



高等学校试用教材

# 燃烧学

傅维镡 张永廉 王清安

高等教育出版社



高等学校试用教材

# 燃 烧 学

傅维镛·张永廉·王濟安

高等教育出版社

## 内 容 简 介

本书以浅易的表达方法,由浅入深地介绍了各种燃烧物理现象及其物理模型的建立,介绍了各种燃烧现象的数学分析方法。在数学上力求简单、明瞭、易懂,以便既能使读者易于理解,又能达到对燃烧现象进行定量分析的目的。本书力求做到理论分析与实验现象的密切结合,使初学者在较短的时间内掌握燃烧学的基本内容及其研究方法。

全书共10章,书末有附录。全书采用国家法定计量单位。

本书是工程热物理专业本科生燃烧学的基本教材。本书也可作为其他有关专业的燃烧学教材,各专业可根据本专业的需要选择其中的有关章节。

本书也可供有关科技人员学习和备查。

本书于1987年11月经国家教委工程热物理教材委员会编审小组审定。

高等学校试用教材

### 燃 烧 学

傅维德 张永康 王清安

高等教育出版社出版  
新华书店上海发行所发行  
复旦大学印刷厂印装

开本850×11681/32 印张17.375 字数416,000

1989年4月第1版 1989年5月第1次印刷

印数0001—1,200

ISBN 7-04-001980-9/TH·41

定价 4.80元

## 前 言

燃烧学是一门古老而又年青的科学，这是因为它是一门涉及化学、流体力学、传热学、热力学的边缘科学，现象比较复杂，因而很不成熟，尚有大量的问题等待我们去研究。它涉及的领域很广，从火箭、航空发动机到民用锅炉、燃气轮机、冶金炉、工业炉、内燃机、防火及大气污染等，都存在着大量的燃烧问题，因而学习和研究燃烧现象和燃烧技术，无论对燃烧学科还是对燃烧技术的发展都是很重要的。然而，根据我们多年教学实践的体会，感到教好和学好《燃烧学》这门课是不太容易的。其原因，一方面固然由于燃烧现象本身的复杂性，因而学生不易掌握它的研究方法。但另一方面则是由于没有好的教材，使学生难以在课外通过自学、钻研而入门。许多国外的燃烧参考书又很难看懂，因此学生很难深入学习。为此，我们承担了教委交付的任务，力图编写一本适合我国国情、内容较为基本，但又较系统的燃烧学教科书，作为我国工程热物理专业用的通用教材。在写作方法上力求由浅入深，通俗易懂，争取做到读者能用本书进行自学。

本书有以下几方面的特点：

### 一、系统性较强

本书力图做到较系统地阐述燃烧物理的基本现象与规律。为此，我们以化学流体力学作为分析燃烧问题的基础，贯穿全书。但也并不排斥某些重要的经验公式和半经验公式，从而使内容比较完整而系统。

### 二、注重燃烧物理现象的描述及其物理模型的建立

本书自始至终贯穿着燃烧物理现象的描述，在此基础上建立合理的数学模型。尽力做到既注重物理现象，但并不是简单地罗

列大量实验结果，又做到理论与实践的统一，使读者深刻地认识到对燃烧物理来说，观察和分析各种燃烧现象是创建燃烧理论和解决燃烧技术的前提。

本书着重于简化模型的分析，介绍了各种燃烧现象的简化模型。作者认为简化模型的特点是物理概念清楚，容易使一个初学者接受而入门，能较快地学会对复杂的燃烧现象进行必要的简化，从而建立合理的教学模型，以揭示燃烧现象的基本规律。在此基础上将来进一步学习燃烧现象的数学模拟或学习更复杂的《燃烧技术》课程就有了扎实的物理基础。

### 三、内容及编排新颖

本书在吸收了国内外的经验及我们自己的教学实践基础上，在章节的安排上与国内其他燃烧参考书有所不同，由浅入深，由简单到复杂地进行了内容的安排。其中将《着火与熄火》一章放到了较后，这是因为它涉及层流和湍流燃烧现象，这样安排容易将着火、熄火现象讲清楚。在内容的选择上增加了近期国内外燃烧基础研究的新成果，充实了内容，这与国内其他燃烧参考书也有明显的不同。

本书共分十章，其中第1章到第7章属于燃烧物理现象的基本内容。从第8章开始转入较为综合的燃烧现象讨论，它是进一步学习《燃烧技术》课程的基础。其中第3章(部分)、第5章、第7章、第9章、第10章由傅维铤编写；第1章、第2章、第4章(部分)、第6章由张永廉编写；第3章(部分)、第4章(部分)由王清安编写。

本书由重庆大学王致均教授主审，并于1987年11月由国家教委工程热物理教材委员会《燃烧学》和《燃烧技术》编审小组审查通过。王致均教授仔细阅读了原稿，对本书内容提出了中肯的意见，对提高本书质量起了重要的作用。对此，我们表示衷心的感谢。

书中打“\*”者属于参考内容，各学校可根据自己的要求确

定取舍。

本书内容相对较全，以适应除工程热物理专业以外的其他有关专业的需要，各专业可根据本专业的要求，合理选取其中有关章节。

由于作者水平有限，书中一定会有不少缺点和错误，我们诚恳地希望读者批评、指正，以便今后不断完善和提高。

作者

1987.11.30

# 主要符号表

## 拉丁字母

<b>A</b>	控制体的表面积；离心喷嘴几何特性参数
<b>Ar</b>	阿累尼乌斯准则
<b>a</b>	热扩散系数
<b>a<sub>w</sub></b>	声速
<b>B</b>	综合变量；蒸发的无量纲数
<b>b</b>	射流半宽度
<b>C</b>	摩尔浓度
<b>C<sub>p</sub></b>	定压摩尔热容
<b>c<sub>p</sub></b>	定压比热容
<b>c<sub>v</sub></b>	定容比热容
<b>D</b>	扩散系数
<b>D<sub>1</sub></b>	邓克尔第一准则
<b>D<sub>11</sub></b>	邓克尔第二准则
<b>d</b>	直径
<b>E</b>	活化能；电火花放电能量；内能；点火能量
<b>Eu</b>	欧拉准则
<b>e</b>	单位质量的内能（比内能）
<b>F</b>	面积；角系数；无量纲浓度
<b>F</b>	力
<b>F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>, F<sub>z</sub></b>	力在直角坐标系中的分量
<b>Fr</b>	傅鲁德准则
<b>f</b>	力
<b>G</b>	总物质质量流量；重量流量；吉布斯自由能
<b>Gr</b>	格拉晓夫数
<b>g</b>	单位质量的吉布斯自由能（比吉布斯自由能）；单位面积上的物质流；重力加速度

$g_{F,B}$	回火及吹熄的临界速度梯度
$g_0$	斯蒂芬流
$H$	总焓
$H_R$	反应热
$h$	比焓; 高度; 普朗克常数
$h_i$	生成热
$h_c$	燃烧热
$I$	轴向动量
$i$	$x$ 向单位向量
$J$	物质的扩散流
$J_A$	单位时间、单位面积流体 $A$ 扩散的物质
$j$	$y$ 向单位向量
$K$	科瓦斯纳无量纲数
$K_b$	燃烧常数
$K_n$	分布常数 (随旋流强度变化)
$K_p$	平衡常数
$K^*$	反应物变为活化络合物的平衡常数
$k$	反应速度常数
$k_i$	燃烧常数
$k_v$	蒸发常数
$k_0$	反应频率因子
$k$	$z$ 向单位向量
$L$	长度
$Le$	刘易斯数
$LFL$	火焰传播贫限
$Lp$	拉普拉斯准则
$l$	湍流尺度
$\mathcal{L}$	蒸发潜热
$M$	摩尔数; 马赫准则; 旋转动量矩
$m$	质量
$m_F$	回流量



$N$	分子总数; 液滴总数
$N_u$	努塞尔准则
$N_0$	阿弗加德罗常数
$n$	反应级数; 分子浓度; 均匀度指数; 切向槽道数
$\hat{n}$	法向单位向量
$Pe$	贝克莱准则
$Pe_c$	传热贝克莱准则
$Pe_D$	传质贝克莱准则
$Pr$	普朗特准则
$p$	压力
$Q$	热量
$Q_i$	某组分的反应热
$q$	热流量 (单位时间、单位面积); 单位摩尔的热量; 冷却速度; 活化分子在总分子数中的百分比
$R$	通用气体常数; 化学当量比时空气与燃料质量比
$Re$	雷诺准则
$R_r$	空间相关系数 (欧拉相关系数)
$R_s$	旋转半径
$R_t$	时间相关系数 (拉格朗日相关系数)
$R$	阻力
$r$	半径; 径向距离
$r_a$	空气核半径
$r_f$	折算薄膜半径
$Sc$	施密特准则
$S_1$	火焰传播速度
$S_L$	层流火焰传播速度
$S_T$	湍流火焰传播速度
$St$	斯特洛霍尔兹准则
$S$	摩尔熵; 旋流强度
$T$	温度
$T_i$	绝热火焰温度

$T_s$	热壁温度
$t$	时间
$t_b$	碳粒燃尽时间
$t_c$	特征反应时间
$t_D$	特征扩散时间
$t_v$	蒸发时间
$U$	分子算术平均速度
$u$	$x$ 方向速度分量
$V$	容积
$V_{Di}$	$i$ 组份相对于混合气的扩散速度
$v$	$y$ 方向速度分量
$v_b$	卷吸速度
$v_\theta$	切向速度
$W$	对系统做的功
$We$	韦伯准则
$w$	$z$ 方向速度分量
$w_i$	$i$ 组份的反应速率
$w_{ii}$	$i$ 组份的特征反应速率
$X^*$	活化络合物
$x$	坐标
$x_f$	火焰高度
$x_i$	着火距离
$\mathcal{X}$	泽尔多维奇综合函数
$Y$	质量相对浓度
$y$	坐标
$\mathcal{Y}$	泽尔多维奇综合函数
$Z$	单位时间、单位体积内碰撞的分子总数
$z$	坐标

### 希腊字母

$\alpha$  余气系数; 雾化角; 热释放准则; 链载体支链数

$\beta$	消耗单位质量燃料所需氧的质量
$\gamma$	反应速度的温度系数；比热比
$\Delta$	无穷小量；无量纲参数
$\delta$	反应区宽度；液膜厚度；薄膜厚度
$\epsilon$	发射率；反应程度；林纳德-琼斯势；湍流强度；涡粘性系数
$\epsilon_{ij}$	应变率张量
$\Sigma$	求和
$\sigma$	表面张力；斯蒂芬-波尔兹曼常数；分子直径
$\Pi$	求积；无量纲参数
$\eta$	燃烧完全度；无量纲坐标
$\xi$	无量纲坐标
$\theta$	无量纲温度；斯林-纽贝数
$\theta_1$	分子间相互作用的特征温度
$\wedge$	无量纲层流火焰传播速度
$\lambda$	导热系数；摩擦系数
$\kappa$	科洛维兹数
$\phi$	无量纲发热量；考虑液滴变形阻力的修正系数
$\mu$	粘性系数；流量系数
$\nu$	运动粘性系数；阿累尼乌斯浓度的指数
$\tau$	应力；时间
$\tau_c$	化学反应特征时间
$\tau_t$	停留时间
$\tau_d$	着火延迟时间
$\tau_{ij}, \tau$	应力张量
$\rho$	密度
$\Phi$	耗散功
$\phi$	初始混合物的化学当量比
$\varphi$	方位因素；轴向速度系数
$\lambda$	摩尔相对浓度
$\Omega_n, \Omega_D$	输运函数

## 角 标 下 角 标

a	空气
D	扩散
F, f	火焰面; 燃料
G	产生
g	气相
i	某组份
i	着火
in	内区; 入口
iner	惰性
L	损失; 层流; 长度
l	液相
m	平均; 中心线处; 最大值
max	最大值
min	最小值
OX	氧化剂
out	外区; 出口
P, Pr	产物
p	液滴
s	旋转
T	湍流; 热
V	挥发
v	蒸发
*	参考; 两区分界面
0	初始; 分界面; 标准状态
$\infty$	来流; 环境
x, y, z	分量
i, j, k	张量分量

## 上 角 标

•	脉动
0	标准状态
*	参考; 分界面
f	分析基
g	干燥基
r	可燃基
w	水
y	应用基
-	平均

# 目 录

## 主要符号表

<b>第1章 绪论</b> .....	1
§ 1-1 燃烧和火焰 .....	1
§ 1-2 燃烧与国民经济及能源的关系 .....	3
§ 1-3 燃烧科学的发展简史 .....	5
§ 1-4 燃烧学的研究对象及研究方法 .....	7
<b>第2章 燃烧化学热力学和化学动力学基础</b> .....	9
§ 2-1 引言 .....	9
§ 2-2 生成热、反应热及燃烧热 .....	9
一、生成热 .....	10
二、反应热 .....	12
三、燃烧热 .....	14
四、热化学定律 .....	16
§ 2-3 自由能、平衡常数及绝热火焰温度 .....	18
一、热力学平衡与自由能 .....	19
二、标准自由能和平衡常数 .....	20
三、气体的离解 .....	30
四、绝热火焰温度的计算 .....	32
§ 2-4 化学反应速度 .....	34
一、浓度及其表示法 .....	35
二、反应速度表示法 .....	36
三、化学反应速度方程式 .....	37
四、反应级数和反应分子数 .....	39
§ 2-5 影响反应速度的因素 .....	42
一、压力、浓度对反应速度的影响 .....	42
二、温度对化学反应速度的影响 .....	45

三、活化能对反应速度的影响	48
四、化学动力学方程式	49
§ 2-6 反应速度的理论	50
一、碰撞理论	50
二、过渡状态理论大意*	55
§ 2-7 链反应	57
一、直链反应	57
二、支链反应	60
<b>第3章 燃烧物理学基本方程</b>	<b>65</b>
§ 3-1 引言	65
§ 3-2 多组份气体基本参量	65
§ 3-3 分子输运基本定律	68
一、牛顿粘性定律	68
二、傅立叶导热定律	69
三、费克扩散定律	70
四、输运系数间的关系及输运系数	73
§ 3-4 基本守恒方程	78
一、总质量守恒方程(连续性方程)	78
二、动量守恒方程	81
三、组份守恒方程	86
四、能量守恒方程	88
五、二维边界层守恒方程	95
§ 3-5 泽尔多维奇转换和广义雷诺比拟	96
一、泽尔多维奇转换	96
二、广义雷诺比拟	98
§ 3-6 斯蒂芬流和相界面上的边界条件	99
一、斯蒂芬流	99
二、相分界面的内移	103
三、液-气相分界面处的边界条件及广义雷诺比拟	104
四、固-气相分界面边界条件	108

§ 3-7	多组份反应系统的相似准则	109
<b>第4章</b>	<b>气体燃料及液滴的扩散燃烧</b>	<b>113</b>
§ 4-1	引言	113
§ 4-2	射流扩散燃烧的某些特征	114
§ 4-3	湍流自由射流流体力学特征	118
	一、湍流自由射流的守恒方程	120
	二、湍流自由射流的解	122
§ 4-4	湍流自由射流扩散燃烧	127
	一、守恒方程组及求解	127
	二、火焰的形状	131
	三、射流火焰横断面的组份分布	135
	四、射流火焰横断面的温度分布	137
	五、实验结果	138
§ 4-5	受限射流扩散火焰	141
	一、布克-舒曼的纵向受限射流火焰的理论解	143
	二、斯林-纽贝具有回流区的纵向受限射流	146
§ 4-6	旋转射流扩散火焰	149
	一、旋流强度	150
	二、弱旋转射流扩散火焰	151
	三、强旋转射流扩散火焰	154
§ 4-7	相对静止高温环境中液滴的蒸发和燃烧	158
	一、没有燃烧情况下液滴的蒸发	162
	二、有燃烧情况下液滴的蒸发	166
§ 4-8	强迫气流中液滴蒸发和燃烧	172
§ 4-9	多组份液滴的蒸发与燃烧*	178
	一、多组份燃料液滴的蒸发与燃烧的基本守恒方程	181
	二、可溶性多组份燃料液滴的蒸发与燃烧	181
	三、微爆性燃烧现象	184
	四、乳化燃料液滴的蒸发与燃烧	185
	五、煤-油、煤-油-水混合燃料液滴的蒸发与燃烧	186



§ 4-10	数值解 .....	187
§ 4-11	液滴群的蒸发与燃烧 .....	189
<b>第5章</b>	<b>预混可燃气的层流燃烧</b> .....	<b>194</b>
§ 5-1	引言 .....	194
§ 5-2	燃烧波两种型式 .....	195
§ 5-3	层流火焰传播速度的定义及其传播机理 .....	200
一、	火焰传播速度的定义 .....	200
二、	层流火焰的内部结构及其传播机理 .....	201
§ 5-4	简化分析法 .....	206
§ 5-5	层流火焰传播速度的无量纲分析 .....	208
§ 5-6	分区近似解 .....	211
§ 5-7	渐近分析解 .....	215
一、	无限薄火焰的解 .....	217
二、	内区(扩散-反应控制)求解 .....	218
三、	外区(扩散-对流控制)求解 .....	220
四、	匹配 .....	221
五、	最终解 .....	222
§ 5-8	物理化学参数对 $S_1$ 的影响 .....	224
一、	混合气初温 $T_\infty$ 对 $S_1$ 的影响 .....	224
二、	压力对 $S_1$ 的影响 .....	224
三、	混气成分(余气系数)对 $S_1$ 的影响 .....	228
四、	氧浓度对 $S_1$ 的影响 .....	229
五、	混合气输运性质对 $S_1$ 的影响 .....	230
§ 5-9	物理化学参数对火焰厚度的影响 .....	231
一、	混合气性质对火焰厚度 $l$ 的影响 .....	231
二、	混合气初温及压力对火焰厚度 $l$ 的影响 .....	232
§ 5-10	层流火焰传播速度的实验测定法 .....	233
一、	本生灯法 .....	234
二、	平面火焰法 .....	236
三、	驻定火焰法 .....	236