

燃料与燃烧

常弘哲 张永康 沈际群 编

上海交通大学出版社

K16

燃料与燃烧

常弘哲 张永廉 沈际群 编

上海交通大学出版社

(沪)新登字 205 号

21147/07
内 容 简 介

本书系统地介绍了有关燃烧工程的基础理论。全书共分十章,内容为:各种燃料的特性、燃料燃烧计算、化学动力学基础、着火、火焰传播及稳定、气体、液体及固体燃料的燃烧以及燃烧引起的污染防治等。在内容处理上注意工科高校学生基础特点,着重讲清各种燃烧理论的物理概念,使学习者能在较短时间内,系统地掌握燃烧基础理论,为从事燃烧工程打下良好的基础。

本书可作为高校热能工程、动力机械、燃料及能源等专业的燃烧课程教材。对从事热能工程、动力机械、能源、冶金等专业的工程技术人员亦有较大参考价值。

燃 料 与 燃 烧

出版: 上海交通大学出版社
(上海市华山路 1954 号·200030)
发行: 新华书店上海发行所
印刷: 立信常熟印刷联营厂
开本: 787×1092(毫米) 1/16
印张: 12.5

字数: 306,000
版次: 1993 年 3 月 第 1 版
印次: 1993 年 3 月 第 1 次
印数: 1—5,700
科目: 295—298

ISBN 7-313-01179-2/TK·16

定 价: 3.60 元

前 言

在目前以及未来相当长的年代里,人类所需热能主要来源仍是依靠燃烧燃料,因此掌握有关燃料与燃烧理论方面的知识就成为热能工程技术人员所必须的。热能工程技术人员面对的燃烧装置类型很多,而且这些装置还在日新月异地不断发展。在这种情况下,如果以增加专业课内容来满足要求,不仅为教学时间所不允许,而且局限于当前某些燃烧装置的专业知识还会很快老化。只有加强燃烧理论知识学习,掌握在各种燃烧装置中带有共性的基础理论,才是解决问题的正确途径。因为这样才能拓宽学生专业知识面,增强分析问题、解决问题的能力。同时也加强了学生对新型燃烧技术的吸收和创造能力。综上所述,有必要在高等技术学校热能工程专业中,开设“燃料与燃烧”这门技术基础课。

“燃料与燃烧”这门课虽然已在有些高校中开设有年,但在教学中仍存在不少问题,被教师认为难教而学生认为难学的课程之一。为此有必要对这一问题进行分析,找出问题的症结,以改进我们的教学和教材编写工作。

燃烧现象十分复杂。燃烧学是一门涉及化学、流体力学、传热传质学和热力学等学科的边缘学科。因此比之于已较成熟的热力学、流体力学、传热学等学科,在理论的系统性和严密性上,可以说还很不成熟。

造成本课程难教、难学重要原因之一,正是由于燃烧现象本身十分复杂以及燃烧学本身的不够成熟。当学生初次接触这门课并将它与其他技术基础课相比时,往往会感到这门课内容繁杂,头绪较多,理论欠周密,难记难学。因此在开讲本课程之前,应先将本课程的特点一一向学生阐明,以取得师生之共识,以逐步适应本课程的学习,并在在学习过程中,逐步培养处理复杂燃烧问题的能力。

原因之二是由于学生对燃烧问题缺少感性知识,妨碍了在教学中师生取得共同语言。对此除了通过加强实践性教学环节,增加学生感性知识外,教学内容的安排至关重要,为此本书有以下考虑:

(1) 加强燃烧理论与实际燃烧问题的联系。现有燃烧理论是将十分复杂的燃烧过程抽象为几个最基本过程,诸如燃烧化学反应,点火,火焰传播,火焰的稳定等等。在阐明这些问题时采取了简化和高度抽象的物理模型,并由此导出若干结论。由于学生缺乏燃烧实践知识,如将这些结论直接灌输给他们,将使他们感到这些知识相当抽象、枯燥,难以激发学习兴趣,也不知道如何应用这些结论分析燃烧问题。有鉴于此,在编写本书时,十分注意从燃烧实例引发问题,并介绍如何从这些复杂问题抽象简化的物理模型,以及由此得出的重要结论。最后再用这些结论解释实际燃烧问题,显然这是符合人们认识问题规律的。

(2) 以建立正确的物理概念作为重点。高等技术学校学生学习燃烧理论首先应掌握正确、清晰的物理概念,而不在于大量的数学推导。这固然与课程学时有限有关,更重要地是考虑当前燃烧理论在燃烧技术中的应用,主要还是起着一种定性指明方向的作用,这就要求掌握正确的物理概念。由于学生已具有工程数学和有关基础理论,如再掌握正确的燃烧理论物理概念,是不难进一步掌握更复杂的燃烧数学模型和进行燃烧问题的数值计算。

考虑到当前燃烧技术发展很快。本书对内容及时更新作了重大努力。

本书共分 10 章,其中第 1 章着重从合理利用燃料的角度,介绍常用燃料的特性以及某些新型燃料。第 2 章介绍热能工程中所需的有关燃烧计算方法,并适当加强有关烟气分析的计算,这是由于在燃烧研究工作中,烟气分析日益占有重要地位。从第 3 章至第 9 章介绍基本燃烧理论,但以物理概念为王。在第 10 章则介绍有关燃烧污染问题,这一问题是当前举世瞩目的重大问题。

由于本书属技术基础课程教材,因此有关燃烧装置的设计计算以及实验技术等问题均未涉及,这些内容在有关专业课中向学生介绍。

本书由上海交通大学常弘哲(第 1、2、3、4、7、9 章及附录),东南大学张永康(第 5、10 章),重庆大学沈际群(第 6、8 章)编写,由常弘哲主编。

本书经重庆大学王致钧教授主审。他对全书内容提出了不少宝贵意见,使本书质量提高许多,在此我们表示衷心感谢。

由于作者水平有限,本书一定存在不少缺点,我们衷心希望读者批评指正,从而使其进一步完善。

编 者

1992 年 11 月

绪 论

燃烧燃料是人类获得热能的主要手段。燃料及其燃烧除了满足人们生活需要以外，也广泛地应用于国民经济各个部门，因而影响和制约着国民经济的发展。研究和掌握燃料的燃烧规律，合理地使用燃料并把燃料的热能尽可能地释放出来，对国民经济的发展有重大的意义。

国民经济和科学技术的发展，对燃料和燃烧技术提出越来越高的要求。例如航空和航天技术的发展需要燃烧不断强化。能源问题的出现要求高效率地燃烧以及使用各种劣质燃料和替换燃料。大气污染日益严重要求减少燃烧污染物的排放等等。为了解决这些问题，必须掌握燃烧过程的各种规律，这样才能解决燃烧应用中的一系列技术问题。

本课程的设立正是为了满足上述要求，在课程内将系统地讨论燃料及其燃烧规律。不言而喻，这些理论是每一个从事热能工程的工程技术人员所必需牢固掌握的。

燃烧是一门古老而又年青的科学，说它古老是因为人类对火及燃烧现象的实践经验至今最少也有 50 万年的历史，说它年青是因为对燃烧规律的认识直至近百余年，特别是近几十年才有较大的进展。

虽然人类使用火已有很长历史，但由于燃烧的复杂性，对火的认识却长期处于无知状态。例如在 18 世纪中叶前 100 年间，在欧洲曾占统治地位的“燃素说”，它把物质能否燃烧归之于物质中是否含有一种“燃素”的错误说法。1777 年法国化学家拉瓦西(Lavoisier) 否认了燃素学的结论，提出物质的燃烧是一种发光发热的氧化反应的正确概念。

在 19 世纪中，工业革命推动了化学科学的发展，随着原子、分子学说的建立，随着热化学、热力学，化学热力学和化学动力学的发展，将燃烧学推向了新的阶段。本世纪初到 30 年代开始建立燃烧动态过程的理论，根据化学动力学及传热传质学的观点，建立了着火及火焰传播理论。在 40~50 年代又从扩散燃烧和动力燃烧的观点研究了液滴和碳粒的燃烧。从 50 年代末到 60 年代，冯·卡门(Von Karman)首先提出用连续介质力学来研究燃烧现象，并逐渐发展成反应流体力学。随着大型电子计算机的出现，斯帕尔汀(Spalding)等人比较系统地把计算流体力学方法用于燃烧研究，建立了“计算燃烧学”。目前计算燃烧学已应用于气体燃料燃烧、液雾燃烧、煤粉燃烧的研究，并取得了进展。与此同时，激光技术与各种气体分析技术的发展，使人们有可能直接测量燃烧条件下的气体速度、温度、组分浓度以及燃料颗粒速度、浓度和尺寸分布，从而对燃烧机理的研究发展到更高阶段。

燃烧学的研究主要从两方面进行。一方面是燃烧理论的研究，主要研究燃烧过程所涉及的各种基本现象，如燃烧反应的化学动力学机理，预混可燃气的着火，火焰传播及火焰稳定、扩散火焰、液滴燃烧、碳粒燃烧等燃烧机理。另一方面是燃烧技术的研究，主要是应用燃烧基本理论解决工程技术中的各种实际燃烧问题，例如对现有燃烧技术的改进，对新型燃烧技术的探索等等。由于燃烧过程十分复杂，无论是在进行理论研究还是应用研究中，实验研究都起着十分重要的作用。目前世界上燃烧学的主要研究方面已不同于过去一个时期那样比较着重于有关航空和航天技术中的燃烧问题。近年来，由于能源紧张和环境污染问题日趋严重，正大力开

展各种民用工业燃烧装置的研究,以尽量节约燃油、尽可能改成烧煤,并研究降低燃烧对大气污染。此外,还大力开展煤的气化和液化技术的研究等等。各种火灾的产生、传播和防止也是当前燃烧学的重要研究方向。

目 录

绪 论	1
第 1 章 燃料	1
1.1 概述	1
1.2 燃料的化学组成	3
1.3 燃料的发热量	8
1.4 气体燃料	13
1.5 液体燃料	17
1.6 固体燃料	25
1.7 燃煤新技术概述	32
第 2 章 燃料的燃烧计算	39
2.1 燃料燃烧所需空气量计算	39
2.2 完全燃烧时烟气的计算	43
2.3 不完全燃烧时烟气量计算	47
2.4 烟气分析计算	50
第 3 章 化学动力学基础	58
3.1 化学反应速率	58
3.2 化学反应速率和浓度的关系——质量作用定律	59
3.3 化学反应机理	59
3.4 影响化学反应速率的因素	63
第 4 章 预混可燃气的着火理论	66
4.1 着火方式概述	66
4.2 热自燃理论	67
4.3 链锁自燃理论	72
4.4 开口系统的自燃理论	74
4.5 点燃理论	78
第 5 章 预混可燃气中的火焰传播	84
5.1 火焰传播的概念	84
5.2 层流火焰传播理论	87
5.3 层流火焰传播速度的实验结果	90
5.4 湍流火焰传播理论	96
第 6 章 扩散燃烧基础及气体燃料的燃烧	101
6.1 动力燃烧与扩散燃烧的基本概念	101
6.2 气体燃料的射流扩散燃烧	102
6.3 气体燃料燃烧器简介	105

第7章 火焰的稳定性	113
7.1 预混气中火焰稳定的条件	113
7.2 高速气流中火焰的稳定方法	116
7.3 扩散火焰的稳定	120
第8章 液体燃料的燃烧	122
8.1 液体燃料燃烧过程的特点	122
8.2 液体燃料的雾化及雾化器	123
8.3 油滴燃烧和油雾燃烧	131
8.4 乳化油及其燃烧	136
第9章 固体燃料的燃烧	137
9.1 固体燃料燃烧概述	137
9.2 煤的燃烧过程	140
9.3 碳粒燃烧理论	142
9.4 碳粒所需燃尽时间及影响因素	152
9.5 碳粒的着火与熄火	155
9.6 煤粒燃烧的特点	157
第10章 燃烧造成的污染及防治	160
10.1 燃烧造成的大气污染	160
10.2 烟尘的生成机理及防治	162
10.3 硫的氧化物的生成机理及防治	164
10.4 氮的氧化物的生成机理及防治	166
10.5 低 NO_x 燃烧方法和低 NO_x 燃烧器	171
10.6 噪声的形成机理及控制	176
附录	184
1. 不同温度下的饱和水蒸气量	184
2. 气体及灰分的焓值	184
3. 复习思考题	185
主要参考文献	190

第 1 章 燃 料

1.1 概 述

燃料通常是指能与氧发生激烈氧化反应,放出大量热量,并在经济上是合理的一种物质。

燃料按其物态可分为:气体燃料、液体燃料和固体燃料。按燃料获得的方法则可分为天然燃料与人造燃料。表 1-1 给出了常用燃料的分类。

表 1-1 常用燃料的分类

物 态	天然燃料	人 造 燃 料
气体燃料	天 然 气	高炉煤气、焦炉煤气、发生炉煤气、液化石油气
液体燃料	石 油	汽油、煤油、柴油、重油、渣油、煤焦油
固体燃料	木柴、泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤	木炭、焦炭、煤粉、型煤

在本章内,仅限于讨论常用燃料的特性。

在世界燃料构成中,各种燃料的使用比例是不断变化的。在 18 世纪和 19 世纪上半叶,感兴趣的是木材,之后则是煤。现在在工业发达国家中,木材早已不用作燃料。本世纪 50 年代,煤一度成为燃料的主角,之后其所占比重日益下降,而石油所占比重则日益增加,到 80 年代,石油已成为燃料中的主角。但从世界燃料的使用远景看,煤的储量比石油大得多。因此,在世界能源发展史上,将进入一个新阶段,大力增产煤,已成为当务之急。在表 1-2 给出了一些专家对世界能源的情况及可使用年代估计值。

表 1-2 世界能源情况

能源类型	储量(EJ)*1		每年消耗量(EJ)*2		可以再使用的时间(年)
	已查明的	最大的	1979年(%)	2000年(%)	
天 然 气	3000	8000	50(16)*3	80(13)	60
石 油	4000	20000	140(4?)		30
油 页 岩	2000	23000	—	190(?)	60
沥 清 砂	3000	10000	—		—
煤	20000	300000	70(22)	150(25)	280
铀	11000	3×10^9	10(3)	100(16)	1100
增殖反应堆	$>10^{12}$	$>10^{17}$	—	—	—
可再生能源	—	—	50(16)	90(15)	—
世界总量	—	—	320(100)	610(100)	—

*1 EJ = 10^{18} J;

*2 假定2000年以前每年增长2.9%;

*3 括号内数字为该种燃料占总的燃料量中的百分比。

我国是一个燃料资源较丰富的国家,至 80 年代,探明的煤储量达 7000 亿吨以上,居世界

第3;石油储量居世界第13位;天然气储量则居世界第14位。

在表1-3给出了我国能源生产及其构成情况,在表1-4则给了我国能源消费情况。

表 1-3 我国能源产量及其构成

年 份	产量(万吨标准煤*)				各种能源构成比例(%)			
	原煤	原 油	天然气	水 电	原 煤	原 油	天然气	水 电
1935	18535	1819	151	483	83.0	8.3	0.8	2.6
1975	24421	11018	1170	2145	70.5	22.5	2.4	4.4
1980	44222	15165	1912	2421	69.4	23.8	3.0	3.8

表 1-4 我国能源消费量及其构成

年 份	消费量(万吨标准煤)	各种能源构成比例(%)			
		煤	石 油	天 然 气	水 电
1935	18301	83.45	10.27	0.63	2.65
1975	45425	71.85	21.07	2.51	4.57
1980	60275	71.81	21.05	3.14	4.00

* 标准煤的定义见1.3节。

由这些统计资料可以看出,我国燃料产量很大,其中以煤为主(约占70%左右),石油和天然气所占比例较低,这是由我国燃料资源的构成所决定的。根据我国燃料资源构成情况,煤的生产将始终占很大比重(65~70%),因此研究煤的燃烧和利用是我国热能工程技术人员面临的主要任务之一。

从我国现状出发,本世纪内能源的主要来源是煤,由于目前可采储量按人均值计很低,在油源不足的情况下,石油应首先用于运输式和移动式动力设备,而在地面固定式动力设备和生产中应尽量使用煤,这就是我国燃料政策的出发点。

近年来随着我国生产的迅速发展和人民生活水平的提高,燃料的供应曾一度出现严重的短缺,这不仅使工业生产不能充分发挥,人民的生活也受到严重影响。这些问题如不解决,将影响我国的现代化建设。但在燃料供应不足的同时,我国燃料浪费现象却又相当严重。由于管理不善,经济结构不合理,技术设备落后等原因,导致单位产品能耗较高。1930年我国能源利用率估计低于30%,而工业发达国家可达50%或更高。相比之下相当于我国每年白白浪费了一亿多吨标准煤,因此大力开展节能十分重要。

为了在2000年实现工农业总产值翻两番的目标,如果按1980年的能源消耗计算则需18亿吨标准煤,但按我国能源工业的发展,估计到20世纪末约为14亿吨标准煤,缺少约4亿吨标准煤。为此必须采用先进科学技术和方法来大大降低单位产品的能耗。采用先进的燃烧技术和保证燃烧装置良好的运行将起十分重要的作用,这是我国热能工程技术人员所面临的十分光荣而又艰巨的任务。

1.2 燃料的化学组成

燃料是由多种可燃与不可燃物质组成的混合物,不同燃料其组成差别很大。以下对气体燃料、液体燃料和固体燃料的组成作一介绍。

1.2.1 气体燃料

气体燃料是由若干可燃气体(如 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 H_2S 等),不可燃气体(如 CO_2 、 N_2 、 O_2 等)以及水蒸气组成的混合气体。在表 1-12、表 1-13、表 1-14 中列出了常用气体燃料的成分。

气体燃料的组成常表示为各气体成分的体积百分数。由于气体燃料中所含水蒸气量会随外界条件(压力、温度等)而变化,这对研究燃料特性很不方便。为此对气体燃料采用不计入水蒸气的所谓干气体组成,与计入水蒸气的所谓湿(全)气体组成两种表示方法。

1. 干气体燃料组成(以上角标 g 表示)

$$\text{CO}^g\% + \text{H}_2^g\% + \text{CH}_4^g\% + \cdots + \text{CO}_2^g\% + \text{O}_2^g\% + \text{N}_2^g\% = 100\% \quad (1-1)$$

式中: $\text{CO}^g\%$, $\text{H}_2^g\%$, \cdots , $\text{N}_2^g\%$ 分别为对应于干气体燃料中 CO , H_2 , \cdots , N_2 诸成分的体积百分数。

2. 湿(全)气体燃料组成(以上角标 s 表示)

$$\text{CO}^s\% + \text{H}_2^s\% + \text{CH}_4^s\% + \cdots + \text{CO}_2^s\% + \text{O}_2^s\% + \text{N}_2^s\% + \text{H}_2\text{O}^s\% = 100\% \quad (1-2)$$

式中: $\text{CO}^s\%$, $\text{H}_2^s\%$, \cdots , $\text{N}_2^s\%$, $\text{H}_2\text{O}^s\%$ 分别为对应于湿气体燃料中 CO , H_2 , \cdots , N_2 , H_2O 诸成分的体积百分数。

在进行燃料燃烧计算时,要求以实际进入燃烧装置的气体燃料成分进行计算,为此在已知干气体燃料成分时还需换算为湿气体燃料成分。

在图 1-1 上表示出干、湿气体燃料成分的关系。由图可以看出,对任一成分 x , 其干成分 x^g 与湿成分 x^s 之间有以下关系:

$$\frac{x^g}{100 - \text{H}_2\text{O}^s} = \frac{x^s}{100}$$

即

$$x^g = x^s \frac{100 - \text{H}_2\text{O}^s}{100} \quad (1-3)$$

上式说明,在已知干气体燃料成分 $x^g\%$ 时,只需乘上换算系数 $\frac{100 - \text{H}_2\text{O}^s}{100}$ 即可求出湿气体燃料成分 $x^s\%$ 。

气体燃料所含水蒸气量不高,一般等于该温度下的饱和水蒸气量。由饱和蒸气表(见附录 1)可查出在不同温度下 1 Nm^3 干气体所能吸收的水蒸气量 $g_{\text{H}_2\text{O}}^s$ (单位为 g/Nm^3 干气体),然后根据下式即可求出湿气体燃料中水蒸气所占体积百分数:

$$\text{H}_2\text{O}^s\% = \frac{0.00124 g_{\text{H}_2\text{O}}^s}{1 + 0.00124 g_{\text{H}_2\text{O}}^s} \quad (1-4)$$

式中的 0.00124 为在标准状态下每 1 g 水蒸气的体积(Nm^3)^{*}。

* Nm^3 表示在标准状态(压力为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, 温度为 273 K)下气体的体积。

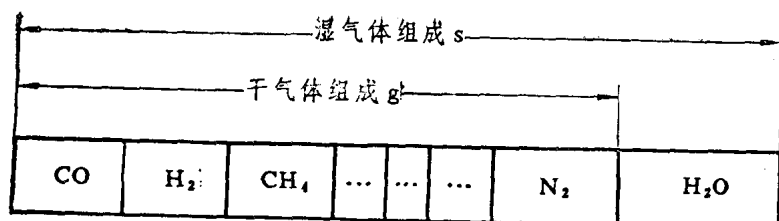


图 1-1 气体燃料干、湿成分间的关系

1.2.2 固体燃料

这里主要介绍热能工程中最常使用的固体燃料煤。煤是由多种有机可燃质，不可燃的无机矿物及水分混合组成。

1. 可燃质

煤中的可燃质是多种复杂的高分子有机化合物的混合物。由于技术上的困难，至今尚不能将它们一一分开并弄清其分子结构。但通过化学元素分析，可以了解这些可燃的有机化合物是由碳、氢、硫、氧、氮等元素组成。由于这些元素都已化合成各种有机化合物，因此，不能就根据这些元素组成全面了解燃料的燃烧特性，但可用它粗略区分燃料品种和估算燃料发热量。另外，燃料的化学元素组成还是进行燃料燃烧计算的重要原始数据。以下介绍煤中各组成元素及其对燃烧的影响。

(1) 碳

碳是煤中的主要可燃元素。随着煤的形成年代增长，由于一些不稳定的成分逐渐析出，碳的含量将逐步增高，这一过程称煤的碳化过程。碳化程度低的泥煤含碳量为 60%~70%，碳化程度高的无烟煤可达 90%~98%。由表 1-22 可看出各种煤的含碳量。煤中的碳是以与氢、氧化合成为有机化合物状态。在碳化程度高的煤，也可能存在结晶状态的碳。碳是一种较难燃烧的元素，碳化程度高的煤着火与燃烧均较困难。

(2) 氢

煤中含氢量约为 2%~6%，碳化程度越高，含氢量越低，由表 1-22 中可看出各种煤的含氢量。煤中所含氢中的一部分与碳、硫等化合为各种可燃有机化合物，这部分氢称为自由氢，这些可燃有机化合物在煤受热时易裂解析出，且易于着火燃烧。有一部分氢则与氧化合形成结晶水，这部分氢称为化合氢，显然它是不能再燃烧放热了。

含氢量高的煤种燃烧时易生成带黑头的火焰，即燃烧时易生成碳黑。此外含氢量高的煤种在储存时易风化而失去部分可燃物质，故在储存与使用时应加注意。

(3) 氧和氮

煤中的氧和氮都是不可燃成分。由于氧使可燃质中部分元素(如碳和氢)氧化，这将使燃料燃烧时放出的热量减少，所以照理说将氧与氮列入可燃质中是不确切的，但通常仍将它们列入可燃质中。煤中所含氧随碳化程度加深而减少，如泥煤中含氧达 40%，而无烟煤中含氧仅 1.2% 左右。煤中含氮量很少，约为 0.5%~2.5%。在一般情况下氮不会氧化，而是以自由状态转入燃烧产物。但在高温下，或者有触媒存在时，部分氮成可形 NO_x ，污染大气。由表 1-22 可看出各煤种的含氧量与含氮量。

(4) 硫

硫是燃料中最有害的可燃元素。硫在燃烧后会成 SO_2 与 SO_3 气体,这些气体会与燃烧产物中的水蒸气结合,形成对燃烧装置金属表面有严重腐蚀作用的亚硫酸和硫酸蒸气。 SO_2 与 SO_3 排入大气还会严重污染大气。我国煤的含硫量大约为 0.5%~3%,亦有少数煤超过 3%。

煤中的硫常以三种形式存在,即存在于有机物中的有机硫 S_{y1} 、黄铁矿硫 S_{it} 和硫酸盐硫 S_{ly} ,三者合称全硫 S_q 。其前两种可参与燃烧,放出热量,故计入燃料可燃质中称可燃硫 S_r ,后者则不能参与燃烧而计入燃料灰质之中。我国煤中 S_{ly} 很少,可忽略不计,一般可用元素分析时测出的 S_q 代表 S_r 。

2. 灰质与灰分

灰质指燃料中的不可燃矿物杂质,它们中的一部分是在燃料形成过程中混杂进来的,另一部分是在燃料开采、运输和贮存过程中由外界带入的。直接测定燃料中的灰质含量比较困难,通常是测定燃料在燃烧后形成的固体残渣量。这种残渣被称为灰分,它是燃料在燃烧时,灰质经高温分解和氧化后形成的。因此,灰质与灰分无论在组成上和数量上都不相同。

各种煤的灰分量差别较大,一般为 5%~50%。灰分主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、各种氧化铁 (FeO 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4)、 CaO 、 MgO 及 K_2O 、 Na_2O 等。由于煤的灰分量较高,因此,对煤的发热量有较大影响,由此而引起的燃烧装置堵塞、磨损、恶化传热等问题也更多,这给设备的维护与运行增加了困难。煤中的灰分还影响燃料的着火与燃烧。因此,煤灰分的高低是评价煤质优劣的主要依据。

灰分在低温下呈固体状态,当加热至一定温度时,灰分将会软化并带有粘性,再继续加热将达到灰分熔点,这时灰分将呈流体状态。

在燃煤装置中,灰分的熔点对运行的经济性与安全性有很大影响。如灰分熔点过低,则灰分易产生裹灰(熔化的灰分包在尚未烧透的焦炭之外),造成煤的不完全燃烧;并在炉栅结块,影响通风,恶化燃烧,还给清灰除渣带来困难。所以一般要求灰分熔点不低于 1200°C ,在设计燃烧装置时必须考虑灰分的熔点。

灰分的熔点用实验方法测定。测定时将灰分堆集成高度为 20 mm,锥底为边长 7 mm 的等边三角形的正棱锥形灰锥,再将灰锥体放入调温电炉中,逐步升温后可以看到灰锥体的三个变形阶段(图 1-2)即:

① 锥顶变圆或开始倾斜,相应的温度称为灰分开始变形温度 t_1 。

② 锥体上部弯曲并倾斜至锥底,或萎缩成半球体,相应的温度称开始软化温度 t_2 。

③ 锥体呈流体状态流淌,相应的温度称开始熔化温度 t_3 。



图 1-2 灰锥在不同温度下的变形

在煤的特性中通常都给出其 t_1 、 t_2 、 t_3 温度值,它与灰分的组成密切相关。

3. 水分

水分是燃料中不可燃杂质,固体燃料煤中水分含量较高,且碳化程度不同的煤水分含量差别很大(见表 1-22)。从技术角度考虑,常将煤中所含水分 W 划分为外在水分 W_w 与内在水分 W_n 。 W_w 指吸附于煤块表面的水分,它可用自然干燥的方法去除。 W_w 随运输和储存条件

变动很大。 W_a 则指吸附于煤块内部的水分,它需在干燥箱中加热到 $102\sim 105^\circ\text{C}$ 并持续 $1\sim 2$ h 才能去除。 W_n 的含量比较稳定。至于存在于煤中矿物杂质内部的结晶水,则计入前述的化合氢之中,它需加热到更高温度才能去除,因其含量很少,分析时一般不予考虑。

固体燃料的组成用各成分所占质量百分数表示。由于煤中所含水分及灰分量常随开采、加工、运输、储存乃至气候等条件的变化而变化,这样,即使是同一种煤也会因水分或灰分含量的变动,造成燃料组成的质量百分数变化,给燃料的研究带来不便。为此,常根据实际的需要,采用不同的“基”来表示燃料的成分。

(1) 应用基成分(以上角标 y 表示)

这时按实际进入燃烧装置的燃料来计算成分,计入燃料中全部水分和灰分。即

$$C^y\% + H^y\% + O^y\% + N^y\% + S^y\% + A^y\% + W^y\% = 100\% \quad (1-5)$$

式中: $C^y\%$ 、 $H^y\%$ 、 $O^y\%$ 、 $N^y\%$ 、 $S^y\%$ 、 $A^y\%$ 和 $W^y\%$ 分别表示燃料中碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分的应用基质量百分数。

(2) 分析基成分(以上角标 f 表示)

在实验室对煤进行分析研究时,必需对煤试样先进行风干,以去掉不稳定的外在水分,以避免在分析过程中水分不断发生变动,影响实验结果。按去掉外在水分后的煤计算燃料的成分称为分析基成分。即

$$C^f\% + H^f\% + O^f\% + N^f\% + S^f\% + A^f\% + W^f\% = 100\% \quad (1-6)$$

式中: $W^f\%$ 为分析基水分质量百分数,由于分析基水分是煤内在水分,故亦可写成 $W_n^f\%$ 。

(3) 干燥基成分(以上角标 g 表示)

将燃料经过干燥,以去掉全部水分,即得干燥燃料。按干燥燃料计算燃料成分称为燃料干燥基成分。即

$$C^g\% + H^g\% + O^g\% + N^g\% + S^g\% + A^g\% = 100\% \quad (1-7)$$

由于去掉不稳定的水分含量,燃料干燥基成分比较稳定,因此,用 $A^g\%$ 能更确切反映煤中所含灰分的高低。

(4) 可燃基成分(以上角标 r 表示)

按去除燃料中所含全部水分及灰分后的燃料来计算燃料成分,称可燃基成分。即

$$C^r\% + H^r\% + O^r\% + N^r\% + S^r\% = 100\% \quad (1-8)$$

由于可燃基成分不会受到由于外界因素造成的水分和灰分变动的影晌,故同一煤井开采的煤其可燃基成分比较稳定,至多随煤层的转移略有变化,因此,它能比较合理地反映煤的特性。故煤矿的煤质资料常以可燃基成分表示煤的组成(可参看表 1-26),并用它来区分煤种(如泥煤、烟煤等等)。

在图 1-3 中表示出燃料各种基间的关系。

(5) 各种“基”成分间的换算

在进行燃料燃烧计算时,常需在各种基成分间进行换算,例如煤质特性常用比较稳定的可燃基成分表示,但在进行燃料燃烧计算时却又需按燃料实际应用时的成分(即煤应用基成分)计算,这时就需将煤可燃基成分换算为煤应用基成分。以下以此为例说明各种基成分的换算原理。

由图 1-3 可以看出

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y = 100 - A^y - W^y$$

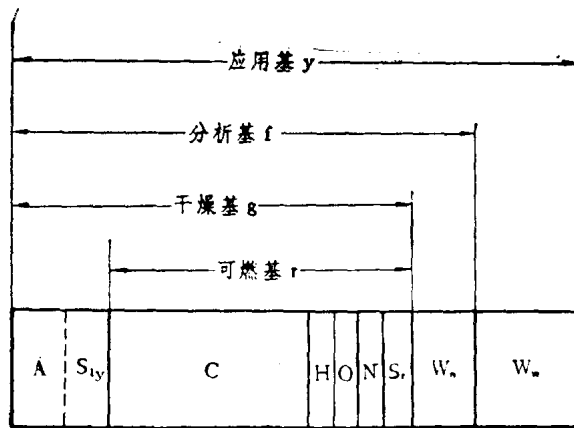


图1-3 燃料各种基成分间的关系

而

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100$$

因此,必然有以下关系

$$\frac{C^y}{C^r} = \frac{100 - A^y - W^y}{100};$$

$$\frac{H^y}{H^r} = \frac{100 - A^y - W^y}{100}; \dots\dots$$

即

$$C^y = C^r \times \frac{100 - A^y - W^y}{100};$$

$$H^y = H^r \times \frac{100 - A^y - W^y}{100}; \dots\dots$$

由此可以看出: 上式中的 $\frac{100 - A^y - W^y}{100}$ 即由可燃基成分换算为应用基成分的换算系数。只要求出换算系数(这要求已知 A^y 及 W^y), 即可进行换算。在表 1-5 中给出了各种基间的换算系数。

但应注意, 上表不能用于分析基水分含量和应用基水分含量之间的换算。这是因为分析基水分仅包括内在水分, 而应用基水分为包括内在水分与外在水分的全水分, 两者既不是针对同一种水分, 当然也就不可能进行换算。分析基水分 $W^r\%$ 与应用基水分 $W^y\%$ 可以按下述关系进行换算。根据图 1-3 所表示的关系可将 $W^r\%$ 换算为应用基内在水分 W_a^y , 即

$$\frac{W^r}{100} = \frac{W_a^y}{100 - W_w^y}$$

故

$$W_a^y = W^r \times \frac{100 - W_w^y}{100}$$

式中 $W_w^y\%$ 为应用基外在水分。故应用基(全)水分为

$$W^y = W_w^y + W_a^y$$

$$= W_w^r + W^t \times \frac{100 - W_w^r}{100} \quad (1-9)$$

表 1-5 燃料各种基成分换算系数

已知成分	角标	所 求 成 分			
		应用基	分析基	干燥基	可燃基
应用基	y	1	$\frac{100 - W^f}{100 - W^r}$	$\frac{100}{100 - W^r}$	$\frac{100}{100 - (A^r + W^r)}$
分析基	f	$\frac{100 - W^r}{100 - W^f}$	1	$\frac{100}{100 - W^f}$	$\frac{100}{100 - (A^f + W^f)}$
干燥基	g	$\frac{100 - W^r}{100}$	$\frac{100 - W^f}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^g}$
可燃基	r	$\frac{100 - (A^r + W^r)}{100}$	$\frac{100 - (A^f + W^f)}{100}$	$\frac{100 - A^g}{100}$	1

1.2.3 液体燃料

常用的液体燃料为石油及其加工产品,它的元素组成主要是碳和氢。其中碳含量约占 85~87% (液体燃料均以质量百分数表示其化学组成),氢含量约占 11~14%。此外,还常含有少量硫、氧、氮、钾、钠、钙、镁等元素。在燃料中的氢与碳化合生成各种有机化合物,称为烃。它包括多种烷烃、环烷烃、芳香烃等烃类。

根据含硫量高低可将液体燃料分为低硫油(含硫量低于 0.5%)、中硫油(含硫量为 0.5%~1%)、高硫油(含硫量高于 1%)。由于液体燃料含氢量高,燃烧后生成大量水蒸气,它会与硫的燃烧产物生成硫酸,对金属造成腐蚀,所以液体燃料中所含硫比煤中含硫更为有害。

液体燃料灰分很少,一般在 0.05% 以下,即使重油也不超过 0.3%。这些灰分主要由碱金属的氯化物和硫酸盐组成。在燃料燃烧后,灰分以飞灰形式被烟气带走,所以会引起对燃烧装置的堵塞、磨损,当其沉积于受热面时,还会影响传热。如灰分中含有钒、钾、钠时,还会生成引起高温腐蚀的化合物,故对其含量有严格限制。

液体燃料中水分含量较低,一般规定不得超过 2%。

液体燃料的组成用其应用基质量百分数表示。

1.3 燃料的发热量

作为燃料,单位质量(1 kg)或单位体积(1 Nm³)燃料燃烧后能放出的热量是一个非常重要的特性,因为这将直接涉及燃料消耗量的高低和存储燃料所要空间,对运输式动力装置(如船舶和飞机动力装置)这还涉及续航力。为此提出了燃料发热量的概念。

燃料的发热量(又称热值),是指在某一温度下(通常燃料的发热量是在 15~25℃ 下测定的),1 kg 液体(或固体)燃料或 1 Nm³ 气体燃料,在与外界无机功交换条件下,完全燃烧后,再冷却至原温度时所释放的热量,其单位相应为 kJ/kg 或 kJ/Nm³。由于燃烧产物的焓与温度有关,故燃料发热量与测定时的温度有关,但在工程计算中常忽略了这一影响。在 1.2 已经介绍了燃料的组成可表示成各种基,显然对应不同基燃料的发热量是不同的,在计算中应加区