



燃烧技术

曾汉才 韩才元

吴学曾 张永廉

华中理工大学出版社

RANSHAOJISHU

内 容 简 介

本书是根据工程热物理专业的特点与要求来阐述燃烧装置和燃烧技术。内容包括：燃料成分与特性；燃料燃烧计算；气体、液体与固体燃料的燃烧原理；燃烧装置与燃烧技术；燃烧引起的环境污染和防治；燃烧试验与模化等。

本书是高等学校工程热物理专业和热能工程专业的教材，也可供电厂热能动力专业和有关工程技术人员参考。

燃 烧 技 术

曾汉才 韩才元

吴学曾 张永廉

责任编辑 易秋明

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：7.625 插页：2 字数：188 000

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数：1—2 000

ISBN7-5609-0439-4/TK·16

定价：1.58元

前 言

根据全国工程热物理专业教学计划安排编写的《燃烧技术》，全书共分七章，首先介绍各类燃料的成分及燃烧计算，然后分别论述气体、液体和固体燃料的燃烧原理、燃烧装置及一些技术问题，最后叙述燃烧引起的环境污染和防治，以及燃烧试验和模化方法。

本书的绪论、第七章和第五、六章分别由华中理工大学韩才元和曾汉才编写；第二、四章由东南大学张永廉编写；第三章由清华大学吴学曾编写。全书由曾汉才主编，中国科技大学程久生主审。

本书是全国工程热物理专业通用教材，也可作为热能专业教学参考书，并可供有关工程技术人员参考。

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1. 课程的性质、任务及主要内容	(1)
§ 2 燃烧技术的研究方法	(2)
§2.1 物理模拟.....	(2)
§2.2 工程应用的研究方法.....	(3)
§2.3 数值模拟的研究方法.....	(4)
第二章 燃料及燃烧计算	(6)
§ 1. 燃料的分类	(6)
§ 2. 固体燃料	(7)
§2.1 煤的化学成分及其表示方法	(7)
§2.2 煤的发热量	(12)
§2.3 煤的物理和化学性质	(13)
§2.4 煤的类别	(16)
§2.5 其它固体燃料	(19)
§ 3 液体燃料	(19)
§3.1 液体燃料的化学成分及其表示方法	(21)
§3.2 液体燃料的物理和化学性质	(21)
§3.3 液体燃料的类别	(24)
§3.4 乳化燃料的物理和化学性质	(26)
§ 4 气体燃料	(26)
§4.1 气体燃料的化学成分及其表示方法	(26)
§4.2 气体燃料的发热量	(27)
§4.3 气体燃料的类别	(30)
§ 5 燃烧过程的物质平衡	(32)
§5.1 完全燃烧所需的空气量	(33)
§5.2 完全燃烧产生的烟气量	(37)
§5.3 不完全燃烧产生的烟气量	(41)

§5.4 完全燃烧方程及过量空气系数的确定	(46)
§ 6. 燃烧过程的热平衡	(50)
§6.1 完全燃烧时的燃烧温度	(51)
§6.2 不完全燃烧(有离解)时的燃烧温度	(53)
§6.3 实际燃烧温度	(55)
§6.4 提高理论燃烧温度的途径	(55)
第三章 气体燃料的燃烧技术	(64)
§ 1. 气体燃料燃烧的特点	(64)
§ 2. 气体燃料的预混燃烧	(66)
§2.1 预混火焰的传播	(66)
§2.2 预混火焰的稳定	(68)
§2.3 喷射式烧咀	(72)
§2.4 喷射式平焰烧咀	(91)
§2.5 助喷式烧咀	(92)
§ 3. 气体燃料的扩散燃烧	(93)
§3.1 扩散燃烧的特点	(93)
§3.2 扩散燃烧火焰	(94)
§3.3 扩散火焰燃烧器	(97)
第四章 液体燃料的燃烧技术	(106)
§ 1. 液体燃料的雾化	(106)
§1.1 雾化方法	(107)
§1.2 雾化机理	(108)
§1.3 雾化质量指标	(109)
§ 2. 雾化燃烧过程	(113)
§2.1 雾化燃烧过程的组织	(114)
§2.2 低质燃料油(渣油、重油)的燃烧	(119)
§2.3 乳化燃烧	(121)
§ 3. 喷咀	(123)
§3.1 机械式喷咀	(123)
§3.2 气动式喷咀	(133)
§3.3 旋转式喷咀	(140)
§ 4. 液体燃料燃烧装置	(142)

§ 5. 液体燃料喷嘴的设计计算	(144)
§5.1 机械式喷嘴	(144)
§5.2 气动式喷嘴	(147)
第五章 固体燃料燃烧技术	(154)
§ 1. 固体燃料燃烧过程及其特点	(154)
§ 2. 层燃炉	(156)
§2.1 固定火床炉	(156)
§2.2 抛煤机炉	(159)
§2.3 链条炉	(160)
§2.4 抛煤机链条炉	(164)
§ 3. 粉煤燃烧	(164)
§3.1 煤粉特性	(165)
§3.2 煤粉燃烧系统	(166)
§3.3 煤粉气流的着火和燃烧	(170)
§3.4 煤粉的燃烧时间	(174)
§ 4. 旋风燃烧	(177)
§4.1 旋风炉内空气动力特性	(178)
§4.2 旋风炉内煤粒浓度的分布	(180)
§4.3 旋风炉内的燃烧过程	(181)
§ 5. 沸腾燃烧	(183)
§5.1 沸腾床的空气动力特性	(183)
§5.2 沸腾床燃烧特性	(187)
第六章 燃烧污染和防治	(191)
§ 1. NO_x 的生成与控制	(191)
§ 2. SO_x 的生成与控制	(194)
§ 3. 烟尘的生成与控制	(196)
§ 4. 燃烧噪声的生成与控制	(198)
第七章 燃烧试验和模化	(199)
§ 1. 燃烧试验	(199)
§ 2. 模化	(200)
§ 3. 相似准则	(202)

§3.1 相似准则及其推导	(202)
§3.2 燃烧过程的相似准则	(210)
§ 4 . 流动过程的相似条件和模化方法	(214)
§4.1 相似条件	(214)
§4.2 模化方法	(218)
§ 5 . 燃烧过程的近似模化	(223)
§5.1 燃烧器出口流场的近似模化	(224)
§5.2 燃烧室模化及实例	(228)

第一章 绪 论

§ 1. 课程的性质、任务及主要内容

《燃烧技术》是工程热物理专业的一门专业课，是《燃烧学》的后续课程。

《燃烧学》的内容侧重于燃烧基本理论，而《燃烧技术》则侧重于燃烧理论的实际应用，解决燃烧工程中的具体问题。两门课程密切相关。

本课程的任务是使学生在掌握燃烧理论的基础上，熟悉工程中各种典型燃烧设备和燃烧技术，研究新型的燃烧方式，培养学生分析和解决燃烧工程中问题的能力和创造能力。

燃料燃烧技术在国民经济的发展中尤其是在能源工程中起着十分重要的作用。在我国，煤是一种主要的燃料。我国煤炭储量十分丰富，产煤量逐年增加，1985年达8.5亿吨，1990年将达10亿吨。但是，我国能源利用很不合理。能源利用率低，浪费很大，国民经济的单位产值能耗指标很高。例如，欧洲共同体的能源利用率为40%，美国为51%，日本高达75%，我国仅为28%。1980年日本的单位产值能耗为2.2万吨标准煤/亿元产值，我国则高达12.42万吨标准煤/亿元产值。这些数字表明，对于相同的产值，我国消耗的标准煤是日本的5.65倍。造成这个事实的原因是多方面的，我国燃烧设备的热效率低则是其重要原因。例如我国工业锅炉的热效率低达50~60%，而英国和日本则分别高达71%和80%。我国工业窑炉的热效率更低（30%以下）。经调查，全国

工业窑炉总耗能量为1.7亿吨标准煤，占全国总耗能量的25%左右。由此可见，我国工业窑炉节能的必要性和艰巨性。节能的方法很多，改进燃烧技术和提高燃烧效率是一个重要方面。

燃料在燃烧过程中产生大量的有害污染物（如氮氧化物、硫氧化物和粉尘等），严重污染大气环境和危害人体的健康。煤是最脏的燃料，煤中含N量大，所以 NO_x 生成量大；煤中矿物质多，故粉尘量大。至于 SO_2 ，由于煤的热值比重油低得多，所以，即使含硫量相同，则煤排出的 SO_2 比重油的相应增多。在我国，由煤燃烧产生的污染物占80%以上。由于人类对保护环境的要求日益严格，因此，采用净化燃烧、控制和减少有害污染物的排放，是当前燃烧技术发展趋势，必须予以足够的重视。

因此，燃烧技术所要解决的问题较多、较复杂，知识面要求较宽。仅靠书本知识是不够的。本课程的任务只是培养学生掌握工程中典型的燃烧技术，培养解决问题的能力。

本课程的主要内容包括：燃料及燃烧计算；气体燃料和液体燃料的燃烧；固体燃料燃烧（本书的重点），此外，还阐述燃烧引起的污染及其控制方法；最后介绍燃烧试验和模化方法。

§ 2. 燃烧技术的研究方法

燃烧技术研究的内容主要是，研究提高工业窑炉、工业锅炉和电站锅炉等燃烧设备的热效率，降低单位能耗；研究减少有害污染物的排放，保护环境。

研究方法包括物理模拟、工程应用和计算机数值模拟等。

§ 2.1 物理模拟

因燃烧设备较大，一般用模型进行研究。模型研究有以下几种方法

①总体模化

总体模化是指整个燃烧设备的模化。例如同时研究燃烧器和炉膛的总体性能，其研究结果更接近于实际。这个整体模型可以是实验室小模型，也可以是现场试验大模型。只要小模型和大模型内发生的物理化学过程是相似的，则大模型模拟结果可以比较可靠地推广到几何相似倍数更大的原型上去。

如果情况复杂，则可以先得出各局部区域的模拟试验结果，综合整体试验就可得到整体的结果。

如果现象复杂，所支配的物理法则较多而又不能忽略，则可暂不考虑一般情况，而仅就二、三个特殊现象研究其各自的相似，最后把结果进行综合，或进行总体性近似模化，得到总体的最佳状况。

例如，锅炉中的燃烧过程，既涉及到燃烧器，又涉及到炉膛，模型研究时可以单独设计燃烧器的冷态和热态单项试验台，设计炉膛模化的冷态和热态单项试验台，然后建立整体的燃烧试验台或在工厂中进行小型或中型的工业性试验，再推广应用到更大型的燃烧设备上。又例如窑炉炉膛的燃烧过程，对各种受热面既有辐射传热，又有对流传热，如果两者都在同一模型上考虑，则模型难以建立，这时可以单独研究辐射传热模型和对流传热模型，最后进行综合的传热过程研究。

②局部模化

局部模化包括两方面的内容，一是局部设备的模化，例如单个燃烧器模化、炉膛模化等；二是研究燃烧过程中的子过程，如着火过程、燃尽过程等。局部模化研究的目的是改造某个设备的性能与结构特性，或改进运行条件和研究燃烧过程的规律。

§ 2.2 工程应用的研究方法

实际上，燃烧技术的研究更多的是现场的技术改造、设备更新

和新产品设计。这些在工程实际上往往是简单易行的，而且能够收到较明显的经济效益和社会效益。这是一种很实际的又有实用价值的燃烧技术研究方法。

§ 2.3 数值模拟的研究方法

电子数字计算机的出现，使得科学研究和工程设计计算中的复杂问题有了求解的可能。也就是首先建立数学模型，用数值模拟的方法进行求解。

物理模拟的方法和数值模拟的方法相比，它的最大特点是直观性强，针对性也强，可信性和可靠性大，很容易直接应用到实际工程上。但是，模型研究方法，要完全满足对于复杂的燃烧过程模型相似所应遵守的条件是极为困难的，有时甚至是无法实现的。因此，物理模拟方法有时比较难于应用。而且，在改造或设计燃烧设备时，常常需要在若干个甚至几十个方案中选择最优结构或最佳运行参数，这时将要制作许多实体模型或改变运行参数，要做大量的试验，耗费较多的人力、物力和时间。

在电子计算机上进行数值模拟比模型研究有很大的优越性。这种方法不仅可以应用于开发研究，燃烧基础研究，而且也可以对不同规模的设计和操作条件进行考察对比，寻求最佳方案。数值模拟可以用于各种设备的详细设计，也可以用于改变操作条件以及提高生产能力的场合。这种方法可用于较大和复杂的系统，也可以很快地得到较准确的结果，而耗费的人力、物力和时间却不多。它的通用性强，程序可以标准化，对具体研究对象只做部分修正即可。变量可以是连续的或离散的。线性和非线性问题都可以求解，用这种方法很容易改变输入变量，求得多种情况下的结果。

但是，数值模拟方法也有缺点，并受到一定的限制。首先，建立燃烧过程的数学模型主要取决于对所模拟过程的内在规律的

认识，只有在掌握大量实验结果和基础理论研究成果的基础上，才有可能建立可靠的数学模型；第二，当缺少准确可靠的数据和物理模型不够清楚的情况下，数值模拟方法的准确度将受到影响，甚至无法进行模拟；第三，当过程极其复杂，目前还不能用数学语言进行表达，即无法建立数学模型时，或者即使能够建立极其复杂的数学模型，但无法用现代的计算技术求解的情况下，数值模拟也是无能为力的。

尽管如此，燃烧过程的数值模拟方法近20年来发展相当迅速。60年代后期，斯帕尔丁（Spalding）首先得到了边界层燃烧问题的数值解，接着，斯帕尔丁和哈劳（Harlow）继承和发展了普朗特（Prandtl）、科尔莫戈罗夫（Kolmogorov）等人的工作，创立了“湍流燃烧模型方法”，提出了一系列的湍流流动和湍流燃烧的模型；发展了各具特色的数值计算方法和计算机程序体系。

大批燃烧过程数值计算的成果推动着这门学科的发展，目前不仅开辟了“多相流动和燃烧过程数值计算”的新领域，而且还建立了多相化学流体力学方程组和一套多相流的数值解法。

近20年来，英、美、法、西德、苏、波、日和埃及等国相继开展了燃烧过程数值计算的研究工作，在基本方程、理论模型、数值方法和计算机程序方面均取得了可喜的进展，已发展到有可能对大型煤粉锅炉、燃气轮机燃烧室、内燃机、火箭发动机、核反应堆蒸汽发生器和各种工业窑炉等系统中的三维、定常或非定常、均相或多相、湍流、没有或有化学反应的实际过程进行数值分析，给出参数的分布及其变化，预测燃烧装置的性能等等。这一新领域的出现，极大地丰富了燃烧学的内容，进一步揭示燃烧规律，使燃烧学上升到系统理论的高度。

以上各种研究方法都在不同的场合采用。我们应该根据研究课题的性质、任务和完成的时间采取不同的研究方法。

第二章 燃料及燃烧计算

§ 1. 燃料的分类

燃料是指在燃烧过程中能够发出热量并能利用的可燃物质。

矿物燃料，按物态分类，可分为固体、液体和气体燃料；按其来源分类，可分为天然和人工燃料。表2-1列出了常用矿物燃料的分类。

表2-1 常用矿物燃料的分类

种 类	天 然 燃 料	人 工 燃 料
固体燃料	泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤、油页岩	焦炭、粉煤
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、重油、渣油等
气体燃料	天然气、石油拌气、矿井气	高炉煤气、发生炉煤气、炼焦炉煤气、地下气化煤气等

天然矿物燃料是由古代植物和动物在地下长时期堆积、埋藏，受到地质变化作用（包括物理、化学、生物等作用）逐步分解后形成的。

人造燃料是对天然燃料进行加工处理后得到的产品。

除表2-1所列举的常用矿物燃料外，在生产和生活中还可能使用其它一些燃料，例如：（1）农村用燃料：有薪柴、秸秆、牲畜粪、沼气等；（2）工业生产废气：液化石油气（炼油过程中废

气)、氯碱生产中废氢等;(3)火箭发动机用固体、液体燃料,例如各种聚乙烯酯、液氢、苯胺等。

本章主要讲述常用矿物燃料的物理化学特性及其燃烧计算。

§ 2. 固 体 燃 料

工程上常用的固体燃料是煤。

§ 2.1 煤的化学成分及其表示方法

常用两种方法表示煤的化学成分,即:元素分析法和工业分析法。

1. 元素分析法

根据元素分析法,煤中可燃质由碳(C)、氢(H)、硫(S)、氧(O)、氮(N)等元素及灰分(A)和水分(W)组成。

碳:是煤中含量最多的可燃元素,一般占燃料的15~90%。碳以两种形式存在:一部分碳与氢、氮、硫等元素结合成各种复杂的有机化合物(如各种形式的碳氢化合物);另一部分碳呈游离状态,称固定碳。随地质年代的增长,煤中含碳量增加,固定碳的含量增多。碳的发热量约为32860kJ/kg。纯碳是一种比较难烧的物质,它的着火温度较高,因此,煤中含碳量越高,就越难着火燃烧。

氢:它也是可燃元素,容易着火、燃烧。其发热量约为120370kJ/kg,比纯碳发热量高三倍多。煤中含氢量不多,一般为3~6%,并随着地质年代增长而减少。煤中的氢,一部分与氧化合生成结晶水,这部分氢称为化合氢;另一部分氢则和其它元素化合构成有机物,称为自由氢。

硫：煤中含硫量一般在0.5~3%范围内，个别煤种高达8~10%。煤中的硫常以三种形式存在：有机硫（与C、H、O结合成复杂的有机化合物）、黄铁矿硫（ FeS_2 ）和硫酸盐硫（ CaSO_4 等）。硫酸盐硫一般不能燃烧，在燃烧过程中转入到灰渣中，作为灰的一部分。黄铁矿硫与有机硫都能参与燃烧，称为可燃硫。硫的发热量很低，仅为9050kJ/kg。硫是一种有害元素，其燃烧产物为二氧化硫（ SO_2 ），有一部分 SO_2 再氧化成三氧化硫（ SO_3 ），若与水蒸汽结合，将形成硫酸或亚硫酸蒸汽，对低温金属受热面进行腐蚀。 SO_2 、 SO_3 排入大气造成污染，损害人体健康，影响农作物生长。

氧：由于氧常与煤中的氢和碳组成化合物（例如 H_2O 、 CO_2 ），这些化合物不能燃烧，从而降低了煤的发热量。不同煤种中氧含量差别很大，低的仅1~2%，高的达40%。随着地质年代增加，氧含量减少。

氮：氮在高温下与氧形成氮的氧化物（ NO 及 NO_2 ）为有害物质，会污染大气。

灰分：灰分是煤中的矿物杂质在燃烧过程中经过高温分解和氧化作用形成的固态残留物。其主要成分除粘土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）外，还包括少量的氧化物（ FeO 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ）和一些金属（Ca、Mg、Na、K）的化合物。灰分是有害物质。它不仅降低了煤的发热量，而且由于妨碍了可燃物质与氧的接触而造成不完全燃烧损失。此外，灰分沉积在受热面上，影响受热面的传热。对于不同煤种，灰分含量相差很大，一般在5~50%范围内。

水分：煤的水分是一种不可燃物质。水分含量增加，不仅降低了煤中可燃物质的含量、降低煤的发热量，而且燃烧时还要吸收热量，因而燃烧温度大大降低。各种煤的水分差别也很大，少的低于2%，多的可达50~60%。

煤中的水分由外部水分（表面水分）和内部水分（固有水分）两部分组成。外部水分是指机械地附着在煤表面上的水分，在大气中自然风干就可除去。外部水分受外界条件的影响很大。内部水分指的是达到风干状态后煤中的残留水分，包括化学吸附水分及矿物质结晶水。

固体燃料的成分常用元素分析的质量百分数来表示

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

式中，C、H、O、N、S、A和W分别表示煤中碳、氢、氧、氮、硫（可燃硫）、灰分和水分的百分数。

煤中水分和灰分的含量是随开采、运输、贮存及气候条件而变化的，因此，即使对于同一种煤，由于水分及灰分含量的变动，使其它成分的含量也随之变化。这样，就难以正确判断煤的种类及性质。

为了实际应用的需要和理论研究的方便，通常采用下面四种基准作为煤的成分分析的基础。

应用基：以进入燃烧设备前的工作燃料为基准。它包括了全部水分和灰分，反映了煤的实际应用的成分。常用于燃烧计算。

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

分析基：以除去外部水分的煤样为基准。常用于实验室分析。

$$C^f + H^f + N^f + O^f + S^f + W^f + A^f = 100\% \quad (2-3)$$

干燥基：以除去全部水分后的煤样为基准。由于干燥基的成分不受水分的影响，因此可以较准确地表示出煤的含灰量。

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

可燃基：把除去煤中全部水分和灰分后的煤样作为基准。

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

煤的成分及其相互关系见图2-1。

上述四种基之间存在着一定关系，可以相互转换。表2-2列出了不同基之间的换算系数。

y										
f										
g										
	r									
A	C				H	O	N	S	W ₁	W ₂
A	C _r			V				W		
灰分	固定碳			挥发分				水分		
焦炭				挥发性物质						

图2-1 煤成分表示法

煤的元素分析测定较为复杂。工业上常用的是煤的工业分析法，它简单易行。

2. 工业分析法

煤的工业分析法是测定煤中所含水分 (W)、灰分 (A)、挥发分 (V) 和固定碳 (C_r) 的质量百分数。煤的工业分析的测试方法按国家标准。它的基本要点为：将一定量的煤样放在 $102 \sim 105^\circ\text{C}$ 的干燥箱内脱去水分，直至恒重，以测出水分含量；再将一定量的干燥煤样放在密闭坩埚内置于 850°C 的马弗炉中干馏七分钟，测出挥发分含量；剩余的固体残留物由固定碳及灰分组成，称为焦炭。然后将一定量的焦炭试样放在 800°C 的马弗炉内完全燃烧至恒重，以测定灰分和固定碳的含量。

固定碳的主要成分是碳，但不是纯碳，其中还残留有少量其它元素，如 H 、 O 、 N 等。

煤的工业分析成分，按质量百分数计可表示为

$$C_r^y + V^y + W^y + A^y = 100\% \quad (2-6)$$

类似于元素分析的成分表示法，工业分析的成分也可以按各种“基”来表示，其相互间的换算关系同样可用表2-2。