



工业和信息化部“十二五”规划教材

燃 烧 学

(第3版)

严传俊 范 玮◎编著



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

燃 烧 学

(第 3 版)

严传俊 范 玮 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书主要内容分为燃烧学基础和应用两部分。基础部分包括热化学、化学动力学、一维燃烧波、多组分质量输运、理想反应气体混合物的守恒方程等内容;应用部分包括航空发动机、火箭发动机、超声速燃烧、内燃机中的燃烧等内容。

本书具有基础性、通用性和先进性,可作为动力工程及工程热物理、航空宇航推进理论与工程等专业燃烧课程高年级本科生和研究生的教材,也可供从事与燃烧有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧学/严传俊,范玮编著.—3版.—西安:西北工业大学出版社,2015.9
ISBN 978-7-5612-4593-4

I. ①燃… II. ①严…②范… III. ①燃烧学 IV. ①O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 214549 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:31

字 数:750 千字

版 次:2016 年 1 月第 3 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

第3版前言

新编教材是以适应国际化趋势,体现当代工业和信息化领域最新成就和教学内容课程体系改革成果,解决有关学科专业教学需要为目标的。修订版教材是对质量较高、在教学中反映较好、需要修订的已正式出版的教材进行修订后再次出版的教材。编写出版一批具有创新精神,体现我国工业和信息化领域最新教学水平和科技水平的教材、专著,初步形成国防特色明显,体现信息化和工业化深度融合、机械化与信息化复合发展,质量上乘、品种齐全、特点突出、实用性强的工业和信息化特色教材体系,这是促进工业和信息化特色学科专业教材建设工作走上科学化、规范化、制度化的轨道,更好地服务于国家新型工业化、信息化和国防现代化建设的需要。

本书第1版为原国防科学技术工业委员会“十五”规划教材,普通高等教育“十一五”国家规划教材。其编写大纲曾得到北京航空航天大学陈懋章院士,哈尔滨工业大学谈和平教授的审阅。经过连续10年国内多所高校相关专业本科生、研究生的使用,得到了学生、授课教师及同行的广泛认可,在业界产生了一定的影响。然而,由于距上一次修订已有7年,在使用过程中大家提出了许多宝贵的意见和建议,根据最新的动力工程和工程热物理以及飞行器动力工程专业本科生、航空宇航推进理论与工程专业研究生“燃烧学”教学大纲的要求,需要对原教材内容进行修订。

全书共有21章,在本次修订中,除第14,17,18,20章外,对其余各章都做了补充和修改,适当增加了一些例题。考虑到等离子体对燃烧过程的重要作用,将第19章改为“等离子体点火与助燃”。书中各部分内容可根据各专业的特点有选择性地教学,标有*的章节为选讲内容。修订后的教材内容力求反映航空、航天、动力工程及工程热物理领域燃烧学的最新研究成果,具有明显的国防特色,而且新版教材深度更适宜、分量更恰当、表述更准确,具有基础性、通用性和先进性,可作为本科生和研究生的动力工程及工程热物理、航空宇航推进理论与工程等专业“燃烧学”课程的教材,也可供从事与燃烧有关的工程技术人员参考。

本教材修订稿得到了西安交通大学黄佐华教授及空军工程大学何立明教授的审阅,非常感谢他们提出宝贵的意见和建议。

由于水平所限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2015年7月

第1版前言

本书系统简明地介绍了燃烧的基本现象、燃烧理论及基本实验结果,反映了国际燃烧界较为成熟的研究成果,可作为动力机械与工程热物理、航空宇航推进理论与工程等专业高年级本科生和研究生的燃烧学课程教材,也可供从事与燃烧有关的工程技术人员参考。在教材内容选取上充分吸收了国内现有的燃烧学课程教材中的精华,同时参考了国际著名大学如普林斯顿大学、斯坦福大学的《燃烧学》讲义,融入笔者多年从事燃烧学课程教学和科研方面的心得体会和研究成果。书中重点介绍了基本燃烧现象的物理化学本质,叙述近代高热容、高速度条件下的燃烧理论和燃烧技术,在数学处理上力求简明、易懂,尽量避免烦琐的数学公式推导。为了使读者更好地掌握其中内容,本书还配有典型例题及习题,使之成为连接燃烧理论与实际应用的桥梁,为读者从事与燃烧相关专业的研究工作奠定坚实的基础。教材力求具有基础性、通用性和先进性。

本书主要内容分为燃烧学基础部分和应用部分。基础部分包括热化学、一维燃烧波、化学动力学、多组分质量输运、理想反应气体混合物的守恒方程、预混层流火焰的传播和稳定、着火和熄火、预混湍流火焰、气相非预混火焰、高速气流中点火、火焰传播和稳定、液体燃料的扩散火焰、固体燃料燃烧、燃烧产生的污染及防治等。上述内容是各类与燃烧相关的专业的通用内容,也是本书的重点。应用部分覆盖了航空发动机、火箭发动机、内燃机中的燃烧、超声速燃烧、爆震燃烧、脉动燃烧、锅炉燃烧以及燃烧的先进诊断技术;简要地介绍以上燃烧装置中燃烧过程的特点,以及燃烧学基本理论是如何在这些燃烧装置中应用的,以提高学生应用工程方法处理复杂燃烧问题的能力。这部分内容可根据各专业特点来选用。

在编写过程中,博士生黄希桥、张群、郑龙席、邱华,硕士生王丁喜、王治武、李牧、杜魁善、丁永强、李强、熊姹等参加了本书部分内容的编写及例题、图表制作的工作,特表示感谢。

本书的大纲曾得到北京航空航天大学陈懋章院士,哈尔滨工业大学谈和平教授的审阅。他们的评审意见对教材内容的选取和编写十分重要。非常感谢本书评阅人对本书提出了宝贵的修改意见。本书的编写还得到了国内燃烧界一些同行的支持和鼓励。

非常感谢国防科学技术工业委员会对本书编写和出版给予的资助。

由于水平有限,书中可能有不足或错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005年2月

主要符号表

1. 物理量符号名称

α_T	热扩散系数	Pr	普朗特数
A	面积	Q	热量, 热效应
A_r	相对原子质量	q	加热量, 热流
$(A/F)_{st}$	空气-燃料化学恰当比	q_m	质量流量
c	比热容	q_v	体积流量
C_B	分子浓度	R_u	通用气体常数
C_d	阻力系数	R	气体常数
d	直径	r	半径, 径向坐标
D	扩散系数	Re	雷诺数
E_a	活化能	R_i	Richardson 数
e	内能	RR_i	反应速率
f	混合物分数	S	熵, 源项
G	吉布斯自由能, 产生项, 总质量流	Sc	施密特数
g	重力加速度, 浓度脉动均方值, 质量流	Sh	舍伍德数
g_i	临界速度梯度	SL	层流火焰传播速度
$\bar{g}_{i,T}^0$	标准状态压力下组分 i 的吉布斯自由能	ST	湍流火焰传播速度
H	滞止焓	T_{ad}	绝热火焰温度
H_{prod}	燃烧产物焓	V_m	摩尔体积
ΔH_R	标准反应焓或燃烧焓	v_D	爆震波速度
H_{react}	反应物焓	w	质量分数
h	焓	x	摩尔分数
$\bar{h}$	绝对焓	z	碰撞数
Δh	显焓	α	余气系数
J	扩散流	γ	比热比
k	湍流动能, 反应率系数, 玻耳兹曼常数, 反应速率常数	η	kolmogorov 微尺度
K	平衡常数	η_{comb}	燃烧效率
K'	拉伸率	λ	导热系数
l	湍流尺度, 长度	Λ	积分尺度
Le	路易斯数	μ	动力黏性系数
L_f	火焰长度	ν	运动黏性系数, 化学计量数
M_r	相对分子质量	ϵ	湍能耗散率
m	质量	Φ	当量比, 通用因变量
n	数密度脉动, 粒径分布指数, 反应级数	τ	剪切应力
N	颗粒数总通量, 颗粒数密度	τ_{chem}	化学反应时间
N_{AVO}	阿伏加德罗数	τ_{ignit}	点火滞后时间
Nu	努塞尔数	τ_{res}	停留时间
p	压力, 概率密度分布函数	σ	分子有效直径

2. 常用的上、下标及其他有关符号名称

0	标准态	l	液体
a	空气	mix	混合物
b	已燃, 逆向	n	法向
c	原煤, 反应	O ₂	氧气
chem	反应	p	颗粒, 一次
diff	扩散	r	辐射
dil	冲淡剂	s	组分, 二次, 显焓
eff	有效, 出口	T	湍流
f	燃料, 生成焓	u	未燃
g	气体	v	挥发分
h	异相	w	水分, 壁面
in	初始, 进口	∞	来流
i, j, k	坐标方向		

3. 单位说明*

$$1 \text{ atm} = 1.013\,25 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$$

* 由于本书的资料来源广泛, 有部分单位未使用法定计量单位。为了保持原始资料数据的准确性, 在书中保留了原计量单位。在此特别给出书中所使用的非法定计量单位与法定计量单位的换算关系, 以便读者参考。

目 录

绪论	1
0.1 燃烧现象	1
0.2 燃烧的重要性	3
0.3 燃烧学发展简史	4
0.4 内容要点	5
参考文献	5
第 1 章 燃烧热力学	6
1.1 定义及概念	6
1.2 用于反应系统的热力学第一定律	10
1.3 热力学第二定律在反应系统中的应用	14
习题	22
参考文献	23
第 2 章 化学动力学	24
2.1 化学反应速率	24
2.2 具有简单级数的反应	33
2.3 几种典型的复杂反应	35
2.4 多步基元反应	39
2.5 链反应	47
2.6 反应速率理论	53
2.7 化学反应机理	61
习题	71
参考文献	73
第 3 章 一维燃烧波*	74
3.1 一维燃烧波分析	74
3.2 爆震波的特征	78
3.3 爆震波的结构	85
3.4 爆震波的形成	87
3.5 爆震极限	87
习题	88

参考文献	88
第 4 章 燃烧中的输运现象	89
4.1 定义	89
4.2 分子输运基本定律	90
4.3 输运系数的初步分析	92
习题	97
参考文献	97
第 5 章 多组分反应流体守恒方程	98
5.1 多组分反应流体一维流动的守恒方程	98
5.2 多组分反应流体一维流动守恒方程通用形式	104
5.3 多组分反应流体中的相似准则	105
5.4 分界面上的边界条件和斯蒂芬流	106
习题	111
参考文献	111
第 6 章 层流预混火焰传播	112
6.1 火焰速度和火焰结构	112
6.2 一维层流预混火焰模型	113
6.3 燃料-氧化剂混合物层流火焰传播数据	118
6.4 火焰厚度	123
6.5 层流预混火焰传播详细分析*	125
6.6 层流预混火焰的稳定传播模型	127
6.7 层流预混火焰对拉伸的响应*	132
习题	137
参考文献	137
第 7 章 着火、可燃性和熄火	138
7.1 着火与熄火的基本概念	138
7.2 可燃极限	139
7.3 最小点火能量与淬熄距离	144
7.4 着火机理和模型	146
7.5 熄火现象	159
习题	162
参考文献	162

第 8 章 湍流预混火焰	163
8.1 湍流预混火焰结构的一些现象观察	163
8.2 湍流的一些基本概念	166
8.3 湍流预混火焰的传播模式	168
8.4 湍流预混火焰模型——小火焰模式域*	171
8.5 湍流预混火焰的稳定	173
8.6 良搅拌反应器:零维湍流预混火焰模型	176
习题	181
参考文献	181
第 9 章 非预混火焰	182
9.1 层流自由射流火焰结构	182
9.2 层流自由射流火焰模型	184
9.3 受限层流扩散火焰结构	193
9.4 受限层流扩散火焰模型	194
9.5 湍流扩散火焰	198
习题	209
参考文献	210
第 10 章 液体燃料的蒸发与燃烧	211
10.1 液体油雾火焰的结构	211
10.2 单个油珠蒸发模型	211
10.3 蒸发油滴模型向单个燃烧油滴模型的扩展	215
10.4 油滴的相互作用*	226
习题	227
参考文献	227
第 11 章 固体燃料的燃烧*	228
11.1 概述	228
11.2 燃煤的燃烧器	228
11.3 非均相反应	229
11.4 碳的燃烧	229
11.5 煤的燃烧	243
11.6 其他固体燃料的燃烧	244
习题	244
参考文献	245

第 12 章 燃烧产生的污染与防治*	246
12.1 燃烧产生的大气污染	246
12.2 排放的定量描述	246
12.3 氮的氧化物的形成及其防治	248
12.4 一氧化碳的形成及其防治	252
12.5 未燃碳氢化合物的形成与防治	253
12.6 碳烟形成机理与防治	254
习题	256
参考文献	256
第 13 章 航空发动机中的燃烧*	257
13.1 航空发动机主燃烧室	257
13.2 航空发动机主燃烧室燃烧过程组织	269
13.3 航空发动机加力燃烧室	297
习题	308
参考文献	308
第 14 章 火箭发动机中的燃烧*	309
14.1 概述	309
14.2 液体火箭发动机中的燃烧	311
14.3 各类固体推进剂的燃烧	314
14.4 侵蚀燃烧和振荡燃烧	320
习题	322
参考文献	322
第 15 章 超声速燃烧*	323
15.1 超声速燃烧产生的背景	323
15.2 超声速燃烧的基本原理	324
15.3 超声速冲压发动机燃烧的特点	328
习题	329
参考文献	330
第 16 章 爆震燃烧*	331
16.1 爆震燃烧的基本原理	331
16.2 脉冲爆震燃烧关键技术	344
16.3 脉冲爆震燃烧的应用	346

习题	350
参考文献	350
第 17 章 脉动燃烧*	352
17.1 脉动燃烧基本原理	352
17.2 脉动燃烧的特点及其应用	357
习题	358
参考文献	358
第 18 章 内燃机中的燃烧*	359
18.1 概述	359
18.2 柴油机的喷雾燃烧过程	365
18.3 汽油机的燃烧	367
18.4 内燃机的燃烧模型概述	369
18.5 内燃机的代用燃料	373
习题	375
参考文献	375
第 19 章 等离子体点火与助燃	376
19.1 研究意义及概念	376
19.2 等离子体点火与助燃的基本原理	378
19.3 等离子体化学	381
19.4 等离子体点火	385
19.5 等离子体助燃	386
习题	388
参考文献	389
第 20 章 燃烧诊断技术	390
20.1 燃烧流场的速度诊断	390
20.2 燃烧流场的密度诊断	393
20.3 燃烧产物的组分和浓度诊断	394
20.4 燃烧流场的温度诊断	398
20.5 压力测量	401
20.6 颗粒尺寸的测量	401
20.7 燃烧流场参数的其他诊断技术	403
习题	410
参考文献	410

第 21 章 燃烧过程数值模拟	411
21.1 燃烧过程数值模拟的目的和意义	411
21.2 燃烧过程数值模拟的分类	411
21.3 燃烧过程数值模拟方法	413
21.4 燃烧过程数值模拟软件	414
习题	417
参考文献	417
附录	418
附录 A C—H—O—N 系统热力学性质	418
附录 B 燃料性质	438
附录 C 空气、氮气和氧气的常用性质	442
附录 D 双分子扩散系数及其估算方法	444
附录 E 一些物质的物性参数	446
附录 F 多组分输运特性	453
附录 G 多组分反应流体守恒方程推导	466
附录 H 某些碳氢燃料总包和准总包的化学反应机理	475
附录 I 碳氢燃料与空气燃烧产物平衡成分计算机程序说明	477
参考文献	481

绪 论

0.1 燃 烧 现 象

一般将剧烈放热和发光的快速化学反应过程称为燃烧。这里的化学反应通常是指燃料的氧化反应或类氧化反应,如氟化、氮化、氯化反应等。燃烧常伴随火焰。燃烧有许多形式,如果按化学反应传播的特性和方式,可以分为强烈热分解、缓燃和爆震等形式。

强烈热分解的特点是化学反应在整个物质内部展开,反应速度与环境温度有关,温度升高,反应速度加快。当环境温度很高时,就会立刻爆炸。

缓燃和爆震与强烈热分解不同,化学反应不是在整个物质内部展开,而是从某个局部开始,并以燃烧波的形式按一定速度一层一层地自行传播的。化学反应波阵面很薄,化学反应就是在很薄的波阵面内进行并完成的。

缓燃,亦即通常所说的燃烧,其产生的能量通过热传导、热扩散及热辐射作用传入未燃混合物,逐层加热、逐层燃烧,从而实现缓燃波的传播。缓燃波通常称为火焰面,它的传播速度较低,一般为每秒几米到十几米。目前,大部分燃烧系统均采用缓燃波。

爆震波的传播是通过冲击波对可爆震混合物一层层强烈冲击产生的压缩作用使其发生高速化学反应来实现的。爆震波的传播速度远远大于缓燃波的传播速度,它是一种超声速燃烧波。由于爆震威力大,有巨大的破坏作用,所以在内燃机和工业生产中,力求防止爆震波的产生。由于爆震速度快、能增压,所以它有可能用于能源、动力、化工、加工工业等领域。爆震波只是爆炸的一种形式。有些爆炸不一定需要有燃烧波穿过可燃介质,如强烈热分解。

在自然界和工程中,燃烧现象的表现形式是十分丰富多样的。

燃烧按是否有火焰而分为有火焰和无火焰两种燃烧方式。以火花点火发动机为例,燃烧从火花点火开始,薄的反应区通常称为火焰在未燃燃料和空气混合物中传播,火焰面后是燃烧产物。一定条件下,在未燃可燃混合气的许多点同时发生化学反应,从而在燃烧室整个容积内迅速燃烧,这种燃烧室容积释热的现象称为自动点火,它没有薄的火焰面。

燃烧过程中,燃料和氧化剂(典型的为空气)混合燃烧。燃烧可以根据燃料和氧化剂是否预先混合来分类,如果燃料和氧化剂先混合后燃烧,称为预混燃烧;如果燃烧和混合是同时进行的,则称为非预混燃烧或非预混火焰。

以上每一种燃烧类型还可根据流体流动是层流还是湍流来进一步分类。表 0.1 给出了每一种燃烧类型的典型例子,现在对其进行讨论。

表 0.1 火焰基本类型及其应用实例

燃料-氧化剂混合	流体运动	应用实例
预混	层流	平面火焰, 本生灯火焰
	湍流	火花点火汽油机, 低 NO 固定燃气轮机
非预混	层流	木材火焰, 辐射加热炉, 蜡烛
	湍流	煤粉燃烧, 航空燃气轮机, 柴油机, 氢-氧火箭发动机

(1)层流预混火焰。在层流预混火焰中,燃料与氧化剂在燃烧前预先混合,且流动是层流。例如,层流平面火焰和在贫油条件下的本生灯火焰(见图 0.1),图中 Φ 表示当量比。

预混层流平面火焰向未燃混合物传播可以用层流燃烧速度 S_L (单位 m/s) 来表示,在有些文献中,将层流燃烧速度称为层流火焰速度。燃烧速度只取决于混合物的组分、压力和初始温度,这个问题将在第 6 章详细论述。

如果层流平面火焰的燃烧速度 v_L 小于未燃混气的气流速度 v_u (见图 0.1),火焰就会被吹灭。因此,对于平面火焰必须满足不等式 $v_L > v_u$ 。在火焰被吹灭之前,

$v_L \approx v_u$,因而,火焰吹灭前的进口气流速度是层流燃烧速度的量度。当平面火焰与流动方向有一角度 θ 时,进口速度可以更高一些。如图 0.1 所示,根据火焰稳定条件,火焰速度应等于气流在火焰面法向的分速度,有以下关系式

$$v_L = v_u \sin\theta$$

那么,根据所测的角度和进口气流速度就可以求出层流燃烧速度。

(2)湍流预混火焰。如表 0.1 所示,一些其他预混火焰的实例包括火花点火发动机(Otto 发动机),其中的流动是湍流的。在这种情况下,预混火焰前锋燃烧并向湍流区传播。如果湍流强度不太大,就会形成扭曲的层流预混火焰前锋。湍流火焰可以看作由许多预混层流火焰系统的平均。这就是第 8 章要详细论述的所谓的小火焰。

预混燃烧的优点是可以控制燃烧。通过在贫燃料状态下预混,可以避免高温,同时燃烧会产生很少量的空气污染物,如一氧化氮(NO)。此外,在贫燃料状态下排出的烟灰也非常少,因为烟灰大多是富燃料燃烧的产物。

尽管预混燃烧有以上这些优点,但是它的应用并不广泛,因为大量的预混反应物有可能偶然聚集在一起,产生无法控制的爆炸燃烧。

(3)层流非预混火焰。层流非预混火焰亦称为层流扩散火焰,燃料和氧化剂在燃烧过程中混合,而且流动是层流的。表 0.1 所示的例子是蜡烛的燃烧。图 0.2 给出了两个很重要的火焰模式:逆流非预混层流火焰和顺流非预混层流火焰。

非预混火焰比预混火焰的化学性质更复杂,因为燃料当量比的变化范围从 0(空气) $\rightarrow\infty$

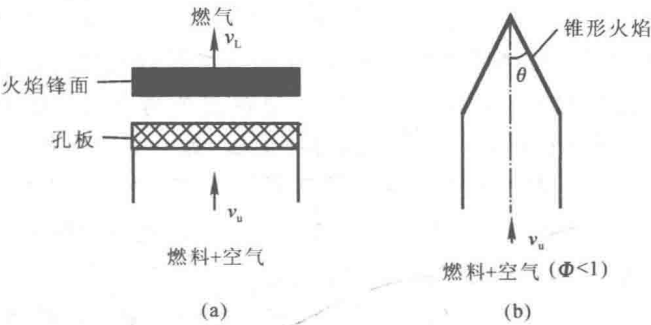


图 0.1 层流预混火焰示意图
(a)层流平面火焰; (b)本生灯火焰

(纯燃料)。在燃料一边是富燃料燃烧,在空气一边是贫燃料燃烧。火焰锋面(通常以强的发光面表征)位于燃料-氧化剂化学恰当比附近,后面将会证明这就是温度最高的地方。与预混火焰不同,非预混火焰不能传播,所以它不能用层流火焰速度来表示。

(4)湍流非预混火焰。在这种情况下,非预混火焰在湍流场内燃烧,当湍流强度较

小时,可以应用所谓的小火焰概念。由于上面提及的安全问题,所以在工业炉和燃烧器中主要用的就是非预混火焰。非预混火焰会发出黄色的光,这是因为在非预混火焰的富燃料区进行的是富燃料反应,这样会形成许多烟灰颗粒,从而形成黄色火焰。

(5)预混-非预混复合层流火焰。家用煤气灶采用的就是这种类型的火焰。燃料与空气预混稍微偏富一点(当量比 $\Phi=1.4$),这样就不会产生烟雾。而这种富燃料火焰的产物再与周围的空气进行非预混燃烧。在实际应用中,有数百万个这种类型的燃烧器,占了天然气消耗总量的 30%。

燃烧过程与燃料是否是气体燃料、液体燃料或固体燃料有紧密联系。气体燃料燃烧过程相对比较简单。对于液体燃料,在燃烧前需要将液体燃料雾化、蒸发、混合。至于固体燃料,以煤为例,燃烧过程由预热、干燥、挥发分析出、焦炭生成、挥发分燃烧与焦炭燃烧等一系列阶段构成,是复杂的多相燃烧。

对于非预混燃烧,当化学反应时间远大于混合时间时,燃烧过程受化学动力学控制,称为动力学燃烧;当混合时间远大于化学反应时间时,燃烧过程受扩散控制,称为扩散燃烧。当化学反应时间与混合时间相当时,燃烧过程同时受扩散和动力学控制。

由此可见,燃烧现象是流动、传热、传质和化学反应同时发生又相互作用的复杂的物理、化学现象。

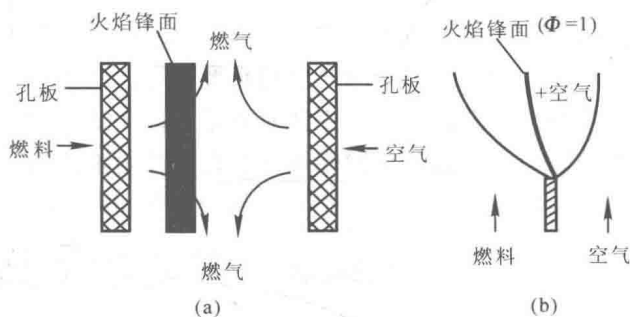


图 0.2 层流非预混火焰示意图

(a)逆流非预混层流火焰; (b)顺流非预混层流火焰

0.2 燃烧的重要性

燃烧是人类最古老的技术,在 100 多万年前人们就已经利用燃烧技术了。今天,大约 90% 的世界能量供应都是由燃烧生成的。燃烧在工程中的应用十分广泛。在动力生产方面,人类所需的动力生产几乎都涉及固体、液体或气体燃料的燃烧,如电站锅炉、各种交通工具(如汽车、飞机、船舶)发动机的燃料燃烧。虽然核能将逐渐成为工业国家的一种重要的能源,太阳能、风能和潮汐能正在被人们积极开发利用。但是,在今后一个相当长的时间里,燃料燃烧仍然是动力生产的主要来源。在工业方面,例如钢、铁、有色金属、玻璃、陶瓷和水泥等工程材料的生产过程,石油炼制、化肥生产、炼焦生产等加工过程中都伴有燃烧现象。在许多地方的住

宅、工厂、办公室、医院及其他建筑物均需要采暖。多数情况下,优先的热源仍是燃料的燃烧。在环境保护方面,更直接的威胁是燃料燃烧直接引起的大气污染,如何精心地控制燃烧过程减少污染,已成为近年来燃烧学研究的重要课题。还有火灾也会给人们带来巨大的灾难。由此可见,燃烧与国民经济和人民生活有着紧密的关系。现代工业技术和国防的高度发展和环境保护、火灾防治的严格要求对燃烧学和燃烧技术都提出了新的挑战。

0.3 燃烧学发展简史

人类对火及燃烧现象的实践经验至今最少也有 50 万年的历史。50 万年前,北京人就开始用火。钻木取火是人类在生产实践中发明的。火是人类最初支配的自然力,并逐渐成为人类改造自然的强大手段。人类经历了制陶时期(新石器时代,距今 10000 年)、青铜时期(公元前 2000 年),直到铁器登上历史舞台,这里每一步都与火有着密切的关系。在汉代(公元前 200 年),已开始用煤;魏晋时期(公元 300 年),已用煤冶铁;1800 年前,已有使用石油的记载;1000 多年前,发明了火药。在欧洲,自十字军东征以来,工业有很大发展,在冶铁、炼焦、烧石灰、制陶、制玻璃及酒精等工业中都广泛使用火。17 世纪以后,工业的发展,特别是冶金和化工工业的发展,使得火的使用范围和规模扩大了,人们更加迫切地想要弄清楚火及燃烧现象的本质。直到 18 世纪中叶,俄国科学家罗蒙诺索夫(М. В. Ломоносов)和法国化学家拉瓦锡(A. L. Lavoisier)提出了可燃物质氧化的学说才真正揭开了火的秘密。19 世纪,由于热力学与热化学的发展,把燃烧过程作为热力学平衡体系,研究了燃烧反应热、绝热火焰温度、燃烧产物平衡成分等概念和计算方法,建立了燃烧热力学。20 世纪初,美国化学家路易斯(B. Lewis)和俄国科学家谢苗诺夫(Н. Н. Семёнов)等人研究了燃烧化学反应动力学机理,发展了燃烧反应动力学的链式机理。20 世纪初到 30 年代,开始建立研究燃烧动态过程的理论,提出了火焰物理的一些基本概念,例如最小点火能、火焰传播等概念。从 20 世纪 30 年代到 50 年代,逐步从反应动力学和传热、传质相互作用的观点建立了着火、火焰传播和湍流燃烧的规律。人们逐渐认识到,限制和控制燃烧过程的因素往往不只是反应动力学因素,而且还有流体流动、传热、传质等物理因素。20 世纪 50 年代到 60 年代,冯·卡门(Von Karman)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。现代先进激光诊断技术的出现,改进了燃烧试验方法,提高了测试精度,为深入研究燃烧现象及其规律提供了重要手段和精确可靠的试验数据。随着大型计算机的发展,20 世纪 70 年代初,英国的斯帕尔汀(Spalding)等人较为系统地把计算流体力学方法用于燃烧的研究,建立了燃烧的物理模型和数值计算方法,用它可以定量地预测燃烧过程和燃烧设备的性能。从此,燃烧学的研究进入从定性到定量、从宏观到微观的新阶段。在 20 世纪 80 年代到 21 世纪,在发动机低温清洁燃烧技术,极端条件燃烧机理和现象,替代燃料和混合燃料模型,多尺度燃烧过程中化学反应和火焰动力学机理,高压燃烧反应动力学,等离子体点火与助燃,基础燃烧的实验方法及先进的测量技术等方面,取得了重要的进展。