

ranshao
lilun



高等学校“十五”规划教材

燃烧理论

主 编 谢兴华

副主编 李寒旭

中国矿业大学出版社

高等学校“十五”规划教材

0643.2-43

X54

燃 烧 理 论

主 编 谢兴华
副主编 李寒旭

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了燃烧理论的化学和物理基础以及结合电子计算机进行计算的数学物理方法,同时,运用实例说明了燃烧理论在实际问题中的应用与求解。

本书对 20 世纪 80 年代以来提出和发展的一些燃烧理论的方法和模型进行了分析和比较,介绍了燃料燃烧特性和化工燃烧装置与设备,是一本内容较新和较全面的教科书。

本书可作为高等学校本科生和研究生的燃烧课教材和高校教师的教学参考书,也可供工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧理论/谢兴华主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2002. 8

ISBN 7 - 81070 - 554 - 7

I. 燃... II. 谢... III. 燃烧理论 IV. O643-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 019882 号

书 名 燃烧理论
主 编 谢兴华
责任编辑 褚建萍
责任校对 崔永春
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 中国矿业大学印刷厂
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 380 千字
版次印次 2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷
印 数 1~1050 册
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

燃烧理论课程所需研究解决的是燃烧过程的各个基本现象,例如,燃烧反应的机理、历程,预混可燃气体的着火和熄灭,火焰的传播机理及其结构,液体及固体燃料燃烧的物理模型等。它主要运用化学、传热传质学及流体力学的有关理论,可以说它是物理、化学、力学等多方面的综合学科。也有一些学者的论著把燃烧机理进一步划分为燃烧化学和燃烧物理学,并根据研究的重点逐渐形成了一些新的分支,如火焰光谱学、燃烧空气动力学、化学反应流体力学、流体化学热力学、计算燃烧学等。

燃烧应用技术主要是把燃烧理论中所阐明的物理化学概念和基本规律与实际过程中的燃烧问题联系起来,对现有的燃烧方法进行分析和改进,对新的燃烧方法进行探讨实验,针对不同燃料的燃烧特性提出合理的燃烧方法,根据具体要求研究设计新型燃烧装置,以不断提高燃料的利用率和燃烧设备的技术水平,降低燃烧过程的噪音和污染物的生成。

本书参考和归纳了国内外有关专著及大量文献资料。内容兼顾理论和实践两个方面,并注意理论联系实际,融合了燃烧理论和燃烧工程的内容。在理论研究方面着重介绍了基本概念、基本方法、主要结论及其应用范围。在燃烧工程方面主要介绍了燃料燃烧特性和装置。对实验研究方法和测试技术给予了重视,介绍了一些新的研究途径和手段。

本书由谢兴华教授任主编,并编写绪论、第1、2、5、9章和第6章1、2、3节,由李寒旭副教授编写第3、4、7、8章和第6章4、5节,编写过程中得到了胡学先教授和孙金华博士的大力帮助,文稿计算机输入和初校由彭小圣、王群英、刘义、曲政俊、张宏伟和周宁完成。颜事龙教授主审。在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平和经验,书中缺点错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2002.4

目 录

绪论	1
1 燃烧化学动力学及其化学平衡	8
1.1 简单化学反应	8
1.1.1 反应级数	10
1.1.2 具有简单反应级数的反应	10
1.2 复杂化学反应	15
1.2.1 对峙反应	15
1.2.2 平行反应	16
1.2.3 连串反应	17
1.3 爆炸——分支链反应	19
1.3.1 链锁反应	19
1.3.2 支链反应	21
1.4 燃烧反应速度及其影响因素	22
1.4.1 燃烧反应速度表示方法	22
1.4.2 影响燃烧反应速度的因素	23
1.5 燃烧化学平衡	25
1.5.1 平衡常数的表示法	25
1.5.2 复相化学平衡	26
1.5.3 化学平衡的影响因素及平衡常数的求法	27
2 燃烧物理基础	29
2.1 多组分气体的基本参量	29
2.2 层流气体分子输运过程的基本规律	30
2.2.1 层流气体分子的输运过程	30
2.2.2 牛顿(Newton)粘滞定律	31
2.2.3 傅立叶(Fourier)热传导定律	31
2.2.4 费克扩散定律	32
2.2.5 多组分气体的交叉输运现象	33
2.3 多组分化学反应流体运动的基本方程	35
2.3.1 质量守恒方程	35
2.3.2 动量守恒方程	35
2.3.3 组分守恒方程	37
2.3.4 能量守恒方程	38

2.4	二维平板附面层中的简化方程	41
2.5	捷尔道维奇变换	44
2.6	相分界上的边界条件和斯蒂芬(Stefan)流	45
2.6.1	斯蒂芬流	45
2.6.2	相分界面上的边界条件	47
3	燃料	48
3.1	固体燃料	48
3.1.1	煤的种类和一般特性	48
3.1.2	煤的元素分析与工业分析	49
3.1.3	分析数据的表示方法和基准换算	57
3.2	气体燃料	58
3.2.1	天然气	58
3.2.2	合成气	59
3.3	液体燃料	60
3.3.1	石油的炼制及其产品	60
3.3.2	石油产品的理化性质	61
3.4	新型燃料水煤浆	64
3.4.1	水煤浆技术发展现状	64
3.4.2	水煤浆的品种及特性	65
3.4.3	水煤浆燃料的制备	65
3.4.4	水煤浆的生产及应用	67
4	燃烧计算	68
4.1	概述	68
4.1.1	燃烧的几个基本概念	68
4.1.2	燃烧计算的依据、内容及假定条件	69
4.2	固体和液体燃料的燃烧计算	70
4.2.1	理论空气量计算	70
4.2.2	烟气量计算	71
4.3	气体燃料的燃烧计算	74
4.3.1	气体燃料的干、湿成分换算	74
4.3.2	理论空气量计算	75
4.4	烟气分析与过量空气系数的选择	77
4.4.1	烟气分析与计算	77
4.4.2	过量空气系数的选择	80
4.5	燃料的燃烧温度	83
4.5.1	燃料的燃烧温度	83

4.5.2	燃烧温度的计算	85
5	着火过程	86
5.1	着火机理和着火方式	86
5.1.1	着火机理	86
5.1.2	着火方式	87
5.2	热自燃理论	88
5.2.1	概述	88
5.2.2	Semenov 系统和热量守恒	88
5.2.3	热图分析	89
5.2.4	热自燃临界条件的数学表达式	90
5.2.5	热自燃发生的界限	91
5.2.6	着火延滞(感应)时间	92
5.3	强迫着火	96
5.3.1	基本概念和现象	96
5.3.2	炽热平板的点火距离	97
5.3.3	炽热平板长度 L 及强燃温度	98
6	气体燃料的燃烧	102
6.1	气体燃料的预混燃烧	102
6.1.1	基本概念	102
6.1.2	爆震与缓燃	103
6.1.3	爆震波	106
6.1.4	缓燃波	107
6.1.5	层流火焰传播理论	108
6.1.6	影响火焰速度的因素	113
6.1.7	湍流预混火焰的传播	113
6.2	气体燃料的扩散燃烧	115
6.2.1	气体射流概述	115
6.2.2	气体燃料自由射流燃烧的基本假设	117
6.2.3	火焰结构求解	118
6.3	瓦斯的燃烧	122
6.3.1	概述	122
6.3.2	瓦斯的燃烧(爆炸)	123
6.4	扩散火焰与预混火焰	131
6.4.1	本生灯的燃烧过程及火焰结构	131
6.4.2	脱火回火	134
6.5	煤气燃烧方法与火焰稳定	136

6.5.1	燃烧方法	136
6.5.2	火焰稳定	138
7	液体燃料的燃烧	139
7.1	油的雾化	139
7.1.1	雾化方法	139
7.1.2	雾化过程	139
7.1.3	燃油雾化质量	141
7.2	燃料油的燃烧过程	143
7.3	燃油烧嘴	145
7.3.1	气体介质雾化式油烧嘴	146
7.3.2	油压式(机械式)油烧嘴	148
7.3.3	转杯式油烧嘴	150
7.4	水煤浆的燃烧	151
7.4.1	水煤浆燃烧简介	151
7.4.2	水煤浆燃烧技术	151
7.4.3	水煤浆在工业上的应用	153
8	固体燃料的燃烧	159
8.1	煤的燃烧	159
8.1.1	煤的燃烧方式	159
8.1.2	煤粒表面上的多相燃烧反应	160
8.1.3	碳的氧化反应	161
8.1.4	固体燃料的燃烧过程	162
8.2	层状燃烧(固定床燃烧)	163
8.2.1	层状燃烧简介	163
8.2.2	人工加煤的燃烧炉	165
8.2.3	绞煤机	166
8.2.4	链条炉	167
8.2.5	抛煤机、振动炉排、往复炉排	168
8.3	流化床燃烧	169
8.3.1	流化床燃烧系统	170
8.3.2	流化床燃烧原理	172
8.3.3	沸腾床燃烧技术	178
8.3.4	循环流化床燃烧技术	183
8.4	煤粉燃烧	185
8.4.1	煤粉的燃烧方式	186
8.4.2	煤粉气流的着火过程	187

8.4.3	合理安排煤粉气流的着火过程	187
8.4.4	煤粉气流着火后的燃烧	188
8.4.5	旋风燃烧	189
8.4.6	先进悬浮燃烧工艺	189
8.4.7	旋流燃烧器	190
9	爆炸物的燃烧	191
9.1	爆炸物燃烧的一般概念及特点	191
9.1.1	爆炸物的概念及其燃烧的特点	191
9.1.2	爆炸物燃烧速度的表示方法	191
9.2	爆炸物的稳定燃烧	192
9.2.1	概述	192
9.2.2	气体爆炸物的燃烧	193
9.2.3	固体爆炸物的燃烧	194
9.3	爆炸物的不稳定燃烧	202
9.3.1	不稳定燃烧的类型及其原因	202
9.3.2	不稳定燃烧的控制	204
9.4	爆炸物的燃烧转爆轰	204
9.4.1	凝聚相爆炸物燃烧转爆轰的条件	205
9.4.2	燃烧转变为爆轰	211
9.5	影响爆炸物燃烧的因素	213
9.5.1	压力对燃烧速度的影响	213
9.5.2	影响燃烧速度的其他因素	215
	参考文献	219

绪 论

1. 理论进展

燃烧的应用和发展已有悠久的历史。在我国远古时期就有关于燧人氏钻木取火的传说,在欧洲荷马史诗中也有关于普罗米修斯为人类盗火的神话。从各种考古发掘中也直接或间接地表明,人类祖先远在无文字可考的旧石器时代就已开始用火,火是人类第一次控制的自然力。恩格斯说过:只是人类学会了摩擦取火之后,人才第一次使某种无生命的自然力为自己服务。火的使用使人类脱离了茹毛饮血的野蛮状态而进入文明时代。但是,只有当火的使用由日常生活进入到生产领域之后,燃烧才形成一门独立的科学,并得到迅速发展。人类所经历的每一次技术进步,如陶器制作、青铜冶炼、炼铁及冶金技术的发展、蒸气动力、煤和石油的使用、热能工程、汽车、炸药、火箭、喷气及宇航技术的发展等等都与燃烧有密切的关系,同时也大大推动了燃烧科学的发展。

古代人们在使用火的同时,产生过不少有关火的学说。如我国“五行说”的“金、木、水、火、土”中的火;古印度“四大说”的“地、水、火、风”中的火;古希腊“四元说”的“水、土、火、气”中的火等,都认为火是构成万物的原本物质之一。随着工业的发展,特别是冶金和化工工业的发展,燃烧的应用范围和规模扩大了,使人们更迫切地想要搞清楚燃烧现象的本质。但由于燃烧过程的复杂性,实质上直到18世纪中叶之前,人们对燃烧现象的本质几乎仍然毫无所知。在17世纪中到18世纪中,即自法国化学家拉瓦锡提出燃烧的氧化学说之前的大约100年间,欧洲曾流传着“燃素说”,并占统治地位。按燃素说,火是由无数细小而活泼的微粒构成的物质实体。这种火的微粒既能同其他元素结合而形成化合物,也能以游离方式存在。它弥散于大气之中,给人以热的感觉。“火微粒”所构成的元素就是“燃素”。按照燃素说解释燃烧现象,认为一切与燃烧有关的化学变化都可以归结为物质吸收燃素与释放燃素的过程。并认为物质中含燃素越多,燃烧起来越旺。

直到18世纪,由于氧气以及其他碳酸气、氢气、氮气等一些重要气体的发现,促使了燃烧学的发展。在1756年至1777年间,罗蒙诺索夫和拉瓦锡通过各自的实验观察,完全否认了燃素说的结论,提出了燃烧的氧化学说,认为可燃物的燃烧并不是物质释放出燃素,而是可燃物与氧的化合反应。燃烧的氧化学说认为:燃烧能放出光和热,可燃物只有在氧气存在时才能燃烧;空气主要由氮气和氧气组成。

到19世纪,赫斯(Hess)和基尔霍夫(Kirchhoff)等人发展了热化学和化学热力学,此时对燃烧过程进行了静态研究,把燃烧过程作为热力学体系考察其初态、终态间的关系,阐明了燃烧热、产物平衡组分及绝热燃烧温度的规律性。到20世纪30年代,开始建立研究燃烧动态过程的理论,莱文斯(Lewis B.)、艾里伯(Elbe Von)等人提出了燃烧反应动力学的链式反应机理,他们发展了19世纪玛拉德(Mallard)等提出的火焰传播概念,并提出了最小点火能量等基本概念,奠定了描述火焰的物理基础。后来,前苏联的谢苗诺夫、泽尔多维奇等人应用反应动力学和传热传质相互作用的观点,首先从定量关系上建立了着火及火焰传播的经典燃烧理论。从

实践中人们逐渐认识到,限制和控制燃烧过程的因素往往不是反应动力学因素,而是传热、传质等物理因素。20世纪50年代和60年代冯·克曼(Karman Von)首先提出用连续介质力学来研究燃烧基本现象,逐渐发展成反应流体力学。这一阶段虽然建立了化学流体力学基本方程组,但由于方程数目多、耦合和非线性,只有经过大量简化才可能求解。这使得人们无法将计算结果与实验对照来检验理论,因此也就难以区分这种解的误差是来源于基本理论还是来源于人为的假设,从而使燃烧学长期停留在分类综合实验现象和孤立地分析阶段。

计算机的出现和发展,促进了燃烧学与数值计算方法的结合。20世纪60年代后期,斯帕尔丁(Spalding D. B.)等人比较系统地把计算流体力学的方法用于燃烧研究,建立了燃烧的数学模型方法和数值计算方法。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 F. H.)建立了“湍流模型方法”,提出了一系列的湍流模型和湍流燃烧模型,发展了各具特色的数值计算方法和计算机程序体系。近30年来,英、美、法、德、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等方面均取得了较大的进展,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、核反应堆蒸气发生器和弹膛等系统中的三维、定常或非定常、均相或多相、湍流、有或没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,预测装置的性能。这一新领域的出现,极大地丰富了燃烧学的内容,并逐渐形成了计算燃烧学这一分支学科。另外,随着燃烧实验技术,特别是激光诊断技术的发展,使人们有可能用非接触法来测量燃烧过程的气体流速、温度分布场、组分质量分布场以及颗粒的运动速度、浓度和大小分布等。这些都为燃烧科学和理论的进一步发展奠定了良好的基础。

2. 燃烧模拟

(1) 模拟燃烧问题所需要的基础知识

燃烧科学涉及到许多学科,其中包括:热力学,化学动力学,流体力学,传热和传质学,湍流,物质结构和性质。

为了建立燃烧问题的理论公式并进行求解,需要数学知识和数值计算方法。

为了与试验数据进行对比,验证理论模型,需要设计燃烧研究用的试验装置,数据的测量和采集,数据分析和整理。

(2) 燃烧模拟的目的

- ① 模拟燃烧过程和发展在各种条件下计算燃烧性能的方法;
- ② 帮助解释和理解观察到的燃烧现象;
- ③ 代替困难的或昂贵的试验;
- ④ 指导燃烧实验的设计;
- ⑤ 通过参数研究,帮助确定各种不同参数对燃烧过程的影响。

(3) 燃烧模型的应用

- ① 动力工程,主要包括:发电厂中煤的燃烧,汽车、飞机、船舶中的液体燃料的燃烧,燃气轮机天然气等的燃烧,火箭发动机中固体和液体推进剂的燃烧。
- ② 在材料生产,如钢、玻璃、陶瓷、水泥、精炼燃料和炭黑中的应用。
- ③ 防火和安全。
- ④ 家庭和工业供热。

⑤ 燃烧对环境的影响,主要包括:污染物,如 NO_x 、 SO_x 、 CO 的生成;粒子的生成,如烟灰和结焦;控制排气成分和温度的方法。

(4) 燃烧模型的分类

燃烧问题可以根据它对时间和空间的依赖关系、反应物的初始混合状态、流动状态、反应物的相、发生反应的部位、反应速率、自然对流或强迫对流、流体的可压缩性以及燃烧波的传播速度等进行分类。见表 1。

燃烧状态	燃烧分类
与时间的关系	稳态反应和非稳态反应
与空间的关系	一维、二维和三维反应
初始反应物的混合状态	预混反应、非预混反应(扩散反应)
流动状态	层流、湍流
反应物的相态	单相反应、多相反应
反应部位	均相反应、非均相反应
反应速率	平衡化学反应(无限反应速率)、有限速率化学反应
对流状况	自然对流、强迫对流
可压缩性影响	不可压缩的、可压缩的
燃烧波的速度	缓燃(亚音速波)、爆震(超音速波)

(5) 典型理论模型的基本构成

图 1 给出了理论模型的几个组成部分以及各部分之间的关系。很显然,控制方程与模型中其他各个部分是密切关联的。根据问题的复杂程度,在模型各组成部分之间也可能有直接的关联。图 2 为建立模型的过程图。

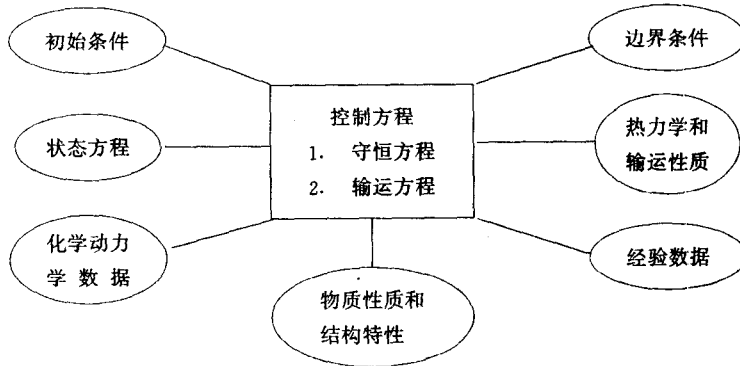


图 1 理论模型构成示意图

为了使模型能够用于预测,通常还需要输入一组数据和经验公式,这些必要的参数和信息有时很难得到。

(6) 燃烧模型的控制方程

① 守恒方程,其中包括质量守恒(连续方程),分子组分守恒(或原子组分守恒);动量守恒(对于每一个独立的空间方向各有一个方程),能量守恒,角动量守恒。

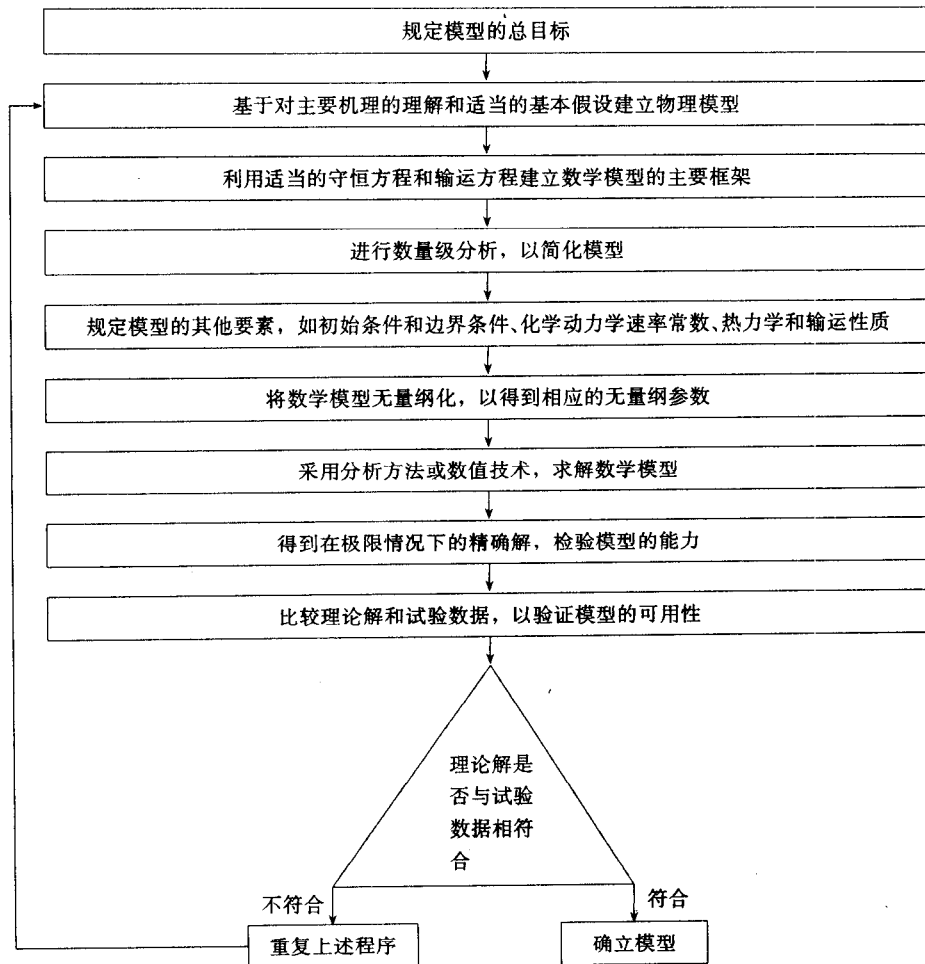


图2 建立理论模型的过程

② 输运方程通常为研究湍流燃烧问题所需要,典型的例子是:湍流动能的输运方程,湍流耗散速率的输运方程,湍流雷诺应力的输运方程,几率密度函数的输运方程,统计矩,如 $\overline{u''Y''}$, $\overline{T''^2}$, $\overline{Y''^2}$ 等的输运方程。

(7) 燃烧模型中所作的一些基本假设

- ① 参加反应的流体可以作为连续介质处理;
- ② 化学反应是无限快的;
- ③ 是简单、单步、正向的不可逆反应;
- ④ 服从理想气体定律;
- ⑤ 路易斯数、施密特数和普朗特数等于1;
- ⑥ 所有组分的扩散系数相同;
- ⑦ 费克质量扩散定律有效;
- ⑧ 气相组分的比热容为常数;
- ⑨ 发生化学反应的固体表面是均匀的;

- ⑩ 在低速燃烧情况下压力均匀;
- ⑪ 杜福效应和索雷特效应可以忽略;
- ⑫ 容变粘性系数很小,可以忽略;
- ⑬ 燃烧产生的湍流可以忽略。

应当指出,随着计算机的发展和数值方法的提高,有些假设现在已经可以取消。

建立理论模型的过程图已给出推导理论模型所遵循的一般步骤,此图容易理解,无需另加说明。

3. 目的方法

在众多的燃烧现象中,有的是人类所必须的,为人类的生活、生产、生存所必备的,主要是指通过燃烧来获得对人类有用的热能、光能和做功气体等。对于这类的燃烧过程,我们必须研究如何提高其燃烧效率,保证燃烧过程的稳定性和安全性,节约能源,并充分开发利用新能源等。另外还有许多是人类不希望的燃烧现象,如火灾,矿井瓦斯燃烧(爆炸),煤的自燃,工业燃烧过程的三废问题,火炸药物品的意外燃烧和爆炸等等。这又给我们提出了燃烧过程中所要解决的另一一些问题,即:如何防止抑制火灾及矿井瓦斯或具有粉尘工厂存在的爆炸危险性,减少有用燃烧过程中的工业污染问题。目前随着工业技术的飞速发展,世界性的能源短缺问题日趋严重,这也给燃烧科学提出了越来越多的新的课题。

燃烧科学的研究方法包括理论分析和实验研究,尽管目前计算机的出现为通过理论分析计算、预测解决燃烧过程的实际问题展现了广泛的前景,但是由于燃烧过程的复杂性和多样性,事实上,对于生产中提出的燃烧技术问题主要还只能通过实验来解决。最近燃烧学的实验研究取得了较大的进展,在实验燃烧学的基础上又发展了燃烧诊断学。燃烧理论分析的作用主要为各种燃烧过程的基本现象建立和提供一般性的物理概念,从物理本质上对各种影响因素做出定性分析,从而对实验研究和数据处理指出合理、正确方向。

燃烧过程的实质是一物理和化学的综合过程,按照化学反应和物理过程之间的关系,实际的燃烧现象大致可分为以下三种类型:

动力燃烧——也称动力火焰,它主要受燃烧过程中的化学动力因素所控制。如着火、爆炸、熄灭和猝灭均为该类型的燃烧实例。

扩散燃烧——也称扩散火焰,它主要受流动、扩散和物理混合等因素控制。如液体燃料滴、碳粒、蜡烛等的燃烧都是受扩散控制的燃烧。

预混燃烧——也称预混火焰,此时化学动力学因素及物理混和因素差不多起同等重要的作用。如汽油发动机、家用煤气炉以及使燃料和氧化剂预先混合后的燃烧均属此类。

不同类型的燃烧有着不同的燃烧规律和特点,因此就必须用不同的物理模型和数学模型来描述它。例如,在火箭技术领域,液体火箭推进剂的燃烧属于液雾扩散燃烧;固体推进剂中双基推进剂的燃烧接近于预混燃烧,因为它是负氧物质硝化棉(NC)及富氧物质硝化甘油(NG)的混合物;而对复合推进剂的燃烧则是扩散—预混燃烧共存的燃烧,混合炸药的燃烧也属于此类。

4. 内容体系

从学科角度看,燃烧学是一门包括化学动力学、热力学、反应流体力学、传热传质学以及数学等多种学科在内的综合边缘学科。燃烧学所研究的内容可分为两个方面:一方面是燃烧理论

的研究,主要研究燃烧过程所涉及的各种基本现象。如燃烧反应的化学动力学机理;点火和着火机理;火焰稳定传播的机理;熄火的机理以及催化燃烧机理等。另一方面是燃烧技术的研究,主要是应用燃烧基本理论解决工程技术中的各种实际燃烧问题。例如对现有燃烧方法进行改进;对新的燃烧方法和燃烧器进行探索;提高燃料利用率;节能途径和防止污染的研究;阻燃材料和垃圾焚烧的研究;新型燃烧催化剂的探索等。对于火药的燃烧,除上述燃烧共性问题外,还着重对火药燃烧性能的控制、改进和提高,为满足各种爆破器材需求的研究;各类火药的燃烧特性、物理模型和数学模型的研究;火药各组分的分解特性、燃烧特性及机理的研究;药剂阻燃机理和新型燃烧催化剂及催化机理的研究;燃烧转爆轰的条件和机理的研究等。

对于燃烧过程,从化学观点看是氧化剂和燃料的分子间进行激烈的快速化学反应,原来的分子结构被破坏,原子的外层电子重新组合,经过一系列中间产物的变化,最后生成最终燃烧产物。这一过程,物质总的热能是降低的,降低的能量大都以热和光的形式释放而形成火焰。从物理观点看燃烧过程总伴随物质的流动,按反应物的相态,分均相流和多相流;按流动状态,可分为层流和湍流。物质燃烧过程大都是多种物质的不均匀的物质场,因而伴随着不同物质间的混合、扩散和相变,由于多种反应热效应的不同,还产生着不均匀的温度场,形成温度梯度,因而还伴随着能量的传递。因此燃烧是一门物理和化学的综合高速变化过程。

一般工业生产和人类生活中燃烧常用的氧化剂是氧,而其燃料就有多种多样。如果以燃料存在的状态来区分的话,则有固体燃料、液体燃料和气体燃料。若按其来源来区分的话,则又有天然燃料和人工合成(或提炼)燃料,表 2 就是一些常用的工业和民用燃料。

表 2 常用的工业和民用燃料

燃 烧 状 态 \ 燃 料 来 源	天 然 燃 料	人 工 提 炼 燃 料
固 体	煤炭、木材、植物杆	木炭、焦炭等
液 体	石油	汽油、柴油、煤油、蜡等
气 体	天然气	煤气、液化石油气、乙炔等

此外还有一些特殊的燃料,即火炸药类,对于火炸药类特殊燃料的燃烧问题,可以说是燃烧科学的一个重要分支,它与燃烧学中发展得相当成熟的液滴燃烧和碳粒燃烧有着许多相似之处,但又有不同的特点,但就其基本理论,描述燃料的物理数学模型都是基本相同的。为此本书还专门为从事火炸药研究和应用的读者编写了关于爆炸物燃烧的内容。

火的使用已经有 50 万年的历史了,通常人们把燃烧的表现现象称为火。由于燃烧是一个包括热量传递、动量传递、质量传递和高速化学反应的综合物理化学过程,因此我们对燃烧的认识还很不完善。现在,通常把一切强烈放热的、伴随有光辐射的快速化学反应过程都称为燃烧。在有两种组分参加的燃烧反应中,把放出活泼氧原子(或类似的原子)的物质称为氧化剂,而被氧化剂氧化的另一类组分就称为燃料。如氧、双氧水、高锰酸钾等是氧化剂,氢、酒精、汽油、木炭、煤等是燃料。爆炸物的燃烧则是集氧化剂和燃料于一体的特殊物质的燃烧,其燃烧过程还伴随生成大量的气体和释放出大量的热。

爆炸物的燃烧、爆炸与爆轰都是一种猛烈的高速变化的物理和化学过程,在这些过程中都

包含着能量极迅速的释放、能量和物质的传递以及高速进行的化学反应,但彼此间又有着明显的区别。同一种物质在一定的条件下可以表现为燃烧,而在另一条件下则可表现为爆炸或爆轰。

爆炸物的燃烧,其特点是反应只在爆炸物的局部区域内进行。燃烧波的传播是化学反应区的能量通过热传导、辐射和对流及燃烧气态产物的扩散作用传给未反应的爆炸物的。燃烧波的传播速度相对较慢,一般在每秒几毫米至数百米之间。燃烧波的传播方向与燃烧气态产物移动方向相反。

爆炸现象是指一种物理或化学的能量极为迅速地释放过程,在此过程中,系统的内在势能转为机械功、光和热的辐射。爆炸大致可分为物理爆炸、化学爆炸和核子爆炸三类。爆炸物的爆炸是由于物质化学结构发生急剧变化而引起的爆炸现象,属于化学爆炸。爆炸与爆轰是属于同一范畴的概念。爆轰可分为稳定爆轰和不稳定爆轰,而传播速度不稳定的爆轰即称为爆炸。爆炸物的爆轰过程在开始阶段爆速是变化的,经过一段时间达最大值,然后稳定传播。爆轰是以爆轰波的形式沿爆炸物自行高速传播的。传播速度在每秒数千米至一万米,大于在爆炸物中的声速。并且爆轰的传播速度恒定,其中爆炸的传播速度在 1 km/s 左右,其爆速一般不稳定,但如低密度震源炸药等可通过改善约束条件达到爆速稳定。爆轰的传播机理是借助于冲击波对未反应的爆炸物强烈地冲击压缩作用。

本书对燃烧理论的发展作了较为详细的描述,并对燃烧、爆轰、火焰、点火、熄火和火焰传播等作了介绍,还对燃烧过程及药剂燃烧性能的要求作了介绍。全书共设9章,前面8章主要介绍燃烧过程的物理化学原理、着火理论,描述不同燃料燃烧的数学物理模型及其火焰结构的求解;最后一章专门为从事爆破器材研究及应用的工作者而编写了有关爆炸物燃烧的内容。就爆炸物的燃烧而言,它是燃烧科学中的一个重要分支,它与燃烧科学中已经发展得相当成熟的液滴燃烧和碳粒燃烧在很大程度上具有相似之处,其基本原理是相同的,但同时,又有自身的特点。

本课程的重点在于学习前人的研究思路和方法,掌握燃烧规律、经验和理论。对燃烧模型的学习,可重点通过研究火焰结构模型,学习建立燃烧物理模型及数学模型和理论,要注意每一种燃烧模型和理论自身的特定实验依据和为便于数学处理所作的假设。因此都有其特定的适用范围和指导实践的局限性。尽管如此,这些模型和理论,特别是为后人引证较多的模型和理论,对我们深入理解燃烧过程的实质,在一定范围帮助我们分析和解释有关燃烧现象,仍具有理论指导意义。要想掌握爆炸物燃烧的基本规律,首先必须学好燃烧的基础内容。

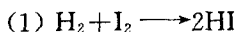
1 燃烧化学动力学及其化学平衡

燃烧过程是一物理和化学现象的综合过程,它是在一定条件下所进行的具有放热和发光现象的剧烈的氧化还原反应。对于任何化学反应,我们所要研究的问题是:① 已知物质的初始状态(反应物的成分、温度、压力等),求其最终状态;其间的各种热力学参数如何变化。② 趋近终态平衡时的反应速度如何。③ 按照什么样的反应机理;分子是如何相互作用而使反应传播下去的。对于第一个问题,在物理化学及工程热力学中都有详细的论述,这里不再赘述。对于第二和第三个问题,它们是相辅相成的,因为要使一个化学反应能由其初始的浓度、温度和压力等条件算出其反应速度就必定牵涉到第三个问题,必须仔细研究每一具体反应过程的实际反应步骤,弄清反应物和产物之间所有的中间过渡物质,即弄清反应历程,从而找出决定反应速度的关键所在,使主反应按我们所希望的方向进行,同时了解反应历程也可以帮助我们了解有关物质结构的知识。这些也就是本章所要研究的问题。

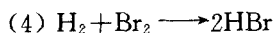
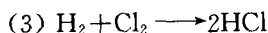
然而,迄今真正弄清楚反应历程的反应还为数不多,这方面的工作远远落后于实际。这是因为一方面由于反应历程涉及到分子、原子的化分和化合,是一个比较复杂的问题;另一方面是由于目前用于研究反应机理的实验技术还远远满足不了要求。例如有些反应中常常有自由电子和自由基参加,它们的性质很活泼,寿命极短,用一般的实验方法很难鉴定它们是否存在,也就很难弄清它们反应的真实历程。因此对一些未知反应历程的化学反应动力学方程式(反应速度表达式)一般只能从宏观上进行推导,有的只能通过经验和半经验方法求得。

1.1 简单化学反应

对于任何化学反应,按照反应历程的复杂程度可以分为简单反应和复杂反应两大类,但是无论是简单反应还是复杂反应,它们都是由基元反应组成的。基元反应是指反应物分子在碰撞中一步就直接转化为生成物分子的反应。只包含一个基元反应的化学反应叫简单化学反应,例如:



而对于由两个或两个以上的基元反应所组成的反应叫复杂反应,例如:



反应(3)和反应(4)在形式上虽然与反应(1)相同,但其历程却大不相同。目前人们普遍认为由 H_2 和 Cl_2 生成 HCl 的反应是按下面的历程进行的。

