

工 程 燃 烧 学

张松寿 编

前 言

近几年来, 由于我国工农业生产的发展和人民生活水平的提高, 对能源的需求量越来越多, 因而合理利用能源, 降低能耗, 已成为当务之急。

燃烧是目前人类获取能量的一个最主要的手段。通过燃烧矿物燃料所获取的能量占世界总能量消耗的百分之九十以上, 因此燃烧过程组织得合理与否在很大程度上影响到能源的利用和能耗的降低。鉴于我国的现实情况, 各种热力设备中燃烧效率与能源利用程度普遍较低, 燃料消耗量较大, 因而迫切需要加强燃烧的理论研究与提高组织燃烧的技术水平。自七十年代末以来, 我国各有关大专院校纷纷开设燃烧学课程; 各有关工厂企业的工程技术人员亦积极学习、掌握这方面的知识。但适合作为工科院校有关专业学习和工程技术人员参考的比较全面、系统地介绍燃烧理论的基础教材却还少见。1981年笔者在上海机械学院动力系讲授燃烧课程时编写了“工程燃烧学”讲义。该讲义从工程实用出发以浅近、易懂的表达方式, 比较全面和系统地介绍燃烧工程的基础理论, 着重讲清各种燃烧现象的物理概念, 为读者提供理解和掌握热力设备中燃烧现象所必需的知识。在内容选择方面, 考虑到我国目前燃料现状和使用政策, 在全面介绍不同物态燃料燃烧的基础上, 适当地加强固态燃料煤的燃烧知识。燃烧学是一门重要的学科, 内容十分丰富, 限于篇幅, 有些内容只能舍去, 例如燃烧问题的数值计算和实验研究所必需的燃烧过程相似理论与模化知识就没有涉及。此外, 为使读者易于接受与理解燃烧理论知识, 在本书的前部专列一章先介绍各种燃料的燃烧方式与所采用的燃烧设备与装置, 以增加读者在这方面的感性认识和提高今后对燃烧技术学习的兴趣。

原讲义自1981年起曾先后在上海机械学院作为传热传质及流体动力学、热能以及工程热物理等有关专业班级的燃烧学教材试用过六届以上, 同时亦曾作为某些学科的研究生学习燃烧学时的参考书; 此外, 上海交通大学、重庆大学、上海市科协科技进修学院等兄弟院校有关专业亦曾使用过本讲义作为燃烧课程的教材。在多次使用基础上, 经过83年和85年两次全面修订, 才始成本书。

本书经西安交通大学许晋源教授、西北工业大学华光时副教授和同济大学闻望副教授仔细审阅, 提出了不少宝贵意见, 使书稿质量提高许多, 在此深表感谢。

限于水平, 在本书内容的取舍、编排、某些论点的阐述以及问题的数学处理上可能存在缺点和错误, 万望同行、专家和读者不吝赐教, 以使本书不断提高, 在此预致谢意。

张松寿 1985年3月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 燃烧与人类文明	(1)
§ 1-2 燃烧科学发展简史	(1)
§ 1-3 燃烧科学的应用和发展	(2)
第二章 燃料	(4)
§ 2-1 燃料的形成及其化学组成	(4)
§ 2-2 燃料的发热量	(12)
§ 2-3 固体燃料	(16)
§ 2-4 液体燃料	(22)
§ 2-5 气体燃料	(28)
第三章 燃料的燃烧及其计算	(32)
§ 3-1 燃料的燃烧反应	(32)
§ 3-2 烟气分析及其结果的应用	(49)
§ 3-3 燃料的燃烧温度及其计算	(57)
§ 3-4 燃烧产物的热焓	(65)
第四章 燃料的燃烧方法与燃烧装置	(69)
§ 4-1 气体燃料燃烧的方法与装置	(69)
§ 4-2 液体燃料燃烧的方法与装置	(71)
§ 4-3 固体燃料燃烧的方法与装置	(77)
§ 4-4 对燃烧器及燃烧设备的基本要求	(83)
第五章 燃烧化学反应动力学基础	(85)
§ 5-1 基本名词、定义和定律	(85)
§ 5-2 分子热活化理论	(91)
§ 5-3 化学反应速度的确定——活化分子碰撞理论	(93)
§ 5-4 影响化学反应速度的诸因素	(96)
§ 5-5 反应速度的活化络合物(过渡态)理论	(103)
§ 5-6 链锁反应	(104)
§ 5-7 一氧化碳与碳氢化合物的燃烧反应	(112)
第六章 预混气体的着火理论	(113)
§ 6-1 热自燃理论	(113)
§ 6-2 链锁自燃理论	(125)
§ 6-3 点燃理论	(131)
第七章 预混气体中的火焰传播——气体燃料的燃烧	(143)
§ 7-1 火焰前锋及层流火焰的传播速度	(143)

§ 7-2	层流火焰传播速度理论	(145)
§ 7-3	层流火焰传播速度与预混气体物理化学参数的关系	(151)
§ 7-4	层流火焰传播界限	(157)
§ 7-5	层流火焰传播速度的实验测定	(160)
§ 7-6	湍流预混气流中火焰的传播	(165)
§ 7-7	湍流火焰传播理论	(166)
§ 7-8	可燃混合气的物理化学性质对湍流火焰传播的影响	(176)
§ 7-9	火焰自湍化的概念	(179)
第八章	均匀可燃混合气流中火焰的稳定	(181)
§ 8-1	火焰稳定存在的基本条件	(181)
§ 8-2	本生灯火焰的稳定	(184)
§ 8-3	高速气流中火焰的稳定	(189)
§ 8-4	高速气流中利用引燃火焰稳定火焰	(191)
§ 8-5	高速气流中利用钝体稳定火焰	(192)
§ 8-6	火焰稳定理论	(196)
§ 8-7	钝体火焰稳定器的稳定极限	(201)
§ 8-8	高速气流中稳定火焰的其他各种方法	(208)
第九章	气体燃料的射流燃烧	(215)
§ 9-1	气体燃料射流的扩散燃烧	(215)
§ 9-2	气体燃料射流的层流扩散燃烧	(217)
§ 9-3	气体燃料射流的湍流扩散燃烧	(222)
§ 9-4	射流扩散火焰的稳定	(225)
§ 9-5	逆向喷流扩散火焰	(227)
第十章	液体燃料的燃烧	(228)
§ 10-1	液体燃料的燃烧过程	(228)
§ 10-2	液体燃料的雾化	(229)
§ 10-3	燃油雾化后的蒸发过程	(244)
§ 10-4	单滴液体燃料的燃烧	(248)
§ 10-5	液体燃料的油雾燃烧过程	(252)
§ 10-6	液体燃料燃烧过程的组织	(254)
第十一章	固体燃料的燃烧	(257)
§ 11-1	固体燃料的燃烧过程	(257)
§ 11-2	固体碳粒的燃烧	(259)
§ 11-3	煤粒的燃烧	(273)
§ 11-4	煤粉的燃烧	(276)
第十二章	燃料燃烧引起的环境污染及其防治	(286)
§ 12-1	何谓大气污染	(286)
§ 12-2	黑烟与煤灰的污染与防治	(287)
§ 12-3	硫的氧化物(SO_2)的污染与防治	(288)

§ 12-4 氮的氧化物 (NO_x) 的污染与防治	(291)
§ 12-5 一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO_2)的污染与防治	(297)
§ 12-6 碳氢化合物(HC)的污染与防治	(298)
附 录 不同单位制常用物理量互换常数表	(299)
参考文献	(300)

第一章 绪 论

§ 1-1 燃烧与人类文明

火,被人类掌握使用以后,为人类的进步与发展作出了巨大的贡献。我们的祖先早在**一百多万年***以前就已经利用火来取暖御寒,防御野兽,熏烤野食;利用火打制武器与工具,制作器皿,提高劳动与生产效能。因此,火给人类带来了进步。人类之所以能区别于其他动物也可以说就在于人类会使用火,恩格斯对此曾作过科学论断:“火的利用第一次使人类支配了一种自然力,从而最终把人和动物分开。”^[30]故火的使用可以认为是出现人类的标志之一。

人类自学会使用火后,生产能力不断提高,社会亦随之进步与发展。十八世纪产业革命的形成主要是由于蒸汽机的产生。蒸汽机之所以会产生则是人类在使用火(燃烧燃料)方面所积累的大量知识与经验的结果。随着社会生产的发展,火的使用也越来越广泛,使用量(即所谓的能源消耗量)也越来越大。在冶金、化工、交通运输、机械制造、纺织、造纸、食品以及国防等轻重工业和人们日常生活中无一脱离得了火的使用——燃烧技术。近年来,宇航的迅速发展,使人们实现了先人梦幻的境界。试想若没有很好解决高能燃料(如液氢等)燃烧问题,怎能制造出巨大功率的火箭发动机把航天器送上太空。因此,人类的物质文明与燃烧技术是密切相关的。从某种意义上说,没有火,就没有人类社会的进步,亦没有今天的高度物质文明,即使在今后相当长的一段历史时期内亦仍然如此。

§ 1-2 燃烧科学发展简史

在古希腊神话中,火是神普鲁米修斯(Prometheus)为了拯救人类的灭亡,从天上偷来送到人间的,它是神的赐与。在我国的神话中,火是燧人氏钻木取得,是人类的创造。但这些总究还是神话与传说,没能揭开火的本质。

在十八世纪中叶以前,人类对火的认识一直不清楚,而且还有错误。最初认为火是组成宇宙的四大元素(空气、水、火与土)之一,后来又认为火是一种没有重量的物质在流动,即所谓燃素说(The Phlogiston Theory)。首先正确地、科学地阐明火本质的是十八世纪中叶的俄国科学家罗蒙诺索夫(M. B. Ломоносов, 1756年)与法国化学家拉瓦锡(A. L. Lavoisier, 1777年)。他们根据所作的实验提出了可燃物质氧化的学说,这才真正揭开了火的谜。此后,在十九世纪由于热化学及热力学的发展,人们开始把燃烧过程作为热力学平衡体系来研究,阐明了燃烧过程一些重要的静态特性参数,如燃烧反应热,绝热燃烧温度、燃烧产物平衡组成的规律性等,但却形而上学地把某些特性看成是孤立的、不变的参数,如每种燃料都有固定的着火温度等。这时还把热力学的特点看成是燃烧现象的唯一特点。本世纪初美国化学家

* 根据近年国内外考古发现,人类最早使用火的时代可以追溯到距今140~150万年以前。

刘易斯(B. Lewis)和苏联化学家谢苗诺夫(Н. Н. Семёнов)等人研究了燃烧的反应动力学机理,认为燃烧的化学反应动力学是影响燃烧速率的重要因素,并发现燃烧反应具有链锁反应的特点,这才初步奠定了燃烧理论的基础。此后经过各国科学家对燃烧现象的深入研究,在本世纪三十年代至五十年代间,人们逐渐认识到限制和控制燃烧过程进展的不仅仅是化学反应动力学因素,而且还有传热、传质和气体流动等物理因素,燃烧现象则是这些因素相互影响、综合作用的结果。到五十年代后期,美国力学家冯卡门(Von Karman)和我国力学家钱学森首先倡议用连续介质力学方法来研究燃烧基本现象,建立了所谓的“化学流体力学”或称“反应流体力学”。许多学者根据这一方法对一系列燃烧问题,如层流燃烧、湍流燃烧、火焰稳定等进行了广泛的研究。到了七十年代初,以英国科学家斯波尔丁(D. B. Spalding)为首的学派比较系统地把计算流体力学的方法用于有燃烧现象的边界层流动、回流流动以及旋流流动,建立了燃烧问题的数值计算方法,逐渐形成所谓“计算燃烧学”。用它能很好地定量预测燃烧过程和燃烧设备性能,使燃烧理论及其应用达到了一个新的高度。在此同时,燃烧测试方面逐渐采用先进的测试技术(如激光技术),改进了燃烧实验方法和提高了测试精度,使人们有可能更深入地、全面地、精确地研究和掌握各种燃烧现象的机理,使燃烧学在深度和广度等方面有了飞跃的进展。

从上述可见,燃烧虽是一门很古老的学科,但它的最大进展却是在最近二三十年间。而且,人们对它的认识至今还不很完善,不少燃烧机理现在还不十分清楚,系统、完整的燃烧理论还没有建立起来。因为燃烧现象十分复杂,它是气体流动、传热、物质扩散以及化学反应等物理化学过程同时相互作用的综合结果,因此,在这些单独学科还不太成熟之前要对它们的综合学科作系统的理论分析研究就不太容易了。所以,相对来说,燃烧学是一门既古老而又年青的学科。

§ 1-3 燃烧科学的应用和发展

燃烧学是一门内容丰富而实用性很强的学科。过去,因生产水平低下,对燃烧设备的技术要求不高,发热强度比较低,故根据已掌握的经验与规律亦能设计制造出各种燃烧装置与设备。但现在,特别是喷气、火箭技术高速发展的今天,要求制造发热强度高、运行范围广的燃烧装置,并越来越趋向于在高温、高压、高速下进行燃烧,因此单靠过去的经验与有限的试验是无法达到这个目的的。这时就发现对燃烧基本过程缺乏认识与理解,会阻碍新的设计、试制工作的顺利进行。这就迫使对燃烧过程从根本上进行深入研究,以求在设计、试制和试验中有正确的理论指导。在对燃烧过程开展大量基础研究同时,逐步形成了一门崭新的、高速发展的基础学科——燃烧学。

燃烧科学的研究包含燃烧基本理论与燃烧技术两方面的内容。对燃烧基本理论和实验研究,对旧的燃烧技术的分析与改进以及对新的燃烧技术的探索与研究等,务求最合理地、最有效地组织燃烧过程和控制燃烧过程。为达到这一目的,还必须掌握各种燃料(包括劣质燃料、高能燃料、代用燃料等)的燃烧特性,以便选用最适宜的燃烧方法与燃烧装置。因此,燃料的燃烧物性研究亦成为燃烧科学的一个重要方向。

燃料燃烧时,除了发出光与热外还会散发出大量的烟尘、灰分、有害与无害的气体以及臭味与噪音,有时还有未经燃烧的部分燃料随着烟气被排放出来。燃烧排放物会污染环境,

会妨害人们的健康和动植物的生长。为此，就应积极开展对燃烧污染物形成机理的研究；探索通过改变燃烧工艺、精心控制燃烧过程以减少或消除污染物排放的有效方法；研究所谓无公害(低污染)或“干净”的燃烧技术把污染消灭在燃烧之中。所以，近年来这些研究都已成为燃烧科学研究的又一个重要方向。

火，可促进人类的进步、给人类带来文明，但也能给人类造成灾难。世界上，每年发生的各种火灾与爆炸(森林火灾、建筑火灾、工业性爆炸与火灾)不知要毁掉多少的生命财产。因此，为了预防与减少因火灾造成的生命与资源的损失，对燃烧科学的研究者提出了不少新的课题，诸如需要研究：火焰沿各种材料表面的传播，大液面的燃烧，闷烧、多孔介质中的燃烧以及掌握燃烧、燃料与环境之间的相互关系，以便可靠地确定各种建筑材料在火灾中所起的作用等等。

燃烧科学的应用是极其广泛的，对人民生活、工业生产、国防技术以及宇宙航行等都具有十分重要的意义。为此，就需要一批科学家和工程师为燃烧科学的发展与应用作出不懈的努力。

第二章 燃 料

所谓燃料，一般系指通过燃烧能获得大量热能，且这些热能能为人们以各种方式所利用的可燃物质。但工业上选作为燃料的仅指在燃烧过程中以氧气(空气)作氧化剂的物质，故这些物质应当是由那些能与氧化合的元素所组成。

§ 2-1 燃料的形成及其化学组成

一、燃料的形成

矿物燃料按其物态可分为固态、液态和气态等三类燃料。若按其获得的方法又可分为天然燃料和人造燃料。表2-1给出了燃料的一般分类。

表 2-1 燃料的一般分类

燃料的物态	天 然 燃 料	人 造 燃 料
固体燃料	木柴、泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤、油页岩	木炭、焦炭、粉煤、煤砖(饼、球)
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、重油、渣油、酒精、煤焦油等
气体燃料	天然气(气田和油田)	高炉煤气、焦炉煤气、发生炉煤气、石油裂化气、沼气、地下气化煤气

天然矿物燃料主要是由植物和动物残骸在地下经长时期的堆积、埋藏，受到地质变化作用(包括物理、化学、生物等作用)，逐渐分解而最后形成了可燃的矿物燃料。所以它们的组成主要是有机化合物以及部分无机化合物、水分和灰分。人造燃料就是对这些天然燃料进行加工处理后所得到的各种产品。因为直接利用天然燃料不能满足各工业部门对燃料的要求。此外，直接燃烧天然燃料是很不经济，在技术上也很不合理，应当开展综合利用。把天然燃料首先作为化工、冶金工业的原料，从中加工出各种工艺过程所需的人造燃料，并同时提取出为国民经济各部门所需的贵重产品。

从动植物转变成燃料是一个漫长的过程，需经过好几千万年、甚至几亿年的时间，并经历一系列复杂的变化过程。如以固体燃料煤为例，在它的生成过程中将经历下述三个作用阶段。

(1) 植物质的堆积阶段。

(2) 菌解作用阶段。即在隔绝空气条件下，植物以细菌作用为主进行着缓慢的分解而致腐烂的过程。在此过程中，植物中各有机物质发生分解，其中部分植物体分解成腐植酸，部分或成为气体逸出(如 CO 、 CO_2 和 O_2 等气体)或溶于地下水而被带走。此外，还有部分木质素、纤维素和树脂等没有分解，还保留着原有植物的形态(如根、茎、叶及树皮等)。经过这一过程后，残留体中的氢、氧相对地减少，而碳素含量相对地增加，这就完成了煤形成的第

一阶段——泥煤过程。

(3) 碳化作用阶段。泥煤形成后，若所在地区地质发生变化，如地壳下沉等，泥煤床被岩石层覆盖，在地热和压力作用下泥煤进一步变质，逐渐变成坚实的物质，这就形成了所谓“褐煤”。所谓煤的变质就是指在煤的形成过程中，受到压缩与坚固，同时其中的水分及挥发物不断挥发与减少，因而在这变化过程中，碳的含量逐渐增加、而 O_2 、 H_2 、 N_2 的含量则相对地减少。这一过程通称为煤的碳化过程。显然，煤的碳化程度愈高，碳的含量就愈多。埋藏愈深、时间愈久、受到压力愈高，碳化程度也愈深。所以煤的生成过程可以说就是煤的碳化过程。碳化程度最深的煤是无烟煤，它的可燃质中碳的含量可高达90~93%，其次是烟煤、褐煤、泥煤。一般认为碳化程度越浅的煤，其地质成煤年龄越短(但非绝对，因煤的碳化程度、速度与许多因素有关，如矿藏条件、土壤中水分的存在和各种地质现象等，因此，如无烟煤的地质年龄有可能比烟煤小)。

图 2-1 为各种煤组分的变化。

二、燃料的化学组成

从上述可知，燃料是一种复杂的混合物，它是由有机可燃质和不可燃的无机矿物杂质(灰分)与水分等组成。

任何一种气体燃料都是由一些具有化学特性的单一气体(简单化合物或单质)混合而成，其中可燃性的气体有 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_nH_m 以及 H_2S 等，不可燃的气体组成有 CO_2 、 N_2 、和少量的 O_2 (参看表 2-15、表 2-16 和表 2-17)。在气体燃料中还含有水蒸气、焦油蒸气以及粉尘等固体微粒。

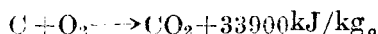
固体燃料和液体燃料中的可燃物质是各种复杂的高分子有机化合物的混合物。它们的分子结构和性质至今还不甚清楚，因此要分析测定其化学构成是极其困难的。根据燃料的元素分析可知，这些可燃的有机化合物都是由碳、氢、氧、氮、硫等化学元素所组成。因此在一般工程计算中(如进行燃料燃烧计算等)可认为燃料就是由这些元素组成的机械混合物，而不考虑由这些元素所构成的各有机化合物的单独性质。显然，这样做是不严格的，它不能反映出燃料的全部特性，但是用它作为燃料燃烧计算的原始数据，粗略区分燃料品种和估算燃料发热量等却还是十分有用的。

测定组成燃料的各化学元素需要有比较复杂的设备和熟练的技巧，因此都由专门的化学试验室来担任，并按国家规定的标准(GB476—79)进行测定。

虽然燃料的化学元素组成不能用来确定和判断燃料的特性，但燃料中各组成元素的性质及其含量与燃料燃烧性能却密切相关，现简要阐述如下。

1. 碳

碳是燃料中最主要的可燃元素。它的发热量为 33900kJ/kg 即每 kg 碳完全燃烧时能放出 33900kJ 的热量，



碳在固体燃料可燃质中的含量是相当高的，一般超过50%，且随着碳化程度的加深，含

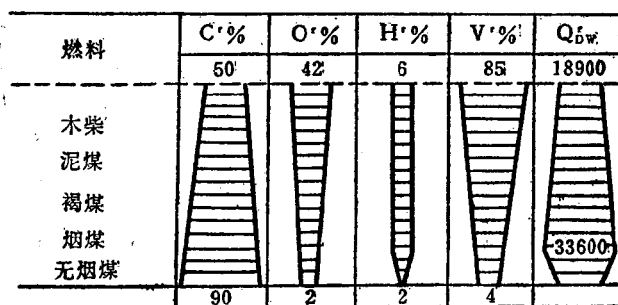


图 2-1 煤的组分变化 Q_{dw}的单位: kJ/kg

碳量越来越多(见表2-8)。燃料发热量的高低可以说主要是由含碳量多少决定的。碳在液体燃料中的含量比在固体燃料中的含量高,且不同油品的含碳量大致相同,约为85~87% (见表2-10)。

碳是一种较难燃烧的元素,需要在较高温度下才能着火燃烧,所以碳化程度深的固体燃料(如无烟煤等),就不太容易着火燃烧。

2. 氢

氢是燃料中最有利的可燃元素。它燃烧时能放出大量的热量,1kg氢燃烧后生成水时放出的热量约为142400kJ,约相当于碳发热量的四倍半。此外,氢最易燃烧,所以燃料中含氢愈多,燃料就愈易着火,且燃烧得亦愈好。但氢在固体燃料中的含量很少,约为2~6%,且随碳化程度加深,氢的含量逐渐减少(见表2-8)。所以无烟煤中含氢量最少。氢在液体燃料中的含量较固体燃料为高,一般为11~14%,不同油品的含氢量都差不多,且碳、氢两元素的总含量可占其可燃质元素组成总量的96~99.5%。所以,液体燃料(石油)主要是由碳和氢两元素组成,其发热量相当高,一般为 $Q_{DW}=39800\sim44000\text{kJ/kg}$ 。

在液体燃料中,碳、氢两元素相互结合成复杂的有机化合物。这种碳氢化合物在有机化学中称为烃。根据结合时构造和形状的不同,烃可以有成千上万种。石油就是这种不同的烃类化合物的液态混合物。

氢在固体燃料中,一部分与氧化合形成结晶状态的水,该部分氢称为“化合氢”,它不能燃烧放热;而未和氧化合的那部分氢称为“自由氢”,它和其他元素(如碳、硫等)化合,构成可燃化合物,在燃烧时与空气中氧反应能放出很高的热量。

含氢较多的燃料燃烧时,易于生成碳黑。含有大量氢的固体燃料在贮藏时容易风化,风化时会失去部分可燃元素,其中首先是氢。

3. 硫

硫是燃料中最有害的可燃元素。虽然它在燃烧时可放出少量的热量(每kg硫燃烧时可放出10500kJ的热量,约为碳发热量的 $\frac{1}{3}$),但它在燃烧后会生成 SO_2 与 SO_3 气体,这些气体与烟气中水蒸气结合,形成硫酸或亚硫酸等蒸气,对燃烧设备的金属表面会引起严重的腐蚀作用。此外, SO_2 与 SO_3 如随烟气排到大气中的话,则会污染大气,对周围的人和动植物的生活与生长有着严重的危害性。

因此,燃料中含硫是十分有害的,尤其是液体燃料,因为液体燃料中含氢量较固体燃料为高,燃烧后会生成大量的水蒸气。所以液体燃料中含硫造成的危害性较固体燃料更大。一般对硫在液体燃料中的含量都有严格的要求。我国石油含硫量大都很少($S<1\%$)。按照含硫的多少,石油(原油)可分为低硫油($S<0.5\%$,如大庆原油)、中硫油($0.5\sim1\%$,如胜利原油)及高硫油($>1\%$,如中东原油)三种。

固体燃料中含硫量一般不多,我国煤的含硫量约在 $0.5\sim3\%$,亦有少数煤种超过3%。

硫在燃料中也是以化合物形式存在。它可以呈有机硫和无机硫(如黄铁矿硫和硫酸盐硫)二种形态。有机硫和黄铁矿硫在空气中燃烧能放出热量并生成 SO_2 ;而硫酸盐硫是不能燃烧的,在燃烧时几乎不分解地转入到灰渣中去,故它属于燃料中灰分的一部分。

4. 氧和氮

氧和氮是燃料的内部杂质,两者都不能燃烧。它们的存在对燃烧没有什么好处,且相对地减少了可燃元素碳和氢的含量,因而使燃料发热量减少。氧在燃料中是呈化合物状态存在

的，它与一部分可燃元素(如氢和碳)结合成化合物，这样就约束了一部分可燃成分，使燃料发热量进一步减少。

氮既不能燃烧，亦不能助燃，因此在燃烧时一般不参加反应而进入到烟气中去。但在温度高和含氮量高的情况下，将会产生氮氧化物(NO_x)等物质，排入大气会造成环境污染。氮在固体燃料和液体燃料中含量一般都不高(见表 2-8 及表 2-10)，然而某些气体燃料中氮的含量却占有很大比例。

在元素分析中，习惯上把氧和氮都归并在燃料的可燃质项目下，然而按照它们的化学性质，这样做法是不确切的。

5. 水分

在燃料中除了上述三种有机可燃质元素外，还有不可燃的无机矿物质：灰分和水分。显然，这两种成分对燃料燃烧来说都是无用的物质，是所谓燃料的外部杂质。它们的存在不仅减少了可燃元素的含量，降低了燃料发热量，同时还给燃料的燃烧带来一定的困难，如不易着火、燃烧后结渣等。

液体燃料石油中水分含量一般不多，规定应在 2% 以下。在贮存、装卸和运输过程中水分有可能增加(例如用水蒸气直接加温)；在石油炼制过程中水分亦会发生变化，故石油中水分不是恒定不变的。

固体燃料煤中水分含量相对来说比较高，且变动范围也很大，同时不同碳化程度的煤，水分含量相差也很大(见表 2-2)。

表 2-2 不同碳化程度煤的水分含量

水分含量 \ 煤 种	泥 煤	褐 煤	烟 煤	无 烟 煤
原煤水分含量%	60~90	30~60	4~15	2~4
风干后水分含量%	40~50	10~40	1~8	1~2

原煤中水分含量比较高是由于煤在开采、洗选、运输、贮存等过程中吸附了大量水分的缘故。吸附在煤块表面的水分利用在空气中自然风干的方法就可以除去，一般通称为外在水分。显然，外在水分的含量受外界条件变动的影响很大。被吸附在煤块内部结构里的水分，以物理化学方式与煤质相结合，就不能用自然风干方法来排除，需放置在干燥炉内加热($102 \sim 105^\circ\text{C}$)才能除去，这部分水分称为内在水分。经排除内在水分后的燃料谓之绝对干燥燃料。一般说，煤的内在水分含量比较稳定。此外煤的矿物质中还含有少量结晶水，它需要加热到更高温度才能除去。

6. 灰分

液体燃料石油中灰分含量是很少的，一般在 0.05% 以下。它们大都是由碱金属或碱土金属的氯化物和硫酸盐等盐类组成。燃烧后，它们将以灰尘的形式随烟气带走，这会引起各类燃烧装置和通道阻塞、磨损，并影响传热。如含有钒、钠等化合物(钠盐、钒盐)时还会产生高温腐蚀。

固体燃料煤中的灰分含量比较多，而且其范围亦很大，约从 5%~50%。油页岩灰分最高，可达 80%。国产煤的灰分大致如下：

煤 种	无烟煤	烟 煤	褐 煤
干燥基灰分%	6~16%	7~29%	11~31%

燃料中灰分主要来自其中所含的一些不能燃烧的矿物杂质，在燃烧过程中经高温分解和氧化作用后所形成的固体残留物。这些形成灰分的矿物杂质部分是在燃料形成过程中混杂进来的，部分是在燃料开采、运输和贮存过程中由外界带进来的。由外界带进的矿物杂质形成的灰分称为外灰分，燃料中灰分大部分是这种灰分，它的数量主要取决于外界条件。故同一煤种的燃料可以具有数量上相差很大的灰分。

因为灰分的存在会相对地减少燃料中可燃物质的含量，降低发热量；同时还易造成燃料不完全燃烧和给设备的维护与操作带来困难，所以燃料中灰分含量是衡量煤质经济价值的一个很主要的指标。

对于燃煤的各种炉子来说，除了需考虑煤的灰分多少外，还需注意到灰分的熔点。因若灰分熔点过低，则炉灰容易在炉栅上结成大块，影响通风，同时使清灰除渣发生困难。所以一般要求灰分熔点(软化温度)不低于1200℃。

三、燃料组成的表示方法

固体燃料和液体燃料的各元素组成，碳、氢、氧、氮、硫、水分和灰分，通常用其相对质量(即质量百分数)来表示，即

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y + A^y + W^y = 100\%, \quad (2-1)$$

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、灰分和水分的元素组成的质量百分数。这里 W^y 应是燃料中总的水分含量(或称全水分)的质量百分数，它指内在水分 W_a^y 和外在水分 W_w^y 两者之和，即 $W^y = W_a^y + W_w^y$ 。

由于燃料中水分和灰分常受季节、运输和贮存等外界条件变动的影响，数值会有很大的波动。同一种燃料由于取样时条件不同，或者在同一实验条件下由于所采用的分析基准不一样，则所得的结果亦都会不相同。所以固体燃料和液体燃料的元素分析值都必须标明所采用的基准，否则就无意义。

根据各种实际需要，固体燃料和液体燃料的元素分析常采用以下四种基准组成来表示：应用基、分析基、干燥基和可燃基。

1. 应用基组成(用上角标y表示)*

应用基(或称为工作基)组成是以包括全水分和灰分在内所有燃料组成的总和作计算基准(100%)。这时燃料的元素组成可写成如式(2-1)。式中各项分别称为应用基含碳量 C^y ，应用基含氢量 H^y ，等等。

按应用基组成表示的燃料组成反映了燃料在实际应用时的成分，它相当于即将送入燃烧设备进行燃烧的燃料。这种状态的燃料有时也称为工作燃料(对固体燃料，或称为原煤)。

燃料的燃烧计算，应按应用基组成来进行。

由前述可知，燃料中水分和灰分的含量常受外界条件的影响而波动，而燃料的元素组成却是以其相对含量百分比来表示的，因此当其中某一项含量发生改变，则所有各项所占的百分比都要相应地改变。这样在理论分析或实验研究中引用燃料分析资料时就显得不方便，此时应用基组成就不能正确地反映燃料的特性。因此就有所谓分析基、干燥基与可燃基等组成

*这里上角标y与下面的f、g、r，是应用基、分析基、干燥基和可燃基的第一或第二个汉字拼音的首字。

表示法。这些都是实验室分析、进行燃料分类和研究燃料特性时所采用的。

2. 分析基组成(用上角标 f 表示)

分析基组成是以空气风干后的所有燃料组成的总和作计算基准。显然这时固体燃料中的外在水分已逸出, 剩留在燃料中的只有内在水分。所以, 燃料的元素分析基组成为

$$C^f + H^f + O^f + N^f + S^f + A^f + W^f = 100\%, \quad (2-2)$$

式中 $W^f = W_a^f$ 称为分析基水分。分析基水分与应用基水分(亦即全水分)之间关系可以用下式来表示:

$$W^y = W_w^y + W^f \times \frac{100 - W_w^y}{100}. \quad (2-3)$$

上式可用来根据外在水分和内在水分计算出全水分。

分析基组成之所以被采用是由于燃料的分析都是在试验室里进行的, 但为了避免水分在分析过程中发生变动, 燃料试样必须先经过空气风干, 这样一部分不很稳定的外在水分就先蒸发消失, 余下的是稳定不变的内在水分。所以一般煤质分析资料和矿山所提供的煤质资料中的水分往往都是这种分析基水分。

有时为了正确地判断燃料中灰分的多寡, 必须在无水的基础上进行分析比较, 这就需要干燥基组成。

3. 干燥基组成(用上角标 g 表示)

干燥基组成是以干燥的, 即已除去全部水分的所有燃料组成的总和作计算基准, 所以燃料中水分即使发生变动, 干燥基组成仍保持不变。燃料的干燥基组成可由下式表示:

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g + A^g = 100\%, \quad (2-4)$$

式中 A^g 为干燥基灰分, 它能比较真实地反映出燃料中灰分含量。燃料中水分含量则应使用反映使用状态的应用基水分 W^y 来表示才较合理。

因为燃料中灰分含量如同水分一样易受外界因素的影响, 变动较大, 故若把水分和灰分这类不稳定性较大的成分去掉, 不计在燃料的组成内, 则可得到不受外界影响的可燃基组成。

4. 可燃基组成(用上角标 r 表示)

可燃基组成是以无水无灰的可燃质元素组成的总和作计算基准。燃料的可燃基组成可以写成

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100\% \quad (2-5)$$

显然, 可燃基组成不受水分、灰分变化的影响, 它能较真实地反映燃料的特性。一般同一矿井的煤的可燃基组成变化不大, 至多随着开采煤层的转移有稍许的变化, 因此以可燃基组成来表示燃料的元素组成是较为合理的。所以煤矿中的煤质资料都是以可燃基组成表示的, 且可用它来判别煤种(如褐煤、烟煤和无烟煤)及其属性。

图 2-2 系用图解的形式表达出上述各种基的相互间关系。

由前述可知, 燃料特性一般用

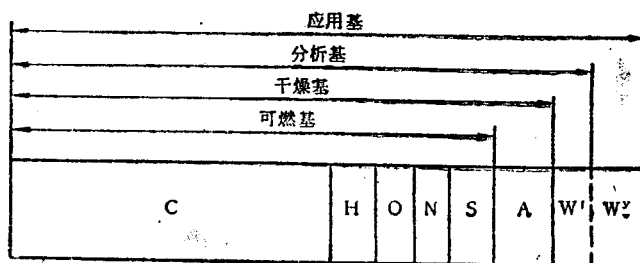


图 2-2 燃料各组成与计算基准的关系

比较稳定的可燃基组成来表示；灰分通用干燥基组成来表示；水分则用应用基组成来表示。但在燃烧计算中却又需要用应用基组成表示的全部元素组成，因此就有必要对它们进行相互间的换算。换算时只需将被换算的基准组成乘上一相应的换算系数，如将可燃基换算为应用基时，可按下式进行：

$$\left. \begin{aligned} C^y &= C^r \frac{100 - (A^y + W^y)}{100} \% \\ H^y &= H^r \frac{100 - (A^y + W^y)}{100} \% \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

各种基准之间的换算系数见表2-3。

表 2-3 燃料组成换算系数

已知组成	角 标	所 求 组 成			
		应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应用基	y	1	$\frac{100 - W^f}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - (A^y + W^y)}$
分析基	f	$\frac{100 - W^y}{100 - W^f}$	1	$\frac{100}{100 - W^f}$	$\frac{100}{100 - (A^f + W^f)}$
干燥基	g	$\frac{100 - W^y}{100}$	$\frac{100 - W^f}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^g}$
可燃基	r	$\frac{100 - (A^y + W^y)}{100}$	$\frac{100 - (A^f + W^f)}{100}$	$\frac{100 - A^g}{100}$	1

在换算中有时会遇到这样一种情况：即同一煤种的煤由于水分变动（例如淋雨、掺水，蒸发，干燥）而引起组成的变化，需要计算变动后的应用基组成，例如某一种煤原先的应用基水分为 W_1^y ，而变动后的水分为 W_2^y ，则对于同一种煤，水分的变化不应影响其干燥基组成，因此可写出

$$C^g = C_1^y \frac{100}{100 - W_1^y} = C_2^y \frac{100}{100 - W_2^y}, \quad C_2^y = C_1^y \frac{100 - W_1^y}{100 - W_2^y} \quad (2-7)$$

上述换算关系即相当于应用基与分析基之间的换算，后者可视为这种情况下的一个特例。

气体燃料是由一些具有独立化学特性的单一气体混合而成，所以它的化学组成就可用各种单一气体的体积百分数来表示。若包含水分（水蒸气）在内的则称为“湿气体组成”，不包含水分在内的则称为“干气体组成”^{*}，如

$$CO^g + H_2^g + CH_4^g + \cdots + CO_2^g + N_2^g + O_2^g = 100\%, \quad (2-8)$$

$$CO^g + H_2^g + CH_4^g + \cdots + CO_2^g + N_2^g + O_2^g + H_2O^g = 100\% \quad (2-9)$$

这里上角标 g 与 s 分别表示干气体组成和湿气体组成。

气体燃料中所含的水分一般等于在该温度下的饱和水蒸气量。若温度发生改变，则饱和水蒸气量也随之发生改变，因而气体燃料的湿气体组成也就不同。所以对气体燃料的湿气体组成就必须注明温度，否则就无意义了。在技术资料中，为了免除这一影响，气体燃料一

^{*} 事实上除去摄氏温度在五六十度以上的发生炉煤气外，其他煤气或温度不高的发生炉煤气中，水蒸气含量都可不予考虑。

般都用干气体组成来表示。

但是在进行燃烧计算时，又必须用气体燃料的湿气体组成作为计算的依据，因此就需要根据该温度下的水分含量 H_2O^s 将干气体组成换算成湿气体组成。它们之间的换算关系如下：

$$X^s = X^g \frac{100 - H_2O^s}{100} \% \quad (2-10)$$

式中 X^s 和 X^g 相应表示在湿气体组成和干气体组成下的某种单一气体的体积百分数。 H_2O^s 则表示在该温度下的水分含量，亦即为 $100m^3$ 的湿气体燃料中所含有水蒸气的体积。

不同温度下的水分含量 H_2O^s 可以按下法来求得：先从表 2-4 中查得不同温度下 $1m^3$ 干气体所能吸收的饱和水蒸气的质量 $g_{H_2O}^s(g/m^3 \text{ 干气体})$ ，然后根据下式可求得在一定温度时的 H_2O^s 值：

表 2-4 不同温度下的饱和水蒸气量

温度	饱和水蒸气分压	每(Nm ³)含水蒸气量(g)		温度	饱和水蒸气分压	每(Nm ³)含水蒸气量(g)	
℃	(×133.322Pa)	按湿气体计算	按干气体计算	℃	(×133.322Pa)	按湿气体计算	按干气体计算
20	17.5	18.5	19.0	39	52.4	55.4	59.6
21	18.9	19.7	20.2	40	55.3	58.5	63.1
22	19.8	21.0	21.5	42	61.5	65.0	70.8
23	21.1	22.3	22.9	44	68.3	72.2	79.3
24	22.4	23.7	24.4	46	75.5	80.0	88.8
25	23.8	25.1	26.0	48	83.7	89.5	99.5
26	25.2	26.7	27.6	50	92.5	97.8	111.0
27	26.7	28.3	29.3	52	102.1	108.0	125.0
28	28.3	30.0	31.1	54	112.5	119.0	140.0
29	30.0	31.8	33.1	56	123.8	131.0	156.0
30	31.8	33.6	35.1	57	129.8	137.0	166.0
31	33.7	35.6	37.3	58	136.1	144.0	175.0
32	35.7	37.7	39.6	60	149.4	158.0	197.0
33	37.7	39.9	42.0	62	163.8	173.0	221.0
34	39.9	42.2	44.5	64	179.3	190.0	248.0
35	42.2	45.5	47.3	66	196.1	207.0	280.0
36	44.6	47.1	50.1	68	214.2	226.0	315.0
37	47.1	49.8	53.1	70	233.7	247.0	357.0
38	49.7	52.2	56.2	72	254.6	269.0	405.0

* Nm³ 为在标准大气压(1.01325×10⁵Pa)和温度 273K 标准状态下的体积。

$$H_2O^s = \frac{0.00124g_{H_2O}^s}{1 + 0.00124g_{H_2O}^s} \times 100\% \quad (2-11)$$

这里 0.00124 为标准状态下每克水蒸气的体积(m³)。

§ 2-2 燃料的发热量

燃料的发热量(或称热值)是指单位质量或单位体积(对气体燃料而言)的燃料完全燃烧时所能释放出的最大热量,一般用 kJ/kg (kcal/kg)* (对固体和液体燃料)。或 kJ/Nm^3 (kcal/Nm^3)** (对气体燃料)来表示。它是衡量燃料作为能源的一个很重要的指标。

燃料发热量的高低显然决定于燃料中含有可燃物质的多少。但是,固体燃料和液体燃料的发热量并不等于各可燃物质组成(碳、氢、硫等)发热量的代数和。因它们不是这些元素的机械混合物,而是具有极其复杂的化合关系,所以难于导出理论公式来进行计算。目前,最可靠地确定燃料发热量的办法是依靠实验测定。

气体燃料因为是由一些具有独立化学特性的单一可燃气体所组成,而每种单一可燃气体的发热量可以精确地测定(表 2-5 为一些常见单一可燃气体的发热量测定值),因此气体燃料的发热量可以按每单一可燃气体组成的发热量计算后相加起来,即

$$Q_{\text{DW}} = (30.22\text{CO}\% + 25.71\text{H}_2\% + 85.40\text{CH}_4\% + 142.18\text{C}_2\text{H}_4\% + \dots + 55.20\text{H}_2\text{S}\%) \times 4.1868 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)}。 \quad (2-12)$$

表 2-5 可燃气体的发热量(Q_{DW})

可燃气体	氢 (H_2)	一氧化碳 (CO)	甲烷 (CH_4)	乙烷 (C_2H_6)	丙烷 (C_3H_8)	乙炔 (C_2H_2)	乙烯 (C_2H_4)	丙烯 (C_3H_6)	硫化氢 (H_2S)
kJ/Nm^3	10800	12700	36000	64400	93600	56500	59500	86300	23100

表 2-6 为一些常用的固体、液体和气体燃料的发热量值。

表 2-6 一些常用的固体、液体和气体燃料的低发热量

固体燃料	发热量 Q_{DW}^{L} kJ/kg	液体燃料	发热量 Q_{DW}^{L} kJ/kg	气体燃料	发热量 Q_{DW}^{L} kJ/Nm ³
泥 煤	8380~10500	航空汽油	>43100	天然气	33500~46100
褐 煤	10500~16700	航空煤油	>42900	高炉煤气	3350~4200
烟 煤	20900~25100	柴油	~42500	焦炉煤气	13000~16800
贫 煤	25100~29300	重油	39800~41900	发生炉煤气	3770~6700
无烟煤	20900~25100			水煤气	10000~11300

从表 2-6 可见,各种液体燃料的发热量相差不多,都在 41900kJ/kg 左右,而气体燃料与固体燃料的发热量则随燃料品种不同而不同。一般说,天然气的发热量较高,而人造气体燃料中由于不可燃组成较多,发热量较低,且其组成随制气工艺过程的不同而不同,因而发热量数值亦就有很大的差别。固体燃料的发热量随着碳化程度加深而增加,当含碳量为 87% 左右时,发热量达到最大值,以后则开始下降。无烟煤的发热量较烟煤为低,这是因为无烟

* $1\text{kJ/kg} = 0.23885\text{kcal/kg}$

** $1\text{kJ/Nm}^3 = 0.23885\text{kcal/Nm}^3$