

技术卷

中国科学技术  
经·典·文·库

# 燃烧理论与燃烧设备

徐旭常 吕俊复 张海 编著

(第二版)



科学出版社

## 内 容 简 介

本书在1990年《燃烧理论与燃烧设备》第一版的基础上,更新和强化了近年来燃烧理论研究的进展和燃烧技术的进步,涵盖了燃烧理论、燃烧技术、燃烧设备和燃烧污染物生成、数值模拟以及煤气化等内容。

全书共12章。前3章分别介绍了燃烧概论、反应化学动力学和流动等燃烧基础知识;第4、5章系统分析了气体燃烧理论和气体燃烧设备;第6、7章为液体燃料的燃烧理论和燃烧设备;第8章以煤为例,概括介绍了固体燃料燃烧过程与燃烧理论;第9~11章分别介绍了常用的固定床、流化床、气流床燃烧设备;第12章结合燃烧理论与燃烧设备,简单介绍了煤的气化理论和大规模煤气化技术。

本书以基本概念为主,深入浅出地总结了燃烧理论基础、研究进展和近年来应用上的新成就,具有显著的新颖性;注重理论分析与实际技术密切结合,剖析了燃烧设备的理论基础和创新思路,具有高度的实用性。

本书可作为高等院校热动力工程、电厂热动力等专业的本科生及研究生教材或教学参考书,也可供从事锅炉及其他燃烧设备相关工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

燃烧理论与燃烧设备/徐旭常,吕俊复,张海编著. —2版. —北京:科学出版社,2012

(中国科学技术经典文库)

ISBN 978-7-03-034958-3

I. ①燃… II. ①徐…②吕…③张… III. ①燃烧理论②燃烧设备  
IV. ①O643.2②TK16

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第132848号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:刘小梅  
责任印制:张倩 / 封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

1990年11月第 一 版 机械工业出版社

2012年6月第 二 版 开本:787×1092 1/16

2012年6月第一次印刷 印张:38 插页4

字数:904 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 第二版前言

自1990年《燃烧理论与燃烧设备》第一版问世以来,我国经济迅速发展,促进了大型电站的建设,推动了燃烧理论和大型燃烧设备的进步;随着环境意识的逐渐提高,对洁净燃烧技术提出了更高的要求,促进了燃烧过程污染物排放的研究和低污染燃烧技术的发展。根据教学经验和研究进展,本书对第一版进行了补充完善。本书继承了第一版的特色和基本框架,摒弃繁琐的公式推导,紧密结合锅炉使用的燃烧设备,对燃烧理论进行针对性介绍,以期读者掌握燃烧理论的基本概念,并在学习本课程之后能够自主地分析、设计工程实际中各类燃烧设备。本书强化了近年来低 $\text{NO}_x$ 煤粉燃烧技术、循环流化床燃烧理论和应用的最新进展,同时引进了与燃烧密切相关的气化内容,并简单介绍了各种燃烧设备的数值模拟。

本书前3章分别介绍了燃料燃烧概论、涉及燃烧反应的化学动力学和气固反应理论,以及燃烧中涉及的流动尤其是气固两相流动的基本知识,以便为后续的学习提供基础。

自燃和点燃、预混可燃气体的火焰传播、火焰稳定和射流火焰等是燃烧理论的基础内容。为便于对本质的理解,将其结合气体燃烧在第4章进行阐述,并在第5章介绍了气体燃烧设备。

第6、7章分别介绍了液体燃料的燃烧理论和燃烧器。液体燃料的燃烧理论归结起来主要是液滴的蒸发、气相的扩散和燃烧。液体燃料燃烧器的设计和使用的关键问题是雾化和配风。

第8章以煤为例,介绍了固体燃料的燃烧理论,包括异相化学反应的焦炭燃烧问题。第9~11章分别介绍常用的固定床(层燃)、流化床、气流床(室燃)的主要燃烧设备,并简单涉及了煤燃烧中的污染物生成与控制。

结合燃烧理论与燃烧设备,在第12章中简单介绍了煤的气化理论和大规模煤气化技术。

本书保留了第一版作者毛健雄、曾瑞良、陈昌和所写的大部分内容,补充援引了第一版出版之后出现的新的进展。考虑到便于读者深入学习,本书各章分别列出了参考文献。第一版中引用的资料很多已经很难找到来源,在此一并向被引用者致谢。

本书由徐旭常院士、吕俊复教授主编。参加本书编写的还有张海、杨海瑞、吴玉新、张建胜等。吕俊复最后对全书进行修改、定稿。王庆功、杨石、王涛、王巍等博士研究生进行了校稿工作。刘宝莉编辑在本书编写过程中,给予了大量的帮助。

感谢本书第一版的作者,他们尽管年事已高,还是精心指导年轻教师进行本书的编写,奖掖后辈。还要感谢国内外同行,本书中引用了他们很多研究成果。

作者

2011年5月

## 第一版前言

本书是根据全国高等工业院校热能工程(锅炉)专业教学指导委员会 1987 年全体会议上审查通过的编写大纲撰写的。

自从 1964 年出版了清华大学教材《燃烧学》(上册燃烧理论、下册燃烧技术基础)以来,根据我们在教学中的经验,逐次补充和修改后编成本书——《燃烧理论与燃烧设备》。本书结合锅炉用的燃烧设备,也尽可能联系热能工程中的其它燃烧装置来讲述,使读者在学习了燃烧理论后就能了解工程实际中各类主要燃烧设备的特点、性能以及有关理论的实际应用。改变以往学习燃烧理论时常不涉及实际工程燃烧设备的不足,以达到学以致用的目的。

本书前两章分别介绍了燃料燃烧产物及带有燃烧设备的热工装置的各项热损失,以及与燃烧过程有密切关系的涉及化学反应速率的化学动力学基本知识。这是学习本书的基础准备。

本书结合气体燃料的自燃和点燃理论、预混可燃气体的火焰传播、火焰稳定和射流火焰来讲述最基本的燃烧理论,这些知识也是液体、固体燃料燃烧的基本知识。为使这些基本燃烧理论不至描述得过于复杂而妨碍对理论本质的理解,一般将它们作为较单纯的气体燃料的燃烧理论来阐述,实际上对于液体和固体燃料燃烧过程中的气相燃烧和火焰特性等基本理论也是相仿的。第三章即叙述气体燃料的燃烧理论和燃烧设备。

第四、五章分别介绍液体燃料的燃烧理论和燃烧器。液体燃料的燃烧理论归结起来主要是液滴的蒸发、气相的扩散和燃烧。液体燃料燃烧器的设计和使用的关键问题是雾化和配风。

固体燃料主要是煤,它占我国能源消耗的 70%,它的燃烧理论和燃烧设备不仅在我国而且对世界今后的能源利用都是重要课题。第六章专门阐述与煤有关的燃烧理论,其中主要论述异相化学反应的焦炭燃烧问题。第七章介绍常用的煤粉燃烧设备。燃烧产物对大气的污染,是涉及各种燃料燃烧的重要问题,而燃煤生成的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  对污染尤为严重,因此集中在这一章中讨论。这章中还介绍了水煤浆燃烧和液态排渣炉。第八章介绍燃煤的另外两种主要方式:层燃和沸腾燃烧。层燃是燃煤工业锅炉和工业窑炉最常用的燃烧方式,沸腾燃烧则是 60 年代迅速发展起来的新燃煤方式。

一些燃烧基本问题虽然和各种燃料的燃烧都有关系,但为了尽可能叙述得透彻些,编写时常将某个问题集中地放在某一章中详细讲述,例如湍流对燃烧的影响, $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  的污染问题等。必要时,有些内容分别在各章中提到,以利于结合实际和便于教学,例如旋转气流在第三章中仅简单地叙述了基本概念,然后在第五章中结合离心式机械喷油嘴的雾化原理和烧油的旋流配风器以及在第七章中结合旋流煤粉燃烧器的工程实用来具体地讨论。

本书尽可能从各主要方面阐述对不同问题的看法,援引了主要参考资料的重要论点,

还由于阐述中可能有偏差或疏漏,以及为便于读者查找有关参考文献并扩大自学的参考范围,本书各章列出了本章的参考文献。

本书由清华大学的《燃烧理论与燃烧设备》授课教师合作编写。全书由徐旭常主编和修改定稿。各章节的作者分别是:第一、四、五章——曾瑞良;第二章和第三章的大部分——陈昌和;第六、八章和 7.1、7.6、7.7——毛健雄;第七章的 7.2、7.3、7.4、7.5 和第三章的 3.5、3.7、3.9——徐旭常。

哈尔滨工业大学秦裕琨教授在编写过程中和成稿后曾两次审阅本书,提出了许多宝贵意见,对书稿的完善给予了很大的帮助。

考虑到授课的情况不尽相同以及有关科技人员的业务范围各异,本书内容取材尽量满足各方面的要求,也为了便于自学,作者努力使本书内容尽量完整和系统化,并尽可能地附以插图。如果读者已具有了燃料和燃烧设备概述的知识,讲授或阅读时可略去第十章和 4.1、6.1、6.10。如果已学过物理化学,可以略去第二章。其他章节也可按不同的要求分别选为重点或简略。

本书还结合燃烧理论和燃烧设备的基本内容扼要地介绍了我国各高等院校和各研究开发机构以及国外的新近研究成果,力图说明近年来燃烧理论和技术的发展方向。

作 者

1988年10月

# 目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 燃料、燃烧产物及热损失 .....	1
1.1 燃料的化学成分和性质 .....	1
1.1.1 燃料的成分及燃烧特性 .....	1
1.1.2 燃料的成分分析基础和换算 .....	5
1.1.3 燃料发热量及其换算 .....	8
1.2 煤的分类 .....	10
1.2.1 按干燥无灰基挥发分 $V_{daf}$ 含量分类 .....	10
1.2.2 我国发电厂用煤的 VAMST 分类标准 .....	11
1.2.3 工业锅炉用煤的分类 .....	12
1.3 液体燃料和气体燃料 .....	15
1.3.1 黏性 .....	15
1.3.2 闪点与燃点 .....	16
1.3.3 凝固点 .....	16
1.3.4 相对密度 .....	16
1.4 液体燃料和气体燃料 .....	17
1.4.1 天然气 .....	17
1.4.2 高炉煤气 .....	18
1.4.3 发生炉煤气 .....	18
1.4.4 焦炉煤气 .....	18
1.4.5 液化石油气 .....	18
1.5 燃料的燃烧产物与烟气焓 .....	19
1.5.1 燃料的理论空气量 .....	19
1.5.2 燃料的燃烧产物 .....	21
1.5.3 烟气分析与过量空气系数 .....	23
1.5.4 空气和烟气焓的计算 .....	24
1.6 燃烧设备的热平衡及热效率 .....	26
1.6.1 锅炉热量平衡概念 .....	26
1.6.2 锅炉效率与热损失 .....	28
1.6.3 污染物的测量 .....	32
参考文献 .....	32
第 2 章 燃烧的化学动力学基础 .....	34
2.1 化学反应速率 .....	34

2.2	浓度对化学反应速率的影响	35
2.2.1	质量作用定律	35
2.2.2	反应级数	36
2.2.3	反应级数的测定	39
2.3	温度对化学反应速率的影响	40
2.3.1	Arrhenius 定律	40
2.3.2	活化能	42
2.3.3	反应速率的碰撞理论	43
2.3.4	反应速率的过渡状态理论	45
2.4	压力对化学反应速率的影响	45
2.5	链锁反应	48
2.5.1	链锁反应的概念	48
2.5.2	燃烧链锁反应的分析	49
2.5.3	不分支链锁反应	50
2.5.4	分支链锁反应——爆炸	52
2.6	气体在固体表面的吸附	54
2.6.1	物理吸附与化学吸附	54
2.6.2	吸附的影响因素分析	55
2.7	化学平衡	56
	参考文献	58
<b>第3章</b>	<b>燃烧的流体力学基础</b>	59
3.1	湍流流动与湍流模型	59
3.1.1	湍流流动	59
3.1.2	气相湍流模型	61
3.2	射流与旋转气流	64
3.2.1	直流射流的特点	64
3.2.2	等温直流自由射流	66
3.2.3	等温直流引射射流	71
3.2.4	等温旋转射流	73
3.2.5	受限射流	74
3.2.6	平行射流组	75
3.2.7	相交射流	76
3.3	气固流动	79
3.3.1	气固接触形式	79
3.3.2	空隙率	81
3.3.3	颗粒分类	82
3.4	固定床的流体力学	83
3.4.1	形成固定床的条件	83
3.4.2	固定床的流动阻力	84

3.5 流化床的流体力学	85
3.5.1 流化速度	85
3.5.2 床层压降和空隙率	91
3.5.3 鼓泡流化床	93
3.5.4 湍流流化床	98
3.5.5 快速流化床	98
3.5.6 下行移动床	100
3.6 气流床的流体力学	101
参考文献	102
<b>第4章 气体燃料燃烧理论</b>	<b>104</b>
4.1 气体燃料火焰的着火	104
4.1.1 气体火焰着火的概念	104
4.1.2 自燃热力理论	105
4.1.3 链锁自燃理论	113
4.1.4 预混可燃气体的点燃	114
4.1.5 点燃热力理论	116
4.1.6 点燃方法	120
4.1.7 可燃极限	124
4.1.8 影响可燃极限的因素	125
4.2 气体燃料火焰的传播	129
4.2.1 层流火焰传播概念	130
4.2.2 层流火焰传播理论	132
4.2.3 影响层流火焰传播的因素	138
4.2.4 湍流火焰传播的特点	142
4.2.5 湍流火焰的表面理论	144
4.2.6 湍流火焰的容积理论	146
4.3 气体燃料火焰的稳定	147
4.3.1 本生灯火焰的稳定	147
4.3.2 火焰稳定的均匀搅混热平衡原理	150
4.3.3 湍流火焰的稳定方法	156
4.4 射流火焰	161
4.4.1 预混火焰和扩散火焰概念	161
4.4.2 不等温自由射流火焰	162
4.4.3 层流射流火焰	163
4.4.4 湍流射流火焰	164
4.4.5 受限射流火焰和多股射流火焰	166
4.4.6 反扩散火焰	167
4.5 湍流射流火焰特征的解析分析	168
参考文献	174



<b>第 5 章 气体燃料燃烧设备</b> .....	175
5.1 扩散式燃气燃烧器 .....	175
5.2 完全预混式气体燃烧器 .....	178
5.3 部分预混式燃气燃烧器 .....	182
5.3.1 普通部分预混式煤气燃烧器 .....	182
5.3.2 平焰式煤气燃烧器 .....	185
5.3.3 高速煤气燃烧器和浸没式煤气燃烧器 .....	186
5.4 气体燃料燃烧污染物控制 .....	187
5.4.1 热力型 $\text{NO}_x$ .....	188
5.4.2 瞬时反应型 $\text{NO}_x$ .....	190
5.4.3 燃料型 $\text{NO}_x$ .....	191
5.5 气体燃烧的数值模拟概论 .....	193
5.5.1 层流气体燃烧数值模拟 .....	193
5.5.2 湍流气体燃烧数值模拟 .....	196
5.5.3 典型计算结果 .....	200
参考文献.....	201
<b>第 6 章 液体燃料燃烧理论</b> .....	202
6.1 液体燃料燃烧过程 .....	202
6.1.1 液体燃料的燃烧方式 .....	202
6.1.2 喷雾方式燃烧的几种物理模型 .....	202
6.1.3 液体燃料燃烧过程强化的基本措施 .....	204
6.2 液滴的蒸发 .....	205
6.2.1 斯蒂芬流 .....	205
6.2.2 相对静止高温环境下液滴的蒸发 .....	208
6.2.3 强迫气流下液滴高温蒸发 .....	214
6.3 液滴的燃烧 .....	216
6.3.1 相对静止环境下液滴燃烧 .....	216
6.3.2 强迫气流下液滴的燃烧 .....	222
6.4 液体燃料燃烧的实验研究 .....	222
参考文献.....	225
<b>第 7 章 液体燃料燃烧设备</b> .....	226
7.1 液体燃料燃烧器 .....	226
7.1.1 液体燃料燃烧对燃烧器的要求 .....	226
7.1.2 雾化喷嘴的分类 .....	227
7.1.3 油燃烧设备配风要求 .....	229
7.1.4 液体燃料雾化质量 .....	231
7.2 旋转气流特性 .....	234
7.2.1 速度分布 .....	234
7.2.2 压力分布 .....	237

7.2.3	旋流器中流体动力特性系数	237
7.3	离心式机械喷嘴工作原理	241
7.3.1	雾化过程	241
7.3.2	喷油量的计算	242
7.3.3	雾化角的计算	245
7.3.4	简单压力式喷嘴设计计算	250
7.4	回油喷嘴及计算	252
7.4.1	回油喷嘴工作原理	253
7.4.2	内回油喷嘴雾化、调节特性的理论计算	255
7.4.3	内回油喷嘴实验结果及修正	260
7.5	蒸汽喷嘴	262
7.5.1	蒸汽喷嘴	262
7.5.2	蒸汽机械雾化喷嘴	263
7.5.3	Y型蒸汽机械雾化喷嘴	264
7.6	配风装置	269
7.6.1	旋流式配风器	269
7.6.2	平流式配风器	279
7.7	液体燃料燃烧污染物生成与控制	280
7.7.1	液体燃料燃烧污染物排放标准	280
7.7.2	液体燃料燃烧污染物生成	281
7.7.3	液体燃料燃烧 $\text{NO}_x$ 的控制	283
7.8	液体燃烧的数值模拟概论	287
	参考文献	288
<b>第8章</b>	<b>固体燃料燃烧理论</b>	<b>290</b>
8.1	固体燃料燃烧过程与热解	290
8.1.1	概述	290
8.1.2	挥发分的概念	290
8.1.3	煤的热解机理	291
8.1.4	挥发分的析出量及其成分构成	293
8.1.5	煤热解反应动力学	296
8.1.6	挥发分的热力特性	299
8.2	碳燃烧的化学反应机理	300
8.2.1	碳燃烧的异相反应理论	300
8.2.2	碳燃烧的化学反应	302
8.2.3	碳燃烧反应的微观分析	303
8.2.4	碳和氧的反应机理	304
8.2.5	碳和 $\text{CO}_2$ 的反应机理	307
8.3	碳的燃烧反应过程	307
8.3.1	碳的燃烧反应速率	307

8.3.2	燃烧反应速率的影响因素	308
8.3.3	多孔碳粒的燃烧分析	311
8.3.4	多孔碳板的有效渗入深度	312
8.3.5	多孔碳球的有效渗入深度	315
8.3.6	多孔碳球的燃烧反应	316
8.4	碳燃烧的二次反应	318
8.4.1	静止或低速流动碳粒表面附近的燃烧	318
8.4.2	$Re > 100$ 流动介质中碳表面附近的燃烧	320
8.5	碳颗粒的燃尽	321
8.6	具有空间二次反应的碳球燃烧	325
8.7	煤的燃烧及燃尽	329
8.7.1	挥发分对煤燃烧过程的影响	329
8.7.2	灰分对煤燃烧过程的影响	331
8.7.3	煤粒燃尽时间	334
	参考文献	335
<b>第9章</b>	<b>煤的层燃</b>	<b>337</b>
9.1	煤的层燃过程	337
9.1.1	煤的层状燃烧概述	337
9.1.2	层燃的热质交换过程	339
9.1.3	层燃的化学反应过程	341
9.2	煤的层燃设备	343
9.2.1	固定炉排	346
9.2.2	链条炉	351
9.2.3	抛煤机炉	364
9.2.4	往复炉排炉	369
9.2.5	振动炉排炉	374
9.2.6	下饲炉	376
9.3	层燃污染物生成与控制	378
9.3.1	层燃过程中 $NO_x$ 的生成与控制	378
9.3.2	层燃过程中 $SO_2$ 的生成与控制	378
9.4	层燃的数值模拟概论	380
9.4.1	层燃炉数值模拟的方法	380
9.4.2	燃料层燃烧的数学模型	382
	参考文献	384
<b>第10章</b>	<b>煤的流化床燃烧</b>	<b>385</b>
10.1	流化床燃烧的特点	385
10.1.1	概述	385
10.1.2	鼓泡流化床燃烧的特点	385
10.1.3	循环流化床燃烧的特点	386

10.1.4	循环流化床燃烧技术的发展	388
10.2	循环流化床燃烧过程	390
10.2.1	循环流化床燃烧过程分析	390
10.2.2	燃料热量释放规律	395
10.2.3	循环流化床中的燃烧效率	401
10.3	循环流化床燃烧设备	403
10.3.1	燃煤循环流化床过程定态设计	403
10.3.2	燃烧室设计	404
10.3.3	分离器设计	406
10.3.4	料腿与返料器设计	407
10.4	循环流化床燃烧污染物生成与控制	408
10.4.1	循环流化床燃烧中脱硫	408
10.4.2	循环流化床燃烧中氮氧化物的生成与控制	413
10.4.3	循环流化床灰渣综合利用	420
10.5	循环流化床燃烧的数值模拟概述	423
10.5.1	基于实验的半关联性质的经验模型	423
10.5.2	基于微观守恒方程的计算流体力学模型	424
	参考文献	427
<b>第 11 章</b>	<b>煤粉燃烧</b>	<b>429</b>
11.1	煤粉火炬燃烧的特点	429
11.1.1	煤粉气流的点燃特性	429
11.1.2	煤粉气流的火焰特性	433
11.1.3	燃烧室特性	434
11.1.4	煤粉燃烧的污染排放与控制	438
11.1.5	煤粉燃烧对燃烧室受热面的污染特性	444
11.2	煤粉的制备	445
11.2.1	煤粉的一般特性	445
11.2.2	煤粉燃烧器和燃烧室	449
11.2.3	制粉系统	451
11.3	直流煤粉燃烧器及其布置	469
11.3.1	直流煤粉燃烧器的布置	470
11.3.2	几种常见的直流煤粉燃烧器	476
11.4	旋流煤粉燃烧器及其布置	485
11.4.1	几种常见的旋流煤粉燃烧器	485
11.4.2	旋流煤粉燃烧器的布置	491
11.5	现代大型煤粉燃烧技术	493
11.5.1	煤粉火焰的稳定方法和原理	494
11.5.2	低 $\text{NO}_x$ 煤粉燃烧技术	507
11.6	液态排渣煤粉燃烧	521

11.6.1	液态排渣煤粉燃烧的主要型式 .....	521
11.6.2	液态排渣煤粉燃烧的主要特点 .....	524
11.7	煤粉燃烧的数值模拟概述 .....	526
11.7.1	煤粉颗粒燃烧过程的数值计算 .....	526
11.7.2	煤粉燃烧过程的物理模型及其数学描述 .....	527
11.7.3	对 200MW 锅炉煤粉燃烧全过程模拟结果 .....	531
	参考文献 .....	534
<b>第 12 章</b>	<b>煤的气化</b> .....	<b>536</b>
12.1	水煤浆 .....	536
12.1.1	水煤浆的优点 .....	536
12.1.2	水煤浆的生产 .....	537
12.1.3	水煤浆的雾化 .....	538
12.2	煤的气化理论 .....	541
12.2.1	煤气化概述 .....	541
12.2.2	煤气化的主要反应过程 .....	544
12.2.3	煤气化反应动力学 .....	545
12.2.4	煤气化反应的影响因素 .....	551
12.3	煤的固定床气化 .....	554
12.3.1	固定床气化工艺原理 .....	554
12.3.2	固定床气化工艺分类 .....	555
12.3.3	固定床气化典型工艺 .....	556
12.3.4	固定床加压气化炉关键设备 .....	560
12.3.5	固定床加压气化在中国的应用及其改进 .....	563
12.4	煤的流化床气化 .....	564
12.4.1	流化床气化基本原理 .....	564
12.4.2	流化床气化的典型技术及结构 .....	565
12.5	煤的气流床气化 .....	573
12.5.1	气流床煤气化技术原理 .....	573
12.5.2	典型气流床煤气化技术 .....	576
12.6	煤气化的数值模拟概论 .....	585
12.6.1	煤气化数值模拟方法 .....	585
12.6.2	煤气化数值模拟方法 .....	586
	参考文献 .....	590

# 第 1 章 燃料、燃烧产物及热损失

## 1.1 燃料的化学成分和性质

工业和发电燃烧设备(锅炉)上所用的燃料有固体燃料(以煤为主)、液体燃料(以重油为主)和气体燃料(煤气)三大类。在我国,煤是最主要的锅炉用燃料,燃烧液体和气体燃料的工业锅炉和电站锅炉只占很小部分<sup>[1]</sup>。

### 1.1.1 燃料的成分及燃烧特性

各种固体、液体及气体燃料都属于有机燃料。燃料的化学成分主要有碳、氢、氧、氮、硫、灰分及水分。

#### 1. 碳

碳是燃料中主要的可燃元素,一般占燃料成分的 15%~90%,煤中占 50%~90%。埋藏年代越久的煤,其碳化程度越深,含碳量也越高,而氢、氧、氮等的含量则较低。例如,无烟煤的埋藏年代最久,含碳量可达 90%以上;而褐煤埋藏年代最短,含碳量为 30%~40%。

碳完全燃烧时生成二氧化碳( $\text{CO}_2$ ),此时每千克纯碳可放出 32866kJ 热量;碳不完全燃烧时生成一氧化碳( $\text{CO}$ ),此时每千克纯碳放出的热量仅为 9270kJ。

由于纯碳的着火与燃烧都较困难,因此含碳量高的煤难以着火、燃尽。例如无烟煤,虽然其发热量较高,但属于难燃的煤种,需要特殊的燃烧设备,以利于其着火与燃尽。

#### 2. 氢

氢也是燃料中的可燃成分,其发热量最高,每千克氢燃烧后的低位发热量为 120370kJ,约为纯碳发热量的 4 倍,但煤中氢的含量较少,为 2%~10%。随着碳化程度的加深,煤中的氢元素含量减少。液体燃料中的氢元素含量稍多,一般可达 15%左右。气体燃料中的含氢量较多,尤其是天然气。因此,燃用含氢较多的燃料利于减少  $\text{CO}_2$  排放。

燃料中的氢一般不含水中的氢。

#### 3. 硫

气体燃料中的硫以气体化合物的形式存在,如硫化氢。液体燃料中的硫大多是有机物大分子中的一个或多个原子,与其他碳、氢、氧原子结合。固体燃料中的硫分为两部分,一部分含在硫酸盐中,如硫酸钙、硫酸镁,称为无机硫,它不能燃烧,是灰分的一部分;另一

部分是有机硫和黄铁矿硫,可燃烧放热,称为可燃硫,但其热值不高,每千克可燃硫的发热量仅为 9100kJ。

煤中的硫铁矿硫和硫酸盐硫,是成煤过程中随地质结构的变化,从周围环境混杂进来的,因此在煤炭中是相对独立的,绝大部分可以通过煤炭洗选的物理方法分离出来。但是有机硫已经成为煤炭结构的有机组成部分,见图 1.1,硫原子与碳等原子形成了紧密结合的化学键,需要化学方法才可能分离出来。

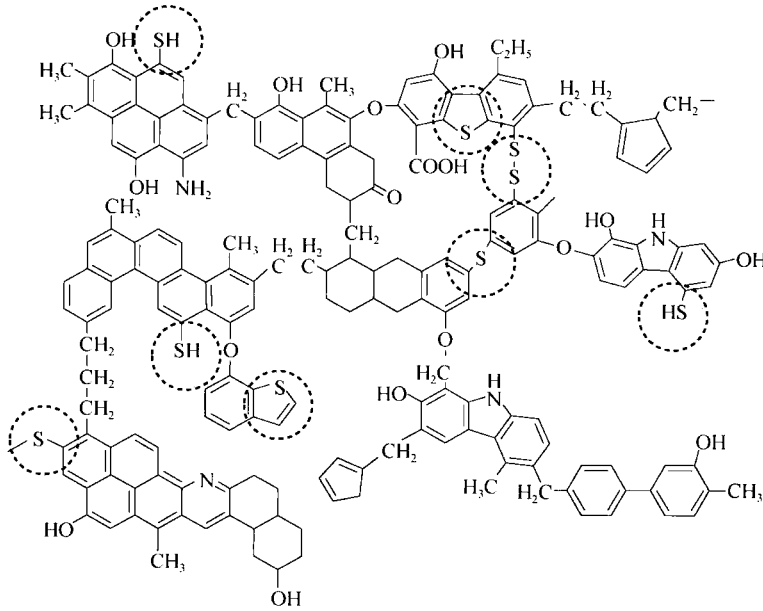


图 1.1 煤中的有机硫赋存形式

硫燃烧后在烟气中以 SO<sub>2</sub> 及少量 SO<sub>3</sub> 存在,SO<sub>3</sub> 使烟气中的水蒸气露点大大升高。烟气中的 SO<sub>2</sub> 及 SO<sub>3</sub> 能溶解于水变成 H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>(亚硫酸)及 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(硫酸),它会导致锅炉低温受热面如空气预热器的金属腐蚀及堵灰。锅炉排放的烟气中,硫的化合物将会污染环境,对人类及动植物皆有害。

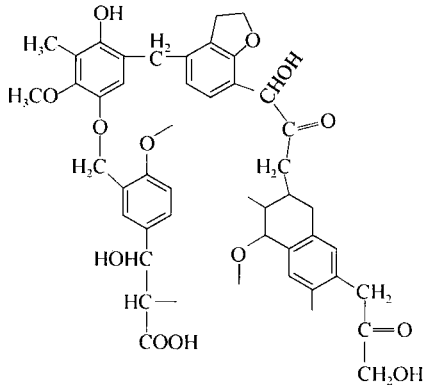


图 1.2 煤中氧的赋存形式

我国大部分煤中硫酸盐硫含量很低,可忽略不计,而黄铁矿硫在总硫分中占有较高的比例。我国大部分动力煤的含硫量为 1%~2%,南方有些地区的劣质烟煤的含硫量为 3%~5%,有的甚至高达 10%。含硫量超过 2%的燃料称为高硫燃料。燃用高硫燃料的锅炉,设计时应该重视减少低温腐蚀;为满足排放要求,需要采取脱硫措施。

#### 4. 氧

氧是燃料中的不可燃成分,可与燃料中的部分氢、碳等结合,见图 1.2。氧的存在,使燃料中的

碳、氢可燃成分相对减少,因此氧元素的存在会使燃料发热量有所下降。一般氧含量的变化范围较大,如液体燃料仅含1%左右,固体燃料煤中的含氧量则随碳化程度的加深而减少,如无烟煤的含氧量为1%~2%,而泥煤的含氧量可达40%。

燃料中的氧一般不含水中的氧。

### 5. 氮

氮也是燃料中的不可燃成分,氮元素的存在会使燃料发热量有所下降。一般氮的含量只占1%~2%。氮和氧在高温下形成氮氧化合物,包括NO、NO<sub>2</sub>及N<sub>2</sub>O,这对生态环境极为有害。目前,国内外都在研究能降低排烟中NO<sub>x</sub>含量的燃烧设备,已取得了较大的进展。在设计燃烧设备时,应充分重视NO<sub>x</sub>的原始排放问题。

### 6. 灰分

灰分是燃料中不可燃的矿物杂质在燃烧时形成的产物。灰分来自于矿物,但不同于矿物。燃料燃烧后形成的灰分成分与原来燃料里的矿物成分不完全相同,因为在燃烧过程中有分解、化合等反应。

各种燃料的灰分含量相差较大,如气体燃料及液体燃料基本上不含灰分,固体燃料煤中灰含量为10%~30%,有些劣质煤的灰含量可达50%以上,油页岩的含灰量高达70%。灰分的来源有两个,一是形成燃料的物质本身的矿物质和燃料形成过程中进入的外来矿物质,称为内在灰分;二是开采运输过程中掺杂进来的矿物质,如灰尘、沙土等,称为外在灰分。

燃料中灰分含量高,不仅导致发热量减小,而且影响燃料的着火与燃烧。由于燃烧的烟气中灰分浓度大,使受热面易受污染而影响传热、降低效率,使受热面易磨损而减少寿命,因此对排烟中所含粉尘必须采用高效除尘措施,使含尘降低至合格的排放指标,以减少向大气中的粉尘排放。对于灰分含量高于40%的劣质燃料,应该就地使用,不宜长途运输,否则经济上不划算。

灰分的熔点是非常重要的特性指标,简称灰熔点。该特性指标与灰中的成分及含量有关,大多数煤的灰分呈酸性,因其中含SiO<sub>2</sub>很多。灰中各主要成分的熔化温度各不相同,见表1.1。

表 1.1 灰中各主要成分的熔化温度

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
熔化温度/K	2503	2323	2843	3073	1823	1693	1073~1273	1073~1273

灰分的熔点与成分含量有关。例如,当SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量高,且SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值低(约为1.18)时,灰熔点大多较高;SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值升高,则灰熔点降低。

灰熔点常用三个特征温度表示,即温度DT、ST、FT。温度DT为灰的开始变形温度,ST为灰的软化温度,FT为灰的熔化温度。其测定方法采用角锥法。将灰样研碎并加黏结剂制成角锥体,将它放入可观测的高温电炉中加热。试样加热到一定温度时,角锥顶尖开始变形,该温度即为DT。再加热使角锥软化歪倒,此时的温度为ST。温度继续



升高,当角锥开始熔化时,此温度即 FT。DT、ST、FT 温度对应的灰锥形状示于图 1.3。灰熔点的测量结果与测量设备中的气氛有关,还原性气氛下测定的灰熔点比氧化性气氛中低,因此通常规定测量在半还原性气氛下进行。

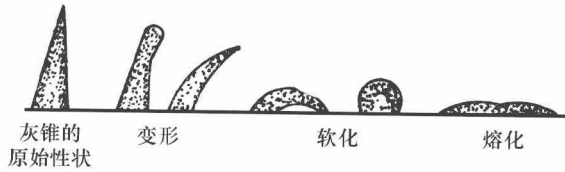


图 1.3 角锥法灰熔点温度下的灰锥状态示意图

一般煤的灰熔点(DT、ST、FT)在 1273~1873K。低灰熔点的煤在层燃炉排上燃烧时,会使炉排及炉拱上结渣,影响供给燃烧的空气与焦炭颗粒的良好接触,严重时甚至会导致层燃炉不能正常运行。流化床中,结渣将形成大粒度的团块,使流化质量受到致命的影响,导致结焦进一步恶化,甚至整个床层结为一块,因此流化床中要严格控制结渣问题。在煤粉炉中,如果飞灰处于熔化状态,就会黏在燃烧室受热面及炉墙上,熔化的灰堆积冷却成渣块,常称为结渣。结渣后的受热面吸热量减少,从而使炉温升高;炉温的升高又使结渣更为严重,这样,造成恶性循环,使锅炉不能正常运行。另外,DT、ST、FT 的间隔大小对结渣及渣的流动性也有影响,间隔较大(约 200K)的称为长渣,间隔较小的(约 100K)称为短渣。长渣凝固较慢,短渣凝固较快。为了烧低灰熔点的煤,采用所谓液态排渣炉,即灰渣在熔化流动状态下排出炉外。为提高炉内温度,常将一部分水冷壁涂敷耐火材料,以减少吸热量。升高炉温(燃烧温度最高可达 1973K)可使灰保持液态,顺墙流出排渣口。为了确保液态排渣炉能顺利排出液态渣,除要求煤的灰熔点较低外,还需了解不同温度下的灰黏度即黏温特性,以估计能否在一定温度范围内排渣。燃用低灰熔点的长渣煤有利于液态渣的形成和排出。在液态排渣炉和气化炉中,通常要控制反应温度高于灰熔点,若灰熔点高于燃烧温度,将不能有效形成液态渣层,同样影响设备的正常运行。此时,通常在燃料中掺混部分石灰石等矿物质,可在一定程度上降低灰熔点。

7. 水分

水分是燃料中的不可燃成分。其含量变化很大,如液体燃料含水分 1%~3%,固体燃料中埋藏年代短的年轻褐煤水分可达 50%,如云南昭通褐煤;老年褐煤的水分也超过 30%,如内蒙古白音华褐煤。煤中水分有三种,即外部水分、内部水分和结晶水分,见图 1.4。外部水分是附着在颗粒内外表面的水分,包括表面水和大孔水。将煤样放在空气中自然干燥,很快会失去一部分水分,并达到空气平衡的状态,失去的这部分水分称外部水分( $M_{wz}$ )。外部水分包括煤在矿层中吸收的地下水,还有存放和运输时遇雨雪,以及人为喷洒

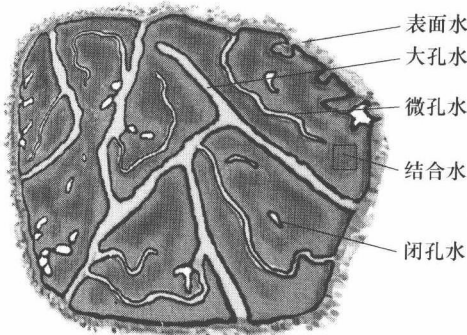


图 1.4 煤中水的赋存形式