质含量的影响。

硫对受热面腐蚀、结渣、积灰(沾污)和磨损都有害，但其带来的危害程度的大小不能简单地用其测量出的数量多少来衡量，因还受其他因素的影响，包括煤中灰量及灰中的碱性成分和锅炉燃烧方式。

2. 灰熔融特性

实验室中将煤样灰化而得到的灰成分，其所经历的温度、时间和环境气氛的条件，与实际炉膛内差别很大。

灰熔融试验方法在试样变形过程中确定的温度，根据定义被区分为变形温度(t_1 、 IT)、软化温度(t_2 、 ST)、半球温度(HT)、熔化流动温度(t_3 、 FT)^①。由于其中一些矿物质成分已经发生物相变化，但往往不能使试样的外形改变；试样缓慢加热逸出的气体产生的部分小空穴，可能会立即被已熔化的物质填满；并且在观察试样变形过程中还将带来人

① 各国定义不尽相同。

为判断的误差，因此试验结果的精确度不是很高。另外，试验确定的是整个灰样的平均熔融温度；不能反映灰中各种成分的真实熔融温度。灰熔融温度相近的煤在实际锅炉中其灰污（结渣）性能通常是不同的，有时差别明显。因为燃料内的矿物质及其燃烧后形成的灰是一复杂无机化合物的混合物，无单一熔点，熔化过程是在一个或大或小的温度区间进行的。熔体在未达到完全真流体状态之前，要经过不同的软化塑性状态，少量的低熔融性成分，就将导致受热面灰污。某一煤种的试验灰的开始变形温度 $t_1 > 1500^\circ\text{C}$ ，炉内却发生较严重的结渣；而另一煤种的 $t_1 < 1100^\circ\text{C}$ ，反无结渣现象，这显然不是两者炉膛热力工况不同所能起的作用。为此，人们应该有这样的看法：灰的熔融温度与炉内结渣之间只存在着一定的关系；熔点高的煤种，一般是比熔点低的煤种带来的受热面结渣程度轻些，但并不意味着完全能很好地来度量结渣的倾向；过去长期地把灰熔点测定的意义与结渣紧密地相联，似乎是把测量灰熔点的作用看得过高。

3. 灰成分分析

灰成分的分析，特别是了解灰中硅Si、铝Al、铁Fe、碱(Na、K)和碱土(Ca、Mg)金属、硫酸酐 SO_3 等主要成分组成的化合物，对指导锅炉工作是大大地深入了一步。目前世界各国提供的燃料的常规设计原始资料，除元素分析成分、工业分析成分、灰熔融温度等外，较严谨的设计要求都还包含有灰成分分析的数据。

灰的化学成分能有助于对锅炉燃用煤的结渣、积灰、腐蚀及磨损等倾向作出有益推断。在被确定出的矿物质 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 等主要氧化物组成中， SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 被划分为酸性成分，其余的为碱性成分。由于酸性成分的离子半径比碱性成分的小，离子势（化合价/离子半径）比碱性成分的高，酸性成分具有较大的晶格能，硬度和熔点高，因此人们可以得到启发，即采用灰中酸碱氧化物比值的大小来衡量锅炉受热面灰污染的轻重，应该说是具有科学理论基础的。

此外，灰中各氧化物的多少，可利用作平衡相图来了解其与熔融性能的关系。灰中含量多的主要成分—— SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 通过二元或多元系平衡相图能查得在某一温度下煤灰将形成哪些灰渣，以及它们在什么温度下熔融，并可由此引伸出各种判别污染的指标。

但应知道，目前这种由实验室内测定出的灰氧化物，严格来说，还不能很好地反映出炉内实际情况。试验测定的灰分是假定矿物质均匀分布于煤母体结构中，并假定煤灰成分与炉壁上沉积的灰成分相似；没有考虑到一些矿物质在炉内的变化及有选择性的实际现象。如往往发现过热器上积灰中碱、硫氧化物含量比试验测得的数量高若干倍，而炉膛灰渣中的碱、硫成分却很少。

再者，煤中矿物质是以粘土、碳酸盐、硫化物为主，包括近百种元素所组成的极为复杂的化合物的混合物。显然，实验室提供的少数的、尽管是主要的简单化合物，是不能说明和代表原煤矿产物的成分和组成的。很简单，如 SiO_2 含量，可以由石英也可以是由粘土引起的，而这两种矿物质在炉内燃烧过程中的性能极不相同。又如碱金属可结合为简单的氯化物，亦可能牢固地化合在长石内，然后参与炉内反应，对受热面沾污的影响很不一样。

在燃烧过程中,煤中的主要矿物质成分大多都转变成硅酸盐化合物和钠、铁、铝等各种各样化合物。这些化合物的熔融性与实验室测出的简单氧化物的差别很大。此外,由于煤中矿物质的富集偏析,各个煤粒成分也都不同,特别是煤研磨成细粉后,某一煤颗粒可以是无矿物质的纯煤,也可以是单一矿物质或是煤与矿物质共生体。它们之间的密度和熔融温度相差极大,而不能忽视其影响受热面污染的轻重的作用。

因此,简单地根据煤中矿物质的均匀分布的假定,来评价实际煤灰特性,和采用常规的灰成分分析来预测煤的结渣性能及沾污性能,严格地讲是不确切的。现今国内外的一些判断煤灰结渣和沾污的指标:如结渣指数、沾污指数、碱酸比、 SiO_2 含率等,由于这些指标都是只把灰成分分析的单金属和单非金属氧化物作为参数的,就不一定正确,分辨率也不高。我国义马煤是容易形成严重结渣的煤种,但按美国提出的碱酸比和硫的乘积计算,算出的结渣指数却属于低结渣性煤范畴,显然与实际相违。事实上,义马煤结渣的主要原因是煤灰中铁的偏析富集所致。在对受热面沾污性能的判别上,当今发表的美国沾污指数只考虑钠含量,而我国煤灰成分中钾含量普遍高于钠含量,沾污指数边界值的通用性也值得进一步分析。

二、灰污受热面的附加热阻

当前需加强锅炉受热面灰污研究的另一方面,是要提高计算受热面灰污后的附加热阻的精确性。它包括正确的理论概念、数据充实整理和数学模型拟定等工作。

确定形形色色又不规则的灰污层厚度和导热系数,至少在短期内是难以解决的。目前从国内外有关资料看到的,灰污系数 ε 、热有效系数 ψ 、利用系数 ξ 都是为锅炉热力计算的实际应用(欧、美实用性更大)。这些系数是以灰污附加热阻为主(管式空预器例外)的综合试验修正值。它们之间存在着一定的关系,都是利用热量的交换方法或间接的测量算得的。

以对流受热面看,目前 ε 、 ψ 、 ξ 就有多种用以计算对流传热量的数学模型。显然,由于传热系数、放热系数和传热量等的具体计算方法和处理情况不同,各种计算方法中推荐的 ε 、 ψ 、 ξ 数值通常也不同,往往不能相互套用。究竟采用哪个较合理,是值得研究的。

从对我国锅炉行业影响较大的苏联三个标准《锅炉热力计算方法》——1945年ЦКТИ标准、1957年和1973年ВТИ-ЦКТИ联合标准,可以看出在1957年标准中推广了 ε ,而在1973年标准中又退回到只将 ε 限于横向冲刷错列布置的燃煤对流受热面上。这不仅表明锅炉受热面灰污后带来的传热计算的复杂性,其精确性也有必要进一步研究和提高,同时亦很自然地联想到与苏联ВТИ博士Н. В. Кузнецов的影响不无关系。库氏在1954年报道了他在对流受热面上研究灰污的一些结果,并经一些热力检验修正后,用于1957年标准的设计推荐。今天看来,该试验通过试验台对松散性沉积得到的一些主要规律是有贡献的。但令人怀疑和值得讨论的是,试验台在对管子上灰污热阻的研究方法、试验手段和把减轻松散性沉积的结果套用在粘结性沉积上等方面,都存在着一定的不足和概念不清。如在锅炉常用烟速范围内,增加烟速可使对流受热面的松散性沉积减少而往往使粘结性沉积增加。

除以上方面外,在锅炉受热面的腐蚀和磨损方面,还有许多内容尚需深入研究。诸如:

目前计算烟气露点的算式和线算图,所考虑的因素、物理概念等,彼此明显不同,准

确性也不够,应用范围及通用程度亦需要扩大。

以影响受热面飞灰磨损的灰粒径大小、灰粒形状和组成,以及气流冲刷受热面的流场结构和磨煤机型式差异等,来确定出适宜烟速的较完整的数据很为有益。

第四节 研究煤灰特性的必要性

研究燃料特性对锅炉受热面外部工作影响的目的,就是要保证锅炉机组的正常出力和安全经济运行。

现今,锅炉工作者越来越认识到燃料特性对锅炉工作的重要性。同时亦认识到,各种化石燃料的燃烧反应性能虽不同,但决定锅炉尺寸的主要是灰的理化特性而不是煤的反应特性。而对灰的理化特性的研究,主要取决于能否有正确的方法确定煤中矿物质对结渣、积灰、腐蚀和磨损的影响,予以防止和消除。但是,由于受热面污染是一极其复杂的物理化学过程,影响因素很多。国外虽研究多年,至今尚未能达到准确的科学性,依据仍然是经验。国内近些年一些单位开展了有关这方面的研究工作,也只是刚开始。因此,为了给锅炉设计、运行提供更好的依据,消除和减轻对受热面的危害,在大容量锅炉广泛燃用劣质燃料的今天,加强煤灰性质对灰污、腐蚀和磨损的研究,是很有现实意义的。

锅炉受热面外部过程的研究主要集中在燃煤锅炉上。其原因是,除了煤是锅炉的主要燃料外,还由于煤属多灰化石燃料,引起的问题较多,比研究其它燃料更困难。这因为:

原煤矿物质的植物灰分、次生灰分,特别是外来灰分通常不同,且组成复杂,了解得还很不够。加上燃烧的煤粒,由于可燃质与矿物质紧密共生,各个煤粒间成分不一样,在破碎过程中又存在矿物质的偏析、纯化现象,将带来附加影响。当燃用煤种多变时,更增加了研究的困难。

再有,煤在炉内燃烧形成的灰渣和被烟气携带的飞灰在与受热面接触过程中,出现一系列的物理化学变化——加热分解、挥发、汽化、熔融、软化、凝结、化合、碰撞,以及对受热面选择性沉积和化学反应等现象,其中有一些变化和现象是在炉内温升速度达 $10^4 \sim 10^6$ °C/s时进行的,并且还受到锅炉运行工况的影响,这些使研究煤灰特性对受热面污染更艰巨。另外,在炉膛高温火焰下产生的煤胞和各种形状的飞灰,对受热面结渣、积灰都有不同程度的影响,受热面腐蚀、磨损也与飞灰颗粒形状有关系。

在现有基础上,进一步深入研究应从煤化学、硅酸盐物理化学、气固两相流和化学热力学等有关基础理论着手。飞灰、煤胞形成过程和灰成分的相律等研究也应加强。除利用和完善现有常规分析外,还应充分利用x射线衍射、电子探针、热显微镜和重力筛分等先进测试手段和计算机技术。此外,烟温、热负荷、气流特性等炉内工况对锅炉结渣、沾污、腐蚀和磨损等影响的研究,也是很需要的。当然,这些要求研究的内容,重点是针对煤灰中主要几种矿物质成分的。

第二章 煤的组成、特性和分类

第一节 煤 的 成 因

煤是一种能燃烧产生热量的最重要的有机岩类——化石燃料，由植物残骸演变而成。

植物有高等植物和低等植物之分。植物的残骸受地壳的变动被埋于地下，经历亿万年地层内的高温高压作用和通过菌解和变质^①两个过程，变成为煤。

植物在菌解阶段，由于厌氧细菌的作用，发生腐烂、分解与合成等生化过程，内部组织破坏，出现泥炭化，一部分物质转化为气体逸出，残余的物质与沼泽中泥砂和水中溶解的矿物质混合在一起，形成了含水很高、呈稀泥状的所谓泥煤。

泥煤在不断增高的地层压力和温度的作用下，被压紧、硬化，继续不断地放出气体和水分，含碳成分逐渐增多，开始煤化过程，即进入变质阶段（也就是形成矿物煤的阶段）。

由于变质程度的不同，矿物煤的组分亦不同。据此，可将矿物煤进行分类。通常将矿物煤分为褐煤、烟煤和无烟煤。

褐煤是泥煤初级成岩阶段的煤种，因呈棕褐色而得名。褐煤煤化成岩离地表不深、温度不高，质地疏松，水分较高。

烟煤是在褐煤基础上经过进一步受到地层压力和温度的作用而形成。烟煤按变质程度的不同，依次又可分为长焰煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤和变质程度最高的贫煤等多种质地致密的烟煤品种。烟煤因燃烧时有“烟”而得名。

无烟煤是烟煤层受到更高的地层温度和压力的作用后而转变成的地龄最长、变质程度最高、质地最硬的矿物煤。无烟煤由于受热分解产生的气体少而得名。

由于煤是植物通过化学、生物学、细菌学，以及地质变化等各种作用才得以形成的。因此，从褐煤演变到无烟煤，不是由于来源不同造成的，而是由于煤生成的煤介质作用不同所致。一旦这种特定条件中断，成煤过程就将停止。这时，即使成煤时期很早，也不可能变成煤化程度高的煤种。如泥煤受到空气氧化就不能转变成褐煤；褐煤不再受到高压高温的作用就停止向烟煤的转变。

第二节 煤化度与煤有机物

不同种类的煤皆为有机物和无机物两部分所组成的不均匀的混合物质。

有机物是煤的可燃成分。它包含碳C、氢H、氧O、氮N、硫S五种元素，构成了以

① 变质过程称为煤（炭）化作用；变质程度称为煤（炭）化度。

可燃气体为主的“挥发分”和可燃的固态物质的“固定碳”。无机物是指煤里各种各样的无机矿物质和与有机质结合的无机元素。无机物一般不可燃，俗称煤灰分。此外，煤中还含有一定量的水分，为惰性成分。

图2-1示出了煤成分及其相互关系。

煤的有机物和无机物的组成十分复杂，至今对它们的了解还不十分清楚，只知道与煤生成的原始物质、地理环境和变质过程等密切相关。

煤有机物组成，根据现有分析条件，尚难以直接测定出它们真正的化合物组成。因为在测定时，其中大多数有机成分会分解。一般只能通过分析煤的元素成分，即采用“元素分析”的方法来确定上述五种元素为基准组成的质量百分比，作为煤的有机物组成。

研究发现，煤有机物组成与煤龄有关。随着煤龄的增长，有机物中碳含量增加，氢和氧含量减少。按照煤化学解释，煤有机物是一高分子叠合物，主要由稠环构成。稠环周围有许多侧链和含氧官能团及基。碳大部分集中在稠环内，氢和氧大部分存在侧链上。在变质过程中，稠环扩大，侧链断裂，煤主体植物成分浓缩，煤变质程度加深，碳 C' 量增加，氢 H' 和氧 O' 量减少（图2-2）。

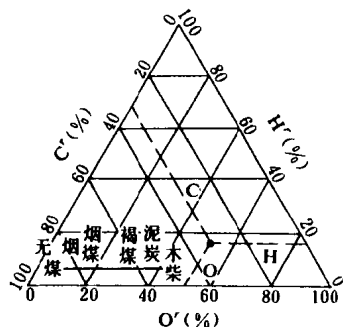


图 2-2 各种天然固体燃料

的 C' 、 H' 、 O' 含量变化(日本)

图中虚线表示煤的可燃基组成为：

$C' = 32.5\%$ ； $O' = 52.5\%$ ； $H' = 15\%$

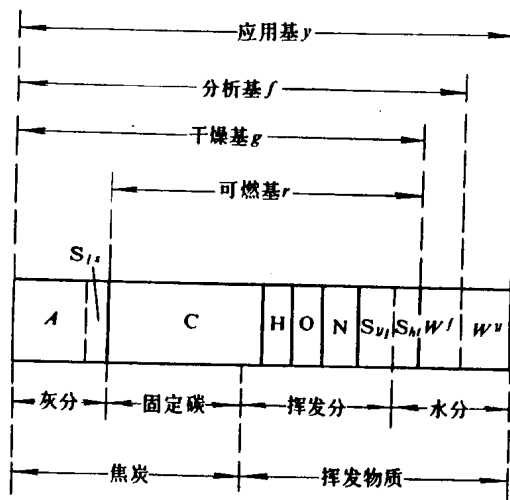


图 2-1 煤成分及其相互关系

图中角码： yj —有机； ht —黄铁矿； ls —硫酸盐

煤的这种 C' 、 H' 、 O' 含量的变化，显然也能反映在采用“工业分析”方法测定的挥发分 V' 和固定碳 C'_{gd} 的含量上，以及反映在与之有关的“燃料比 C'_{gd}/V' ”和“碳氢比 C'/H' ”等比值的变化上，图2-3示出了变化范围。由图可见：

- 1) 煤变质程度低，固定碳 C'_{gd} 随煤含碳量 C' 减少而减少；煤变质程度高， C'_{gd} 增多。
- 2) 煤变质程度低，挥发分 V' 多；煤变质程度高， V' 少。
- 3) 煤变质程度低，挥发分里含氧量 O' 多；煤变质程度高，含 O' 少。
- 4) 煤变质程度低，燃料比 C'_{gd}/V' 小；反之，则 C'_{gd}/V' 大。 V' 小于10%的煤，燃料比值约在9以上； V' 大于30%的煤，燃料比值通常在2以下。
- 5) 煤变质程度低，碳氢比 C'/H' 小；反之，则 C'/H' 大。 $V' < 10\%$ 的煤，碳氢比值可达20以上，且变化陡峭； $V' > 10\%$ 的煤，碳氢比值小于20，变化缓慢。