



普通高等教育“十一·五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGCHENG RANSHAOXUE

工程燃烧学

汪 军 马其良 张振东 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGCHENG RANSHAOXUE

工程燃烧学

汪 军 马其良 张振东 编
李永光 袁益超 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要阐述了燃烧的概念、基础理论、燃烧装置及燃烧技术。书中既着重于系统地阐述与燃料燃烧过程有关的基本概念和基本理论,又重点介绍固、液和气体燃料燃烧技术和控制燃烧过程中污染物的生成及排放的基本原理和方法。

该书紧密结合国家和地方发展燃气轮机技术、城市垃圾焚烧技术和“西气东送”的政策和大趋势,充分反映能源与动力行业技术发展的新趋势和新动向,力求使读者获得适应 21 世纪能源动力学科和产业发展需求的知识和能力。

本书可作为普通高等院校本科能源动力类专业学生教材,也可作为研究生相关专业教材,还可供相关行业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程燃烧学/汪军等编. —北京:中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7274 - 7

I. 工… II. 汪… III. 燃烧理论—高等学校—教材
IV. TK16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 077306 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 627 千字
定价 39.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书根据教育部高等学校能源动力类“热能与动力工程”专业教学指导委员会所制定的教学基本要求编写,力求适应1999年教育部高等学校本科专业调整之后能源动力类热能与动力工程专业对“工程燃烧学”课程教学的要求。

新的“工程燃烧学”在教材内容安排上,既考虑到清华大学、浙江大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、东南大学、上海交通大学和上海理工大学等院校1999年前相类似的、按照二级学科划分的能源动力类专业结构体系特点(专业分工细而全),又充分认识到新的本科热能与动力工程专业逐步淡化原有的二级学科色彩、强调拓宽专业口径的特色。该教材紧密结合国家和地方发展燃气轮机技术、城市垃圾焚烧技术和“西气东送”的政策和大趋势,既着重于系统地阐述与燃料燃烧过程有关的基本概念和基本理论,又重点介绍固、液和气体燃料燃烧技术和控制燃烧过程中污染物的生成及排放的基本原理和方法,使学生在掌握扎实的理论基础知识的同时,能够获得相关理论知识的工程应用背景知识,并通过相应的配套实验教学获得感性认识和实践机会,强调“工程燃烧学”课程的工程应用性,培养学生学以致用、理论联系实际的能力和素养。

本书充分反映能源与动力行业技术发展的新趋势和新动向,理论联系实际,有效地解决了现有教材专业适应面单一,难以适应目前能源动力类“热能与动力工程”专业主干课程内容要求的问题,满足新世纪对人才培养的新要求。

本书由上海理工大学动力工程学院汪军、马其良、张振东编写,其中,第1、2、4.5、7、8.2、9章节由汪军编写,第3、5、6、10章由马其良编写,第4.1~4.4、8.1章节由张振东编写。上海电力学院李永光教授、上海理工大学袁益超教授担任本书主审。主审老师提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中疏漏不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2008年6月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 能源的概念与分类	1
1.2 工程燃烧与燃烧设备	3
1.3 工程燃烧设备的基本性能要求	11
1.4 工程燃烧的研究及发展	13
2 燃料概论	16
2.1 燃料的概念与分类	16
2.2 燃料的组成和特性	17
2.3 固体燃料	26
2.4 液体燃料	33
2.5 气体燃料	51
2.6 燃料分析方法	58
3 工程燃烧计算	78
3.1 燃烧过程的化学反应	78
3.2 燃烧空气量的计算	79
3.3 燃烧烟气量的计算	81
3.4 燃烧温度计算	83
3.5 燃烧检测及燃烧效率	88
4 燃烧理论基础	98
4.1 燃烧反应的热力学基础	98
4.2 燃烧反应的化学动力学基础——活化分子碰撞理论	106
4.3 活化络合物的过渡态理论	110
4.4 链锁反应理论	111
4.5 燃烧过程中的射流特性及其混合过程	117
5 气体燃料的燃烧	133
5.1 气体燃料燃烧原理及特点	133
5.2 预混可燃气体的着火和燃烧	134
5.3 气体燃料的扩散燃烧	157
5.4 气体燃料燃烧装置	162
5.5 气体燃料的置换	172
6 液体燃料的燃烧	177
6.1 液体燃料燃烧原理	177
6.2 液体燃料的雾化过程及装置	184

6.3	配风原理及装置	195
6.4	液体燃料雾化燃烧的组织及布置	201
7	固体燃料的燃烧	205
7.1	固体燃料的燃烧过程及特点	205
7.2	煤的层状燃烧技术及装置	208
7.3	煤的悬浮燃烧技术及装置	222
7.4	煤的旋风燃烧技术及装置	242
7.5	煤的沸腾燃烧技术及装置	248
7.6	煤燃烧新技术及发展趋势	263
8	热机燃烧技术及装置	277
8.1	内燃机燃烧技术及装置	277
8.2	燃气轮机燃烧室	313
9	垃圾焚烧技术及装置	335
9.1	垃圾焚烧技术原理	335
9.2	垃圾焚烧系统和设备	351
10	燃烧污染控制和燃烧安全技术	367
10.1	燃烧污染物排放及控制标准	367
10.2	烟尘污染与控制技术	370
10.3	SO _x 污染与控制技术	372
10.4	NO _x 污染与控制技术	381
10.5	燃烧噪声与控制技术	389
10.6	燃气泄漏及事故预防	391
10.7	回火及脱火的预防	393
10.8	燃烧设备的安全保护	397
10.9	燃烧设备的安全管理	399
	参考文献	401

1 绪 论

1.1 能源的概念与分类

人类在日常生活和从事生产活动的过程中，每天都要消耗大量的能量。在物理学中，能量被定义为用做功本领量度的物质及其运动的属性。相应于不同的运动形式，能量可分为机械能、热能、电磁能、化学能、核能、辐射能等。当物质的运动形式发生转换时，能量形式同时也发生转换。

为人类提供上述各种形式能量的自然资源称为能源。大英百科全书对能源的解释是：“能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语，人类采用适当的转换手段，给人类自己提供所需的能量”。能源与每个人的生活息息相关，是人类赖以生存和发展工业、农业、国防、科学技术，改善人民生活所必需的燃料和动力来源。

按照能源转换和利用的层次，能源可分为一次能源、二次能源和终端能源。

一次能源，又称为自然能源。它是从自然界取得的未经加工或转换的能源，例如原煤、原油和天然气等矿物燃料，树木、农作物、草和水生植物等生物质燃料，以及太阳能、风能、水能、核能等；一次能源经过加工或者转换而得到的电力、各种石油产品、焦炭、煤气、煤液（煤液化燃料产品）、热水、蒸汽等称为二次能源；二次能源经过输送和分配，在各种用能设备中使用，即终端能源。

一次能源中能够直接用作终端能源（即通过用能设备供消费者使用的能源）的很少。天然气是少数几种可用作终端能源使用的一次能源之一。而大部分一次能源都被转换成容易输送、分配和使用的二次能源（如电力、油料、煤气、热水和蒸汽等），以适应用能单位的需要。

一次能源还可按照其是否能够“再生”而分为“可再生能源”和“非再生能源”。“可再生能源”是指能重复产生的自然能源，它可供人类长期使用而不会枯竭，例如太阳能、风能、水能、海洋能、潮汐能、地热能、生物质能等。“非再生能源”则指那些不能重复产生的自然能源，例如煤炭、石油、天然气、核燃料等。这些能源随着使用将不断减少，短期内不会重复产生，最终将会枯竭。

按照能源在当代人类社会经济生活中的地位，常将能源分为“常规能源”和“新能源”两大类。“常规能源”是指技术上比较成熟，已被人类广泛利用，在生产和生活中起着重要作用的能源，例如煤炭、石油、天然气、水能、核裂变能等。虽然已得到利用，或已引起人们重视，但尚未被人类大规模利用，或在利用技术方面有待进一步研究和开发的能源，称为“新能源”，例如太阳能、风能、海洋能、地热能、生物质能、核聚变能等。随着科学技术的发展，新能源利用技术将日益得到完善，新能源将逐渐被广泛利用，新能源也就演变为常规能源。

按照能源的使用对环境的影响情况，又可分为“清洁能源”和“非清洁能源”。煤炭、石油等固体和液体燃料在燃烧时，会产生较大的污染，一般均属于“非清洁能源”。太阳能、

风能、水能、海洋能、地热能等非燃料能源基本上不产生污染，天然气、液化石油气等气体燃料燃烧时产生的污染较小，这些能源属“清洁能源”。

按照能源的性质和利用方式，能源可分为“燃料能源”和“非燃料能源”。“燃料能源”包括矿物燃料（煤炭、石油、天然气等）、生物质燃料（木柴、植物秸秆、沼气、有机废物等）、化工燃料（甲醇、乙醇、丙烷、苯胺、废塑料等）和核燃料（铀、钍、钚等）四种。“非燃料能源”如风能、水能、潮汐能、海洋波浪能等具有机械能，有的含有热能，例如太阳能、地热能、海水温差能等。

我国能源资源并不丰富，能源供应比较紧张。能源的人均资源占有量为世界人均资源量的 1/2，仅为美国人均资源量的 1/10。在各种能源资源中，对国民经济发展最具有实际意义的是煤炭、石油与天然气、水能和核能资源。表 1-1 给出了中国一次能源消费总量及其构成。由表 1-1 可见，中国目前最主要的一次能源仍然是煤炭。1980 年后，煤炭在一次能源消费构成中所占的比例在 70%~75% 左右，近年来又下降至 70% 以下；原油和天然气所占比例先是略有下降，在近几年又呈上升势头，约占 20%~25%；水电所占比例一直呈持续上升趋势。

表 1-1

中国一次能源消费总量及其构成

年份	能源消费总量 (万 t 标准煤)	占能源消费总量的比例 (%)			
		原煤	原油	天然气	水电与核电
1957	9644	92.3	4.6	0.1	3.0
1965	18901	86.5	10.3	0.9	2.7
1970	29291	80.9	14.7	0.9	3.5
1975	45425	71.9	21.1	2.5	4.6
1980	60275	72.2	20.7	3.1	4.0
1985	76682	75.8	17.1	2.2	4.9
1990	98703	76.2	16.6	2.1	5.1
1995	131176	74.6	17.5	1.8	6.1
1996	138948	74.7	18.0	1.8	5.5
1997	137798	71.5	20.4	1.7	6.2
1998	132214	69.6	21.5	2.2	6.7
1999	130119	68.0	23.2	2.2	6.6
2000	130297	66.1	24.6	2.5	6.8
2001	134914	65.3	24.3	2.7	7.7
2002	148000	66.1	23.4	2.7	7.8
2003	167800	67.2	22.7	2.8	7.3
2004	197000	69.0	22.3	2.5	6.2
2005	222000	67.7	20.2	2.7	9.4
2006	245669	68.7	21.0	3.0	7.3

随着国民经济在 21 世纪初继续保持持续、快速和健康发展的势头,我国已经成为世界第二大能源消费国,目前能源消费量约占全世界能源消费总量的 11%。加强能源领域建设,实现能源工业新的突破迫在眉睫。由于受到油气资源储量的制约,石油和天然气产量的增长速度有限,我国一次能源生产总量的增加仍将主要依靠发展煤炭、水电和核电。据测算,我国一次能源生产总量到 2050 年可达到 35.4 亿 t 标准煤,其中原煤 33.5 亿 t,占 67.7%;原油 2.3 亿 t,占 9.3%;天然气 1500 亿 m^3 ,占 5.6%;水电 11540 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占 4.5%。在整个 21 世纪上半叶,我国一次能源生产和消费结构仍将以煤炭为主,电力能源结构仍将以火电为主。有明显变化的是,水电在能源生产总量中的比例将超过原油,水能资源的开发程度将接近 60%。

1.2 工程燃烧与燃烧设备

在人类的生活与生产活动中,热能是最早为人们认识并加以利用的能量形式之一。热能不仅可以直接用于人类的日常生活和生产活动,还可以通过能源转换装置转换为其他形式的能量,如机械能、电能等。因此,现代化工业的发展,无不与热能的转换和利用密切相关。

人类可以通过太阳能的直接利用和开发地热能来获取热能,但是燃烧煤炭、石油和天然气等矿物燃料将化学能转化为热能,一直是人类获取大量热能、机械能和电能的主要途径。例如,我国目前的能源消费结构以煤炭为主,近年来煤炭消费量占能源消费总量的 70%左右,煤炭消费量的 80%是原煤作为动力和民用燃料直接燃烧利用。

1.2.1 火与燃烧

燃烧是物质发生激烈的化学反应而发热和发光的现象。在自然界中,这种广泛存在的自然现象被称作“火”。从古代直至中世纪时期,火在西方世界曾被认为是宇宙中四种基本元素之一。中国春秋时期产生的“五行”说,将水、火、木、金、土五种物质作为构成万物的元素,以说明世界万物的起源和多样性的统一。火的使用是地球上出现人类的标志之一。18 世纪 60 年代始于英国的第一次产业革命,在 80 年代因蒸汽机的发明和采用得到进一步的发展,这是人类对火与燃烧现象长期认识和研究经验积累的结果。在征服和利用火和燃烧现象的过程中,人类一直试图认识和研究火和燃烧现象的本质。人类的物质文明史与燃烧技术的发展不可分割,火的历史也就是人类社会进步的历史。

燃烧一般是指某些物质(通常是木柴、煤炭、石油、天然气等燃料)在较高温度时与氧气化合而发生激烈氧化反应并释放出大量热量的现象,它是一些不同的物理和化学现象相互作用的结果。

化学反应是燃烧过程中最主要的基本现象。在任何一个燃烧过程中,很少仅涉及一个化学反应,而是会同时发生许多化学反应。燃烧过程中所发生的化学反应的类型很多,主要取决于反应物的种类。

热量传递是燃烧过程中必然发生的物理现象。燃烧化学反应将提高火焰介质的温度,而且这些化学反应本身对温度的敏感性也很高。在燃烧所产生的火焰中,热量的传递不仅通过导热的方式来进行,有时也存在辐射,而且经常以由湍流涡旋运动而引起的热扩散来进行。

传质现象广泛存在于燃烧过程中。传质过程包括两种类型:①形成火焰的部分或所有气体的对流传质;②火焰中某些组分相对于其他组分的分子或湍流扩散。火焰中气体流动可能

是由火焰本身的流动所引起,也可由于浮力作用而产生。火焰中的炽热气体由于浮力效应而不断上升,从而卷吸较冷的气体来加以补充,结果形成气体的对流。燃烧中的扩散现象是由于火焰中气体组分浓度的显著差异而引起的。其中,因分子无规则热运动使火焰中气体组分由浓度较高处传递至浓度较低处的现象称为分子扩散;而在湍流火焰中,凭借气体质点的湍动来进行质量传递的现象称为湍流扩散。燃烧过程中的传质现象与流体的流动及其物理性质有关。

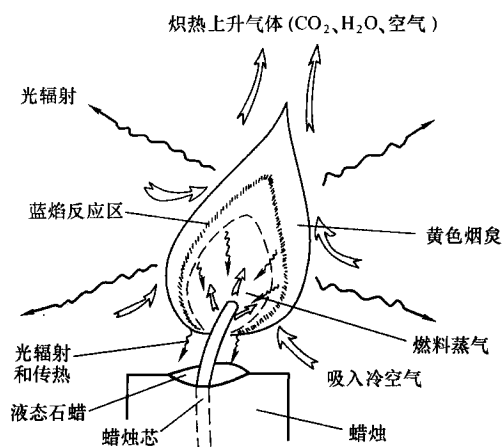
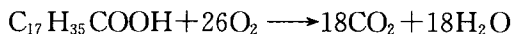
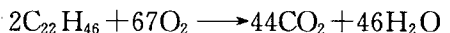


图 1-1 蜡烛火焰中不同位置处所产生的物理现象

下面我们以蜡烛所产生的火焰(图 1-1)为例,来说明化学反应、传热和传质三种基本现象如何相互作用并对燃烧过程产生影响。

蜡烛通常由石蜡制成。石蜡是从石油或页岩油的含蜡馏分经冷榨或溶剂脱蜡而制得。它是几种高级烷烃的混合物,主要有正二十二烷($C_{22}H_{46}$)和正二十八烷($C_{28}H_{58}$),含碳量约 85%,含氢量约 14%。蜡烛里还常加入硬脂酸($C_{17}H_{35}COOH$)以提高软化点。在常温下,石蜡和硬脂酸均呈固态;缓慢加热后,在约 150°C 下将液化并最终成为蒸气。在加热过程中,蜡烛的主要成分实际上发生了分解,形成一些较轻的可燃组分。蜡烛燃烧的主要反应物是空气中的氧气和由蜡烛芯蒸发出来的气态可

燃组分。石蜡和硬脂酸燃烧后的生成物均为二氧化碳和水蒸气,反应的化学方程式为



蜡烛燃烧过程不仅涉及氧气、石蜡、硬脂酸及其加热分解过程中产生的其他组分,而且还与燃烧过程中产生的一些原子和原子团有关,如 O 、 OH 、 CH_3 、 $HCHO$ 等。通过在火焰内部进行精确测量或者简单地观察火焰中出现的少量蓝色(由 CH 原子团引发的可见光辐射),可以证实这些原子团的存在。燃烧过程中的各种化学反应生成 CO_2 和水蒸气,并提高了介质的温度。在某些情况下也会产生烟炱,而且火焰中的烟炱量多于火焰上方。由于炽热的烟炱颗粒发出黄光,所以才可用肉眼识别。

蜡烛燃烧时所发生的传热过程是很容易理解的。燃烧时产生的黄色火焰一方面以光辐射形式满足照明需求,另一方面该火焰产生的高温以辐射传热的方式使蜡烛顶部被加热和液化,并进一步使液态石蜡蒸发而产生在火焰中进行反应的气态燃料组分。

蜡烛燃烧过程中的传质作用,是与化学反应和传热作用一起将燃烧反应物带入火焰中。火焰中的炽热气体和燃烧产物(主要包括空气中的 N_2 、 CO_2 和水蒸气)由于浮力效应而不断上升,并由卷吸而来的冷空气以及来自蜡烛芯的气态燃料组分所替代。此外,气体燃料组分与空气通过分子扩散在火焰中均匀混合。反应物分子之间以及反应物分子与燃烧过程中产生的原子和原子团之间充分接触,使化学反应得以发生。

除了上述化学反应、传热和传质三种基本现象之外,蜡烛的燃烧过程还涉及某些其他的物理化学现象,例如上面已经提到的液化、蒸发等相变现象。此外,与烟炱颗粒的成核以及

随后发生的长大和凝聚有关的现象,对于研究火焰燃烧时烟的产生具有非常重要的意义。与蜡烛火焰有关的其他物理现象还有:在疏松的蜡烛芯中发生的导热以及对液化石蜡和硬脂酸的毛细抽吸作用等。以上所述火焰中发生的所有基本现象相互紧密关联,并各自在总的燃烧过程中起着自己的一份作用。

图 1-1 所示为蜡烛火焰结构的简化示意图。蜡烛的化学反应区将包含氧化性气体的气态介质(火焰之外)与包含还原性气体的气体混合物(火焰中蜡烛芯周围)分割开来,形成所谓“扩散火焰”或称“非预混火焰”。然而,工程燃烧中上述的各种物理化学现象之间相互作用方式并非均与蜡烛火焰相同,所产生的火焰也并非均为扩散火焰。在蜡烛燃烧过程中,参与燃烧的是两种不同类型的物质,即空气(氧化剂)和由蜡烛产生的蒸气态燃料(还原剂)。它们由不同的空间位置进入燃烧反应区,并相互接触而发生燃烧反应。事实上,工业燃烧设备中经常出现另一种火焰形式,即预混火焰。对于预混火焰,参与燃烧的氧化剂(通常为空气)和还原剂(燃料)在到达反应区之前已完成混合过程,即混合过程先于燃烧过程。预混火焰的结构与扩散火焰有着相当大的差异,其根本原因在于预混火焰和扩散火焰在各自燃烧过程中化学反应、传热和传质三种基本现象之间的相互作用方式不同。

图 1-2 所示为一简单的预混火焰燃烧实验。首先,在空玻璃瓶中充满打火机燃气(主要成分为 CH_4),然后用搅拌的方法使瓶子中的空气和燃气充分混合,并堵住瓶口,以防止气体外泄,最后点燃打火机并将其火焰置于已开启的玻璃瓶口前。点燃瓶口处混合燃气后,可以看见在瓶颈处形成一呈蓝色薄平面的火焰,并朝瓶底方向传播。显然,这种蓝色火焰是一种发光的高温反应区,它像一个固定面一样在混合燃气中传播,其结构与蜡烛产生的扩散火焰有着相当大的差异,但这种预混火焰在燃烧过程中所发生的物理化学基本现象与扩散火焰类似。

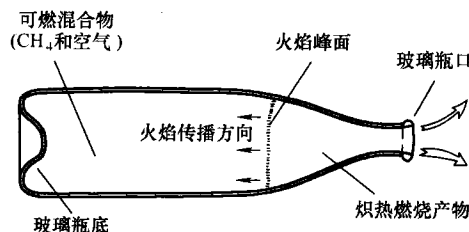


图 1-2 预混可燃气体混合物中火焰的传播

首先,上述实验中的燃烧化学反应也是在火焰中发生的。这种 O_2 与 CH_4 之间的反应与蜡烛火焰的情况非常相似。此外,火焰的蓝色特征也表明反应区中 CH 原子团的存在。如果玻璃瓶中 CH_4 的含量很高,则所产生的火焰也将发出黄光(由炽热烟炱颗粒引起)。

其次,与蜡烛燃烧时所发生的传热过程不同,此时燃烧产生的火焰并非用于照明或者使燃料蒸发,而是用于加热包括预混的空气和 CH_4 在内的气体介质。实验开始时,打火机火焰加热瓶口附近的可燃混合物,使其温度提高并着火。只有当火焰通过传热使附近的可燃混合物温度提高并达到其着火温度,才能使燃烧反应延续下去,火焰才得以向瓶底方向传播。因此,燃烧过程中形成一个向瓶底方向迁移的火焰峰面,将其下游区域中的可燃混合物与其上游区域中的燃烧产物隔开。炽热的燃烧产物和火焰本身通过导热,将火焰峰面前方附近可燃混合物的温度提高并点燃。这个过程不断延续下去,火焰峰面不断向瓶底方向迁移,直到瓶中可燃混合物完全燃尽。

火焰传播过程中出现两方面的传质现象。首先,燃烧产物(CO_2 和水蒸气)在传热的同时,向火焰峰面前方附近的可燃混合物中扩散;其次,加热引起的气体体积膨胀,使得瓶内气体加速喷出瓶口。

随着工业发展和技术进步,人们在应用火焰和燃烧的同时研制了多种类型的工程燃烧设

备并开发了许多燃烧新技术。可以说,了解扩散火焰和预混火焰两种火焰的基本形式及其相关的物理化学现象是理解实际工程燃烧设备原理的基础。

1.2.2 工程燃烧设备

火焰和燃烧在能源、电力、航空、航天、化工、冶金、建材等诸多工业领域中得到广泛应用。在实际应用中,燃料(煤炭、石油、天然气等)和氧化剂(空气或氧气)通过一定的途径输送至燃烧空间(炉膛、燃烧室等燃烧设备)中,并使它们按照预定方式混合,进而发生燃烧反应并释放出大量热量,以满足预定工业过程的需要。因此,工程燃烧是通过有效的人为控制并在确定的燃烧设备中进行的燃烧过程。

燃料类型及其性质对于工程燃烧的组织以及燃烧设备的选用具有决定性的影响。人类生产过程和日常生活所使用的燃料按照其状态可分为固体燃料、液体燃料和气体燃料三大类。固体燃料主要是烟煤、无烟煤、褐煤等天然矿物质燃料,此外还包括木柴、焦炭、木炭、植物秸秆等;液态燃料主要是石油及其炼制加工产品,包括汽油、煤油、柴油、重油和渣油,此外还有甲醇、乙醇、植物油等;气体燃料主要包括天然气(气田气、油田气)、液化石油气、人造煤气(焦炉煤气、发生炉煤气、高炉煤气)、沼气等人工燃料。

根据不同的燃料类型和性质,需要采用不同的燃烧组织方法并选用不同类型的燃料和氧化剂输送方法和燃烧方式。气体燃料流动性好,而且与工程燃烧过程常用的氧化剂空气同为气相,两者均可通过管道送入燃烧空间中。气体燃料的燃烧设备主要包括燃烧器和炉膛(或燃烧室)两部分,其中燃烧器是组织燃烧反应物混合并喷入炉膛或燃烧室的装置,炉膛(或燃烧室)是发生燃烧反应的空间。

液体燃料的流动性也较好,但由于液体燃料的沸点低于其燃点,因而液态燃料必须先发生蒸发,生成燃料蒸气,然后与氧化剂空气混合,进而发生燃烧。因此,为了保证液体燃料与空气之间有效地混合,提高燃烧效率,工程燃烧通常采用燃烧器(油烧嘴)将液体燃料破碎成大量粒径为几微米至几百微米的小液滴,使其悬浮于空气中边蒸发边发生燃烧。

固体燃料的基本燃烧方式主要分为三种:火床(层状)燃烧、流化床(沸腾)燃烧和火室(悬浮)燃烧。将煤块破碎为几十毫米的煤粒时,可采用层状(火床)燃烧方式。层状燃烧时,煤粒在炉排上静止不动,或者靠机械外力作用(非气流作用)而移动,所对应的燃烧设备主要有固定炉排、链条炉排、往复炉排、振动炉排等。当燃用煤粒的粒径在10mm以下,且大部分为0.2~3mm的碎屑时,宜采用介于层状燃烧和悬浮燃烧之间的流化床(沸腾)燃烧方式。沸腾燃烧时,加入炉膛的煤粒受到气流的作用迅速与灼热层中颗粒混合,并在上下翻滚运动中着火和燃烧。当煤粒细小呈粉状时(粒径 $<100\mu\text{m}$),可采用煤粉燃烧器组织煤粉气流,喷入炉膛中进行悬浮燃烧。由燃烧器喷入炉膛的空气—煤粉气固两相混合物在运动中完成升温、着火和燃烧等过程,形成类似于气体燃料燃烧时具有明显轮廓的火焰。

对燃用气体、液体和固体燃料所获取的热能,可采用两种基本方式加以利用。第一种利用方式是采用热机,直接利用燃烧反应产生的高温高压燃气作为工质推动活塞(活塞式内燃机,如柴油机、汽油机、煤气机等)或叶轮(燃气轮机),将热能转变为机械功。活塞式内燃机和燃气轮机中的燃烧空间一般容积不大,统称为燃烧室。另一种利用方式是采用燃烧炉,利用火焰以及燃烧生成物来产生蒸汽或热水(蒸汽或热水锅炉),进而推动蒸汽轮机输出机械功或者用于供暖;或者利用火焰以及燃烧生成物加热物料(工业炉窑),以满足金属

冶炼、锻造加工、热处理以及玻璃、陶瓷、建材等熔化、煅烧、烧成、烧结、干燥等材料加工处理过程的需要。燃烧加热炉的燃烧空间一般容积较大，通常称为炉膛。

一、锅炉

锅炉是产生蒸汽或热水的热动力设备，它由锅和炉两大部分组成（图 1-3）。锅是容纳水和蒸汽并传递热量的容器，包括锅筒和由大量钢管制成的炉膛水冷壁、过热器、再热器等。炉是燃料燃烧的空间，即锅炉炉膛。燃料在炉膛中燃烧所产生的高温烟气，通过辐射、对流和导热三种传热方式，将烟气中的热量传递给锅内的水，从而产生热水或蒸汽。

按照用途不同，锅炉可分为供暖锅炉、工业锅炉、舰船锅炉和电站锅炉；按照所燃用的燃料不同，锅炉可分为燃煤锅炉、燃油锅炉和燃气锅炉；按照锅炉蒸发受热面中工质循环方式不同，锅炉可分为自然循环锅炉、多次强制循环锅炉、直流锅炉和复合循环锅炉；按照燃烧方式不同，锅炉可分为火床（层燃）炉、流化床（沸腾）炉和火室（室燃）炉。

燃用不同燃料或者采用不同的燃烧方式时，锅炉需要选用不同的燃烧设备。燃煤锅炉可根据燃用煤粒的大小，分别采用层燃、沸腾和室燃方式。

（1）燃用煤粉的室燃炉称为煤粉炉是目前电站锅炉主要的燃烧设备。在煤粉炉中，煤粉和空气通过燃烧器喷入炉膛，全部燃料在炉膛空间内悬浮燃烧，形成火炬并产生高温烟气。煤粉燃烧器按其出口流动特性可分为旋流燃烧器和直流燃烧器两大类。燃烧器的主要作用是组织煤粉气流，加强一、二次风气流的混合，保证煤粉气流及时、稳定着火以及煤粉火焰的稳定。

（2）层燃炉相应的燃烧设备主要有翻转炉排、链条炉排、往复炉排、振动炉排等。在层燃炉中，大部分煤在炉排上的燃料层中燃烧，少量煤粒或可燃气在燃料层上方空间中燃烧。某些锅炉采用的燃烧方式介于层燃和室燃之间，如风力抛煤机炉、机械抛煤机炉、抛煤机链条炉等。抛煤过程对燃料造成分选作用，使许多细小煤粒悬浮在炉膛空间中燃烧，而较粗的煤粒则落在火床上进行燃烧。因此，采用抛煤机的炉子中实际上是层燃与悬浮燃烧的综合燃烧过程，形成火炬—层燃炉。

（3）采用流化床（沸腾）燃烧方式的燃煤锅炉又称为沸腾炉，其主要燃烧设备有布风装置（炉箬）和炉膛。布风装置的主要作用是均匀地分配空气，使其沿着炉膛底部截面均匀地进入炉内，以保证煤粒的均匀流化。由进料口加入炉子沸腾段的煤粒受到气流的流化作用迅速与沸腾、燃烧着的燃烧层中的颗粒混合，形成沸腾床，并在上下翻滚运动中着火和燃烧。

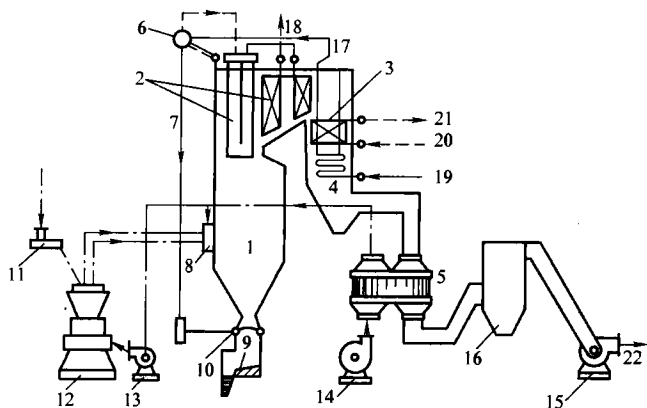


图 1-3 煤粉锅炉设备原理

- 1—炉膛水冷壁；2—过热器；3—再热器；4—省煤器；5—空气预热器；
6—锅筒；7—下降管；8—燃烧器；9—排渣装置；10—集箱；11—给煤机；
12—磨煤机；13—排粉机；14—送风机；15—引风机；16—除尘器；
17—省煤器出口集箱；18—过热蒸汽；19—给水；20—进口
再热蒸汽；21—出口再热蒸汽；22—排烟

一部分细粉被上升气流吹出沸腾段，进入沸腾段之上的悬浮段，并在那里进行悬浮燃烧。

燃油锅炉和燃气锅炉均为室燃炉，炉膛结构与煤粉炉基本上相同，燃油和气体燃料全部在炉膛空间内做悬浮燃烧。在燃油锅炉中，燃油总是先雾化成细小油滴后再喷入炉膛内进行燃烧的。这是为了极大地增大燃料的表面积，以便通过空间燃烧达到燃烧迅速和完全的目的。油燃烧器是将燃油雾化并进行合理配风的装置，主要由雾化器和配风器组成。燃油通过雾化器雾化成细小油滴，以一定的雾化角喷入炉膛。同时，具有一定形状和速度分布的空气流由配风器送入，形成有利的空气动力场，使空气与雾化油滴流相混合，达到及时着火，充分燃尽。燃油锅炉采用的雾化器主要有机械式雾化器（包括离心式和旋杯式）和介质式雾化器（以蒸汽或空气为介质）两大类，以采用离心式机械雾化器为最多。配风器按照气流流动的方式可分为旋流式和直流式两大类。其中，旋流式配风器根据旋流叶片的结构可分为轴向叶片式和切向叶片式；直流式配风器又可分为平流式和纯直流式两种。对于油燃烧器，必须提高雾化质量、保证均匀配风、保持雾化器在配风器中的合理位置、使雾化特性与空气动力特性相适应，才能保证获得稳定、完全、低污染的燃烧。

燃气锅炉燃用的气体燃料主要是天然气和高炉煤气。由于气体燃料的燃烧属气相反应，其着火和燃烧要比固体燃料容易得多，燃烧速度和燃烧的完全程度主要取决于气体燃料与空气的混合。气体燃料的燃烧方式主要有扩散燃烧和动力燃烧两种。其中，扩散燃烧是指气体燃料与空气在燃烧前无混合的燃烧，而动力燃烧是气体燃料与空气在着火前即混合。所采用的燃烧器有旋流式天然气燃烧器、多枪进气平流式天然气燃烧器、中心管进气天然气燃烧器、高炉煤气无焰燃烧器等。

二、工业炉窑

工业炉窑是对物料进行加热的设备，加热的目的是改变物料的物理、化学和机械性质，使物料便于加工成所需要的产品。

工业炉窑主要用于钢铁和有色金属工业、机械工业、建材陶瓷工业以及化学工业等领域中，以完成材料的熔化、精炼、热加工、热处理以及烧成、烧结等工艺过程。因此，工业炉窑的应用比锅炉更加广泛，其类型样式也更多。在实际应用中，习惯上将用于金属加热、熔化、熔炼和热处理的设备称为工业炉，而将用于水泥、玻璃、陶瓷等硅酸盐类材料加热、煅烧、熔化、烧成、烧结的设备称为炉窑。图 1-4 为一用于金属工件锻造或热处理的室式加热炉结构简图（室式热处理炉或锻造炉）。

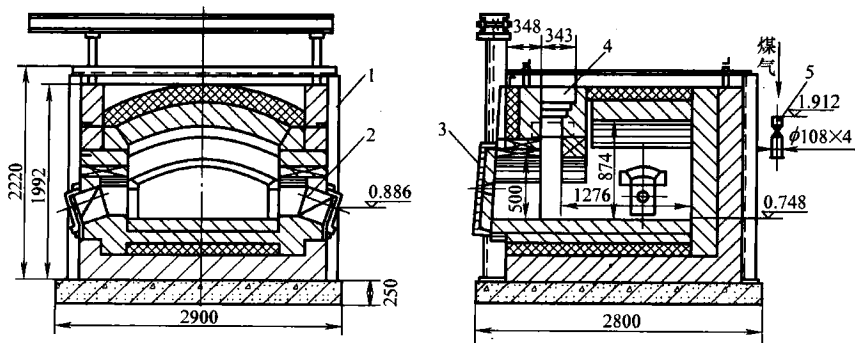


图 1-4 室式加热炉

1—炉架；2—煤气烧嘴；3—水冷炉门；4—排烟道；5—煤气管

按照用途不同,工业炉窑可分为加热炉和熔炼炉两大类。加热炉是在炉内使某种物料得到加热的设备,如轧制加热炉、锻造加热炉、热处理炉、焙烧炉、炼焦炉、煤气发生炉、裂解炉、干燥炉等;熔炼炉是在炉内使物料加热并熔炼的设备,如高炉、转炉、冲天炉、玻璃熔窑等。

按照应用工业领域和被加热物料类型不同,工业炉窑可分为金属熔炼熔化炉、金属加热炉、化学工业炉、水泥窑、玻璃窑和陶瓷窑。

按照加热热源不同,工业炉窑可分为燃料炉和电加热炉。燃料炉又可分为燃用煤、焦炭、粉煤等的固体燃料炉,燃用重油、柴油等的液体燃料炉,以及燃用天然气、煤气等的气体燃料炉。在燃料炉中,加热过程依靠燃烧火焰来实现,按照加热方式不同,燃料炉又可分为直接加热和间接加热。直接加热(即明火加热)是指燃烧生成物直接与加热物料相接触,间接加热是指燃烧生成物不直接接触被加热物料,而是借助于某种间壁式元件(如辐射加热管、对流加热管、马弗罩等)实现热量传递。一般来说,工业炉窑的炉温多数比锅炉炉温高,而且在大多数情况下,要求炉内温度分布比较均匀。

燃用气体燃料的工业炉窑以各种可燃气体作为燃料,采用煤气燃烧器(或称煤气烧嘴)使之与空气混合燃烧。煤气烧嘴与油喷嘴相比,种类非常多。煤气烧嘴一般按煤气与空气的混合方式来进行分类,有内部混合、外部混合和半混合式烧嘴三大类。其中,内部混合式(或称完全预混型)烧嘴的特点是煤气燃烧所需要的全部空气已预先在烧嘴内完全混合好,可燃气体混合物由烧嘴喷出后即可燃烧,因此不需要用二次空气助燃。这种烧嘴又称无焰烧嘴,它产生无色火焰,并能快速燃烧。通过设定煤气与空气的混合比例,采用这种烧嘴可形成所需要的炉内气氛。煤气和空气在烧嘴外部以扩散方式混合并燃烧的烧嘴称为外部混合式(或称扩散燃烧型)烧嘴,有时也称为有焰烧嘴。这种烧嘴的燃烧调节范围较宽,而且没有回火的危险。半混合式(或称部分预混型)烧嘴是使煤气和一部分助燃空气预先混合并从喷头喷出烧嘴,再将必要数量的二次空气在烧嘴外予以补足后进行燃烧。一次空气量占助燃空气总量的30%~70%,调节一次空气量可改变火焰长度和亮度。

工业炉窑采用的油喷嘴,多数按照雾化方法进行分类,但是油喷嘴的种类比煤气烧嘴少,配风器的类型和构造与煤气烧嘴大体相同。油喷嘴的主要类型有高压雾化喷嘴、低压空气雾化喷嘴、油压雾化(机械雾化)喷嘴和转杯式喷嘴等,其中采用压缩空气或蒸汽作为雾化介质的高压雾化喷嘴又分为内混式和外混式高压雾化喷嘴。一般来说,工业炉窑的炉内温度要高于锅炉炉膛内温度,因此工业炉窑使用的油喷嘴和煤气烧嘴本体多数采用耐热结构,如在烧嘴壳体内表面衬以耐火材料。

工业炉窑除了一部分燃用气体燃料和燃料油外,还大量直接以煤、焦炭、粉煤等固体燃料作为热源。工业炉窑中固体燃料的燃烧方式可分为层状燃烧和粉煤燃烧两大类型。层状燃烧方式类似于层燃锅炉中的情况,即将煤粉碎而直接输送至炉排上燃烧。这种燃烧方式可用于热处理加热炉、锻造加热炉等,常用燃烧设备有手烧炉排、水平往复炉排、阶梯式往复炉排、链条炉排以及下绞煤机等。粉煤燃烧方式类似于煤粉锅炉中的燃烧,即将煤粉碎成细微煤粒并在空气中悬浮燃烧。这种燃烧方式可用于水泥回转窑、高炉和石化工业加热炉等,但相比油烧嘴和煤气烧嘴较少采用。常用的粉煤喷嘴,按喷口形状不同分为圆形和扁形口喷嘴;按粉煤气流流动情况不同分为直流和涡流两种类型;按送风方式不同有单管、双管和多

孔式喷嘴之分。与采用炉排的层状燃烧方式相比，粉煤燃烧具有燃烧温度高、燃烧效率高、燃烧过程易于调节以及火焰辐射能力强等优点。

三、燃气轮机

燃气轮机是以连续流动的高温燃气为工质、将燃料燃烧时释放出来的热能转换为机械功的高速回转式叶轮动力机械。它主要由压气机、燃烧室和透平等部件组成（图 1-5）。空气通过进气道连续不断地被吸入压气机并压缩，压力升高，接着进入燃烧室中与喷入的燃料（液体或气体燃料）混合燃烧。所形成的高温高压燃气再进入透平中，推动叶轮高速旋转。

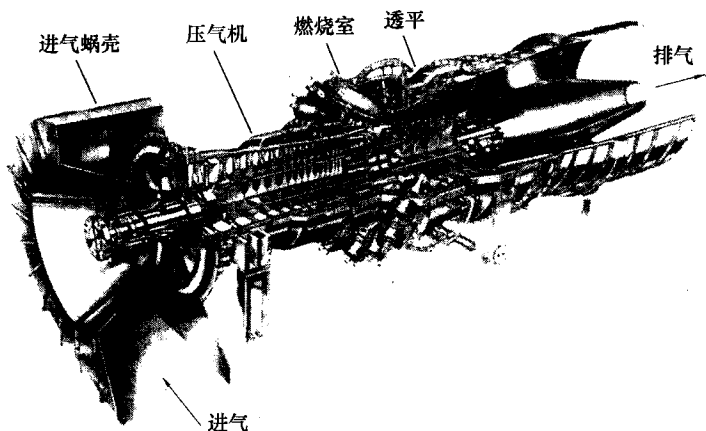


图 1-5 燃气轮机结构

燃气轮机的燃烧设备是燃烧室，它将喷入的燃料与压缩空气混合燃烧形成高温燃气，通常采用高温耐热合金材料制作。现代燃气轮机燃烧室按照基本结构形式可分为圆筒型燃烧室、分管型燃烧室、环管型燃烧室和环型燃烧室四大类型。其中，圆筒型燃烧室广泛应用于固定式燃气轮机中，而分管型、环管型和环型燃烧室在航空燃气轮机、车辆和舰船用燃

气轮机中被广泛采用。此外，按照空气、燃气流在燃烧室中的流动方向不同，燃气轮机燃烧室可分为逆流式（回流式）和顺流式（直流式）两种。按照燃烧方式不同，燃气轮机燃烧室分为扩散燃烧和预混燃烧两种基本类型。

燃气轮机燃烧室主要由火焰筒、火焰稳定器、燃料喷嘴、点火器以及外壳、联焰管、扩压器、燃气导管等部件组成。火焰筒是实现燃料燃烧和燃气掺冷的空间，是燃烧室的关键部件。按照燃用燃料的不同，燃料喷嘴可分为液体燃料喷嘴、气体燃料喷嘴和双燃料喷嘴三种。燃气轮机的燃料喷嘴在工作原理上与锅炉和工业炉窑油喷嘴和气体燃料喷嘴类似。双燃料喷嘴分别具有气体、液体燃料各自的喷口，可只烧天然气或燃油，也可在天然气供应不足时与燃油混烧。燃气轮机燃烧室中主要采用叶片式旋流器作为火焰稳定器，有轴向式和径向式两种。采用旋流器，可在火焰筒中产生回流区，促使燃料加热和蒸发，是稳定火焰的有效手段。

燃气轮机动力装置具有功率大、体积小、启动快、污染物排放低等优点，广泛应用于电站、机械驱动、车辆动力、舰船动力以及航空、航天动力等领域。

四、内燃机

内燃机是通过燃料在气缸中燃烧产生高温燃气，并依靠燃气膨胀推动活塞往复运动而将燃料燃烧时释放出来的热能转换为机械功的活塞式动力机械，是热效率最高的一种热机。

内燃机的核心部件为一圆筒型的气缸，内置一可作直线往复运动的活塞，活塞顶部与气缸盖之间的小空间构成内燃机的燃烧室，活塞通过连杆与曲轴相连（图 1-6）。燃料和空气分别由内燃机的燃料供给系统和配气机构喷入燃烧室，形成可燃混合气并迅速燃烧。气缸中

热量的迅速释放产生高温高压燃气，并急剧膨胀，推动活塞作往复运动，进而通过曲柄连杆机构带动曲轴旋转，将作用在活塞上的燃气压力转变为转矩，通过曲轴向外输出。

内燃机一般燃用轻质液体燃料（汽油、柴油、甲醇、乙醇等）和气体燃料（天然气、液化石油气、发生炉煤气等）。按照燃料的着火方式不同，内燃机可分为外源点火式（又称火花点火式）和自燃发火式（又称压燃式）两种。外源点火式内燃机一般采用电火花点火，如汽油机和煤气机；压燃式内燃机不是由外源点火而是靠压缩热使燃料自行着火燃烧，如柴油机。各种内燃机中可燃混合气的形成方法不同，相应的燃烧过程也不同。如汽油机中可燃混合气往往是在气缸外形成的。雾状油滴经蒸发、扩散与空气混合（利用化油器或电喷和进气管）而流入气缸，直至压缩行程之末，再点火燃烧；而在柴油机中，柴油经喷油嘴喷入燃烧室，与高温、高压空气混合并发生燃烧。

内燃机是热效率最高、应用范围最广的热力发动机，广泛应用于工业、农业、交通运输等国民经济和国防建设各个领域。它是汽车、拖拉机、工程机械、农业机械、通用机械、船舶、机车、军用车辆和发电设备等移动式 and 固定式动力装置的主要动力源。

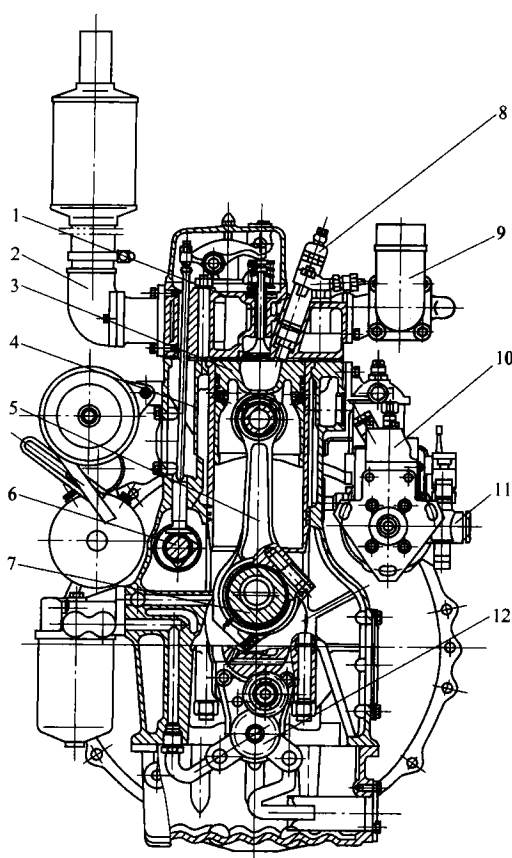


图 1-6 X3105 型柴油机

- 1—气缸盖；2—排气管；3—活塞；4—气缸体；5—连杆；
6—凸轮轴；7—曲轴；8—喷油器；9—进气管；
10—喷油泵；11—输油泵；12—机油泵

1.3 工程燃烧设备的基本性能要求

燃烧设备是锅炉、工业炉窑、燃气轮机、内燃机等热能动力装置最重要的组成部分之一，其性能是决定整个装置能否可靠、安全、经济运行的关键因素。设计良好的燃烧设备应该满足工作可靠性、运行经济性和使用维护三方面的要求并应达到相应的性能指标。

(1) 燃烧热强度高

表征燃烧设备工作热强度的指标有容积热强度和面积热强度。容积热强度是指单位炉膛（或燃烧室）容积在单位时间内燃烧燃料所释放出来的热量，又称比容积热强度；面积热强度是指单位炉膛（或燃烧室）横截面积在单位时间内燃烧燃料所释放出来的热量，又称比面积热强度。

燃烧设备燃烧热强度的高低是反映炉膛（或燃烧室）结构紧凑性的指标。燃烧热强度高，则炉膛（或燃烧室）结构紧凑、尺寸小、质量轻，特别是对于燃气轮机，可使燃烧室结