



研究生教材

火花点火发动机的燃烧

蒋德明 夏来庆 袁大宏 王绍光

西安交通大学出版社

TK113.7

643

365938

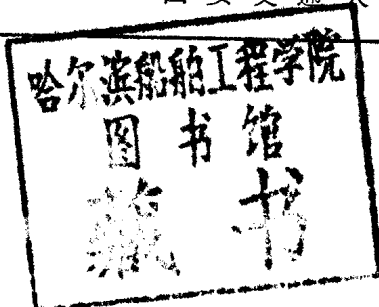
研 究 生 教 材

火花点火发动机的燃烧

蒋 德 明 夏 来 庆

袁 大 宏 王 绍 光

西 安 交 通 大 学 出 版 社



内 容 简 介

本书在总结国内、外最新研究成果的基础上,系统讲述火花点火发动机的基本燃烧理论和实用燃烧技术。全书共分15章,分别讲述燃烧过程的热力学分析、气缸内的湍流特性、火花点火、火焰传播与火焰结构、燃烧的循环变动和燃烧模型等。对近年来迅猛发展的低压汽油喷射和电子控制系统、新型点火系统以及各类燃烧室的设计方法均有详细论述,对汽油机的有害排放物的生成与控制以及燃烧研究的现代实验技术也作了专门的介绍。

本书主要供内燃机专业研究生作教材之用。也可供内燃机专业和相近专业高年级本科生和从事汽车、内燃机设计、制造、科研的技术人员参考。

(陕)新登字007号

火花点火发动机的燃烧

蒋德明 夏来庆

袁大宏 王绍光

责任编辑 孙文声

西安交通大学出版社出版

(邮政编码 710049)

西安交通大学出版社电脑排版

西安工业学院印刷厂印装

陕西省新华书店经销

开本850×1168 1/32 印张12.875 字数323千字

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数: 1——1500

ISBN7-5605-0495-7/TK·46 定价: 4.20元

研究生教材总序

研究生教育是为国家培养高层次人才的，它是我国高等教育的最高层次。研究生必须在本门学科中掌握坚实的基础理论和系统的专门知识，具有从事科学研究或担负专门技术工作的能力。这些要求具体体现在研究生的学位课程和学位论文中。

认真建设好研究生学位课程是搞好研究生教学的重要环节。为此，我们组织出版这套以公共课和一批新型学位课程为主的研究生教材，以满足当前研究生教学的需要。这套教材的作者都是多年从事教学、科研、具有丰富经验的教师。

这套教材首先着眼于研究生未来工作和高技术发展的需要，充分反映国内外最新学术动态，使研究生学习之后能迅速接近当前科技发展的前沿，以适应“四化”建设的要求；其次，也注意到应有的基本理论和基本内容，以保持学位课程内容的相对稳定性和系统性，并具有足够的深广度。

这套研究生教材虽然从提出选题、拟定大纲、组织编写到编辑出版，都经过了认真的调查论证和细致的工作，但毕竟是第一次出版这样高层次的系列教材，水平和经验都感不足，缺点和错误在所难免。希望通过反复的教学实践，广泛听取校内外专家学者和使用者的意见，使其不断改进和完善。

西安交通大学研究生院
西安交通大学出版社

前 言

轿车工业凝聚了现代科学技术的精华，它的利润率极高，而且能够组织大批量生产，它是整个国民经济的支柱产业，这一点已为近百年现代工业发展史所证明。“八五”期间我国将集中人力、物力和财力，各方面协同作战，发展轿车工业及其零部件行业。例如上海将在“八五”期间投资 50 亿元发展汽车工业，使之成为上海的第一支柱产业。

在绝大多数轿车上应用的是高性能的火花点火发动机，为了使我国及早具有独立自主地发展轿车生产的能力，从现在起就要大力开展对影响火花点火发动机性能的最重要方面——汽油机燃烧的研究。毋庸讳言，我国在汽油机燃烧方面的研究与世界先进水平还有相当大的差距，因此在写作本书时，除了反映作者自己近年来的研究成果外，更多的是总结国外最新研究成果，期望为我国年青的内燃机工作者，提供一本入门的教材，使他们在研究工作中能很快地触及学科的前沿问题。

本书由浙江大学内燃机教研室夏来庆教授编写第 9、第 13 和第 15 章，清华大学内燃机教研室袁大宏、王绍光副教授编写第 10 章，西安交通大学内燃机教研室蒋德明教授编写其余各章。本书主要供内燃机专业研究生作《火花点火发动机的燃烧》教材之用，也可供内燃机、汽车专业高年级本科生以及工厂和研究所技术人员参考。

本书作者要特别感谢美国 MIT Sloan 汽车工程实验室主任 J.B. Heywood 教授，他在 1990 年访问西安交通大学时赠送了许多技术资料，使本书的写作得以顺利完成。此外，作者还要感谢西安交通大学出版社孙文声同志出色的编辑工作，为提高本书质量所作的贡献。

本书疏漏之处在所难免，谨请使用本书的同志们批评指正。

蒋德明

1992 年 4 月

主要符号、角标和缩写

1. 主要符号

A	面积
a	声速
A / F	空燃比
A_p	活塞面积
B	气缸直径; 宽度; 筒并分枝剂
C	常数
c	比热容
Cap_{max}	相应最高燃烧压力的曲轴转角
C_m	活塞平均速度
c_p	定压比热容
$\tilde{c}_p$	摩尔定压比热容
c_v	定容比热容
D	直径; 气缸直径; 扩散系数
E	活化能; 能量
e	比内能
F / A	燃空比
G	上止点位置信号
g_e	燃油消耗率
H	焓
h	比焓; 传热系数
$\tilde{h}$	摩尔焓
H_u	低热值
I	光强; 辐射强度
K	反应速度常数
k	导热系数; 湍流动能; 定熵指数

L	连杆长度; 长度
l_l	积分长度尺度
l_K	Kolmogorov 长度尺度
l_M	微观尺度尺度
M	摩尔数; 质量
$\bar{M}$	分子量
m	质量
$\dot{m}$	质量流率
Ne	功率; 曲轴转速信号
n	多变指数; 曲轴转速; 摩尔数
p	压力
p_e	平均有效压力
p_i	平均指示压力
$p_{\max}$	最高燃烧压力
Q	传热量; 活性中间产物; 容积流量
$\dot{Q}$	传热率
Q_b	放热量
$\dot{q}$	瞬时热流量 (单位面积传热率; 单位流体质量传热率)
R	气体常数; 曲拐半径; 气缸半径; 自由基
$\bar{R}$	通用气体常数
r	半径
S	熵; 冲程
s	比熵
S_b	燃烧速率
S_L	层流燃烧速率
S_p	火焰传播速率
S_T	湍流燃烧速率
T	温度; 力矩

t	温度; 时间
U	内能; 流速
u	比内能; 流速
u'	湍流强度
u_p	活塞瞬时速度
u_T	特征湍流速度
V	体积; 速度
V_h	气缸工作容积
V_c	间隙容积
v	比容; 速度
$\overline{W}$	功; 分子量
X	摩尔数
x	质量分数; 摩尔比浓度 (摩尔分数)
x_r	残余废气百分比
x_b	已燃质量百分数
y_b	燃烧体积比
Y_i	质量分数
α	过量空气系数; 传热系数
β	角度
γ	比热容比
$\Delta\theta_b$	速燃角
$\Delta\theta_d$	火焰发展角
ε	压缩比; 湍流动能消散率; 辐射率
η_c	燃烧效率
η_e	有效效率
η_i	指示效率
η_m	机械效率
η_v	容积效率
θ	点火提前角

λ	相对空燃比; 波长; 热导率
μ	动力粘度
γ	运动粘度
ρ	密度
τ	特征时间; 时间; 着火落后角
τ_i	着火落后期
τ_1	积分时间尺度
τ_K	Kolmogorov 时间尺度
τ_m	微观时间尺度
φ	当量比
φ	曲轴转角
ψ	残余废气系数
ω	角速度
$\dot{\omega}$	源项; 反应速率

2. 足标

a	空气
b	已燃
c	冷却; 气缸; 燃烧
ch	化学
cr	间隙
e	平衡; 排气
f	火焰; 燃料; 摩擦; 终点
g	燃气
ht	传热
i	始点; 指示值
IMEP	平均指示压力
ign	点火
L	层流
m	平均; 倒拖

R	参考值
T	湍流
tot	总; 全
u	未燃
W	壁面

3. 缩写

ATDC(atdc)	上止点后
BTDC(btdc)	上止点前
CA	曲轴转角
CAFE	综合的平均燃料经济性
CARS	相干反斯托克斯拉曼散射法
CN	十六烷值
CoV	变动系数
cyl	气缸
ECU	电子控制单元
EFI	电子燃油喷射系统
EGR	废气再循环
EI	排放指标
EC, EO	排气门关; 排气门开
FSR	火焰速度比
HWA	热线风速计
IC, IO	进气门关; 进气门开
KLSA	相应敲缸极限的点火提前角
LDV	激光多普勒测速计
LFL	稀燃火焰生成极限
LML	失火极限
MP	最高燃烧压力
max	最大值
MBT	相应于最大扭矩的点火提前角

MFB	已燃质量百分比
min	最小值
PMP	最高燃烧压力的位置
Pe	贝克列数
ppm	百万分之一
RON	研究法辛烷值
Re	雷诺数
TCI	晶体管点火系统
TDC(TC)	上止点
vol	容积
WOT	节气门全开

目 录

前 言

主要符号、角标和缩写

第1章 工质物性参数的计算

§ 1-1 概述 (1)

§ 1-2 未燃气体组分的摩尔比浓度计算 (3)

§ 1-3 已燃气体组分的摩尔比浓度计算 (5)

第2章 燃烧过程的热力学分析

§ 2-1 求取已燃质量百分比的Rassweiler和Withrow多变指数法 (11)

§ 2-2 求取放热曲线的单区模型法 (16)

§ 2-3 求取放热曲线的双区模型法 (20)

§ 2-4 火花点火发动机工作过程计算的基本微分方程式 (26)

第3章 气缸内的湍流特性参数

§ 3-1 湍流特性参数的定义 (37)

§ 3-2 内燃机中湍流特性参数测量的特点 (42)

第4章 火花点火

§ 4-1 火花点火过程 (50)

§ 4-2 着火落后期 (59)

§ 4-3 火花点火模型 (61)

第5章 火焰传播与火焰结构

§ 5-1 概述 (70)

§ 5-2 火焰传播速率 S_p 和燃烧速率 S_b (73)

§ 5-3 火焰初期发展阶段的基本特性 (76)

§ 5-4 湍流火焰结构与火焰传播速率 (84)

第6章 燃烧的循环变动

§ 6-1	燃烧循环变动的定义和表征参数	(95)
§ 6-2	产生燃烧循环变动的原因	(99)
§ 6-3	燃烧循环变动的说明性模型	(103)
第7章 不正常燃烧 —— 敲缸与表面点火		
§ 7-1	概述	(107)
§ 7-2	敲缸强度和敲缸极限	(109)
§ 7-3	发动机敲缸的模拟 —— Shell 模型	(113)
第8章 燃烧模型		
§ 8-1	燃烧模型概述	(120)
§ 8-2	湍流火焰传播模型	(125)
§ 8-3	湍流涡燃烧模型	(133)
第9章 新型点火系统		
§ 9-1	新型点火系统的分类和介绍	(142)
§ 9-2	某些新型点火系统参数对发动机性能的影响 ...	(155)
第10章 低压汽油喷射和电子控制系统		
§ 10-1	概述	(163)
§ 10-2	发动机电子控制喷油系统的组成	(168)
§ 10-3	电子燃油喷射	(191)
§ 10-4	电子点火提前	(207)
第11章 火花点火发动机燃烧室设计		
§ 11-1	燃烧室的评价指标	(216)
§ 11-2	不同燃烧室设计对燃烧过程的影响	(224)
§ 11-3	采用不同燃烧室时发动机综合性能的比较 ...	(247)
第12章 火花点火发动机的稀薄混合气燃烧		
§ 12-1	有关稀燃的各种定义	(254)
§ 12-2	稀燃的优点、困难和所采用的主要 技术措施	(257)
§ 12-3	稀燃燃烧室调试举例	(265)
第13章 火花点火发动机的分层混合气燃烧		

§ 13-1	直接喷射式分层燃烧系统例1 —— Texaco 公司的TCCS	(272)
§ 13-2	直接喷射式分层燃烧系统例2 —— Ford 公司的PROCO	(283)
§ 13-3	分隔式燃烧室分层燃烧系统	(290)
§ 13-4	轴向分层燃烧系统	(296)
第14章 有害气体排放物的生成与控制		
§ 14-1	概述	(307)
§ 14-2	氧化氮的生成机理和影响因素	(310)
§ 14-3	一氧化碳的生成机理	(321)
§ 14-4	未燃碳氢化合物的生成机理和影响因素	(322)
§ 14-5	火花点火发动机排气的后处理	(334)
第15章 汽油机燃烧研究的实验技术		
§ 15-1	气缸内流速的测量	(347)
§ 15-2	火焰传播的测定	(362)
§ 15-3	燃气温度的测量	(376)

第1章 工质物性参数的计算

§ 1-1 概述

汽油机燃烧的物理化学过程极为复杂，至今尚未完全研究清楚。从燃料和空气组成的可燃混合气，经燃烧反应到形成最终燃烧产物的全过程中，可能出现上百种中间产物，并且中间产物的组成、生成数量以及存在时间等又与燃料的种类、当量比以及当时当地的气缸压力、温度等因素有关，各种中间产物之间也可以诱发多种化学反应。但是在进行工质物性参数计算时，既没有必要，也不可能全部计及上述中间产物的影响。为了使工质物性计算和燃烧模拟计算协调起来，不使工质物性参数计算过分复杂，一般均作以下假定：

(1) 燃料由 C, H, O 三种元素组成，记为 $C_{car}H_{hyd}O_{oxy}$ 。

(2) 空气为 O_2 和 N_2 两种气体的混合气。

(3) 在作燃烧气体的化学平衡计算时，选取最有代表性的 11 种燃烧产物，对其间可以发生的最有代表性的 7 种化学反应进行计算。当然也可以作其它的选择，使计算更加复杂或比较简单，对未燃气体物性参数的计算，可采取更为简易的形式。

(4) 把混合气体的各组分为理想气体，它们的内能、焓、比热容等均为温度的单值函数，并满足以下关系式：纯工质气体的摩尔比热容 $\bar{c}_p$ 为

令 $\theta = T / 1\,000$ ，当 $T \geq 1\,200\text{K}$ 时

$$\bar{c}_p = a_1 + a_2 / \theta + a_3 / \theta^2 + a_4 / \theta^3 + a_5 / \theta^4 \quad (1-1)$$

当 $T < 1\,200\text{K}$ 时

$$\bar{c}_p = a_6 + a_7\theta + a_8\theta^2 + a_9\theta^3 + a_{10}\theta^4 \quad (1-2)$$

$$\text{摩尔焓为 } \bar{h} = \int_{1\,200}^T \bar{c}_p dT + \bar{h}_{1\,200}$$

$$= 1\,000 \int_{1.2}^{\theta} \bar{c}_p d\theta + \bar{h}_{1\,200} \quad (1-3)$$

当 $T \geq 1\,200\text{K}$ 时

$$\begin{aligned} \bar{h} = & a_{11} + 1\,000(a_1\theta + a_2\ln\theta - a_3/\theta \\ & - \frac{1}{2}a_4/\theta^2 - \frac{1}{3}a_5/\theta^3) \end{aligned} \quad (1-4)$$

当 $T < 1\,200\text{K}$ 时

$$\begin{aligned} \bar{h} = & a_{12} + 1\,000(a_6\theta + \frac{1}{2}a_7\theta^2 + \frac{1}{3}a_8\theta^3 \\ & + \frac{1}{4}a_9\theta^4 + \frac{1}{5}a_{10}\theta^5) \end{aligned} \quad (1-5)$$

上述式中的常数 $a_1 \sim a_{12}$ 可由参考文献〔1〕中查到。
这样混合气的摩尔比热

$$\bar{c}_{pj} = \sum \bar{c}_{pij} x_i \quad (1-6)$$

$$\text{式中 } x_i \text{ 为 } i \text{ 组分气体的摩尔比浓度; } x_i = M_i / \sum M_i \quad (1-7)$$

足标 $j = b, u$ 分别对应已燃态和未燃态, M 为摩尔数。

用类似的算法可求出混合气的摩尔焓 $\bar{h}_i$ 和分子量 $\bar{M}_i$ 。

这样

$$\text{单位质量比热容 } C_{pj} = \bar{c}_{pj} / \bar{M}_j \quad (1-8)$$

$$\text{单位质量焓 } h_i = \bar{h}_i / \bar{M}_j \quad (1-9)$$

混合气的气体常数

$$R_j = \bar{R} / \bar{M}_j \quad (1-10)$$

式中 $\bar{R}$ 为通用气体常数。

因此整个工质物性参数计算的关键在于求出混合气中组分气