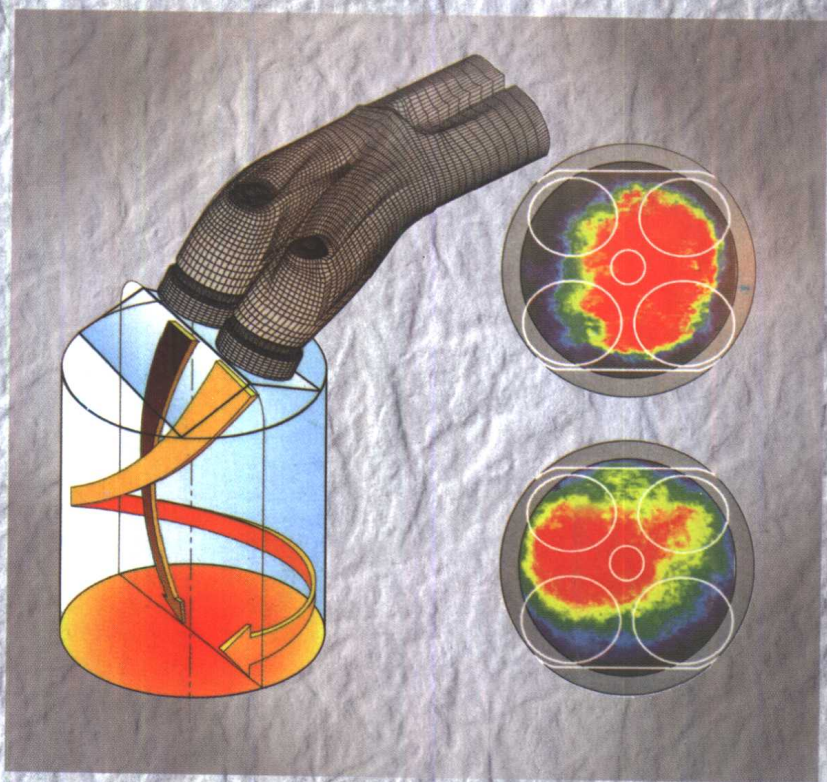


内燃机燃烧 与排放学

蒋德明 著



西安交通大学出版社

责任编辑：李 斌 李志丹 封面设计：阎 亮

ISBN 7-5605-1388-3



9 787560 513881 >



ISBN7-5605-1388-3/TK·71

定价：52.00 元

内燃机燃烧与排放学

蒋德明 著

西安交通大学出版社
·西安·

内容简介

本书系统讲述内燃机燃烧与排放的基本理论、计算方法和实用技术。全书共分 13 章,分别讲述燃料,燃烧热力学,化学动力学,气缸内气体流动,火焰,火花点火发动机的燃烧、燃烧模型、不正常燃烧,燃油雾化和油束模型,直喷式柴油机的燃烧和燃烧模型,有害排放物的生成与控制,火花点火直喷式汽油机的混合气形成和燃烧控制技术以及直喷式柴油机燃烧技术的新发展。

本书主要供汽车和热力发动机专业的博士、硕士研究生以及从事汽车、内燃机燃烧和排放研究的高级技术人员和高等学校教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机燃烧与排放学/蒋德明著. —西安:西安交通大学出版社,2001.7

ISBN 7-5605-1388-3

I. 内… II. 蒋… III. ①内燃机—燃烧学②内燃机—排气
IV. TK4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001) 第 10628 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

长安县第二印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:21.875 插页:2 字数:561 千字

2001 年 7 月第 1 版 2001 年 7 月第 1 次印刷

印数:0 001~1 000 定价:52.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874

前 言

改革开放以来,我国汽车、摩托车工业以前所未有的速度向前发展,摩托车的年产量已居世界第一,轿车正快速进入中国人的家庭,全世界六大汽车厂均已入驻我国,展示出在中国汽车市场上进行全面竞争的势态,加上我国即将成为世界贸易组织(WTO)的正式成员,我国的汽车和摩托车工业面临着巨大的挑战和机遇,它迫切要求迅速提高自主开发能力,为我国汽车工业走向世界、为保护环境做出贡献。

值得庆幸的是近年来内燃机技术已取得引人注目的突破性进展,其标志性成果是缸内直喷式电控汽油机和新一代电控高压直喷式柴油机研制成功并投入市场,非石油基含氧代用燃料的应用显示出良好前景,一些符合“部分零排放车辆(PZEV)”和“超超低排放车辆(SULEV)”规定的汽车已经问世,为此人们对已有上百年历史、似乎已发展到顶点的内燃机还有这么大的改进潜力,即使对最了解这种技术的专家有时也感到意外。因此可以认为,目前内燃机汽车在和电动汽车、混合动力汽车(包括燃料电池混合动力车在内)、燃气轮机汽车的竞争中已处于明显优势地位,未来无污染汽车的动力肯定是新一代内燃发动机。以上成绩的取得主要归功于对内燃机燃烧与排放的持续而深入的研究和以计算机控制为核心的电子技术的成功应用。

《内燃机燃烧与排放学》一书就是在上述的经济和技术大背景下写作的。作者希望本书不仅有较深厚的理论基础并结合内燃机技术发展的实际需要,而且能全景式地反映当代内燃机燃烧与排

放研究的最新成果,能为我国年青的内燃机工作者提供一本有价值的参考书,使他们在研究中很快地触及学科的前沿问题并具备足够的基础知识。

本书相当部分内容是作者在西安交通大学内燃机研究所该领域 20 多年工作成果的总结,作者感谢我的研究生冯骅、毕小平、王子延、黄佐华、李兴虎等教授,沈惠贤、武得钰、刘传李、李国伟、马凡华等副教授以及刘亮、杨迪、阎小俊等博士的出色工作,感谢现在国外工作的陈长佑、杨嘉林、韩志玉、杨笑风博士为作者提供了大量最新出版的参考资料,同时也要感谢与我长期合作共事的周龙保教授,其中 11.4.5 节和 13.5 节中的内容是他指导的研究生的工作。此外,作者还要感谢西安交通大学出版社总编辑杨鸿森教授和编辑李斌教授、李志丹副教授对本书出版的大力支持和帮助。

由于本书涉及面广,作者深感自己的理论知识和实践经验之不足,错误和不完善的地方肯定不少,盼读者不吝指正。

作者谨以本书的出版纪念史绍熙院士逝世一周年。

蒋德明

2001 年元月于西安交通大学
汽车工程系



蒋德明，1934年生，1956年毕业于交通大学内燃机专业。现任西安交通大学汽车工程系教授，国务院学位委员会第四届学科评议组动力机械和工程热物理学组召集人之一，天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室学术委员会主席，清华大学汽车安全与节能国家重点实验室学术委员会副主席，全国动力工程专业教学指导委员会主席，国际内燃机会议（CIMAC）常设委员会委员，乌克兰共和国工程院院士，中国内燃机学会副理事长兼学术编辑委员会主任。

蒋德明的业务专长为内燃机燃烧，排放控制，涡轮增压和气体流动。出版有《内燃机原理》《内燃机的涡轮增压》《内燃机中的气体流动》和《火花点火发动机燃烧》等著作，在国内外学术刊物上发表论文150余篇。

目 录

前 言

主要符号表

第 1 章 燃料

- 1.1 气体燃料····· (10)
- 1.2 液体燃料····· (12)
- 参考文献 ····· (26)

第 2 章 燃烧热力学

- 2.1 基本定义····· (27)
- 2.2 化学平衡和平衡常数····· (31)
- 2.3 燃烧气体的化学平衡分析法····· (35)
- 2.4 元素势能法····· (43)
- 2.5 用废气分析法确定空燃比····· (57)
- 参考文献 ····· (60)

第 3 章 化学动力学

- 3.1 基元反应····· (63)
- 3.2 反应机理的特性····· (76)
- 3.3 反应机理的敏感性分析····· (81)
- 3.4 简化反应机理····· (85)
- 3.5 全局反应····· (90)
- 3.6 固体表面反应机理····· (94)

3.7 根的链锁反应·····	(96)
参考文献·····	(99)

第4章 气缸内的气体流动

4.1 进气涡流·····	(101)
4.2 挤流·····	(132)
4.3 滚流·····	(135)
4.4 气缸内的湍流·····	(140)
4.5 内燃机缸内流动的多维数值模拟·····	(154)
参考文献·····	(163)

第5章 火焰

5.1 预混层流火焰的有关定义和实验数据·····	(166)
5.2 预混层流火焰理论·····	(176)
5.3 甲烷-空气-稀释气的层流燃烧特性·····	(186)
5.4 计算预混层流燃烧速度的简化方法·····	(199)
5.5 预混湍流火焰·····	(202)
5.6 火焰激冷和熄火·····	(214)
5.7 扩散火焰·····	(225)
参考文献·····	(237)

第6章 火花点火发动机的燃烧

6.1 概述·····	(240)
6.2 燃烧率的热力学分析·····	(245)
6.3 火花点火·····	(262)
6.4 火核生成与初期发展·····	(282)
6.5 火花点火发动机燃烧的循环变动·····	(294)
6.6 湍流特征参数对预混燃烧的影响·····	(317)
6.7 火花点火发动机燃烧室设计·····	(326)

参考文献	(333)
------	-------

第7章 火花点火发动机的燃烧模型

7.1 燃烧模型概述	(336)
7.2 火花点火发动机工作过程的基本微分方程式	(342)
7.3 湍流卷吸燃烧模型(Turbulent entrainment combustion model)	(350)
7.4 湍流卷吸燃烧模型的改进	(359)
7.5 湍流涡燃烧模型	(365)
7.6 半岛-分形几何学燃烧模型	(373)
7.7 计算火焰与燃烧室之间几何关系的新方法	(375)
参考文献	(392)

第8章 火花点火发动机的不正常燃烧——敲缸与表面点火

8.1 概述	(395)
8.2 敲缸的化学反应动力学基础	(397)
8.3 敲缸强度与敲缸极限	(405)
8.4 发动机敲缸的现象学模型	(410)
8.5 shell 模型	(411)
8.6 燃料与敲缸	(418)
参考文献	(421)

第9章 燃油雾化与油束特性

9.1 燃油雾化	(423)
9.2 油束模型	(428)
9.3 表征柴油机油束特性的经验公式	(440)
9.4 单油滴的蒸发过程	(444)
9.5 油束碰壁	(448)
参考文献	(451)

第 10 章 直喷式柴油机的燃烧和燃烧模型

- 10.1 着火滞后(ignition delay)期 (454)
- 10.2 放热率的热力学分析..... (459)
- 10.3 直喷式柴油机的二维多区现象学燃烧模型..... (472)
- 10.4 直喷式柴油机简化的三维燃烧模型..... (479)
- 10.5 湍流燃烧模型..... (493)
- 10.6 直喷式柴油机的新概念燃烧模型..... (502)
- 参考文献..... (509)

第 11 章 有害排放物的生成与控制

- 11.1 概述..... (512)
- 11.2 氮氧化物(Nitrogen Oxides)的生成机理和影响
因素..... (521)
- 11.3 一氧化碳的生成机理..... (538)
- 11.4 未燃碳氢化合物的生成机理和影响因素..... (539)
- 11.5 微粒的生成机理和影响因素..... (566)
- 11.6 涡轮增压中冷直喷式柴油机的排放趋势的分析
..... (575)
- 11.7 火花点火发动机的排气后处理..... (580)
- 11.8 压缩点火发动机的排气后处理..... (599)
- 参考文献..... (602)

第 12 章 火花点火直喷式汽油机的混合气形成和燃烧控制技术

- 12.1 概述..... (605)
- 12.2 GDI 发动机的关键技术 (608)
- 12.3 经济性与排放..... (619)
- 12.4 应用均质混合气的缸内直喷式火花点火发动机
..... (626)

12.5 展望·····	(628)
参考文献·····	(629)

第 13 章 高速重载直喷式柴油机燃烧技术的新发展

13.1 概述·····	(631)
13.2 燃烧对 PM 和 NO _x 生成的影响 ·····	(633)
13.3 改善柴油机经济性和排放的技术措施·····	(638)
13.4 新燃烧方式的探索·····	(655)
13.5 二甲醚(DME)发动机的燃烧和排放特性 ·····	(669)
参考文献·····	(680)

附录

- A 常用单位换算简表
- B 燃料与空气的物性参数
- 参考文献

主要符号表

1. 英文字母

a 声速, m/s

A 面积, mm^2

A/F 空燃比

A_p 活塞面积, mm^2

$b(B)$ 宽度, mm; 筒并分枝剂

c 物质的量浓度, kmol/m^3 ; 比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

c_p 比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

c_{pm} 摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

c_v 比定容热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

C 常数

$C_a p_{\max}$ 相应最高燃烧压力的曲轴转角

C_m 活塞平均速度, m/s

$d(D)$ 直径, mm; 气缸直径, mm

D_m 质扩散系数, m^2/s

e 比热力学能, kJ/kg

E 活化能, kJ/kg ; 能量, kJ

$f = \frac{F}{A}$ 燃空比

f_r 残余废气系数

G Gibbs 函数, kJ

g_e 燃油消耗率, $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$

h 比焓, kJ/kg; 表面传热系数, W/(m²·K)
 h_m 摩尔比焓, kJ/mol
 H 焓, kJ
 H_u 低热值, kJ/kg
 k 湍流动能, kJ/m³; 反应速率常数; 定熵指数
 K 化学平衡常数
 $l(L)$ 长度, mm; 连杆长度, mm
 $l_I(L_I, L)$ 积分长度尺度, mm
 $l_K(\eta)$ Kolmogorov 长度尺度, mm
 $l_m(\lambda)$ Taylor 微观长度尺度, mm
 $m(M)$ 质量, kg
 M_i 组分 i 的摩尔质量(相对分子质量), kg/kmol
 M_{eq} 平均摩尔质量(折合摩尔质量)
 n 多变指数; 曲轴转速, r/min, r/s; 物质的量, mol
 p 压力, MPa, kPa, Pa
 p_e 平均有效压力
 p_i 平均指示压力
 $p_{max}(p_z)$ 最高燃烧压力
 P 功率, kW
 q 热流量(单位面积热流量或热流密度)
 $q_m(\dot{m})$ 质量流量, kg/s
 $q_V(\dot{V})$ 体积流量, m³/s
 Q 热量, kJ; 活性中间产物
 \dot{Q} 热流量, W
 Q_b 燃烧放热量, kJ
 r 半径, mm
 R 曲拐半径, mm; 气缸半径; 自由基; 摩尔气体常数, J/(mol·K)

- R_B 波许(Bosch)烟度
 R_g 气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 s 比熵, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 S 冲程, mm ; 熵, kJ/K
 S_b 燃烧速率, m/s
 S_L 层流燃烧速率, m/s , cm/s
 S_T 湍流燃烧速率, m/s , cm/s
 t 温度, $^{\circ}\text{C}$; 时间, s
 T 热力学温度, K ; 力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 u 流速, m/s ; 比热力学能, kJ/kg
 u' 湍流强度, m/s
 u_P 活塞瞬时速度, m/s
 u_T 特征湍流速度, m/s
 U 热力学能, kJ ; 流速, m/s
 v 比体积, m^3/kg
 V 体积, cm^3 , m^3
 V_c 压缩间隙容积
 V_h 气缸工作容积, $\text{dm}^3(\text{l})$
 w_b 已燃质量分数
 $w_i = \frac{m_i}{\sum m_i}$ 质量分数
 W 膨胀功, J
 $x_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$ 摩尔分数

2. 希腊字母

- α 热扩散率, m^2/s
 β 角度

γ 比热比(质量热容比)
 δ_L 层流火焰厚度
 $\Delta\theta_b$ 速燃角
 $\Delta\theta_d$ 火焰发展角
 ϵ 压缩比;湍流动能耗散率, kJ/s
 η 动力粘度, Pa·s
 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 (或 φ) 曲轴转角, °A
 θ_{ig} 点火提前角, 着火滞后角
 θ_{inj} 喷油提前角
 λ 过量空气系数; 相对空燃比; 波长, mm;
 热导率, W/(m·K)
 ν 运动粘度, m²/s
 ρ 密度, kg/m³
 σ 表面张力, N/m
 τ_i 着火滞后期, ms
 τ_I 积分时间尺度
 τ_K Kolmogorov 时间尺度
 τ_m Taylor 时间微观尺度
 Φ 当量比
 φ 体积分数
 φ_b 已燃体积分数
 ω 角速度, rad/s; 反应速率, kmol/(m³·s)
 $\dot{\omega}$ 源项

[] 浓度表示法

3. 角标

a 空气
b 已燃
c 冷却;气缸;燃烧;压缩
ch 化学的
cr 间隙
cyl 气缸内
e 平衡;排气;有效值
f 火焰;燃料;摩擦;终点
g 燃气
ht 传热
i 始点;指示值
ig 点火
IMEP 平均指示压力
j 喷射
L 层流
m 平均;倒拖
R 参考值
Stoich 化学当量值
tot 总;全部
u 未燃
Wall 壁面

4. 缩写

ATDC(atdc) 上止点后
BTDC(btdc) 上止点前
BSFC 有效燃油消耗率(比油耗),g/(kW·h)