

RANSHAO LILUN YU JISHU

# 燃烧理论与技术

刘联胜 主 编

王恩宇 吴晋湘 副主编



化学工业出版社



RANSHAO LILUN YU JISHU



# 燃烧理论与技术

刘联胜 主 编

王恩宇 吴晋湘 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要讲述燃料性质、燃烧基础理论和燃烧技术等内容，具有较强的知识性、系统性和技术性；同时结合每一章所讲述的内容，在章节末尾都设计了思考题，有助于加强读者对概念的理解。

本书可作为高等院校热能工程等相关专业本科生、研究生的教材。同时也适合从事热能工程、能源动力等相关领域工作的技术人员和科研人员阅读。

# 燃烧理论与技术

主编 刘联胜

副主编 张晋吴 宅恩王

## 图书在版编目 (CIP) 数据

燃烧理论与技术/刘联胜主编. —北京: 化学工业出版社, 2008.2  
ISBN 978-7-122-01983-7

I. 燃… II. 刘… III. 燃烧理论 IV. 0643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 010064 号

责任编辑: 刘兴春

责任校对: 陶燕华

文字编辑: 刘莉珺

装帧设计: 史利平

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: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$  字数 381 千字 2008 年 6 月北京第 1 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: 38.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

目前,人类生活、生产所需要的热能几乎全部来源于燃料的燃烧,因此,了解燃烧理论和燃烧技术的基本知识是十分必要的。现在,国家提出“建设节约型社会,实现可持续发展”的总体目标,对于从事热能工程、能源动力等相关领域工作的技术人员来说,全面掌握燃烧理论、深入研究燃烧技术就具有更加迫切的现实意义。

“燃料与燃烧”是高等院校热能工程专业的专业基础课程之一,主要讲述燃料性质、燃烧基础理论和燃烧技术等内容。对燃烧理论进行学习,要求学生具备较为全面的传热学、热力学、流体力学以及化学动力学基础知识。由于燃烧理论所涉及的内容庞杂,因此,教学过程中,很多学生反映课本内容缺乏系统性,易于产生概念混淆等问题;而通过对毕业生的回访调查,反馈回来的意见是“理论知识与工程实际联系不够紧密”。基于上述现实情况,为了提高教学质量、改进教学方法,我们针对热能工程专业组织编写了《燃烧理论与技术》。

在该书的编写过程中,我们力争做到以下几点。(1)加强概念与概念之间的衔接,使燃烧的理论更加系统化。例如,在讲述火焰传播与火焰稳定性的时候采用层层深入的方法,逐渐引出所关注的问题,这将更有利于加深读者的理解。(2)加强了理论知识与工程实际的结合。例如,在液体燃料燃烧一章中,不再仅仅局限于雾化喷嘴的介绍,而是从实际出发,使用较大的篇幅来介绍配风装置,就是为了避免让读者产生“只要雾化质量高,燃烧效果就一定好”的错误认识。(3)利用实验结果对燃烧理论模型进行说明。例如,在“重油油滴的燃烧过程”、“管内火焰传播”等小节中,我们都使用了最新的研究成果对燃烧物理模型进行了说明,可以使读者得到更为直观的认识。(4)既注重燃烧理论的讲解,又注重燃烧技术的介绍。在燃烧理论的讲解过程中,尽量联系日常生活中的实际情况,做到深入浅出,不让读者产生抽象、枯燥的感觉。而对燃烧技术的介绍,则注重于“新”,例如,对“脉动燃烧技术”、“沉浸燃烧技术”、“水煤浆技术”等的介绍,尽量做到不与工程实际脱节。

本书由12章内容构成,其中第1~3章介绍固体燃料、液体燃料和气体燃料的物理性质,第4章介绍燃料燃烧的理论计算,第5章是化学动力学基础知识,第6章是着火与熄火的条件分析,第7章重点讲述预混可燃气中火焰传播和火焰稳定性等问题,第8章、第9章则是扩散燃烧及气体燃料燃烧技术,第10章对液体燃料燃烧过程与燃烧技术进行了介绍,第11章重点介绍了炭粒的燃烧机理以及煤的燃烧过程、燃烧技术等问题,第12章则介绍了燃烧污染的发生与防治。结合每一章所讲述的内容,在章节末尾都设计了思考题,目的是加强读者对概念的理解。

本书主要由河北工业大学王恩宇(第1~4章)、刘联胜(第5~11章)、杨华(第12章)和吴晋湘(部分小节、审稿)编写,刘联胜任主编。

在本书编写过程中,参阅与引用了很多同行专家的书籍与成果,在相应的章节我们都进行了标注,在此,对这些同行专家表示衷心的感谢。

限于作者水平和时间,本书尚有不足及疏漏之处,衷心希望读者给予批评指正。

编者  
2008年1月

# 目 录

绪论	1
<b>1 固体燃料</b>	<b>3</b>
1.1 引言	3
1.2 煤炭的形成及种类	4
1.3 煤的化学组成	5
1.4 煤的成分分析基准	7
1.5 煤的工业分析	10
1.6 煤的发热量及其测定	13
1.7 灰的熔融性	17
1.8 煤的工业分类	18
思考题	23
参考文献	24
<b>2 液体燃料</b>	<b>25</b>
2.1 引言	25
2.2 燃料油及其分类	25
2.3 燃料油成分及发热量	31
2.4 燃料油的主要使用性能	32
思考题	36
参考文献	36
<b>3 气体燃料</b>	<b>37</b>
3.1 引言	37
3.2 单一气体的物理化学性质	37
3.3 气体燃料成分及发热量	41
3.4 常用气体燃料	42
3.5 气体燃料的特性	48
思考题	48
参考文献	49
<b>4 燃料的燃烧计算</b>	<b>50</b>
4.1 引言	50
4.2 燃料燃烧所需的空气量计算	50
4.3 燃料完全燃烧时的烟气量计算	53
4.4 燃料不完全燃烧时的烟气量计算	57
4.5 烟气分析及其结果的应用	61
4.6 燃料的燃烧温度	67

思考题 .....	72
参考文献 .....	73
<b>5 化学动力学基础</b> .....	74
5.1 引言 .....	74
5.2 化学反应速率和质量作用定律 .....	74
5.3 化学反应机理 .....	76
思考题 .....	84
参考文献 .....	84
<b>6 预混可燃气体的着火与熄火</b> .....	85
6.1 引言 .....	85
6.2 闭口系统的热自燃理论 .....	85
6.3 开口系统的热自燃理论 .....	92
6.4 链锁自燃理论 .....	96
6.5 点燃理论 .....	98
思考题 .....	102
参考文献 .....	103
<b>7 预混可燃气体中的火焰传播机理</b> .....	104
7.1 引言 .....	104
7.2 层流火焰传播及火焰前锋 .....	104
7.3 层流火焰前锋的内部结构及其传播机理 .....	107
7.4 影响层流火焰传播速度的主要因素 .....	111
7.5 层流火焰传播速度的实验测量 .....	114
7.6 预混可燃气体的湍流火焰传播 .....	116
7.7 预混火焰的稳定性 .....	121
思考题 .....	130
参考文献 .....	131
<b>8 气体燃料的扩散燃烧</b> .....	132
8.1 引言 .....	132
8.2 动力燃烧与扩散燃烧 .....	132
8.3 射流混合过程 .....	134
8.4 层流射流扩散火焰 .....	142
8.5 湍流射流扩散火焰及其稳定性 .....	144
8.6 纵向受限同心射流火焰 .....	146
思考题 .....	147
参考文献 .....	147
<b>9 气体燃料燃烧技术及燃烧器</b> .....	149
9.1 引言 .....	149
9.2 无焰燃烧技术及无焰燃烧器 .....	150
9.3 有焰燃烧技术及有焰燃烧器 .....	154
9.4 $\text{NO}_x$ 生成机理及低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术 .....	158
思考题 .....	163
参考文献 .....	163

<b>10 液体燃料的燃烧</b> .....	164
10.1 引言.....	164
10.2 液体燃料燃烧的特点.....	165
10.3 雾化过程及雾化机理.....	166
10.4 雾化特性指标.....	169
10.5 燃油喷嘴及其雾化特性.....	172
10.6 单个油滴的蒸发与燃烧.....	181
10.7 油雾的燃烧.....	185
10.8 液体燃料燃烧技术及燃烧装置.....	187
10.9 燃油乳化技术.....	192
思考题.....	195
参考文献.....	195
<b>11 固体燃料的燃烧</b> .....	197
11.1 引言.....	197
11.2 煤的燃烧过程.....	198
11.3 碳粒的燃烧过程与燃烧机理.....	200
11.4 碳粒的着火与熄火.....	209
11.5 煤的燃烧方式.....	211
11.6 水煤浆技术.....	215
思考题.....	217
参考文献.....	218
<b>12 燃烧污染与环境保护</b> .....	219
12.1 引言.....	219
12.2 硫化物的生成机理与防治.....	220
12.3 烟尘的生成与防治.....	221
12.4 燃烧噪声的形成与控制.....	224
思考题.....	225
参考文献.....	225
<b>附录</b> .....	226
附表1 不同温度下的饱和水蒸气含量.....	226
附表2 气体平均比热容.....	226
附表3 化学反应平衡常数.....	227

# 绪 论

燃烧是日常生活中最常见的一种现象，也是工业生产中一种最基本的能量转换方式。随着现代工业的发展，人类越来越倚重于能源，而对能源的利用多是通过燃烧方式来实现的，经过燃烧反应，燃料的化学能以热能的形式释放出来，并为人所用。但是，到目前为止，由于人类对燃烧的认识仍然不够深入、燃烧技术依旧相对落后，因此造成煤炭、石油、天然气等一次常规能源的燃烧效率不高、燃烧污染物排放严重等问题，并直接导致了当前的能源危机与环境危机。所以，学习与掌握燃烧理论、研究与探讨燃烧技术具有重要的现实意义。

燃烧是指燃料与氧化剂之间发生的强烈的化学反应，同时伴随着发光、发热的现象。但是，燃烧并不单纯是一个化学过程，其间还涉及流动、传质、传热等过程的综合作用，因此燃烧是一个极其复杂的物理化学过程。燃烧学是研究燃料和燃烧过程中的着火、点火、熄火及反应机理的学科，而研究所获得的系统性成果就是燃烧理论，燃烧技术则是指在燃烧理论指导下合理组织燃烧过程的技术。迄今，燃烧学依然是一门年轻的学科，其绝大多数理论与技术都是在工业革命后发展起来的。

恩格斯在《自然辩证法》一书中曾说：“人们只有在学会摩擦起火之后，才第一次使无穷无尽的自然力替自己服务”。到18世纪中叶，科学相对进步的欧洲仍然被错误的“燃素说”所统治，“燃素说”是德国化学家斯塔尔在《化学基础》一书中提出“火的微粒由燃素构成，物质燃烧释放出燃素，有些物质不能够燃烧是因为缺少燃素”的观点，这种观点统治了欧洲将近一百年的时间。1783~1789年，法国化学家拉瓦锡先后在“燃烧通论”和“化学纲要”两部著作中对燃烧进行了合理解释，首次提出燃烧是一种“氧化反应”的观点，俄罗斯科学家罗蒙诺索夫根据实验结果也得到了相同的结论。至此，人类对于燃烧才有了一个正确的认识。

19世纪中期，工业革命推动了化学科学的发展，分子学说建立后，人们开始用热化学、热力学的方法来研究燃烧现象，相继发现了燃烧热、绝热燃烧温度、燃烧产物平衡成分等燃烧特性。20世纪初，苏联化学家谢苗诺夫和美国科学家刘易斯等发现燃烧具有分支链锁反应的特点。20世纪20年代，苏联的泽利多维奇、弗兰克·卡梅涅茨基和美国的刘易斯等人又进一步发现燃烧过程是化学反应动力学和传热、传质等物理因素的相互作用的过程，并建立了着火与火焰传播理论。40~50年代，在对预混火焰和扩散火焰、层流火焰和湍流火焰、液滴燃烧和碳粒燃烧进行深入研究之后，科学家认识到主导燃烧过程的往往不是化学动力学因素而是流体动力学因素。至此，燃烧理论初步形成。

20世纪50~60年代，航空航天技术的发展使燃烧学的研究扩展到喷气发动机、火箭等问题中，美国力学家冯·卡门和中国科学家钱学森提出用连续介质力学方法来研究燃烧问



题,另外,许多学者运用粘性流体力学和边界层理论对层流燃烧、湍流燃烧、着火、火焰稳定和燃烧振荡等问题进行了定量分析,最终发展成为“反应流体力学”。

20世纪70年代初,英国科学家斯鲍尔丁等人利用计算流体力学方法来研究燃烧问题,将燃烧学、反应流体力学、计算流体力学和燃烧室工程设计有机地结合起来,开辟了研究燃烧理论及其应用的新途径。而自70年代中期以后,应用激光技术和气体分析技术开始用于直接测量燃烧过程中气体和颗粒的速度、温度、组分浓度等参数,而这些测量结果加深了人们对燃烧现象的认识。随后,燃烧学开始与湍流理论、多相流体力学、辐射传热学和复杂反应的化学动力学等学科相互渗透,燃烧理论发展到了一个更高的阶段。

燃烧理论的发展促进了燃烧技术的进步。能源动力、建材化工、环境工程、航空航天以及火灾防治等各个领域都涉及燃烧问题,目前,各种新型燃烧技术都有不同程度的进步,诸如高强度燃烧、低品位燃料燃烧、水煤浆燃烧、流化床燃烧、催化燃烧、脉动燃烧、渗流燃烧、纯氧或富氧燃烧等,而燃烧污染物控制、火灾成因与控制等技术也越来越受到人们的重视。

现在,国家提出“建设节约型社会,实现可持续发展”的总体目标,“十一五”规划又要求“2010年单位GDP能耗降低20%”,若是仅仅依靠调整产业结构来降低能源消耗,是难以实现上述目标的,而必须借助科技手段来完成。因此,只有掌握燃烧理论,开发研究新型的燃烧技术,才能达到提高燃烧效率,降低能源消耗率,减少污染物排放的目标。

# 1

## 固体燃料

### 1.1 引言

人们将能够在空气中燃烧的物质称为可燃物，但不能将所有的可燃物都称为燃料。而只有在自然界中有大量的蕴藏，且在经济上值得利用其燃烧热的可燃物才可以称为燃料。所以，人们通常所说的燃料，指的是在自然界中大量存在或生产的，能与氧发生激烈氧化反应，放出大量热量，并在经济上能合理利用的物质的总称，比如煤炭、石油、天然气及其加工产品。

燃料的物态和获得方法是现代燃料的最一般的分类方法。燃料按照其物态可以分为固体燃料、液体燃料和气体燃料。按照燃料的获得方法可分为天然燃料和人造燃料。常用燃料的分类见表 1-1。

表 1-1 燃料的分类

燃料的物态	来源	
	天然燃料	人造燃料
固体燃料	煤炭、木材等	焦炭、型煤、木炭等
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、重油等
气体燃料	天然气	焦炉煤气、高炉煤气、水煤气、液化石油气、沼气等

人类利用燃料的历史伴随了人类发展的整个过程。人类从学会用火开始，就以薪柴、秸秆和动物粪便等生物质燃料用于生活。这个以薪柴等生物质燃料为主要燃料的时代，延续了很长的一段时间。到 18 世纪的产业革命后，煤炭的大量利用取代了柴薪作为主要能源的时代。随着石油资源的发展，人类逐渐进入了燃料利用的新时期。特别是 20 世纪 50 年代，美国、中东、北非相继发现了巨大的油田和气田，西方国家很快从以煤炭为主转换到以石油和天然气为主要燃料的时代。

从作为能源来看，燃料在人们生产和生活中的作用可谓是巨大的。在世界一次能源消费结构中，燃料能源一直都占到了极大的比重。

自然界中存在的固体燃料有煤炭、木材等，以及由此加工获得的焦炭、木炭、型煤等。在工业生产中，煤是最常用的固体燃料，这里只以煤炭为例加以介绍。

煤炭是古代的植物体经过漫长年代的演变而成的，含碳量一般为 46%~97%。煤炭是重要的燃料和化学工业原料。煤炭在地球上的储量非常丰富。

## 1.2 煤炭的形成及种类

### 1.2.1 煤炭的形成

成煤必须具备4个先决条件：a. 植物条件；b. 气候条件；c. 地理条件；d. 地壳运动条件。煤炭是古代的有机物（主要是植物）的遗体，因为地壳运动而埋没地下，在适宜的地质环境中经过生物及化学的变质作用而形成的。大体可分为两个阶段，第一阶段是泥煤炭化阶段，即由植物转变成泥炭阶段。当植物枯死之后，堆积在充满水的沼泽中，开始是水存在的氧气不足，后来在水面下隔绝空气，并在细菌的作用下，直到植物的各部分不断分解，相互作用，最后植物的遗体变成了褐色或黑褐色的淤泥物质，这就是泥炭。这个过程，叫做泥炭化过程。这个阶段需要漫长的地质历史时期，需要进行千百万年。第二阶段，由泥炭转变成褐煤，褐煤转变成烟煤，烟煤再转变成无烟煤阶段。当泥炭层形成后，有水经常冲刷大陆的低洼地方，带来了大量的砂石，泥炭层逐渐形成岩层（称为顶板）。被埋在顶板下的泥炭层在顶板岩石层的压力作用下，发生了压紧、失水、胶体老化、硬结等一系列变化，同时它的化学组成也发生了缓慢的变化，逐步变成密度较大、较致密的黑褐色的褐煤。当顶板逐渐加厚，顶板的静压力逐渐增高，煤层中温度也逐渐升高后，煤质便发生变化，逐渐由成岩作用变成了以温度影响为主的变质作用。这样褐煤逐渐变成了烟煤、无烟煤。如果有更高的温度，最终可能变成石墨。

### 1.2.2 煤的煤化种类

煤炭形成的过程中，由于受到压缩而坚固，其中所含水分及挥发物不断减少，因此碳的含量不断增加，而氧、氢、氮等含量则不断减少，这一过程称为煤的煤化过程。根据煤的煤化程度可以把煤分为四种大的类型：泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤。

#### (1) 泥煤

泥煤（peat coal）是地质年代最短的煤，有时又称为泥炭。正如煤的形成过程中所述的，泥煤埋在地下年代不长，所以在结构上尚保留着植物遗体的痕迹，质地疏松，吸水性强，水分含量极高，多达85%~90%，开采后经过风干，水分含量可降到25%~35%。此外，泥煤的含氧量也最多（高达28%~38%），含碳量较少，是煤中含碳量最少的煤。在使用性能上，泥煤的主要用途是锅炉燃料和气化原料，也可制成焦炭供小高炉使用。由于以上特点，泥煤的工业价值不大，更不适宜长途运输，只可作为地方性燃料在产区附近使用。所以，在煤炭的工业分类中甚至不包括泥煤。

我国泥煤产量不多，产区主要在西南各省及浙江等地。

#### (2) 褐煤

褐煤（brown coal）是泥煤经过进一步的煤化后形成的，由于能将热碱水染成褐色而得名。呈褐色、黑褐色或黑色，一般暗淡或呈沥青光泽，不具粘结性。其物理、化学性质介于泥煤和烟煤之间。其特点是水分高、密度小、挥发分高、不粘结、化学反应性强、热稳定性差、发热量低，含有不同数量的腐殖酸。天然状态的含水量为30%~60%，风干后仍含水10%~30%，氧含量常达15%~30%，在空气中易风化碎裂。多被用作燃料和气化原料，含油率达到工业要求时可用于低温干馏，制取焦油及其他化工产品，也可用来提取褐煤蜡、腐殖酸，制造磺化煤或活性炭。一号褐煤还可以作农田、果园的有机肥料。

我国主要褐煤产地为东北（沈阳矿区、舒兰矿区）、华北（平庄矿区、扎赉诺尔矿

区)等。

(3) 烟煤

烟煤 (bituminous coal) 是自然界分布最广、储量最大、品种最多、用途最广的煤种。全部为黑色, 密度一般在  $1.25 \sim 1.45 \text{g/cm}^3$  之间。烟煤的煤化程度高于褐煤而低于无烟煤, 其特点是挥发分产率范围大, 单独炼焦时从不结焦到强结焦均有, 燃烧时有烟, 火焰较长, 易于着火燃烧。烟煤是重要的动力工业燃料和化学工业原料。由于烟煤具有其他煤种所缺少的焦结性, 所以某些烟煤可作为炼焦原料而成为冶金工业不可缺少的燃料。

在烟煤中含水分、灰质较高者常称为劣质烟煤, 其低位发热量大约只有  $11000 \sim 12500 \text{kJ/kg}$ , 而灰分含量却达到  $40\% \sim 50\%$ , 不易着火燃烧。

烟煤和劣质烟煤的产地遍布全国, 烟煤中的贫煤产地主要在华北 (西山矿区、东山矿区)、西北 (铜川矿区、蒲白矿区)、华东 (淄博矿区) 及中南 (新密矿区、鹤壁矿区) 等。

#### (4) 无烟煤

无烟煤 (anthracite coal) 又称白煤或硬煤, 是煤化程度最高的一种煤, 密度为  $1.4 \sim 1.9 \text{g/cm}^3$ 。其特点是挥发分低、固定碳高 (含碳最高达  $89\% \sim 97\%$ )、密度大、硬度高、燃烧时烟少火苗短、火力强。无烟煤主要用做民用和动力燃料, 还可以作为制造合成氨的造气原料。低灰、低硫和可磨性好的无烟煤不仅可以做高炉喷吹及烧结铁矿石用的燃料, 而且还可以制造各种碳素材料, 如碳电极、阳极糊和活性炭的原料。

无烟煤在我国产地主要分布在华北、中南及西南等地区。

## 1.3 煤的化学组成

各种煤都是由多种有机可燃质、不可燃的矿物质灰分和水分组成。煤的化学组成和含量依靠煤的分析获得。煤的分析有元素分析和工业分析两种。元素分析是分析煤的碳 (C)、氢 (H)、硫 (S)、氧 (O)、氮 (N) 五种元素 (一般称为可燃质) 占煤的质量百分数, 并测定不可燃的矿物质灰分 (A) 和水分 (M)。从理论上讲, 煤的元素分析应是煤的有机结构中的元素分析, 但在实际上, 却包含了某些无机矿物质中的元素含量。工业分析是分析煤的水分 (M)、挥发分 (V)、灰分 (A) 和固定碳 (FC) 占煤的质量百分数以及煤的发热量  $Q$ 、焦渣特性鉴定和灰熔点测定、煤的颗粒度测定等。煤的工业分析可在煤的使用单位进行, 而煤的元素分析在煤的研究、管理机构进行。煤的化学组成一般由元素分析确定。下面分别对煤中各元素特性及其对燃烧的影响加以说明。

### (1) 碳

碳是煤中的最主要可燃元素, 在煤中的含量最大, 可达到  $15\% \sim 90\%$ , 煤的煤化程度愈高, 其含碳量愈大。碳在燃烧时会放出大量的热量, 其发热量为  $32783 \text{kJ/kg} (\text{C} \rightarrow \text{CO}_2)$ , 不完全燃烧时仅为  $3270 \text{kJ/kg} (\text{C} \rightarrow \text{CO})$ 。

煤中碳的存在主要呈有机化合物状态, 和氢、氧、硫等元素结合, 煤化程度高的煤也可能存在游离态的碳。碳是一种较难燃烧的元素, 煤含碳量越多, 着火和燃烧越困难, 但发热量会较多。

### (2) 氢

氢是煤中第二重要元素, 也是煤中的可燃元素。而且是燃料中发热量最高、最有利于燃烧的元素, 其发热量可达  $120370 \text{kJ/kg} (\text{H} \rightarrow \text{H}_2\text{O})$ , 不过煤中含氢量一般不高, 只有  $2\% \sim 6\%$ , 而且煤化程度越高煤的氢含量减小。

煤中氢一部分以自由氢的形式存在, 与碳、硫等化合为各种可燃有机化合物。这些自由

氢在煤受热时易裂解而析出，对着火燃烧有利。另一部分氢则与氧化合形成结晶水，这部分氢称为化合氢，显然不能参与燃烧。化合氢的含量一般很少，在分析时一般不予考虑。氢含量越高的煤着火越容易，煤发热量也越高，但在燃烧时容易分解出炭黑粒子，即容易冒黑烟。

### (3) 硫

硫是燃料中最有害的可燃元素，其发热量不大，仅为  $9040\text{kJ/kg}(\text{S} \rightarrow \text{SO}_2)$ 。硫在燃烧后会生成  $\text{SO}_2$  与  $\text{SO}_3$  气体，对动植物产生毒害作用，还会与水蒸气结合形成亚硫酸和硫酸蒸气，如果排放到大气后会形成酸雨或硫酸烟雾造成环境污染，或者对燃烧装置金属表面产生腐蚀作用，尤其是常在燃烧设备中造成尾部受热面的酸腐蚀。煤用于合成氨制半水煤气时，由于煤气中硫化氢等气体较多不易脱净，易毒化合成催化剂而影响生产。煤用于炼焦时，煤中硫会进入焦炭，使钢铁变脆。钢铁中硫含量大于  $0.07\%$  时就成了废品。

我国煤的含硫量变化范围很大 ( $0.2\% \sim 8\%$ )。我国现行国家标准 (GB/T 15224.2—2004，煤炭质量分级第 2 部分：硫分) 中把煤中的硫分分为 5 级：高硫分煤、中高硫煤、中硫分煤、低硫分煤和特低硫煤。

煤中硫常以三种形式存在，即存在于有机物中的有机硫 ( $\text{S}_o$ )、黄铁矿硫 ( $\text{S}_p$ ) 和硫酸盐硫 ( $\text{S}_s$ )，三者合称为全硫 ( $\text{S}_t$ )。其中前两者可参与燃烧，故计入燃料可燃质中称为可燃硫，后者则不能参与燃烧而计入燃料灰质中。我国煤中硫酸盐硫含量很少，一般全硫若不特别说明即指可燃硫。

### (4) 氧

氧为不可燃元素。由于氧与碳、氢等可燃元素构成氧化物而使它们失去了进行燃烧的可能性从而降低了燃烧放热量，所以煤中的氧也是一种有害元素。煤中含量变化很大，随煤化程度加深而减少，如泥煤中的含氧量达  $40\%$ ，而无烟煤中的含氧量仅有  $1\% \sim 2\%$ 。氧的存在形式也有两种，多数与碳、氢等构成有机化合物，少数以游离态而存在，可以起到助燃作用。

### (5) 氮

氮也为不可燃元素，是煤中唯一的完全以有机状态存在的元素。一般情况下不参与燃烧，但在高温或有催化剂的条件下部分氮可和氧作用生成  $\text{NO}_x$ ，污染大气环境。煤中氮的含量一般不高，约为  $0.5\% \sim 2\%$ 。

### (6) 灰分

煤中的不可燃矿物质称为灰质，煤经燃烧后残留的不可燃残留物称为灰分。可见灰分是灰质经过高温分解和氧化后形成的固体残留物。由于直接测定燃料中的灰质含量比较困难，通常通过测量灰分来反映燃料中的不可燃杂质的多少。它们中的一部分是由原始成煤植物中的和由成煤过程进入的矿物质所形成的灰分，称为内在灰分，另一部分是在燃料开采、运输和贮存过程中由外界带入的矿物质所形成的灰分，称为外在灰分。灰分的物质成分大致为  $\text{SiO}_2$  占  $40\% \sim 60\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  占  $15\% \sim 35\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  占  $5\% \sim 25\%$ 、 $\text{CaO}$  占  $1\% \sim 15\%$ 、 $\text{MgO}$  占  $0.5\% \sim 8\%$ 、 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  占  $1\% \sim 4\%$ <sup>[1]</sup>。各种煤中的灰分含量差别很大，一般为  $5\% \sim 50\%$ 。

煤中的灰分是一种有害成分，也是影响燃烧质量的主要成分。从以下几个方面体现出来：第一，灰分大，可燃物的含量会减少，从而使煤的发热量下降。第二，灰分大的煤，由于灰分的包裹作用影响煤的着火和燃烧，使煤不易完全燃烧。第三，灰分大，烟气中灰粒含量多，使受热面磨损严重；灰分大，排入大气中的灰量大而污染环境；灰分大，受热面积灰

增多, 受热面传热能力下降, 使燃烧设备热效率降低。

为了提高煤的使用性能, 提高煤的燃烧效率并降低粉尘的排放, 需要对煤进行处理以减少煤中的灰分。减少外在灰分可以用浮选等物理选矿方法来清除, 一般可以使灰分降到 8% 以下。减少内在灰分必须将煤磨细后, 用化学液体 (如氢氟酸) 去与灰分作用, 然后再用碱液洗掉酸, 最后用水洗。这一过程成本昂贵, 对环境污染严重。

#### (7) 水分

水分是煤中的不可燃杂质, 也是燃料中的有害成分, 它不仅减低了燃料的可燃质含量使燃料发热量降低, 而且在燃烧时还要消耗热量使其蒸发和将蒸发的水蒸气加热, 延长了煤的点燃时间、降低炉温而恶化燃烧。燃用高水分的煤时, 烟气体积增大, 锅炉排烟热损失增加, 使热效率降低, 同时还可能加剧尾部受热面的低温腐蚀和堵灰。煤中最大含量可达 50%, 随着煤的地质年代越久, 煤中水分含量降低。比如泥煤水分含量为 40%~50%, 褐煤水分含量为 10%~40%, 烟煤和无烟煤的水分含量较低。

煤中的水分指的是游离水分, 正如前所述, 化合水分已计入化合氢中。煤中水分可分为外在水分 ( $M_f$ ) 和内在水分 ( $M_{inh}$ )。前者机械附着和润湿在燃料颗粒表面及直径大于  $10^{-5}$  cm 的大毛细孔中, 通过自然干燥就可以去除; 后者吸附和凝聚在颗粒内部直径小于  $10^{-5}$  cm 的毛细孔中, 需要在能保持温度在 105~110℃ 的干燥箱中加热 1~2h 去除。外在水分和内在水分的总和称为燃料的全水分 ( $M_t$ )。

不同煤的水分含量差别很大, 低者仅为 2%~5%, 高者可达 50%~60%, 一般来说, 随煤的煤化程度增高而逐渐减少。

煤的元素组成及水分含量随着煤的煤化程度不同而不同, 各种煤的元素成分和水分的含量大致如表 1-2 所列。

表 1-2 煤的元素组成及水分含量<sup>[2]</sup>

煤种	C	H	O	N	S	$M_t$	$M_{inh}$
泥煤	60~70	5~8	25~35	1~3	0.3~0.6	60~90	40~50
褐煤	70~80	5~8	15~25	1.3~1.5	0.2~0.35	30~60	10~40
烟煤	80~90	4~5	5~15	1.2~1.7	0.3~0.4	4~15	1~8
无烟煤	90~98	1~3	1~3	0.2~1.3	0.4	2~4	1~2

实际上, 煤中所含的元素有数十种之多, 但通常所说的煤的元素组成只指以上五种元素。其他含量很少的元素只当作煤中的伴生元素或微量元素, 比如磷、氟、氯、汞、砷、铍、镉、硒、铅、锰、铬、铂、铜、锆、镓、铀、钍等。

煤的元素分析成分测定方法都在国家标准中作了相应的规定。比如, 在国家标准《煤的元素分析方法》(GB/T 476—2001) 中规定了煤中碳、氢、氮的测定方法和氧含量的计算方法。在国家标准《煤中各种形态硫的测定方法》(GB/T 215—2003) 和《煤中全硫的测定方法》(GB/T 214—1996) 中规定了硫的测量方法。

## 1.4 煤的成分分析基准

固体燃料的组成用各成分的质量百分数来表示。对于既定的燃料, 其中的碳、氢、硫、氧和氮的绝对含量是不变的, 但燃料的水分和灰分会随着开采、运输、贮存乃至气候等条件的变化而变化, 从而使燃料各组成成分的质量百分数也随之变化。为此, 应根据实际的需要, 采用不同的分析基准来表示燃料的成分。只有分析基准相同的分析数据, 才能确切地说

明燃料的特性,评价和比较燃料的优劣。

根据 GB 3715—1996《煤质及煤分析有关术语》规定,煤质分析结果的表示方法通常用如下的分析基准。

#### (1) 收到基

收到基 (as received basis, 在旧标准中称为应用基) 是以收到状态的煤为基准,也即对进厂的原煤或炉前应用的燃料取样,以下角码“ar”作为标记。收到基将包括全部水分和灰分的燃料各种成分之和当作 100%,即

$$C_{ar}\% + H_{ar}\% + S_{ar}\% + O_{ar}\% + N_{ar}\% + A_{ar}\% + M_{ar}\% = 100\% \quad (1-1)$$

式中,  $C_{ar}$ 、 $H_{ar}$ 、 $S_{ar}$ 、 $O_{ar}$ 、 $N_{ar}$ 、 $A_{ar}$ 、 $M_{ar}$  分别表示燃料中碳、氢、硫、氧、氮、灰分和水分的收到基质量百分数。

收到基成分常应用于燃烧设备的燃烧、传热及热工试验的计算中。比如,煤的水分通常用收到基水分  $M_{ar}$  表示,来表征煤的干湿程度。

#### (2) 空气干燥基

空气干燥基 (air dried basis, 在旧标准中称为分析基) 是以与空气湿度达到平衡状态的煤为基准,即以在实验室条件 (温度为 20°C, 相对湿度为 60%) 下进行自然干燥 (除去外在水分) 后的煤取样,以下角码“ad”作为标记,即有

$$C_{ad}\% + H_{ad}\% + S_{ad}\% + O_{ad}\% + N_{ad}\% + A_{ad}\% + M_{ad}\% = 100\% \quad (1-2)$$

为了避免水分在分析过程中变动,国家标准中规定,在实验室进行燃料成分分析时,均采用空气干燥基成分测定,其他的“基”均据此导出。

#### (3) 干燥基

干燥基 (dry basis) 是以假想无水状态的煤为基准,即以除去全部水分的煤样作为基准。用下角码“d”作为标记。干燥基成分可写为

$$C_d\% + H_d\% + S_d\% + O_d\% + N_d\% + A_d\% = 100\% \quad (1-3)$$

干燥基中去除了全部的水分,所以当燃料水分变化时,并不影响干燥基成分。因此,用于干燥基灰分  $A_d$  更能确切反映煤中所含灰分的高低。

#### (4) 干燥无灰基

干燥无灰基 (dry ash-free basis, 旧标准中称为可燃基) 是以假想无水、无灰状态的煤为分析基准,即以可燃质成分作为百分之百,以下角码“daf”作为标记,即有

$$C_{daf}\% + H_{daf}\% + S_{daf}\% + O_{daf}\% + N_{daf}\% = 100\% \quad (1-4)$$

不难看出,燃料的干燥无灰基成分除去了容易受外界因素影响的全部水分和灰分,而只针对可燃质成分进行分析,故其成分比较稳定,常用于判断煤的燃烧特性和进行煤的分类。比如煤矿的煤质资料中常以干燥无灰基成分表示煤的组成,而煤的工业分类中也是以干燥无灰基挥发分  $V_{daf}$  作为分类依据。

除上述四种常用的基准外,还规定了以下三种相关基准<sup>[3]</sup>。干燥无矿物质基 (dry mineral-matter-free basis): 以假想无水、无矿物质状态的煤为基准,以下角码“dmmf”作为标记。恒湿无灰基 (moist ash-free basis): 以假想含最高内在水分、无灰状态的煤为基准,以下角码“maf”作为标记。恒湿无矿物质基 (moist mineral-matter-free basis): 以假想含最高内在水分、无矿物质状态的煤为基准,以下角码“m, mmf”作为标记。

根据各基准的定义,各基准间的关系可表示为如图 1-1 所示。

由上所述,各种分析基准的成分常用在不同的场合,所以它们之间常需要换算。换算原则是根据物质守恒定律 (即不同基的同一成分的绝对量是相等的) 寻求等量关系,找到各种基之间的换算系数  $K$ ,即

$$x_{\text{待求}} = Kx_{\text{已知}} \quad (1-5)$$

例如，已知空气干燥基含量，求收到基含量。可以如下来找到换算系数。根据式(1-2)和式(1-1)，有关系式： $C_{\text{ad}} + H_{\text{ad}} + S_{\text{ad}} + O_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} = 100 - M_{\text{ad}}$  和  $C_{\text{ar}} + H_{\text{ar}} + S_{\text{ar}} + O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} = 100 - M_{\text{ar}}$ 。因为煤中具有的成分是不变的，所以存在关系： $C_{\text{d}} = \frac{C_{\text{ad}}}{100 - M_{\text{ad}}} = \frac{C_{\text{ar}}}{100 - M_{\text{ar}}}$ ，即有， $C_{\text{ar}} = C_{\text{ad}} \times \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100 - M_{\text{ad}}}$ 。同样的可写出 H、S、O、N、A 各成分的换算关系。

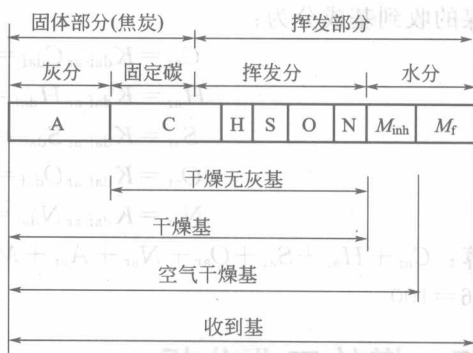


图 1-1 燃料的各种分析基准之间的关系

由空气干燥基成分求收到基成分的换算系数为  $K_{\text{ad-ar}} = \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100 - M_{\text{ad}}}$ 。

各种基的成分间换算系数  $K$  如表 1-3 所列。

表 1-3 不同基准的换算系数  $K$

$x_{\text{已}}$ \ $x_{\text{求}}$	收到基 ar	空气干燥基 ad	干燥基 d	干燥无灰基 daf
收到基 ar	1	$\frac{100 - M_{\text{ad}}}{100 - M_{\text{ar}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ar}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}$
空气干燥基 ad	$\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100 - M_{\text{ad}}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{\text{ad}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}$
干燥基 d	$\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100}$	$\frac{100 - M_{\text{ad}}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_{\text{d}}}$
干燥无灰基 daf	$\frac{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}{100}$	$\frac{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}{100}$	$\frac{100 - A_{\text{d}}}{100}$	1

需要指出的是，收到基水分  $M_{\text{ar}}$  和空气干燥基水分  $M_{\text{ad}}$  之间的换算不能应用以上的换算系数，因为二者的含义不同。收到基水分为燃料的全水分（即  $M_{\text{ar}} = M_{\text{f}}$ ），而空气干燥基水分为燃料的内在水分（即  $M_{\text{ad}} = M_{\text{inh}}$ ）。收到基水分中的内在水分  $M_{\text{inh,ar}}$  和空气干燥基水分  $M_{\text{ad}}$  则可以利用上述方法进行换算，换算关系为：

$$M_{\text{inh,ar}} = M_{\text{ad}} \times \frac{100 - M_{\text{f,ar}}}{100} \quad (1-6)$$

式中， $M_{\text{f,ar}}$  为收到基外在水分。于是，收到基水分和空气干燥基水分间的关系可写为：

$$M_{\text{ar}} = M_{\text{f,ar}} + M_{\text{inh,ar}} = M_{\text{f,ar}} + M_{\text{ad}} \times \frac{100 - M_{\text{f,ar}}}{100} \quad (1-7)$$

**【例 1-1】** 已知某种煤的成分为： $C_{\text{daf}} = 85.72$ ， $H_{\text{daf}} = 3.84$ ， $S_{\text{daf}} = 1.21$ ， $O_{\text{daf}} = 8.15$ ， $N_{\text{daf}} = 1.08$ ， $A_{\text{d}} = 22.33$ ， $M_{\text{ar}} = 9.36$ 。试求该煤样的收到基成分。

**解** 从表 1-3 查得由干燥基换算到收到基的换算系数为：

$$K_{\text{d-ar}} = \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100} = \frac{100 - 9.36}{100} = 0.9064$$

那么煤的收到基灰分为：

$$A_{\text{ar}} = K_{\text{d-ar}} A_{\text{d}} = 0.9064 \times 22.33 = 20.25$$

同样从表 1-3 查得由干燥无灰基换算到收到基的换算系数为：

$$K_{\text{daf-ar}} = \frac{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}{100} = \frac{100 - 9.36 - 20.25}{100} = 0.7039$$



故煤的收到基成分为：

$$C_{ar} = K_{daf-ar} C_{daf} = 0.7039 \times 85.72 = 60.34$$

$$H_{ar} = K_{daf-ar} H_{daf} = 0.7039 \times 3.84 = 2.70$$

$$S_{ar} = K_{daf-ar} S_{daf} = 0.7039 \times 1.21 = 0.85$$

$$O_{ar} = K_{daf-ar} O_{daf} = 0.7039 \times 8.15 = 5.74$$

$$N_{ar} = K_{daf-ar} N_{daf} = 0.7039 \times 1.08 = 0.76$$

验算： $C_{ar} + H_{ar} + S_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 60.34 + 2.70 + 0.85 + 5.74 + 0.76 + 20.25 + 9.36 = 100$

## 1.5 煤的工业分析

煤的元素分析并不能反映煤在燃烧时的某些性质（如焦结性、点燃性等），而要较好地了解煤的使用特性需要进行煤的工业分析。

煤的工业分析，又叫煤的技术分析或实用分析，是评价煤质的基本依据。为了统一煤的工业分析方法，我国颁布了相关的标准（GB/T 212）。在国家标准中，煤的工业分析包括煤的水分、灰分、挥发分和固定碳等指标的测定。通常煤的水分、灰分、挥发分是直接测出的，而固定碳是用差减法计算出来的。广义上讲，煤的工业分析还包括煤的全硫分和发热量的测定，又叫煤的全工业分析。为工作方便起见，我国已另订了标准将煤的发热量测定（见GB/T 213）和全硫测定（见GB/T 214）单独列出。煤的工业分析成分与元素分析成分之间的关系如图 1-1 所示。煤的工业分析成分常用于评价煤的质量或煤的分类。通常，煤的水分用收到基水分表示，它表示入炉煤的干湿程度；煤的灰分用干燥基灰分表示，它表征煤的稳定质量；煤的挥发分用干燥无灰基挥发分表示，便于不同煤种的比较。

### 1.5.1 煤的挥发分

在隔绝空气的条件下加热煤，则煤中的水分首先蒸发逸出，然后煤中的有机物开始热分解而逸出，这些气体产物被称为挥发分，最后留下的固体残余物称为焦炭。可见，煤的挥发分是煤在隔绝空气条件下加热分解的气体产物，而不是以现成状态存在于煤中。挥发分包括可燃气体  $CO$ 、 $CH_4$  等和不可燃气体  $CO_2$ 、 $N_2$ 、 $O_2$  等。在 GB/T 3715—1996《煤质及煤分析有关术语》中定义煤的挥发分为：“煤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”。

煤的挥发分的大小，基本可以代表煤的煤化程度。一般来说，煤的煤化程度越高，煤中挥发分含量越少。比如，年轻的褐煤挥发分  $V_{daf}$  很大，可达 40% 以上，而煤化程度最高的无烟煤挥发分  $V_{daf}$  则低至不足 10%。

煤的燃烧一般可以分为四个过程：预热干燥、挥发分析出并燃烧、焦炭的燃烧和燃尽。挥发分含量的多少对煤炭的燃烧过程的发生和发展有很大的影响。挥发分大的煤，释放的可燃气体多，所以易着火燃烧；挥发分的燃烧对焦炭进行加热，为焦炭的燃烧做好充分准备，有利于燃烧的稳定和完全。因此，挥发分的大小是衡量煤是否易于燃烧的重要指标。但是在空气不足或低温下着火时，挥发分易产生炭黑粒子（冒黑烟）。所以，挥发分是煤的一个重要燃烧特性，也是作为煤的分类的重要依据之一（详见 1.8 相关内容）。

### 1.5.2 焦炭特性

焦炭是煤在隔绝空气条件下加热后残留的固体产物，由固定碳和灰分组成。焦炭特性一