



北京市高等教育精品教材立项项目

# 燃烧与燃烧室

主编 黄 勇

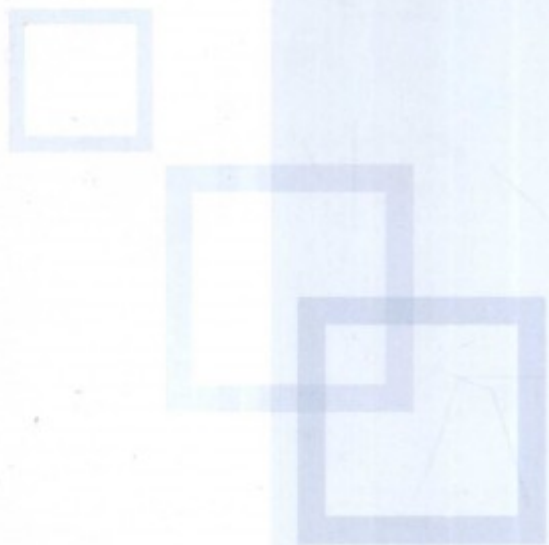
编著 林宇震 樊未军 许全宏

李 锋 郭志辉 刘玉英

杨晓奕 王 方



北京航空航天大学出版社



上架建议：工程热物理

ISBN 978-7-81124-895-1



9 787811 248951 >

策划编辑：白 航

封面设计：

定价：42.00 元

V235.1  
H912

北京市高等教育精品教材立项项目

# 燃烧与燃烧室

主编 黄 勇  
编著 林宇震 樊未军 许全宏  
李 锋 郭志辉 刘玉英  
杨晓奕 王 方

V235.1

H912

北京航空航天大学出版社

# 前言

如果以德国学者 Jost 于 1938 年编写第一本燃烧学教材开始算起,燃烧理论的教学至今已有 80 年。在这期间,燃烧理论系统不断完善,有关燃烧的新技术不断发展。由于其涉及的深度与广度的不断加强,目前在绝大多数大学中,都开始进行不同层次的有关燃烧理论与技术研究的的教学活动。北京航空航天大学的燃烧与燃烧室教学也是如此。

借助于教育部的教学改革运动,我们一直在思考,如何为本科生、研究生、博士生等不同层次的教学对象,构建一个能很好地结合燃烧理论与航空燃气轮机燃烧室,以及其他各种新技术国防动力装置燃烧室的合理的燃烧教学体系。我们的基本思路是:在本科生教学阶段,重点放在理论性、准确性、易读性等基础知识方面;而在研究生以后的教学阶段,再注重先进性、完备性、专题性等问题。鉴于本教材的教学对象为本科生,因此,在编写时特别注意与先修课程的无缝衔接(易读性)、前人研究的成熟结论(准确性)及各章节内容的内在联系(理论性)。为了很好地做到这 3 点,我们组织北京航空航天大学能源与动力工程学院从事燃烧与燃烧室教学和研究的几乎所有学者成立了写作班子,参考了美国大学有关燃烧学的 8 本主要教材(在 Borman & Ragland 的教材中有专门介绍),以及有关燃气轮机燃烧室的 5 本主要专著。当然,考虑到国情,我们也参考了国内燃烧学大师编写的近 20 本教材和专著。

与美国工程院院士、国际燃烧协会前主席、美国 Princeton 大学教授、我校名誉教授 C. K. Law 的观点不谋而合的是,我们都认为,燃烧学主要涉及两个基础学科:化学动力学及流体动力学。因此,本书在编写时,将燃烧流动的控制方程组放在了第 2 章进行介绍,试图从中引出后面的各章节内容;而把化学热力学与动力学的内容放在了紧跟其后的第 3 章进行介绍。随后根据燃料种类,在后续各章节逐步展开介绍气体燃料燃烧(包括扩散燃烧、预混燃烧、爆震燃烧、着火与熄火等)、液体燃料燃烧(包括单滴蒸发与燃烧、液雾形成机理)、航空燃气轮机燃烧室(包括主燃烧室概述、工作特性、加力燃烧室、燃烧室污染排放机理及低污染燃烧室等)等知识。为便于学生掌握所学内容,各章节都给出了大量习题(这在国内外几乎所有燃烧教材中都是最完整和全面的)。为便于进行各章节习题计算,附表中还比较详细地给出了各种物性参数及美国 JANAF 数据表。书中所用所有符号都在目录后面的符号表中给出。

本书编写过程中力求采用问题先导式讲解方法,从最简单的设计问题入手,层层铺开,深入浅出地介绍燃烧学及航空燃气轮机燃烧室的基础知识。作为本科生教材,本书重点放在讲清问题的来龙去脉,追求知识点的理论性和深入性,但不过于追求技术的先进性和完整性,以便读者容易阅读和理解。

本书的编写全部由具有高级职称的燃烧专家完成,其中第 1、5、6 章及附表由黄勇编写,

第2章由黄勇、李锋编写,第3章由黄勇、李锋、杨晓奕编写,第4章由樊未军、刘玉英、王方编写,第7章由黄勇、郭志辉编写,第8、9章由林宇震、许全宏编写,第10章由郭志辉、黄勇编写,第11章由许全宏、杨晓奕编写。全书由黄勇统稿并审定。

感谢北京航空航天大学能源与动力工程学院领导对本书作者的鼓励与支持,感谢北京航空航天大学将本课程列为全校精品课并评选主编教师黄勇为校优秀主讲教师,感谢北京市批准本教材为高等教育精品教材,感谢燃烧学老前辈赵其寿教授、杨茂林教授在本书审稿过程中给予的学术批评与支持,感谢北京航空航天大学教务处、出版社对本书出版的大力支持。

本书在正式出版前已作为北京航空航天大学精品课程讲义连续使用3年,期间由博士生、硕士生及本科生提出了许多修改意见。另外,本校博士生孙孔倩、薛鑫等参与了本书习题整理及部分章节的编写与修订工作,在此一并表示感谢。

由于本书作者水平所限,书中难免会出现各种问题,敬请广大读者批评指正。

作者  
2008年12月

# 目 录

第 1 章 绪 论	4
1.1 燃烧与燃烧室本质	4
1.2 燃烧学的发展	6
1.3 燃料的发展	6
1.4 燃烧技术的发展	7
1.5 权威学术文献与奖项	8
1.6 本书各章节安排	12
习 题	12
参考文献	13
第 2 章 燃烧物理学基本方程	15
2.1 引 言	15
2.2 多组分气体基本参量	15
2.2.1 组 分	15
2.2.2 多组分气体基本参量的定义	16
2.3 分子输运定律	18
2.3.1 Newton (牛顿)粘性定律	18
2.3.2 Fourier(傅里叶)导热定律	19
2.3.3 Fick (费克)扩散定律	20
2.4 基本守恒方程	21
2.5 Zeldovich(泽尔多维奇)转换及广义 Reynolds(雷诺)比拟	26
2.5.1 Zeldovich 转换	26
2.5.2 广义 Reynolds 比拟	27
2.6 Stefan(斯蒂芬)流	28
习 题	31
参考文献	32
第 3 章 燃烧化学热力学与化学动力学基础	33
3.1 燃烧化学热力学	33

3.1.1	基本概念	34
3.1.2	热力学第一定律在燃烧系统中的应用	37
3.1.3	热力学第二定律在燃烧系统中的应用	40
3.1.4	Gibbs(吉布斯)函数在燃烧系统中的应用	43
3.2	燃烧化学动力学	48
3.2.1	化学动力学基本规律	49
3.2.2	燃烧反应速率理论	63
	习 题	73
	参考文献	79
<b>第4章</b>	<b>气体燃料燃烧</b>	<b>81</b>
4.1	气体燃料的扩散燃烧	81
4.1.1	圆形自由射流流体力学特征	81
4.1.2	层流扩散火焰	86
4.1.3	湍流扩散火焰	88
4.1.4	扩散火焰的简化理论模型	91
4.2	预混可燃气的层流燃烧	99
4.2.1	火焰前沿的物理描述	99
4.2.2	一维层流火焰传播基本方程	101
4.2.3	一维层流火焰简化分析解	102
4.2.4	一维层流火焰分区近似解	105
4.2.5	层流火焰速度和厚度的影响因素	107
4.2.6	层流火焰速度的测量	112
4.3	预混可燃气的湍流燃烧	116
4.3.1	湍流火焰的物理描述	117
4.3.2	湍流预混火焰的结构	118
4.3.3	湍流预混火焰理论	120
4.3.4	湍流火焰的数值模拟	123
4.3.5	湍流预混火焰的实验研究	128
4.4	爆震燃烧	129
4.4.1	一维燃烧波的基本关系式	130
4.4.2	休贡纽曲线性质	131
4.4.3	爆震波波速	133
4.4.4	爆震波的结构	135

4.4.5 缓燃-爆震转换(DDT)过程 .....	140
习 题 .....	140
参考文献 .....	143
<b>第 5 章 着火、熄火及火焰稳定 .....</b>	<b>146</b>
5.1 着 火 .....	146
5.1.1 热自燃 .....	146
5.1.2 强迫着火(点燃) .....	152
5.1.3 可燃性边界 .....	157
5.2 熄 火 .....	161
5.2.1 系统状态参数的影响 .....	161
5.2.2 系统特征尺度的影响(淬熄距离) .....	163
5.2.3 着火与熄火的差异 .....	164
5.3 火焰稳定 .....	164
5.3.1 低速气流下火焰稳定原理 .....	165
5.3.2 高速气流下火焰稳定 .....	170
习 题 .....	175
参考文献 .....	177
<b>第 6 章 液雾燃烧基础 .....</b>	<b>180</b>
6.1 单滴蒸发过程分析 .....	181
6.2 单滴燃烧过程分析 .....	186
6.3 对流环境下的单滴蒸发和燃烧 .....	194
6.4 液滴群的蒸发燃烧 .....	195
6.5 热壁面上液滴的蒸发 .....	197
习 题 .....	198
参考文献 .....	200
<b>第 7 章 液雾形成原理 .....</b>	<b>202</b>
7.1 液雾衡量参数 .....	202
7.1.1 液滴尺寸分布 .....	202
7.1.2 雾化细度 .....	205
7.1.3 雾化均匀性 .....	207
7.1.4 喷雾锥角 .....	208



7.2 液雾形成的基本过程 .....	209
7.2.1 二次雾化过程分析 .....	210
7.2.2 初始雾化现象观察 .....	212
7.3 液体圆柱自由射流的线性稳定性分析 .....	215
7.3.1 线性稳定性分析基本理论 .....	215
7.3.2 圆形射流初始雾化的线性分析 .....	218
7.4 其他雾化机理 .....	227
7.4.1 气泡雾化技术 .....	227
7.4.2 超声波雾化 .....	227
习 题.....	228
参考文献.....	229
<b>第 8 章 航空燃气涡轮发动机燃烧室概述</b> .....	<b>230</b>
8.1 燃烧室的作用 .....	230
8.2 燃烧室基本设计特点 .....	231
8.3 燃烧室结构和类型 .....	235
8.3.1 燃烧室典型结构 .....	235
8.3.2 燃烧室类型 .....	236
8.4 燃烧室的性能要求 .....	239
8.4.1 燃烧效率 .....	239
8.4.2 启动点火和高空再点火 .....	240
8.4.3 稳定工作范围 .....	241
8.4.4 总压损失 .....	243
8.4.5 容热强度 .....	244
8.4.6 出口温度分布 .....	246
8.4.7 排气污染 .....	248
8.4.8 耐久性 .....	251
8.4.9 燃烧不稳定性 .....	251
8.4.10 维护性.....	251
习 题.....	251
参考文献.....	253
<b>第 9 章 航空燃气轮机主燃烧室工作特性</b> .....	<b>254</b>
9.1 燃油雾化 .....	254

9.1.1	离心喷嘴 .....	255
9.1.2	空气雾化喷嘴 .....	264
9.1.3	甩油盘喷嘴 .....	265
9.1.4	蒸发管喷嘴 .....	266
9.2	燃烧室空气动力学 .....	267
9.2.1	扩压器流动 .....	267
9.2.2	旋流流动 .....	272
9.2.3	横向射流 .....	278
9.2.4	流量分配 .....	286
9.3	燃油分布 .....	288
9.4	主要燃烧性能分析 .....	291
9.4.1	燃烧效率 .....	291
9.4.2	贫油熄火(LBO) .....	296
9.4.3	贫油点火(LLO) .....	300
9.5	冷却理论 .....	302
9.5.1	燃烧室中的传热过程 .....	302
9.5.2	气膜冷却结构 .....	307
9.5.3	先进冷却方式 .....	308
9.5.4	燃烧室冷却计算实例 .....	308
	习 题 .....	310
	参考文献 .....	311
<b>第 10 章</b>	<b>燃气轮机加力燃烧室 .....</b>	<b>314</b>
10.1	加力燃烧室概述 .....	314
10.1.1	加力燃烧室功能 .....	314
10.1.2	加力燃烧室的工作条件 .....	315
10.1.3	加力燃烧室的典型组成 .....	316
10.1.4	涡喷和涡扇发动机加力燃烧室 .....	317
10.2	加力燃烧室工作原理 .....	318
10.2.1	加力燃烧室热力过程分析 .....	318
10.2.2	加力燃烧室性能参数 .....	319
10.2.3	加力燃烧室主要部件的工作原理 .....	321
10.3	加力燃烧室振荡燃烧及其抑制措施 .....	326
10.3.1	加力燃烧室产生振荡燃烧的原因 .....	326

10.3.2	加力燃烧室振荡燃烧的类型和特点	327
10.3.3	加力燃烧室抑制振荡燃烧的措施	329
	习 题	330
	参考文献	331
<b>第 11 章</b>	<b>燃烧污染形成机理及低污染燃烧室</b>	<b>332</b>
11.1	燃气轮机燃烧污染及其危害	332
11.1.1	燃气轮机污染物的组成及危害	332
11.1.2	航空燃气轮机污染排放的特点	333
11.2	燃气轮机污染排放生成机理	334
11.2.1	CO 的生成机理	334
11.2.2	UHC 的生成机理	337
11.2.3	冒烟生成机理	338
11.2.4	氮氧化物生成机理	341
11.3	低污染燃烧室	350
11.3.1	燃油分级燃烧室	351
11.3.2	贫油预混预蒸发燃烧室	353
11.3.3	贫油直接喷射(LDI)低污染燃烧室	354
11.3.4	富油燃烧-急冷-贫油燃烧(RQL)低污染燃烧室	354
	习 题	355
	参考文献	356
附表 1	常见燃料蒸气的导热系数、粘性系数及质量定压热容随温度变化的拟合公式	358
附表 2	常见燃料在标准状态(即 25℃、1atm)下的燃烧性能参数(与静止空气恰当混合)	359
附表 3	常压下空气的物性参数	360
附表 4	常压下 N <sub>2</sub> 及 O <sub>2</sub> 的物性参数	361
附表 5	JANAF 表节选	362
附表 6	常见碳氢燃料的单步反应速率参数	376

# 符 号 表

## 1. 英文字母

$a$ : 导温系数; 声速

$A$ : 指前因子(在 Arrhenius 公式中);  
面积

AFR: 气/液(油)比

Ar: Arrhenius 数

$b$ : 射流半宽度

$c$ : 声速

$C$ : 摩尔浓度

$C_d$ : 阻力系数; 流量系数

CO: 一氧化碳

$c_p$ : 质量定压热容

$C_{p,m}$ : 摩尔定压热容

$C_{pi}$ : 理论静压恢复系数

$C_{pr}$ : 实际静压恢复系数

$d$ : 直径

$D$ : 扩散系数; 直径

Da: Damkoller 数

$D_p$ : 规定的起飞、降落循环中排放的某种  
气态污染物的总质量

$E$ : 能量

$E_a$ : 活化能

EI: 排放指数

$Eu$ : Euler 数

$F$ : 体积力

$F_{\infty}$ : 起飞最大推力

FN: 流量数

$Fr$ : Froude 数

$f$ : 油气比

$g$ : (总的)质量流量通量; 重力加速度;

Gibbs 函数

$G_x$ : 轴向动量

$G_{\varphi}$ : 切向动量矩

$h$ : 对流换热系数; (单位质量)焓值

$H$ : 焓值

$J$ : (扩散引起的)质量流量通量

$k$ : 绝热指数(一般指空气); 反应速率常  
数; 轴向波数

$K_c$ : 燃烧常数

$K_e$ : 蒸发常数

$k_B$ : Boltzmann 常数

$K_p$ : 化学平衡常数

$L$ : 特征长度; 燃料的理论空气量(质量)

$Le$ : Lewis 数

LHV: 燃料的低位热值

$M$ : 摩尔数

$Ma$ : 马赫数

$m_a$ : 空气流量

$m_f$ : 燃料流量

MMD: 质量中间直径

MW: 分子量

$n$ : 个数; 反应级数; 周向波数

$N$ : 个数

$n_0$ : Avogadro 常数

NO<sub>x</sub>: 氮氧化物

$Nu$ : Nusselt 数

$p$ : (静)压强

$p^*$ : 总压

$Pe$ : Peclet 数

$Pr$ : Prandtl 数

$q$ : 热流量; 热量

$Q$ : 吸(放)热量; 体积流量  
 $Q_{vc}$ : 容热强度  
 $r$ : 径向坐标  
 $R$ : 气体常数; 半径; 体积累积百分比  
 $Re$ : Reynolds 数  
 $RR$ : 化学反应速率  
 $S$ : 熵; 火焰传播速度  
 $Sc$ : Schimidt 数  
 $S_L$ : 层流火焰传播速度  
 $SMD$ : Sauter 平均直径  
 $SN$ : 冒烟数  
 $St$ : Strouhal 数  
 $t$ : 时间  
 $T$ : 温度  
 $T^*$ : 总温

## 2. 希腊字母

$\alpha$ : 余气系数; 函道比  
 $\beta$ : 液雾张角  
 $\delta$ : 焰锋厚度  
 $\Delta$ : 增量  
 $\eta$ : 燃烧效率  
 $\theta$ : 加温比  
 $\lambda$ : 导热系数; 波长  
 $\mu$ : 运动粘性系数

## 3. 上标

$\bar{\quad}$ : 平均值  
 $\dot{\quad}$ : 流量  
 $\rightarrow$ : 矢量  
 $\sim$ : 无量纲参数; 瞬时参数

## 4. 下标

0: 表面(或壁面)处

$u$ :  $x$  方向分速度  
 $U$ : 内能  
 $UHC$ : 未燃碳氢  
 $v$ :  $y$ (或  $r$ ) 方向分速度  
 $V$ : 体积  
 $V^0$ : 燃料的理论空气量(标准体积)  
 $w$ :  $z$ (或周向)方向分速度  
 $W$ : 做功  
 $We$ : Weber 数  
 $x$ :  $x$  方向坐标  
 $y$ :  $y$  方向坐标  
 $Y$ : 质量分数  
 $z$ :  $z$  方向坐标  
 $Z$ : 分子碰撞次数

$\pi$ : 增压比  
 $\rho$ : 密度  
 $\sigma$ : 表面张力系数  
 $\tau$ : 切应力; 寿命; 着火感应期  
 $\Phi$ : 当量比; 耗散功  
 $\varphi$ : 加力比  
 $\chi$ : 摩尔相对浓度; 燃料体积百分比  
 $\omega$ : 复频率

$*$ : 滞止参数  
 $0$ : 标准参数  
 $'$ : 脉动参数

3: 燃烧室进口处

4: 燃烧室出口处  
 $\infty$ : 无穷远处  
a: 空气  
b: 已燃气体  
c: 临界; 燃烧  
ce: 燃烧焓增  
ct: 燃烧温升  
e: 蒸发  
f: 燃料; 火焰  
F: 流动  
H: 加热  
 $i$ : 第  $i$  种组分; 着火位置

L: 层流  
m: 最大的; 模式  
min: 最小的  
p: 颗粒  
pr: 实际  
R: 反应  
s: 显知的; 化学恰当的  
t: 总的  
T: 湍流  
th: 理论  
u: 未燃气体  
总: 混合物总体参数

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 燃烧与燃烧室本质

何谓燃烧? 根据《韦氏大词典》(Webster's Dictionary)的定义,燃烧是一种能发热或者既发光又发热的快速氧化反应。

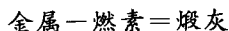
不过,翻遍国内外几乎所有燃烧教材,很少有人专门给出明确的燃烧定义。因为随着科技的发展,燃烧研究也涉及一些不发光火焰及氧化剂也可能不含氧。但从本质上讲,燃烧过程应当释放能量(主要以热能形式),大多可用于各种动力装置。

其实早在出现人类以前,燃烧现象就已产生。由于早期人类对燃烧现象,特别是其主要的表现形式——火焰的不了解,导致古人类对火的敬畏与崇拜。在人类历史的发展长河中,对燃烧的了解也走过了相当曲折的道路。上面介绍的看似简单的燃烧定义,其实是多少年来人类科技进步的结晶。

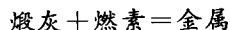
在 18 世纪中叶以前(未发现氧元素),人类对火的认识不清,大多认为火是组成宇宙的所谓四大元素(即空气、水、火、土)之一,是一种没有质量的物质,典型的学说是曾经在人类历史上流行将近 100 年的“燃素说”<sup>[1-2]</sup>(Phlogiston Theory)。

所谓“燃素说”,是这样一种假说,它认为火是一种物质(或者说元素),且由无数细小而活泼的微粒构成。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,它弥散在大气当中,给人以热的感觉。由这种火的微粒构成的元素称为“燃素”。

按照燃素说的解释,一切与燃烧有关的化学变化均可归结为物质吸收与释放燃素的过程。如煅烧金属,认为燃素从中逸出,变成煅灰,即



而煅灰引起木炭燃烧,则认为煅灰从木炭中吸收燃素,使金属重生,即



且燃素说认为,物体中含燃素越多,燃烧越旺。

该学说在 1650—1750 年期间曾经流行全球,直到法国科学家 Lavoisier (拉瓦锡)于 1777 年发现氧元素后,该学说才告结束。

这段曲折的燃烧研究史被英国一家著名媒体在 2000 年左右评为 1000—2000 年这一千年期间的所谓“十大千年之最”中“最大的科学错误”。

在现实生活中,燃烧影响人类生活的诸多方面,尤其是涉及能源利用、动力装置与环境保

护的各个领域。

从能源利用角度来看,全球使用的绝大部分能源都来自各种燃料的燃烧过程,从1970年的约占93%,到1993年的约占86%,预计2015年将占85%<sup>[3]</sup>。而其他能源形式,如水电、核能、风能、太阳能、潮汐能、地热、温差等,其能源利用率总共还不到14%。其中西方发达国家的能源形式相对丰富,且非燃烧能源的利用率相对较高。以美国1996年的能源来源为例(见图1-1-1),来自燃料燃烧的能源约占85%,非燃烧能源占15%<sup>[4]</sup>。特别是其电能组成中,火力发电仅占约67.2%(其中燃煤占56.4%,燃油占2.2%,燃气占8.6%),核电占21.9%,水电占10.8%。而我国的能源形式虽然也开始丰富起来,但目前非燃烧能源的利用率还是不高,2000年以前,来自燃料燃烧的能源比例高达93%以上<sup>[1]</sup>,2005年的比例仍接近92%<sup>[5]</sup>。这些数据充分说明,燃烧学研究对能源利用的影响非常重大。

从动力装置的角度来看,在目前绝大多数军用和民用动力装置中,燃烧室都是动力系统的不可或缺的核心部件。在当今世界局势风云变幻、国防科技发展日新月异的情况下,为了建立一个强大的、有能力保护自己家园的国防系统,对各种新型国防武器平台的动力系统提出了严峻的挑战。而在民用动力系统中,节能、减排越来越成为世界热点话题。因此,目前的燃烧与燃烧室研究正面临着前所未有的挑战与发展机遇,迫切希望有能力、有志气的研究者进入到这一领域中来。

从环境保护的角度来看,首先,燃料的大量燃烧似乎不是人类社会可持续发展的一种合理模式;其次,燃烧产生的氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放被认为是造成大气臭氧损耗及环境污染的重要原因之一<sup>[6]</sup>,而燃烧排放的烟气曾经造成过洛杉矶烟雾、伦敦烟雾等著名的公害事件,夺去了许多人的生命。我国仅民航飞机排放的 $\text{NO}_x$ 就迅速增加,基本接近国外发达国家的排放水平<sup>[7]</sup>。另外,即便是燃烧充分,燃料燃烧所产生的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )和水蒸气( $\text{H}_2\text{O}$ )也是最主要的温室气体。特别是观测数据<sup>[8]</sup>表明,近年来全球大气中 $\text{CO}_2$ 的含量增加迅速(见图1-1-2)。显而易见的结论是,开展燃烧学研究对环境保护的影响极其重大。

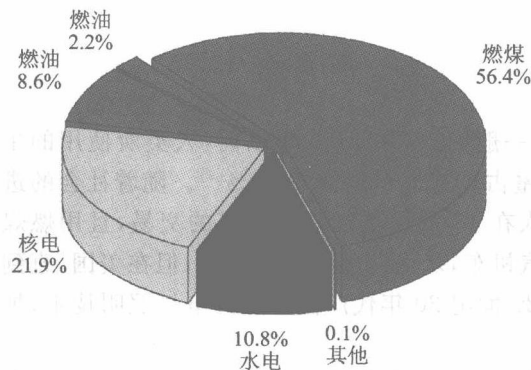


图 1-1-1 美国 1996 年的能源构成

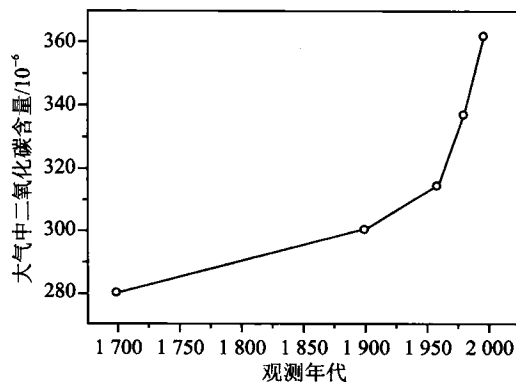


图 1-1-2 全球大气中  $\text{CO}_2$  含量的走势图



燃烧室则是根据各种应用条件设计的,能使燃料得以顺利燃烧,以满足各种应用要求的一种结构系统。显然,针对上述问题,燃烧工程师的主要任务就是运用所掌握的燃烧学知识、设计出适用于各种(或某种)燃料的稳定、安全、高效、无污染的燃烧系统。

## 1.2 燃烧学的发展

对于刚刚接触燃烧学的读者来说,简要回顾一下燃烧学的发展历程是非常有益的。

自从18世纪Lavoisier(拉瓦锡)结束了关于“燃素说”的争端后,燃烧学的发展开始走上了正常轨道。

19世纪早期,美国人Thompson(汤普逊)发明了防止矿井内瓦斯爆炸的安全灯,从而率先提出了淬熄距离的概念<sup>[6]</sup>;1842年,Joule(焦耳)证明“热”不是一种物质,而是一种能量形式;1855年,德国人Bunsen(本生)测量了火焰温度和火焰速度;1868年,法国人Mallard(马拉德)建立了火焰传播模型;1900年,Chapman(切普曼)和Jouquet(乔给特)发现了缓燃和爆震燃烧的区别,并计算了爆震波的速度。

进入20世纪以来,燃烧学的研究开始加速发展。第一次国际燃烧会议于1928年在德国召开,以后每两年召开一次,并自1952年开始,每次会议都出版一个论文集。第一本关于燃烧学的教材由德国人Jost(鸠斯特)于1938年编写。Burke(伯克)和Schumann(舒曼)于1928年采用理论方法分析了扩散火焰长度及形状。第一及第二次世界大战促进了燃烧学的发展,这主要是指燃气轮机和火箭的应用。1951年,Lewis(刘易斯)和von Elbe(冯·埃尔卜)编写了第二本燃烧教材,汇集了von Karman(冯·卡门)等人关于层流火焰结构的模拟及Zeldovich(泽尔多维奇)等人关于爆震波结构的研究成果。20世纪50年代,德国人von Karman等建立了反应流体力学体系;70年代,以英国教授Spalding(斯波丁)等人为代表的学者建立了计算燃烧学的理论基础<sup>[1-2]</sup>。

## 1.3 燃料的发展

燃烧技术的发展是与燃料使用密不可分的。一般而言,在1850年以前,人类所使用的主要燃料是木材。以美国为例,1850年的木材使用量占全部燃料消耗的90%<sup>[9]</sup>。随着社会的进步,煤开始作为替代木材的主要燃料。尽管英国人在13世纪就已开始了煤的交易,且用燃煤技术来加热钢铁,并采用烧煤锅炉技术来驱动蒸汽机车,从而诱发了工业革命;但在美国,直到1885年左右,煤才超过木材成为主要的能源<sup>[8]</sup>。20世纪20年代广泛采用的电灯照明技术,加速了煤作为火力发电厂主要能源的使用<sup>[8]</sup>。

与此同时,石油经过提炼后开始替代鲸油作为润滑和照明燃料。20世纪初期出现的汽车技术加速了燃油工业的发展,同时,在各种工业炉和锅炉中使用燃油作为燃料也越来越有吸引