

工程燃烧概论

霍 然 编 著



中国科学技术大学出版社

工程燃烧概论

霍 然 编 著

中国科学技术大学出版社

2001·合肥

序 言

能源、环境和安全是当今世界面临的三大课题，它们对人类社会的发展具有决定性的影响，而这三者均与燃烧密切相关。

为了保证经济建设的顺利进行和人们生活水平的不断提高，人类对能源的需求量越来越大。尽管近几十年来水电、核电等能源的应用得到长足的发展，但通过燃烧各种燃料取得热能仍然是人类获取能源的主要手段。燃烧过程组织得合理与否在很大程度上直接影响能源利用率。新中国成立以来，尤其是改革开放以来，经广大燃烧科技工作者的努力，我国的燃烧技术水平得到了很大提高，在一些领域已达到国际先进水平。为进一步实现我国燃烧装置的清洁、高效、安全，急需加强燃烧理论和燃烧技术的研究。

多年来，人们研究燃烧问题主要是围绕着能源利用展开的，如上所述，这种研究具有重要的实际意义。但是大规模的工程燃烧也带来了不少值得注意的负面影响，主要是燃烧对环境造成的污染和燃烧过程中存在的不安全问题。研究表明，世界上由人类活动造成的环境污染约有 80% 与燃烧直接或间接有关。有毒、可燃和腐蚀性气体及燃烧烟尘的过度排放严重破坏着人们健康安全生活和工作的条件。工程燃烧是大功率、高强度的化学反应过程。一旦燃烧系统的个别环节发生故障，或发生操作失误，就可能引发火灾、爆炸和有毒有害物质的泄漏。现在每年都会发生多起由此而造成的人员伤亡和设备事故。为了防止和减少工程燃烧所带来的这些不利影响，也需要认真研究燃烧科学技术问题。

尽管人们利用燃烧已有数千年的历史，但只是在最近四五十年中，燃烧学才获得快速发展。现在燃烧学主要从基础理论和应用技术两大方向进行研究，两者既密切相关，又具有相对的独立性。本书从工程应用的角度出发，系统而扼要地介绍了各种燃料的基本知识和工程燃烧的主要方法，注意到对燃烧新技术发展趋势的分析，并对燃烧污染控制和燃烧安全问题进行了一定篇幅的讨论，其取材与编排均比较合理。

我认为，热能利用、安全工程、环境控制等专业的学生和有关工作人员了解一些有关的工程燃烧方面的知识是必要的，有助于大家培养和增强大家为实现能源、环境和安全综合优化而奋斗的意识和能力，更好地投身到国家的现代化建设中去。

在本书出版前，我很高兴为其作序。

范维澄

2001 年 5 月 1 日

前 言

在人们生产和生活中需要使用大量的能量。这些能量是多种多样的，但是仔细分析便可看出，它们绝大部分是热能或是由热能转化来的，而燃烧是获得热能的主要手段。

燃烧学是研究燃烧规律及其应用技术的科学。进入 20 世纪以来，由于航空航天事业的发展，能源危机和环境保护的促进，高强度、大功率、高效率、低污染燃烧设备的出现，燃烧学得到了飞速的发展。燃烧学的研究主要沿着两条途径进行，一是燃烧基础理论，一是燃烧应用技术。这两者互相促进、互相补充，使燃烧学不断取得新的进展及大量新成果。

燃烧基础理论着重研究燃烧过程中的各种基本现象及其基本规律，例如燃烧反应的机理、预混可燃气体的着火和熄灭、火焰传播、火焰结构、物质的异相燃烧、燃烧过程中污染物生成机理等。燃烧理论需要运用化学热力学、化学反应动力学、传热传质学和流体力学的有关理论，分析各种基本燃烧现象的本质，已经形成自己的一套研究体系和研究方法。

燃烧应用技术则主要是把燃烧理论中阐述的基本概念和基本规律与工程中的燃烧问题联系起来。从能源利用的角度讲，主要是分析与改进现有的燃烧装置的性能、研究并探索新的燃烧方式，以提高热能利用的水平。从灾害防治的角度讲，主要是探讨在保证热能利用水平的基础上，减少燃烧造成的环境污染及防治火灾、爆炸等热灾害的途径和方法。

本书主要讨论工业和民用上常见的工程燃烧问题，围绕着获取能量这一主要目的，研究提高燃烧设备的热能利用技术，并对控制燃烧污染和防治火灾、爆炸等热灾害的途径进行适当分析。本书与燃烧现象导论、燃烧学等理论课程配合使用，目的是使学生在学过基础理论之后，再了解一些必要的工程与技术知识，以达到全面训练的目的。对基本燃烧现象及有关过程的数学推导，在本书中不作详细说明。书中着重讨论一些当前人们密切关注或正在研究的燃烧新技术问题，以扩大学生的知识面，增加读者对工程燃烧研究现状的了解、增强创新能力和参加科学研究的兴趣。

本书曾以《燃烧技术》为名作为中国科学技术大学的校内教材出版，并已使用多年。现结合讲授实践和工程燃烧技术的进步与形势发展的需要，作了较大的改写。本书的编写得到了中国科学技术大学范维澄教授、王清安教授及很多其他同志的支持和帮助，王清安、过明道教授全面审阅了书稿。我的不少同事与学生对书稿的编排和校对做了大量工作，尤其是李元洲、王浩波和尤飞等在统稿方面付出了辛勤的劳动。在本书编写的过程中，还参阅了多位专家教授的著作与文章，借此机会特向各位深表谢意。

由于编者水平有限，书中定有许多不妥之处，敬请提出宝贵意见。

编 者
2000 年 8 月

目 次

第一章 绪 论	(1)
一、能源利用与燃烧	(1)
二、工程燃烧的组织	(3)
三、工程燃烧设备类型概述	(4)
四、燃烧装置的基本性能要求	(5)
五、当前工程燃烧研究的重点	(7)
六、本书讨论的主要内容	(8)
第二章 燃料概述	(9)
第一节 燃料的种类、组成及热值	(9)
第二节 固体燃料——煤	(18)
第三节 液体燃料——石油	(23)
第四节 气体燃料	(33)
第五节 火箭燃料	(39)
第六节 燃料分析的基本方法	(44)
第三章 常用工程燃烧计算	(58)
第一节 燃烧反应的计量方程	(58)
第二节 燃烧空气量的计算	(60)
第三节 燃烧烟气量的计算	(62)
第四节 燃烧装置运行状况的现场测定	(71)
第五节 燃烧反应的热平衡计算	(78)
第六节 燃烧过程中的射流混合	(86)
第四章 气体燃料的燃烧	(100)
第一节 气体燃料的燃烧特点	(100)
第二节 气体燃料的预混燃烧	(103)
第三节 气体燃料的扩散燃烧	(117)
第四节 气体燃料的置换	(129)
第五章 液体燃料的燃烧	(135)
第一节 液体燃料的燃烧特点	(135)
第二节 液体燃料的雾化	(137)
第三节 雾化燃烧的组织	(143)
第四节 常用燃油烧嘴	(146)
第五节 燃油烧嘴的初步设计计算	(154)

第六章 固体燃料的燃烧	(161)
第一节 固体燃料的燃烧过程	(161)
第二节 煤的层状燃烧	(163)
第三节 煤粉悬浮燃烧	(172)
第四节 旋风燃烧	(183)
第五节 沸腾燃烧	(188)
第七章 工程燃烧的若干技术专题	(197)
第一节 点火技术	(197)
第二节 煤的气化与液化	(202)
第三节 乳化油与水煤浆燃烧	(210)
第四节 催化燃烧	(215)
第五节 浸没燃烧	(221)
第八章 燃烧试验与模化	(229)
第一节 燃烧试验及其组织	(229)
第二节 物理模化的基本依据——相似	(232)
第三节 相似准则的主要推导方法	(235)
第四节 燃烧空气动力过程的相似	(241)
第五节 燃烧过程的模化试验方法	(244)
第六节 典型工程燃烧问题的模化分析	(247)
第九章 燃烧污染与控制	(253)
第一节 烟尘污染及其控制	(253)
第二节 SO_x 生成与防治	(263)
第三节 NO_x 的生成与控制	(268)
第四节 燃烧噪声与控制	(274)
第十章 工程燃烧安全的几个问题	(280)
第一节 燃气的泄露及相关灾害预防	(280)
第二节 回火和脱火的预防	(287)
第三节 燃烧设备的安全保护	(294)
第四节 工程燃烧的安全管理	(300)
第五节 工程燃烧中的安全分析	(305)
复习参考题	(311)
参考文献	(314)

第一章 绪 论

一、能源利用与燃烧

为了发展生产和改善生活，人类每天都要使用大量的能量。自然界的能量有多种形式，如机械能、热能、电能、化学能、核能和辐射能等。在一定的条件下，这些能量形式可以相互转化。

为人类提供所需能量的自然资源称为能源。在地球上的能源大体可分为三类。第一类能源是以太阳辐射能为原始源泉而形成的能源。太阳能本身可直接利用，但其品位不高，总利用率低。目前人类利用的能源主要是经过多年积累的太阳能所转化成的生物化学能，如煤炭、石油、天然气及植物体等。植物体拥有的化学能是经过几年或几十年而生成的，而煤炭、石油、天然气等则是动植物体在特殊的地下条件下经过千百万年而形成的。风能、水力能是地球在太阳能的作用下引发气候变化而产生的动能。第二类能源是地球本身拥有的核能和地热能。核能是地球上某些元素裂变(如铀 235、钚 239)或聚变(如氘、氚)所释放的能量。核能的能量相当大，据计算，1 千克铀 235 裂变释放的能量相当于 2700 吨优质煤释放的能量。地热能是地球内部存在的炽热岩浆所体现的能量，如地热水、热岩、火山爆发、地震等。这种能量也非常大。有研究认为，其总量相当于地球上全部煤炭能量的 1.7 亿倍。但这种能量的合理利用相当困难，目前除了地热水外，其它形式的地热还没有适当的应用技术。第三类能源是地球与月亮、太阳等天体相对运动时，由于引力作用而形成的海水流动能。目前这种能源的利用基本上还处于设想阶段。

根据能源是否是直接取得的，人们常将其划分为一次能源和二次能源。凡是自然界原先存在的不用加工或转换的能源称为一次能源。如矿物燃料、生物质燃料、水能、风能、太阳能、核能等；由一次能源转换或加工而得到的能源称为二次能源。如电能、石油制品能、焦炭、木炭、热水、压缩空气能等。

在人类社会的发展中，热能具有极其重要的地位。它一方面可直接用于人类的生产和生活，另一方面可以转化为其它形式的能量，如电能、机械能等。长期以来，燃烧植物体燃料与矿物燃料是人类获得热能的主要手段。可以说，人类的文明是伴随着燃烧燃料以获得热能的过程发展起来的。

据统计，在 50 年前，世界范围内 99% 的能源是由燃烧提供的。随着水电、核电和其它新能源的发展，由燃烧提供的能源在可用总能源中所占的比例有所降低，但在大部分国家，尤其是发展中国家仍占 85% 以上。表 1-1 给出了近年来我国能源生产总量及构成的若干数据，可见煤炭是我国当前主要的一次能源。我国的水力资源是很丰富的，但是开发利用这种能源的一次投资相当大。虽然国家已制定了大力发展水电的规划，但在目前的国力条件下，水电建设的发展不可能很快，故其在总能源中所占比例近期内不会有大的改变。我国也非常重视发展核电事业，然而核电的一次投资更大，建设周期更长，且需要很高的技术支持。显然在我国以燃烧燃料的方式取得能量在相当长的时期内还要占主导地位。为了有效、合理利用燃

烧释放的热能，需要认真研究燃烧科学与燃烧技术，提高燃烧效率与能量利用率。

表 1-1 近年来我国的能源生产总量及构成

年份	能源生产总量 (折合亿吨标准煤)	原煤 (%)	石油 (%)	天然气 (%)	水力 (%)	核电 (%)
1949	0.23	96.3	0.7	—	3.0	—
1958	1.98	97.1	1.6	0.1	1.2	—
1968	1.87	83.9	12.2	1.0	2.9	—
1978	6.28	70.3	23.7	2.9	3.1	—
1988	9.58	73.1	20.4	2.0	4.5	—
1990	10.39	74.2	19.0	2.0	4.8	—
1992	10.72	74.3	18.9	2.0	4.8	< 0.1
1994	11.87	74.6	17.6	1.9	5.9	—
1996	12.60	75.2	17.0	2.0	5.8	< 0.5
1998	12.40	72.0	18.5	2.4	7.1	< 1

应当看到，地球上的矿物燃料资源是有限的。随着大规模的开发利用，这类资源势必迅速减少，尤其是天然气、石油等优质能源及易于开采的陆地能源。90年代初，专家估计，根据已探明的矿物燃料资源，按现有的开采速度，天然气的寿命约为 20~30 年，石油的寿命约为 30~50 年，煤炭的寿命约为 150~300 年。尽管不断有新的矿物燃料资源被探明，但是这类资源的锐减是不可避免的。解决这一问题的途径是开发新能源与合理利用现有的矿物燃料能源。

总的来说，我国的矿物燃料能源是比较丰富的，如煤炭储量居世界第三位，在东北、西北和东南沿海地区也有可观的天然气和石油储量，不过与世界某些地区相比并不太多。在当前的经济和技术条件下，矿物能源开发受到限制，而经济的发展对能源的需求却在迅速增加。因此，我国能源的相对短缺在较长时间内是不可避免的。

另一方面我国的燃料能源利用率却比较低。表 1-2 列出了我国与若干发达国家的能源利用情况的比较。这种差距是我国的燃料构成不良和燃烧技术落后引起的。主要是我国的一次能源以煤炭为主体，而煤炭不容易充分燃烧，加之燃烧技术落后，燃烧效率低是不可避免的。应当指出，近几十年来，在广大燃烧科技工作者的辛勤努力下，我国的工程燃烧水平取得了长足的进步，某些燃烧装置（例如大型电站锅炉等）业已达到国际先进水平。但不少其它行业的燃烧设备和技术水平则还很低。对于我国这样一个发展中的大国来说，全面提高燃烧技术水平仍任重道远，燃烧科技工作者应当在这方面有大的作为。

表 1-2 80 年代末若干国家的能源利用率(%)

	美 国	英 国	日 本	中 国
总利用率	51	40	48	30
工业	78	67	77	39
交通	25	20	25	17
民用	80	70	80	20

人类在通过燃烧取得所需能量的同时也带来了一些负面影响，主要体现在燃烧可造成严重的环境污染，并可引发大量的不安全问题，例如火灾、爆炸、可燃与有毒气体泄漏等。燃烧的本质是储存在燃料中的化学能的释放。燃烧后可生成多种产物，有气体、固体，有时也有液体，其中不少产物对人、对其他生物、对环境有毒或有害。燃烧的气相产物大部分被排放到大气中，在燃烧现场还经常遗留很多固液残渣，它们都会恶化环境、危害人类生活。据研究，世界上 80% 以上由人为造成的环境污染直接或间接与燃烧有关。随着燃烧规模的增大，燃烧污染越来越为世人关注。

工程燃烧应当在特定的场合、特定的时间内进行，并通过适当的途径将热量输送到需要的地方。这种特定的燃烧场合一般为炉膛、燃烧室或某种预定的燃烧区域，特定时间则是人们需要热量的时间。若燃烧过程失去控制，超过了人们设定的燃烧空间和时间，就会造成热灾害。当燃烧扩展到其它区域，便可形成火灾；当燃烧空间或被加热的容器内压力过高，便可引发爆炸；当有毒可燃气体泄漏出来，便会危及人类和其它生物。火灾和爆炸也可由其它因素引发，例如森林火灾、矿山火灾经常是由自然因素引起的。然而工程燃烧确实与人类的活动的密切相关。在城市、乡村、厂矿中每年都会发生多次的火灾爆炸事故。近年来，这种热灾害的次数和规模还呈上升的趋势。为了有效减少燃烧所带来的危害，也需要认真研究燃烧科学与技术。

二、工程燃烧的组织

工程燃烧必须通过有效的人为控制使燃烧在某个确定的空间(通称燃烧室或炉膛)进行。燃料和氧化剂各通过一定途径输送到燃烧空间来，使它们按预定方式混合，进而发生燃烧反应，放出热量，以达到某种工程目的。这一过程可用图 1-1 说明。

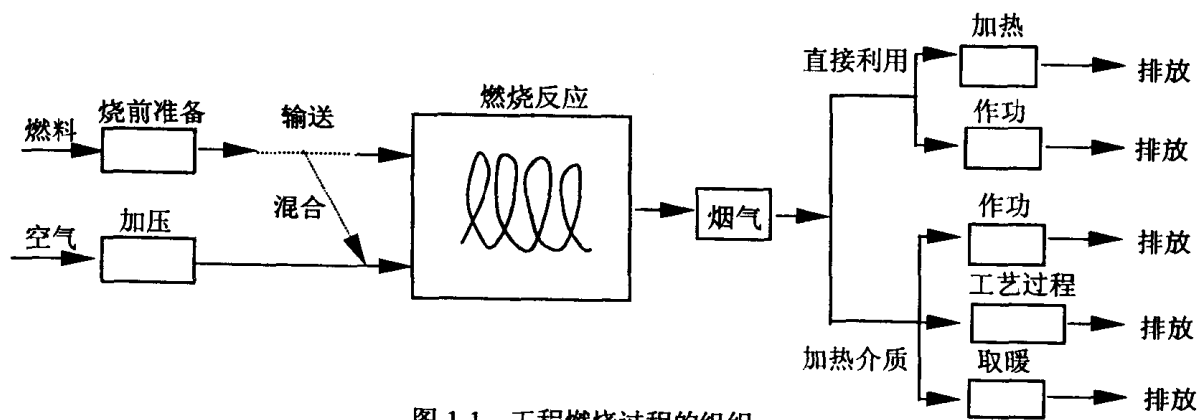


图 1-1 工程燃烧过程的组织

在组织燃烧前，首先应当了解燃料的类型及其燃烧性能。燃料是能够通过燃烧而获得可用热能的物质。在人们的生活和工业上使用的燃料大致可分为固体、液体和气体三类。固体燃料的主体是煤，包括无烟煤、烟煤、褐煤，此外还有煤的干馏残余物、有机页岩、木柴、秸秆等；液体燃料的主体是石油及其炼制产品，包括汽油、煤油、重油、渣油等，此外醇类燃料和植物油的利用也受到人们的重视；气体燃料有天然的和人造的两类，天然气燃料是由地下开采得到的，包括气田气和油田气。人工气体燃料主要有液化石油气、人造煤气、人工沼气等。

有的文献把通过核反应而释放原子能的物质称为核燃料。它们与通过燃烧反应释放热能的物质完全不同。本书不讨论核燃料及核反应。

将燃料与氧化剂输入到燃烧空间是组织燃烧的基本预备步骤。气体燃料的流动性好，与燃烧常用的氧化剂空气同为气相，两者均通过管道送入燃烧空间。用来组织燃料与空气混合及喷射的装置称为燃烧器；液体燃料也较容易流动，但它为凝聚相，为了使其在有限时间内与空气良好混合，也需要使用燃烧器来组织燃烧；固体燃料燃烧前需要破碎，当其以几十到几百毫米的块状燃烧时，往往是将其输送到一定床面上进行层状燃烧。当煤颗粒较小呈粉状时，也可使用燃烧器组织煤粉气流向燃烧空间的输送。

燃烧释放热量的利用有两种基本形式，一种是直接利用高温产物为工质推动发动机运转，这类装置为内燃式热机。热机的燃烧空间一般不太大，习惯上称其为燃烧室。另一种是利用燃烧放出的热量加热另外一些物质，可以通过这些物质去作功或完成某项工作，例如推动汽轮机运转、取暖等，也可以使这些物质本身升温以实现某种工艺要求，例如冶炼、锻造、成形等。这类装置的燃烧空间体积较大，通常称之为炉膛。

三、内燃机和燃烧炉

1. 内燃机

内燃机是一种动力机械，有活塞式和燃气轮式两种系列。现在，活塞式内燃机广泛用在汽车、拖拉机、轮船及其它动力机械上，在小型飞机上也有较好的应用。活塞式内燃机产生动力的关键部件为一圆筒型的汽缸，缸中有一个通过活动连杆与曲轴相连的活塞，活塞顶部与汽缸盖之间的小空间为燃烧室。将燃料和氧化剂送入燃烧室燃烧时，由于热量的迅速释放而使气体急剧膨胀，推动活塞运动，进而带动曲轴转动而实现对外作功。在活塞式内燃机中，一般使用气体燃料和轻质液体燃料。根据所用燃料的着火方式不同，内燃机可分为点燃式和压燃式两种。前者的代表是汽油机，燃料的着火需要用外来热源或火源点燃；后者的代表是柴油机，燃料在汽缸内通过加压而发生自燃。这两种着火形式对燃烧装置的结构有不同的要求。为了加大发动机的功率及实现平稳运行，活塞式内燃机往往采用多个汽缸协同工作。

燃气轮机设计有专门的耐高温燃烧室，燃料和空气经专用管道送入，燃烧时可形成连续火焰。燃烧生成的高温气体由燃烧室尾部喷出，推动其后部的叶轮组转动。由于没有曲轴、连杆之类的机构，故燃气轮机的转速高，运转平稳，机体紧凑，可以提供更大的推力，现在广泛用于飞机和火箭中。

2. 燃烧炉

燃烧炉的形式更是多种多样，根据加热对象的特点，大体可分为锅炉、工业炉和民用燃具三类。

(1) 锅炉 锅炉是由“锅”和“炉”两大部分组成的。燃料在炉中燃烧，通过炉内传热，加热锅的受热面，使锅中的介质(通常为水，有的也为油)为工业生产与其它设施提供热能，或使其变为蒸汽以推动动力设备运转，如蒸汽机、汽轮机。

按照用途，锅炉可分为工业锅炉、生活锅炉、船舰锅炉和电站锅炉等；根据燃烧方式可分为火床炉、煤粉炉、沸腾炉等；按照燃料可分为燃气锅炉、燃油锅炉和燃煤锅炉等。

(2) 工业窑炉 工业窑炉利用燃烧放出的热量加热炉内的物料。在实际使用中，习惯上将用于金属加热或熔化的设备称为工业炉，将用于加热硅酸盐类物质的设备称为窑炉，不过在

很多情况下两者没有明确的区别。

与锅炉相比，工业炉的样式更多，应用也更加广泛，几乎遍及国民经济的所有工业部门。根据用途，工业炉大体可分为加热炉和熔炼炉两类。加热炉的作用是在炉内完成对某种物料的加热，如锻压加热炉、热处理炉、焙烧炉、干燥炉等；熔炼炉则是在炉内完成对物料的加热和熔炼过程，常见的有高炉、化铁炉、平炉、转炉等。

(3)民用燃具 民用燃具的类型也很多，如燃气炉灶、燃气热水器、燃气取暖器等。这类燃具的体积往往较小，结构也比较简单，其燃烧空间甚至是不封闭的。由于它们与人们的日常生活和安全密切相关，因此本书中也将进行一定篇幅的讨论。

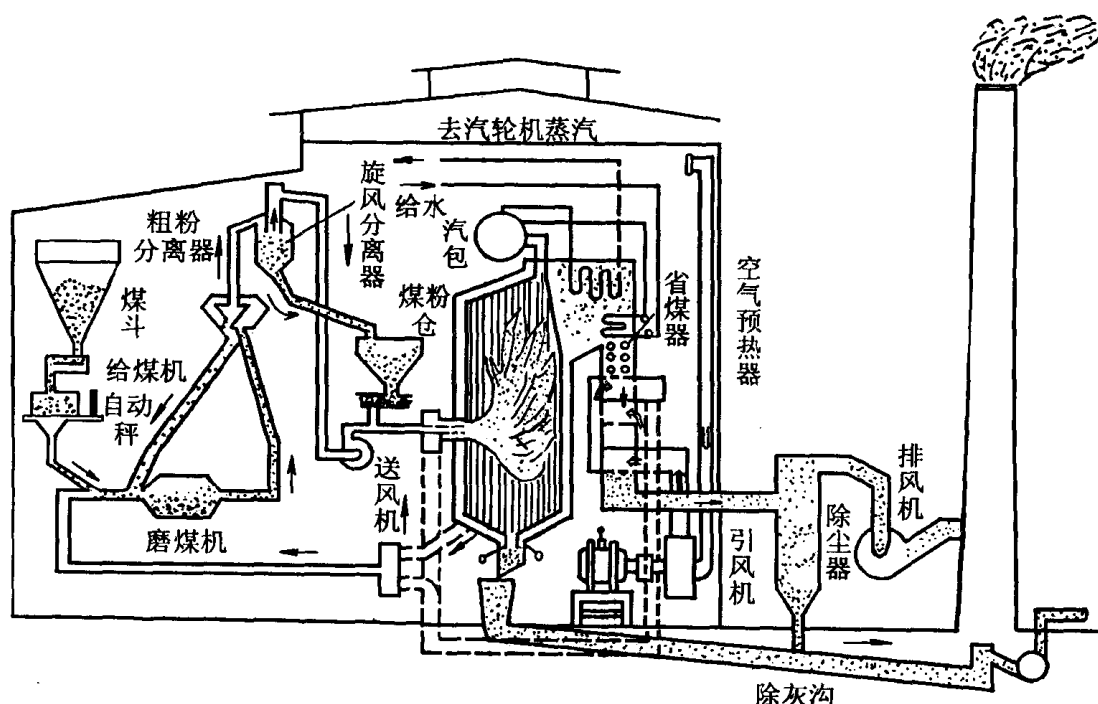


图 1-2 某电站用煤粉锅炉结构简图

为了组织好工程燃烧过程，一般还需要许多辅助仪表或设施，如监测与控制的仪表、操作装置、运输设施等。尤其是大型燃烧设备往往是一个庞大而复杂的系统。图 1-2 为某电站用的煤粉锅炉的结构简图。可见它除了燃烧室和燃烧器外，还包括燃料与空气的准备和输入装置、烟气的排出与处理装置、热能利用装置、燃烧过程中有关参数的测量装置、操作与控制装置、余热利用装置等。不同类型的燃烧设备都具有一些服务于其主要功能的特殊装置，它们均应结合该设备的情况进行配置和完善。

在燃烧设备中，与燃烧过程直接相关的主要装置是燃烧室和燃烧器。燃烧室提供燃烧反应的空间，燃烧器用于合理组织燃料与氧化剂的输入和混合。燃烧器是实现燃料有效燃烧的重要部件，气体、液体和煤粉都使用燃烧器组织燃烧，因此在后面的讨论中重点涉及燃烧器。

四、燃烧装置的基本性能要求

为了保证工程燃烧可靠而安全的运行，燃烧设备必须满足一定的质量性能要求。不同设备的指标体系是有较大差别的，这里仅就燃烧室和燃烧器提出一些原则性要求。

1. 燃烧室

就燃烧室而言，主要应保证以下几方面：

(1)燃烧效率高 燃烧效率是表示燃料燃烧完全程度的指标，其含义是实际燃烧过程释放出的可用于热工过程的能量与理论上燃料完全燃烧所释放出的能量之比。这一指标是体现燃烧装置经济意义的重要方面。不同装置的燃烧效率差别很大，例如，有些老式工业窑炉的燃烧效率只有30%左右，而先进的电站煤粉锅炉、燃气轮机燃烧室等则可达到95%~99%。

(2)燃烧强度大 燃烧强度是表示单位时间内在燃烧室内放出热量多少的指标。当燃烧强度按单位燃烧室容积计算时称为容积热强度；当燃烧强度按单位燃烧室横截面面积计算时称为面积热强度。它们分别用单位时间释放的可用燃烧热与燃烧室的体积或特定截面面积之比表示。

燃烧强度反映燃烧室结构的紧凑性，此指标越高，燃烧室的体积越小。对于某些燃烧设备(如航空与航天发动机)来说，这一指标具有极为重要的意义。对于地面使用的燃烧设备，此指标可以低些，但适当减小燃烧室的体积大多是有好处的。

(3)燃烧稳定性好 这是表示燃烧过程合理性和可靠性的指标。当燃料和空气在规定的压力、温度下，以预定的流量送入燃烧室时，应当能正常着火，火焰分布合理，不发生过长或过短，火焰面稳定，不发生熄火或回火，不出现超温或降温等情况。这样燃烧设备才具有良好的实用性。

(4)安全性好，使用寿命长 这是表示燃烧装置能否长期可靠运行的指标。许多燃烧装置一经点火，便要求连续运行相当长时间，有的甚至会长达数月。如果装置运行被迫中途停止或发生事故，往往会造成严重后果。这一性质很大程度上取决于燃烧室的热强度、火焰或温度场分布及隔热保护条件，它们均需要根据燃烧装置的总体要求作出合理设计，以保证装置的正常、安全工作，并尽量延长装置的使用寿命。

(5)燃烧污染小。现在燃烧所造成的污染越来越受到人们的重视，尤其是一些大城市和重工业集中的地区，燃烧污染已变得十分严重，近年来虽然有所改观，但形势仍不容乐观。分析表明，这与那些地区大量燃用煤炭及大量使用低档次汽车直接相关。我国不少地方还多次下过酸雨，这正是燃用含硫较多而未处理的煤炭的结果。新发展的燃烧室与燃烧炉应当尽量降低污染物的排放。

2. 燃烧器

燃烧器主要包括燃料喷嘴、配风器和点火器部分。相对于燃烧室来说，燃烧器的体积要小得多，但它是组织合理燃烧的关键装置，是燃烧室性能好坏的关键因素。除了应具有与燃烧室一些共同的要求外，燃烧器还应满足以下几点：

(1)能够实现燃料与空气的良好混合 燃料与空气的充分混合是完全燃烧的先决条件，燃烧器应具有特殊的燃料喷嘴结构以保证燃料能均匀分散在空气中，尤其是某些液体燃料，应可做到有效雾化，这是燃烧技术重点讨论的内容之一。

(2)点火容易，火焰稳定 燃烧器应当具有方便可靠的点火机构，能够按要求顺利将燃料点燃，并在燃烧室内建立正常的燃烧过程。对于某些不易着火的燃料或某些工作条件恶劣的燃烧装置，实现成功点火且保证火焰稳定具有一定的难度，因此需要特别重视燃烧器的这一性能要求。

(3)结构紧凑，重量轻 燃烧器的体积和重量都不宜过大。由于其组成部件多，还应当注

意结构的合理性。将一些新的设计思想和结构材料应用在燃烧器上，往往可以发挥显著作用。

(4)安装、检修和操作方便 燃烧器的结构复杂，且经常接触高温火焰区，难免会粘附一些有害物质或发生某些故障，因而需要进行经常性地检查、维护和修理。这便要求燃烧器易于安装和拆卸。

五、当前工程燃烧研究的重点

工程燃烧研究的方面很多，同时在某个时期的研究重点与当时经济发展的需要密切相关。当前在我国需要重点研究的燃烧技术问题主要包括：

1. 节能、高效的燃烧方法和装置

这一问题主要与能源利用率有关。前面已谈过，目前我国的能源利用率还比较低。解决这一问题涉及到技术、运行、管理等多种因素，但采用先进的燃烧技术、提高燃烧效率无疑是最基本的环节。同一种燃料使用不同的燃烧方法，其燃烧效率将大不一样。例如煤粉的燃烧效率比固定床高得多，现在大型火力发电厂基本上都采用煤粉燃烧法。在有条件的企业中宜优先选用先进的燃烧技术。在我国的不少工业部门中，仍大量使用小型工业炉和窑炉，其燃烧装置相当落后，有些还停留在五六十年代的水平上。结合行业特点和现场条件，积极进行这些装置的技术改造、系统更新、研制更适用的燃烧装置，具有重要的社会经济意义。

2. 污染低、安全性高的新型燃烧方法

控制燃烧污染已成为一个迫切的社会问题。在我国的一次能源中将长期以煤为主，但煤含有大量灰分和有害杂质，且较难完全燃烧，在许多以烧煤为主的地区均存在严重的烟尘污染和有害气体污染。此外，其它燃料的污染也不可低估，如有些低档汽车、拖拉机的不完全燃烧排放物已成为城市的主要污染源之一。燃烧设备设计和运行的不合理则会经常引发事故。应当围绕着减少污染物的生成和排放、保证燃烧设备的安全运行开展燃烧新技术的研究。

3. 设计适应不同加热需要的新型燃烧器

许多工程燃烧过程具有极大的特殊性，例如有的要求在有限空间内实现高强度燃烧以提供强大的推力，例如飞机与火箭发动机；有的要求达到足够高的温度以进行冶炼，例如特种钢材冶炼；有些通过燃烧加工或处理的物质具有较大的毒性或腐蚀性，其燃烧过程应当进行专门控制；有些燃料的热值过低，或燃烧过程难以组织(例如重油、沥青)，需要发展新型的燃烧方法。

4. 不同燃料的合理利用

现在合理利用燃料，尤其是劣质燃料，也成为人们普遍关心的问题。高热值气体燃料及轻质液体燃料(如汽油和煤油)的燃烧容易组织，人们喜欢使用，但这些优质燃料的资源有限。因此应当重视燃料的分级使用，将优质燃料用在最需要的地方，同时研究开发劣质燃料的应用技术。

燃料质量的低劣主要体现在：(1)热值低，如有些可燃固体的热值只有标准煤的 $1/2 \sim 1/3$ ；(2)灰分高，如有些煤的灰分含量可达 $40\% \sim 50\%$ ；(3)可燃挥发分低，如有些无烟煤的挥发分低于 5% ；(4)含硫量大，有些煤或渣油的含硫量可达 $2\% \sim 3\%$ ，这类燃料的直接燃烧是生成酸雨的基本原因。研究劣质燃料的使用是一项长期的任务。

另外，有些地区使用的燃料是从多个矿区购来的，致使有些燃烧装置常因燃料性能不稳定而出现一些问题，因为多数燃烧装置都是按照使用某类燃料设计的。提高燃烧装置对燃料

品种的适应性也是工程燃烧研究的重要方面。

5. 计算机等新技术在燃烧控制中的应用

近十几年来,计算机与微电子技术获得了飞速发展,许多新型的电子仪表、探测元件、分析与处理仪器等可以有效地用于燃烧过程的监测和控制。在燃烧系统中,采用这些新技术,能够大大加深对燃烧过程的认识。许多以往难以探测到的燃烧细节,使用新技术就可以很快得到解决。然而为使有关电子、电气技术在燃烧设备中合理使用,离不开对燃烧过程及其基本原理的了解。因此应当结合工程燃烧的具体状况,研究与发展准确、可靠、快速、经济的自动化和智能化的监测和控制系统。

六、本书讨论的主要内容

本书以讨论应用面最广的民用燃烧设备的燃烧技术为主。为了适应教学改革、扩大学生知识面和培养创新能力的需要,书中以一定篇幅介绍燃烧新技术的发展,并简要介绍燃烧污染的防治和燃烧安全问题,以增加学生参与科研工作和技术开发的兴趣。

第二章介绍燃料的种类以及各类燃料的主要分析方法、基本燃烧特性,目的是为合理使用燃料来组织燃烧奠定基础。第三章讨论常用工程燃烧计算,主要分析燃烧前后的物质平衡和热平衡,这有助于深入了解有效利用燃烧放出的热能。本章还对射流混合计算作了一些讨论,因为这种混合方式在工程燃烧中应用十分广泛。

第四、五、六章分别讨论气体、液体和固体燃料的常用燃烧技术,着重说明它们各自的主要燃烧方式和组织工程燃烧时需要注意的问题,并适当介绍一些基本的设计和计算方法,目的是加深对燃烧技术原理的理解。

第七章按专题的形式讨论几种燃烧技术,对于有关新技术的发展现状,尽量作出客观的分析以提高读者的参与能力。其讨论方式比较灵活,可视情况增减。

第八章讨论燃烧试验与模化问题,燃烧试验是发展新技术的主要手段,本章介绍燃烧试验的测量要点、要求和注意事项。许多燃烧设备是庞大的和复杂的,无法实现全尺寸的热态试验,需要经常进行小尺寸的或局部的模拟试验,为此讨论模拟研究中应当遵循的基本准则。

第九章专门讨论几种主要的燃烧污染及其治理途径。第十章讨论与工程燃烧密切相关的若干安全问题。这两章的主要目的是增强读者的环境意识和安全意识,克服片面追求能量利用的倾向。研究工程燃烧的最终目的是为了与提高与改善人民的生产生活条件。

本书附有部分复习参考题,供学习时使用。

第二章 燃料概述

第一节 燃料的种类、组成及热值

一、燃料的种类

燃料指的是通过燃烧而获得可利用热能的物质。有人说，凡是可燃的物质就是燃料，这种说法不确切。人们在生产、生活中遇到的很多物品都是可燃的，如家具、衣物、木材、塑料等，但一般不能将其称为燃料。燃料一词有着明确的行业使用背景。有些物质(如煤、石油)，从热能利用的角度来说是燃料，但从化工行业来说则是原料。

燃料的种类很多，按其形态可分为固体、液体和气体三大类，按其来源可分为天然燃料和人造燃料两大类。各类燃料的主要种类简述如下。

1. 固体燃料

- (1)煤，包括无烟煤、烟煤、褐煤；
- (2)煤的干馏残余物，包括焦炭、半焦炭等；
- (3)有机可燃页岩和泥炭；
- (4)木柴、植物秸秆、木炭。

2. 液体燃料

- (1)石油及其炼制产品，包括汽油、煤油、柴油、重油、渣油等；
- (2)醇类，主要是甲醇和乙醇；
- (3)植物油，包括一些产油率较高但不宜食用的植物油和某些低等级植物油。

3. 气体燃料

- (1)天然气，包括气田气和油田气；
- (2)液化石油气，石油加工过程中的副产品；
- (3)人造煤气，主要有焦炉气、高炉气、发生炉煤气等；
- (4)人工沼气，由废弃有机物厌氧发酵得到的气体燃料。

在各类燃料中，作为天然化石燃料的煤与石油及其制品占据主导地位，本章主要围绕这两类燃料进行讨论。

二、燃料组成的表示法

实际使用的燃料大都是复杂的混合物，其中有可燃组分，也有不可燃组分。为了有效、合理地使用燃料，应当了解它们的基本组成。从热能利用的需要出发，燃料组成通常采用工业分析组成、元素分析组成和成分分析组成三类方法表示。

工业分析组成和元素分析组成主要是针对固体燃料提出的。用工业分析方法可得出燃料

的规范性组成，即将燃料划分为水分(M)、灰分(A)、可燃挥发分(V)和固定碳(FC)等四种组分，它们的含量用百分比表示，因此四者之和为 100，即

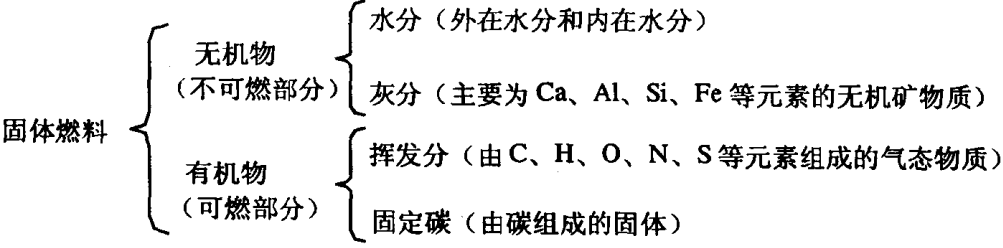
$$M + A + V + FC = 100 (\%) \tag{2-1-1}$$

该组成可反映燃料中可燃组分和不可燃组分的含量。使用元素分析方法可得出燃料中主要可燃化学元素和其它不可燃组分的组成，有机化学元素分为 C、H、O、S、N，不可燃组分包括水分和灰分。这种组成也用百分比表示，其总量为 100，即

$$C + H + O + N + S + M + A = 100 (\%) \tag{2-1-2}$$

固体燃料的工业分析组成和元素分析组成的关系可用表 2-1-1 说明。

表 2-1-1 固体燃料的工业分析与元素分析组成



工业分析给出的水分代表固体燃料中各种水分的总含量，灰分代表无机矿物质的含量，这两项为燃料的非可燃组成；挥发分和固定碳为燃料的可燃组分，其中挥发分代表煤中易挥发(因而容易着火)可燃物的含量，而固定碳代表燃料中不挥发性可燃物的含量。

应当指出，工业分析所得到的并不是燃料的原始组成，而是在一定条件下通过加热将燃料中原有的极为复杂的组成加以分解和转化而得到的可用普通的化学分析方法来研究的组成，例如，煤的灰分与煤中原有的矿物质是不同的，而是煤加热到规定温度(国标规定为 815℃)时燃烧后的残留物。再如，挥发分是煤加热到规定温度(国标规定为 900℃)时在隔绝空气的条件下分解出来的气态有机物质，而固定碳是挥发分逸出后剩余的固态有机物质。上述组成仅是煤的有机物质在一定条件下的转化产物，因而工业分析组成具有很强的规范性。在分析操作中，必须严格按试验标准对待，否则分析结果将会产生较大误差。

在某些情况下，仅仅知道燃料的工业分析数据尚不能满足工程需要。例如在锅炉设计和燃烧控制等计算中，经常涉及理论空气量、过量空气系数、热值、热效率及烟气排放量等，这些计算均需使用燃料的元素分析数据。元素分析虽然给出了 C、H、O、S、N 五种元素在燃料中的质量百分比，但并不反映它们结合成的有机体的具体形式。元素分析需要比较复杂的设备和熟练的技巧，因此分析工作一般由专门的化学分析实验室承担。

现在简要说明元素分析的各种组分的性质。

(1)碳(C) 碳是燃料中的主要可燃元素，其单质的热值为 32800 kJ/kg。在燃料中，碳基本上不以自由碳形式存在，而是与氧、氮和硫等结合在一起，形成复杂的有机化合物。

(2)氢(H) 氢是燃料中另一种主要的可燃元素，其热值很高，为 142000 kJ/kg，约相当于碳的热值的四倍半。但它在煤中的含量比碳少得多，其质量含量为 2%~6%。氢在燃料中有两种存在形式，一种是与碳、硫、氮等元素结合在一起的氢，它对燃烧放热有贡献，通常称为可燃氢，或有效氢。另一种是与氧化合生成成为水的氢，通常称为化合氢，燃料燃烧时，化合氢不再参加反应。在计算燃料的热值和理论空气需要量时，应以有效氢含量为准。

(3)硫(S) 硫是燃料中最有害的可燃元素。它在燃烧时可以放出少量热量,其热值为 9210 kJ/kg,约为碳的热值的 1/3。但其产物为 SO_2 和 SO_3 ,这些气体与烟气中的水蒸气结合,生成腐蚀性很强的硫酸和亚硫酸,可严重危害人体健康、污染环境、腐蚀燃烧设备和金属表面,有时还会影响加热产品的质量。我国的大部分煤中含硫量一般在 0.5%~3%范围内,亦有少数煤种超过 3%。虽然硫在固体燃料中的含量不太大,但由于其危害性大,因此使用中应严格控制其含量。

硫在煤中有下述三种存在形态:

① 有机硫(S_o) 它们是燃料的原始动植物体中的 S,均匀地分布在煤体中,与煤中其它元素(C、H、O)结合成复杂的有机化合物,是煤体的一部分,这种硫是可燃烧的。

② 黄铁矿硫(S_f) 它们是煤形成过程中从外部夹杂而来的,通常与铁、铜等金属化合,以金属硫化物的形式存在(如 FeS_2 、 CuS 、 ZnS ,其中最常见的是 FeS_2)。这种硫也可以燃烧,它们与有机硫合在一起总称可燃硫,元素分析给出的含硫量指的是可燃硫的含量。

③ 硫酸盐硫(S_s) 它们也是无机硫的一部分,然而是以金属盐形式存在的,如 CaSO_4 、 MgSO_4 、 FeSO_4 等。由于这种形态的硫已经充分氧化,不再参与燃烧反应。燃烧后,它们几乎不分解地转入灰渣中去。硫酸盐硫是由地下水和周围的矿石带到煤中来的,我国煤中的硫酸盐含量大都低于 0.1%,仅有少数煤种超过 0.3%,因而当煤质分析资料中仅给出硫的总含量时,有时可用其全硫含量作为可燃硫来进行热工计算。

(4)氧(O) 固体燃料中的氧是以化合状态存在的,它的存在对燃烧没有任何帮助,相反由于它已经与可燃元素碳、氢结合,相对减少了这些元素的可燃组分含量,从而使燃料的热值降低。煤中的氧含量一般根据其它成分的测定值用下式间接算出来:

$$O = [100 - (C + H + S + N + A)] \frac{100}{100 - M} (\%) \quad (2-1-3)$$

木材和泥炭的氧含量较高,甚至可高达 40%。随着煤的炭化程度的加深,氧不断分解逸出,氧含量逐渐降低,一般无烟煤的氧含量只有 2%~4%。

(5)氮(N) 氮是燃料的内部杂质。固体燃料的氮含量不大,通常仅约 0.5%~2.5%。一般情况下,氮不参加燃烧反应。燃烧后,它以游离状态转入燃烧烟气中。氮的存在也相对减少了燃料中可燃物质的含量,对燃烧没有帮助。在高温条件下,氮可与氧反应生成 NO_x ,这也是严重污染环境的有害气体。

(6)灰分(A) 灰分指的是煤中所含的矿物杂质(主要是碳酸盐、粘土矿物以及微量稀土元素)在燃烧中经过高温分解和氧化而生成的固体残留物,其成分分布大致为: SiO_2 , 40%~60%; Al_2O_3 , 15%~35%; Fe_2O_3 , 5%~25%; CaO , 1%~15%; MgO , 0.5%~8%; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, 1%~4%。

灰分含量高不仅降低煤的热值,而且还容易造成着火困难、燃烧结渣、燃烧不完全,同时给设备维护和操作带来困难。对于炼焦用煤来说,一般规定入炉前的灰分不应超过 10%。

(7)水分(M) 水分也是燃料中的杂质,它的存在降低了燃料中可燃质的含量,而且在燃烧时,它变成水蒸气,而水蒸气还要被加热,这都要额外消耗部分热量。

固体燃料中的水分包括外在水分和内在水分两部分。外在水分指的是附着在燃料表面的水分,其含量与大气的湿度和燃料的存放条件有关。当把燃料磨碎并在大气中风干后,外在水分即可消除。内在水分指的是燃料达到风干状态后仍然残留的水分。它包括被燃料吸收并