



万俊华 郜 冶 夏允庆 编著

燃烧理论基础

(黑)新登字第9号

内 容 简 介

本书以深入浅出的表达方法,介绍各种燃烧问题的分析和处理方法,注重讲解各种基本燃烧现象的物理和化学本质。在数学处理上力求简单、明了、易懂,使初学者在较短的时间内能初步掌握燃烧学的基本内容及其研究方法。

本书内容包括:绪论;化学动力学;燃烧学的物理基础;绝热火焰温度计算;混合气的着火;混合气中的火焰传播;扩散燃烧;工业炉中煤的燃烧;固体火箭发动机内的燃烧;火箭发动机喷管内的化学反应。

本书可做为固体火箭发动机、热能工程、内燃机、航空发动机、冶金炉、工业炉等专业燃烧课的教材,也可作为上述专业研究生的参考书。同时也可供从事以上专业的科研、设计、生产和试验人员参考。

燃 烧 理 论 基 础

万俊华 邵 冶 夏允庆 编著

*

哈尔滨船舶工程学院出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨毕升电脑排版有限公司排版
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 14.375 字数 380 千字

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数:1—1000册

ISBN 7-81007-235-8/O·14

定价:3.65元

序

本书系统简明地介绍了燃烧学的理论基础和燃烧理论在热动力机械中的典型应用。作者结合多年的教学经验和科研成果,力求摆脱繁琐的数学公式的演导,更多地着重燃烧现象中物理、化学本质的阐述。阅读本书,可以提高读者分析问题和解决实际问题的能力。应该说,这本书是一本好的学术著作。

燃烧理论是一个相当复杂的学科,我国在 1956 年的十二年科学规划、1962 年的十年科学规划、1977 年全国科学大会提出的科学发展规划中,燃烧学都是全国重点研究课题。

燃烧学是一门很有前景的学科。人们对燃烧的微观机理和过程,无论实验结果和理论发展的水平,尚不足以阐明燃烧的“真象”。同时,热动力机械的发展也需要掌握燃烧的“规律”。我多年从事液体火箭发动机的研究和发展工作,从开始方案论证到产品完成,需进行大量的燃烧试验工作,耗资很大。近年来,用计算机预测燃烧过程,已日益增多。火箭燃烧室和喷管的热力计算结果,已为设计师提供了很好的设计依据。利用计算机对“燃烧课题”进行仿真的工作,已在开展,很有发展前途。利用仿真结果,节省试验次数,节约研制经费,这是一件对国家经济建设和国防建设很有实际意义的工作。

国内燃烧学的教材、参考书或专著与国外出版的书籍相比,显得太少,因此哈尔滨船舶工程学院组织编写出版《燃烧理论基础》是很有必要的。我希望本书的出版对培养动力工程专业的学生和对从事这方面的研究工作者都能起到积极作用。

中国科学院
学部委员

任新民

1992年8月20日

前 言

喷气推进和火箭技术的迅速发展,促使燃烧过程及其相关的理论研究也随之迅速而蓬勃地开展起来。目前,我国对燃烧理论所进行的研究工作正方兴未艾。燃烧学是一门综合性很强而又复杂的学科,它是建立在热力学、传热学、传质学、流体力学、物理化学等学科知识基础之上的。一方面由于人们对化学动力学过程(如反应机理)和湍流等现象的认识还比较肤浅;另一方面,还由于我们对微观机理和过程缺乏观察和实验手段,使燃烧学的发展受到了很大的局限。但是,经过许多科技工作者的努力,尤其是数值方法和计算机的广泛使用,以及激光测量技术、传感技术的发展,近年来燃烧学还是取得了长足的进展。

本书是为高年级大学生和研究生,也是为从事热动力机械、环保和节能的科技工作者而撰写的。适合于热能工程、锅炉、内燃机、以及航空发动机、固体火箭发动机等专业使用。

本书力求摆脱数学问题处理的复杂和枯燥而更多地重视燃烧现象中物理、化学实质的阐述。由于近年来国外发表的燃烧论文和资料极其丰富,编者选材不想面面俱到,而是选择一些国际上公认为成熟或比较成熟的理论给以充分的阐述,这样取材的结果,难免使本书内容有一定的局限性。编者的主观目的是想使读者通过对燃烧基础知识和燃烧专题的比较深入的学习与研究,能达到提高读者分析问题和解决问题的能力。本书内也融入了作者多年来从事燃烧理论教学的一些心得体会和研究的成果。

全书包含绪论和九章,前六章是燃烧学的基础理论知识。包括:燃烧的化学动力学,燃烧的物理基础,绝热火焰温度计算,着火,预混合气体中的火焰传播,扩散燃烧。后三章讨论工业炉中煤的燃烧,固体火箭发动机中的燃烧,火箭发动机喷管内的化学反应。

本书的绪论、第一章至第三章、第六章第一节、第九章由万俊华撰写,第六章第二节至第八章由郜冶撰写,第四章和第五章由夏允庆撰写。全书由万俊华最后统稿。

本书的编写时间比较仓促,并由于我们的水平所限,书中可能还会有不足或错误之处,在此,恳切地希望广大读者批评指正。

编著者

1992年6月

主要符号表

拉丁文

A	系数
a	热扩散系数
B	系数; 交换数
b	系数
C	常数; 摩尔浓度; 浓度
C_p	定压比热容
C_v	定容比热容
C_f	阻力系数
D	扩散系数; 燃烧室直径
d	液滴直径; 火花塞间隙
d_p	淬熄距离
E	活化能
E_c	临界点火能
E_{\min}	最小点火能
F	截面积
G_i	i 种物质流量
G_v	容积流量
g	重力加速度
H	燃料发热量; 焓
h	焓; 常数; 燃烧室高度
J	分子扩散通量

K	常数;平衡常数
k	反应速率常数
\bar{k}	玻尔兹曼常数
L	长度;火焰高度
\bar{l}	分子平均自由程
M	摩尔数;马赫数;分子量
m	质量流率;分子量;常数;分子质量
N	分子总数
N_i	物质分子数
N_A	阿佛伽德罗(Avogadro)常数
n	分子浓度
p	压强(压力)
Q	反应热
R	通用气体常数
r	半径
S_L	层流火焰传播速度
S_T	湍流火焰传播速度
T	温度
t	时间;温度
u	速度; x 方向分速度
V	体积
v	Y 方向分速度
w	Z 方向分速度;化学反应速率
X	摩尔分数;轴向距离
x	轴向距离
Y	质量分数;浓度百分数;径向距离
y	径向距离
Z	空间坐标;碰撞次数

希腊文

α	对流换热系数;过量空气系数;系数
β	系数
δ	火焰前锋厚度
ε	湍流扩散系数
λ	导热系数
η	动力粘度
ν	运动粘度
τ	时间;剪切力
τ_i	着火延迟期
ρ	密度
Ω	碰撞积分

角 标

a	空气
b	燃烧
f	燃料;火焰
g	气相
i	成分;着火
j	成分
L	液相;层流
T	湍流
u	未燃混合气
0	初始状态
∞	环境状态,未燃烧混合气
Σ	总量

目 录

序

主要符号表

绪 论	(1)
第一章 燃烧化学动力学基础	(9)
第一节 化学反应速率	(9)
第二节 化学反应的分类	(19)
第三节 简单反应的动力学规律	(24)
第四节 温度对化学反应速率的影响	(29)
第五节 双分子反应碰撞理论	(34)
第六节 影响化学反应速率的主要因素	(40)
第七节 单分子反应理论	(48)
第八节 原子及自由基的复合反应	(51)
第九节 催化反应	(54)
第十节 链反应	(63)
第二章 燃烧学的物理基础	(87)
第一节 燃烧过程中的输运现象	(87)
第二节 气体的扩散	(89)
第三节 气体的粘性	(108)
第四节 气体的热传导	(119)
第五节 输运系数之间的关系	(132)
第六节 描述多组分连续介质的基本公式	(137)

第七节	连续方程(质量守恒方程).....	(140)
第八节	动量守恒方程(运动方程).....	(146)
第九节	能量守恒方程.....	(148)
第三章	绝热火焰温度	(154)
第一节	引言.....	(154)
第二节	燃烧产物的平衡成分.....	(155)
第三节	绝热火焰温度的确定.....	(173)
第四节	四元素液体火箭推进剂的火焰温度计算.....	(174)
第五节	固体火箭推进剂燃烧产物平衡成分的 一步计算方法.....	(180)
第四章	着火	(186)
第一节	着火过程及方式.....	(186)
第二节	谢苗诺夫热自燃理论.....	(189)
第三节	着火的链式自燃理论.....	(203)
第四节	强迫着火的概念.....	(208)
第五章	预混合气体中的火焰传播	(212)
第一节	火焰传播.....	(212)
第二节	层流火焰传播速度理论.....	(215)
第三节	影响层流火焰传播速度的主要因素.....	(227)
第四节	层流火焰传播界限.....	(234)
第五节	层流火焰传播速度的实验测定.....	(237)
第六节	湍流火焰传播.....	(241)
第七节	火焰自湍化概念.....	(249)
第六章	扩散燃烧	(252)
第一节	气体扩散燃烧.....	(252)
第二节	单液滴燃烧.....	(270)
第三节	液滴群的燃烧.....	(277)
第四节	喷雾燃烧.....	(282)

第七章 工业炉中煤的燃烧	(289)
第一节 概 述.....	(289)
第二节 碳燃烧机理及煤粒的燃烧.....	(290)
第三节 煤的层燃.....	(300)
第四节 煤粉射流燃烧.....	(312)
第五节 沸腾燃烧.....	(318)
第六节 旋风燃烧.....	(324)
第八章 固体火箭发动机燃烧	(331)
第一节 概 述.....	(331)
第二节 双基推进剂的燃烧.....	(333)
第三节 复合推进剂的燃烧.....	(352)
第四节 侵蚀燃烧和振荡燃烧.....	(358)
第五节 固体火箭推进剂点火理论分析.....	(372)
第六节 固体火箭发动机燃烧过程的计算机仿真简介	(394)
第九章 火箭发动机喷管内的化学反应	(400)
第一节 应用无因次参数表示的等温反应速率.....	(401)
第二节 绝热膨胀过程中的近平衡流动的准则方程.....	(405)
第三节 近平衡流动准则的应用.....	(411)
第四节 绝热膨胀时近冻结流动准则.....	(416)
第五节 近冻结流动准则的应用.....	(421)
第六节 流动准则的收敛条件.....	(424)
附录 1 Lennard - Jones 势的势能参数	(427)
附录 2 对于 Lennard - Jones 势能的碰撞积分	(430)
附录 3 气体的扩散系数	(431)
附录 4 可燃气体混合物的熄火距离和最小点火能	(437)
主要参考文献	(438)

绪 论

一、研究燃烧理论的目的和重要性

在说明研究燃烧理论目的之前,首先介绍一下“燃烧”这个概念。一般将强烈放热与发光的高速化学反应过程称之为燃烧过程,简称“燃烧”。因此,“燃烧”包括各种类型的氧化反应或类似于氧化的反应以及分解放热反应等。例如,过氧化氢(H_2O_2)和肼(N_2H_4)的分解,都要放出大量热能。

按照这个定义,物质不一定在“氧”中燃烧,例如,很多金属可以在氟中燃烧;氧化钠、氧化钡可以在二氧化碳中燃烧;火药没有气体介质也能燃烧。因此,燃烧过程主要是指放出热量的化学过程,它是目前各种工业技术部门取得能量的一种普遍而重要的方法。

表 1 列出了欧洲共同体和美国预计的每年能量需要量。我们以 1980 年为例,美国的煤、石油和天然气占全部消耗能源的 92.6%,欧

表 1 工业发达国家能量需要量

年 份	单 位: 10^{18} 焦 耳			
	欧 洲 共 同 体		美 国	
	1980	1985	1980	1985
煤	94.0	90.0	178.1	273.3
油	477.8	603.5	470.1	547.0
天 然 气	92.6	127.1	265.7	282.0
核 能	41.5	114.6	58.5	123.4
水力及地热	18.2	20.5	14.7	16.5

洲共同体占 91.6%。由此可见,这些工业发达国家,目前通过燃烧产生的能量占绝对优势地位,其它能源还居于次要地位。到 1985 年,美国占 88.4%,欧洲共同体占 85.9%,虽然燃烧产生的能量有所下降,但仍然是主要的。

下面从五个方面说明燃烧在工程上的地位。

1. 动力的生产

现在,产生动力的方法不外乎是利用固体、液体或气体燃料的燃烧。热电厂中烧煤或烧油以产生汽轮机的蒸汽,这些燃料还作为船舶、火车、汽车、飞机、火箭的能量。天然气也可用作蒸汽轮机、燃气轮机和内燃机的燃料。

2. 工业生产

工程材料,例如钢、铁、许多有色金属、玻璃、水泥、石油炼制以及其它碳氢化合物的生产中,都要燃烧大量的燃料(作为一种主要原材料)。

3. 工业加热和民用采暖

在世界各国,许多工厂、医院、办公楼、住宅以及其它建筑物都需要采暖,大多数情况下,优先的能源是燃烧产生的。

4. “能源危机”

“能源危机”实质上是“燃烧危机”。世界上的燃料供应正在迅速地减少。最易于燃烧的燃料正在迅速地被消耗。如果工程师能设计出烧劣质煤或劣质油的采暖设备,或在汽车中使用煤粉作燃料,“能源危机”可能缓和,人类的困境将大为改善。因此,燃烧技术的改进与“能源危机”有密切的关系。

5. 应当防止的燃烧

森林、一切建筑物,甚至家具、衣服都可以成为燃料。消防人员的任务是使它们不燃烧,或者在不慎着火时能迅速熄灭。因此,专门的消防工程人员为了研究防火及灭火的技术,也应当懂得燃烧理论。

由上述分析可知,燃烧技术与国民经济和人民生活有着非常密

切的关系。研究燃烧理论将为改进燃烧技术提供理论依据。燃烧理论的重要性也就不言而喻了。

在直接将物质的化学能转变为动力的方案未实现之前,一般都必须通过燃烧过程将物质的化学能转变为热能后才可以被利用,或更进一步将热能转变为机械功、电能供给生产及生活上的需要。因此在任何利用化学能作为能源的设备中均有燃烧过程。

对于一台燃烧设备(工业与民用锅炉、加热炉、各种内燃机、喷气发动机、火箭发动机等),通常对它们提出下列技术要求:

(1)经济性

产生单位热能的燃料消耗量应尽可能地少。换句话说,燃烧效率应当高。燃烧设备不能将供给它的燃料全部烧掉。没有烧完的部分通常排入大气;就是燃烧掉的燃料,一般也不能完全燃烧,将燃料的化学能全部转变为热能。未完全燃烧的产物通常是有害的,造成自然环境的污染。因此,燃烧设备的设计师有双重理由要使燃烧效率接近100%。

经济性的另一要求是降低费用。燃料越来越贵,燃烧设备更加昂贵。因此,燃烧设备的设计,必须既提高效率又降低费用,费用包括设备费和运转费。为了减少设备费用,燃烧工程师应使化学反应能在最小的空间内完成;为了减少运转费用,应使通过炉子的气体的压降最小。这两个方面是有矛盾的,必须全面考虑,采取优化设计方案。

(2)可靠性

燃烧设备工作工程中,既能达到设计的性能指标,又能安全运行。

(3)重量特性

这个要求是针对各种类型的发动机。对于航空发动机和各类火箭发动机尤其重要。它是指发出单位功率需要发动机的重量应尽可能地轻。

(4)特殊要求

有些燃烧设备要求燃烧产物温度一定,并具有一定的成分。例如,金属热处理的加热炉,燃烧产物对金属引起物理或化学的变化时,就应当有这样的要求;或者为了对附近的结构元件不发生损害,燃烧产物不允许超过某一温度。因此,设计师必须能预先计算燃烧产物的成分和温度,并使它们受到控制。

所有这些要求均与燃烧过程有密切关系,而其中工作的可靠性和经济性很大程度上取决于燃烧过程进行的情况。因此,研究燃烧过程就是要了解其内部过程的规律性,从而能合理地组织燃烧过程。

归纳上述分析,可以明确研究燃烧理论之目的在于掌握燃烧过程中物理、化学变化的规律性,从而能正确地指导燃烧设备的设计。但是,直到现在,由于燃烧室内所进行的物理、化学过程的复杂性,还没有成功地总结出燃烧过程的完整理论,试验数据还很少,也缺乏系统的整理。因此,还不能完全指导燃烧设备的设计。尽管如此,理论知识仍不失为工程技术人员手中强有力的工具,理论使设计人员有可能合理地选择燃烧设备的型式和解决结构上的问题;对调整燃烧设备的实验人员来说,理论使他们有可能正确地分析实验中所出现问题的原因,从而能够找到解决这些问题的正确途径。

最后,燃烧在现代文明中所起的作用,可概括地归纳为:现在比以往任何时候都更迫切地需要设计出一些燃烧设备和技术,既能高效率地燃烧燃料或废物,同时对自然环境的污染又能降低到最小限度。

二、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。我们的祖先约在70万年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诊断:“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。”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。18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、食品以及国防等轻重工业和人们日常生活中无一能脱离了火的使用——燃烧技术。近年来,宇航技术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)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仍然如此。

三、燃烧科学发展简介

燃烧是人类历史上最早发现的自然现象。在古希腊神话中,火是神普鲁米修斯为了拯救人类的灭亡,从天上偷来送到人间的,它是神的赐予。在我国的神话中,火是燧人氏钻木取得,是人类的创造。但这些终究还是神话与传说,没能揭开火的本质。根据考古学家的分析,中国的山顶洞人(距今约1.8万年)已经学会了人工取火的方法。火的利用是人类征服自然的开始,是推动人类技术前进的伟大发现之一。也可以说,人类的文明是燃烧燃料而得到热能过程中孕育发展起来的。恩格斯在自然辩证法中写道:“……当人类学会了摩擦取火,人类就第一次使无穷无尽的自然力量为自己服务。这个伟大的、不可估量的发现对人类深刻的影响从现在人们对火的迷信中还可以看出。”虽然人类很早就发现了火,且在生产和生活中广泛地应用着它,但是,关于火的知识,我们却了解得很少很少。