

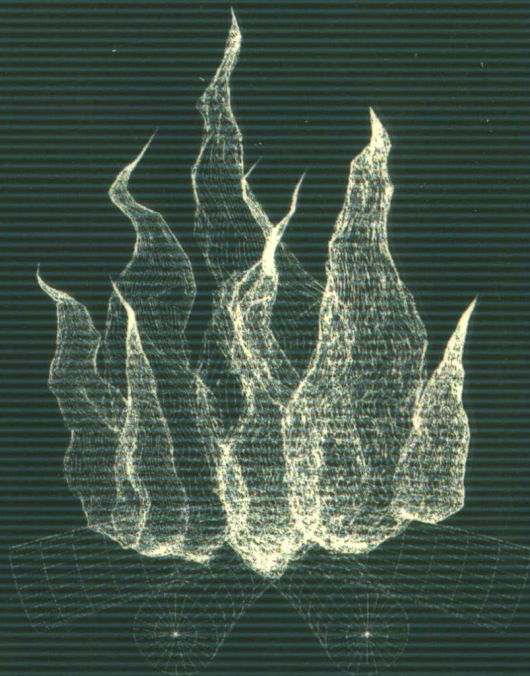
动力机械及工程热物理



国防科工委「十五」规划  
教材

# 燃烧学

● 严传俊 范玮 编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·动力机械及工程热物理

# 燃 烧 学

严传俊 范 玮 编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书内容包括燃烧学基础部分和应用部分。基础部分涵盖了燃烧热化学、化学动力学、燃烧与火焰的基本现象和规律。应用部分简要地介绍了航空发动机、火箭发动机、内燃机、锅炉中的燃烧、超声速燃烧、爆震燃烧、脉动燃烧以及燃烧和先进诊断技术。为了使读者掌握书中内容,本书配有典型例题及习题。

本书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教材,也可以作为从事与燃烧学有关的工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

燃烧学/严传俊,范玮编著. —西安:西北工业大学出版社,2005.8

国防科工委“十五”规划教材. 动力机械及工程热物理

ISBN 7-5612-1962-8

I. 燃… II. ①严… ②范… III. 燃烧学—高等学校—教材 IV. TP0643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 077377 号

## 燃 烧 学

严传俊 范 玮 编著

责任编辑 刘 晖 雷 军

责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

发行部电话:029-88493844,88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:27.875 字数:588 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-1962-8 定价:38.00 元

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯  
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春  
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禛  
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章  
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山  
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 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,融入作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,尽量避免繁琐的数学公式推导。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,使之成为连结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;简要地介绍了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、熊蛇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。本书的编写还得到国内燃烧界一些同行的支持和鼓励。

非常感谢国防科工委对本书编写和出版给予的资助。

由于编者水平有限,书中可能有不少不足或错误之处,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

$A$	面积	$M_r$	相对分子质量
$(A/F)_{st}$	空气-燃烧化学恰当比	$m$	质量
$C$	比热	$q_m$	质量流量
$C_d$	阻力系数	$q_v$	体积流量
$d$	直径	$n$	数密度脉动, 粗径分布指数, 反应级数
$D$	扩散系数	$N$	颗粒数总通量, 颗粒数密度
$D_T$	热扩散系数	$Nu$	Nusselt 数
$E$	活化能	$p$	压力, 概率密度分布函数
$e$	内能	$Pr$	Prandtl 数
$f$	混合物分数	$Q$	热量, 热效应
$G$	吉布斯自由能, 产生项, 总质量流	$q$	加热量, 热流
$g$	重力加速度, 浓度脉动均方值, 质量流	$R_u$	通用气体常数
$g_t$	临界速度梯度	$R$	摩尔气体常数
$\bar{g}_i^{\ominus T}$	标准状态压力下组分 $i$ 的吉布斯自由能	$r$	半径, 径向坐标
$H$	滞止焓	$Re$	雷诺数
$h$	焓	$R_f$	Richardson 数
$\bar{h}$	绝对焓	$RR_i$	反应速率
$\Delta h$	显焓	$S$	熵, 源项
$\Delta h_R$	标准反应焓或燃烧焓	$Sc$	Schmidt 数
$H_{prod}$	燃烧产物焓	$Sh$	Sherwood 数
$H_{react}$	反应特焓 $J$ 扩散流	$S_L$	层流火焰传播速度
$k$	湍流动能, 反应率系数, 拉伸率	$S_T$	湍流火焰传播速度
$k'$	反应速率常数	$T_{ad}$	绝热火焰温度
$K$	平衡常数	$v_D$	爆震波速度
$K'$	拉伸率	$w$	质量分数
$l$	湍流尺度, 长度	$x$	摩尔分数
$Le$	路易斯数	$z$	碰撞数
$L_f$	火焰长度	$\alpha$	余气系数

$\gamma$	比热比
$\eta$	kolmogorov 微尺度
$\eta_{\text{comb}}$	燃烧效率
$\lambda$	导热系数
$\Delta$	积分尺度
$\mu$	动力黏性系数
$\nu$	运动黏性系数, 化学计量数

$\epsilon$	湍能耗散率
$\phi$	当量比, 通用因变量
$\tau$	剪切应力
$\tau_{\text{chem}}$	化学反应时间
$\tau_{\text{ignition}}$	点火滞后时间
$\tau_{\text{res}}$	停留时间
$\sigma$	分子有效直径

## 2. 常用的上、下标及其他有关符号名称

a	空气
b	已燃, 逆向
c	原煤, 反应
chem	反应
diff	扩散
dil	冲淡剂
eff	有效, 出口
f	燃料
g	气体
h	异相
in	初始, 进口
$i, j, k$	坐标方向

l	液体
mix	混合物
n	法向
O	氧气
p	颗粒, 一次
r	辐射
s	组分, 二次
T	湍流
u	未燃
v	挥发分
w	水分, 壁面
$\infty$	来流

## 3. 单位说明<sup>\*</sup>

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

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

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

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

\* 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, 我们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

0.1 燃烧现象 .....	1
0.2 燃烧的重要性 .....	4
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

1.1 定义及概念 .....	7
1.2 用于反应系统的热力学第一定律 .....	11
1.3 热力学第二定律在反应系统中的应用 .....	15
习题 .....	29
参考文献 .....	29

## 第 2 章 一维燃烧波

2.1 一维燃烧波分析 .....	30
2.2 爆震波的特征 .....	34
2.3 爆震波结构 .....	43
2.4 爆震波的形成 .....	45
2.5 爆震极限 .....	46
习题 .....	47
参考文献 .....	47

## 第 3 章 化学动力学

3.1 化学反应速率 .....	48
3.2 基元反应的反应速率常数 .....	55
3.3 总反应的反应速率常数 .....	60
3.4 动力学近似 .....	61
3.5 反应机理 .....	65
3.6 典型氧化反应机理 .....	70
3.7 局部平衡在 $\text{CO} - \text{H}_2 - \text{O}_2$ 反应中的应用 .....	76
思考题 .....	79
习题 .....	79
参考文献 .....	81



<b>第 4 章 燃烧中的输运现象</b>	
4.1 定义 .....	82
4.2 分子输运基本定律 .....	83
习题 .....	85
参考文献 .....	85
<b>第 5 章 多组分反应流体守恒方程</b>	
5.1 多组分反应流体一维流动的守恒方程 .....	86
5.2 多组分反应流体一维流动的守恒方程通用形式 .....	93
习题 .....	94
参考文献 .....	94
<b>第 6 章 层流预混火焰传播</b>	
6.1 火焰速度和火焰结构 .....	95
6.2 一维层流预混火焰模型 .....	97
6.3 燃料-氧化剂混合物层流火焰传播数据 .....	102
6.4 火焰厚度 .....	108
6.5 层流预混火焰传播详细分析 .....	110
6.6 层流预混火焰的稳定传播模型 .....	112
6.7 层流预混火焰对拉伸的响应 .....	118
习题 .....	123
参考文献 .....	123
<b>第 7 章 点火、可燃性和熄火</b>	
7.1 定义 .....	124
7.2 可燃极限 .....	124
7.3 最小点火能量与淬熄距离 .....	131
7.4 点火机理和模型 .....	133
习题 .....	142
参考文献 .....	142
<b>第 8 章 湍流预混火焰</b>	
8.1 湍流预混火焰结构的一些观察现象 .....	143
8.2 湍流的一些基本概念 .....	146
8.3 湍流预混火焰的传播图域 .....	149
8.4 湍流预混火焰模型——小火焰模式域 .....	150
8.5 湍流预混火焰的稳定 .....	151
8.6 良搅拌反应器:零维湍流预混火焰模型 .....	155
习题 .....	160
参考文献 .....	161



## 第 9 章 非预混火焰

9.1 层流扩散火焰结构 .....	162
9.2 层流扩散火焰模型 .....	163
9.3 湍流扩散火焰 .....	168
习题 .....	172
参考文献 .....	173

## 第 10 章 液体燃料的蒸发与燃烧

10.1 液体油雾火焰的结构 .....	174
10.2 单个油珠蒸发模型 .....	175
10.3 蒸发油滴模型向单个燃烧油滴模型的扩展 .....	180
10.4 油滴的相互作用 .....	192
习题 .....	193
参考文献 .....	193

## 第 11 章 固体燃料的燃烧

11.1 概述 .....	194
11.2 烧煤的燃烧器 .....	194
11.3 非均相反应 .....	194
11.4 碳的燃烧 .....	195
11.5 煤的燃烧 .....	211
11.6 其他固体燃料的燃烧 .....	212
习题 .....	212
参考文献 .....	213

## 第 12 章 燃燃产生的污染与防治

12.1 燃烧产生的大气污染 .....	214
12.2 氮的氧化物的形成及其防治 .....	214
12.3 一氧化碳的形成及其防治 .....	219
12.4 未燃碳氢化合物的形成与防治 .....	220
12.5 碳烟形成机理与防治 .....	221
习题 .....	223
参考文献 .....	223

## 第 13 章 航空发动机中的燃烧

13.1 航空发动机主燃烧室 .....	224
13.2 航空发动机的加力燃烧室 .....	236
习题 .....	249
参考文献 .....	249

## 第 14 章 火箭发动机中的燃烧

14.1 概述 .....	250
---------------	-----



14.2	液体火箭发动机中的燃烧 .....	252
14.3	各类固体推进剂的燃烧 .....	255
14.4	侵蚀燃烧和振荡燃烧 .....	263
	习题 .....	265
	参考文献 .....	265
<b>第 15 章 超声速燃烧</b>		
15.1	超声速燃烧出现的背景 .....	266
15.2	超声速燃烧的基本原理 .....	267
	习题 .....	270
	参考文献 .....	270
<b>第 16 章 脉冲爆震燃烧</b>		
16.1	脉冲爆震燃烧的基本原理 .....	271
16.2	脉冲爆震燃烧技术关键 .....	282
16.3	脉冲爆震燃烧的应用 .....	285
	习题 .....	290
	参考文献 .....	290
<b>第 17 章 脉动燃烧</b>		
17.1	脉动燃烧基本原理 .....	291
17.2	脉动燃烧的特点及其应用 .....	297
	习题 .....	298
	参考文献 .....	298
<b>第 18 章 内燃机中的燃烧</b>		
18.1	概述 .....	299
18.2	柴油机的喷雾燃烧过程 .....	306
18.3	汽油机的燃烧 .....	308
18.4	内燃机的燃烧模型概述 .....	310
18.5	内燃机的代用燃料 .....	315
	习题 .....	317
	参考文献 .....	318
<b>第 19 章 锅炉中的燃烧</b>		
19.1	概述 .....	319
19.2	锅炉的燃烧过程 .....	321
	习题 .....	323
	参考文献 .....	323
<b>第 20 章 燃烧诊断技术</b>		
20.1	燃烧流场的速度诊断 .....	324
20.2	燃烧流场的密度诊断 .....	328



20.3	燃烧产物的组分和浓度诊断 .....	329
20.4	燃烧流场的温度诊断 .....	333
20.5	压力测量 .....	336
20.6	颗粒尺寸的测量 .....	336
20.7	燃烧流场参数的其他诊断技术 .....	339
	习题 .....	347
	参考文献 .....	348
<b>第 21 章 燃烧过程数值模拟</b>		
21.1	燃烧过程数值模拟的目的和意义 .....	349
21.2	燃烧过程数值模拟的分类 .....	349
21.3	燃烧过程数值模拟方法 .....	351
21.4	燃烧过程数值模拟软件 .....	352
	习题 .....	354
	参考文献 .....	355
附录 A	C-H-O-N 系统热力学性质 .....	356
附录 B	燃料性质 .....	381
附录 C	空气、氮气和氧气的常用性质 .....	385
附录 D	双分子扩散系数及其估算方法 .....	387
附录 E	一些物质的物性参数 .....	391
附录 F	多组分输运特性 .....	401
附录 G	多组分反应流体守恒方程推导 .....	414
附录 H	某些碳氢燃料总的化学反应和准总的化学反应机理 .....	426
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 .....	429



# 绪 论

## 0.1 燃烧现象

一般将强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。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空气混合物中传播。火焰面后是燃烧产物。在一定条件下,在未燃可燃混合气的许多点同时发生化学反应,导致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火焰;如果燃烧和混合是同时发生的,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一些例子,下面将对其进行讨论。