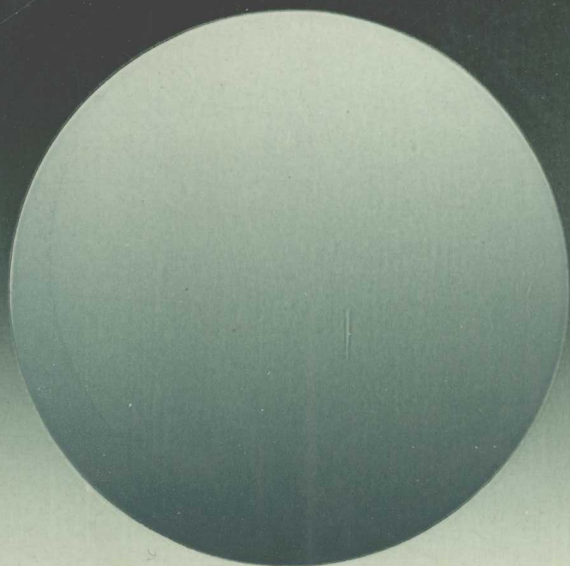


● 研 究 生 用 书 ● THEORY OF COMBUSTION
FOR INTERNAL
COMBUSTION ENGINES
华中理工大学出版社



金国栋

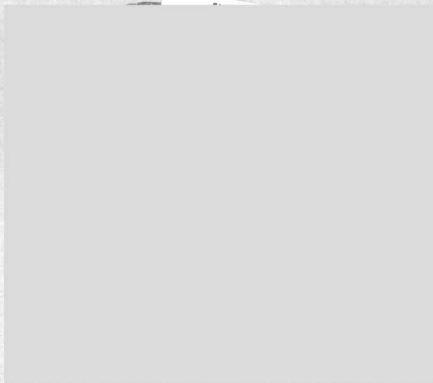
内 燃 机 燃 烧 学

K713

内燃机燃烧学

金国栋

华中理工大学出版社



· 研究生用书 ·

内燃机燃烧学

金国栋

责任编辑 叶见欣

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：8.5 插页：2 字数：203 000

1991年12月第1版 1991年12月第1印刷

印数：1—1 000

ISBN 7-5609-0607-9/TK·24

定价：2.52元

(鄂)新登字第10号

内 容 简 介

本书系统地阐述了为内燃机燃烧研究所必需的基本理论和最新发展,其中有些出自作者本人的研究成果.全书共十二章,包括燃烧的热力学分析、液滴蒸发、着火、火焰传播、扩散火焰、喷雾燃烧、燃烧对环境的污染和燃烧数学模型等.内容新颖,条理清晰,易于应用.可供内燃机专业高年级学生和研究生参考,也可供从事内燃机和其它热能动力的设计、研究和教学人员参考.

Abstract

In this work, the basic theory and latest development relevant to combustion research of I. C. Engines are systematically described, some of which come from the research achievement obtained by the author. The work consists of twelve chapters including thermodynamic analyses of combustion, droplet vaporization, ignition, flame propagation, diffusion flame, combustion initiated pollution and combustion modelling, etc. It features up-to-date and well organized materials and practicability. It can be used as a textbook for university senior students and graduates of I. C. Engine speciality. It is also suitable for designers, researchers and teachers working in I. C. Engine and other thermal power areas as a reference book.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设.各门课程必须有高质量的教材,才能使学生学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础.

我校各专业自1978年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高、教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书.有的教材和教学用书已正式出版发行,更多的则采用讲义的形式逐年印发.这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求.因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量.

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版.编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的

基础理论和专门知识；学位课教材还应接触该学科的发展前沿，反映国内外的最新研究成果，以适应目前科学技术知识更新很快的形势；学术专著则应充分反映作者的科研硕果和学术水平，阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上，应条理清楚，论证严谨，文字简练，符合人们的认识规律。总之，要力求使“研究生用书”具备科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些，但由于研究生的培养工作为时尚短，水平和经验都不够，其中缺点、错误在所难免，尚望校内外专家学者及读者不吝指教，我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陈珽

前 言

内燃机是量大面广的动力机械。内燃机燃烧的优劣对节约能源、净化环境意义很大。为了使内燃机专业的研究生认识和掌握内燃机中有关燃烧问题的基本理论和分析方法，许多高等学校都开设了内燃机燃烧学这一学位课程。过去常借用通用的燃烧学著作进行这门课程的教学，但通用燃烧学往往偏重于连续燃烧系统，在基本内容的组织和理论应用的结合方面不大适合内燃机专业的学生。而一些专门论述内燃机燃烧的著作又过于偏重于具体燃烧室结构和整机性能的定性分析上，对基本理论的阐述不深，体系上也不够完整。因此，作者在1984年编写了一本研究生教学用的英文讲义《Combustion Theory and Its Application in I. C. Engines》，目的在于提供一本既有基本理论，又有具体应用，少而精、学而用、内容新的内燃机燃烧学基础教材。几年来，根据作者从事内燃机燃烧科研和教学工作的心得和体会，对原讲义增补了许多新的内容。不少同事和学生鼓励我以中文重新编写后正式出版，这就是现在呈现在读者面前的《内燃机燃烧学》。

程宏教授和蔡祖安教授是作者进行内燃机燃烧研究的启蒙老师，借本书出版的机会，作者感谢这二位师长对我始终的关心和帮助。作者还要感谢华中理工大学研究生院对本书出版所给予的支持。

内燃机燃烧过程极为复杂。在不少方面，如湍流燃烧、燃烧污染物生成机理等尚未形成完全成熟的理论。由于篇幅有限，本书不能介绍纷呈的各种学术主张，这样有时就难免失之偏颇。此外，由于作者水平所限，也会有错漏之处，恳请读者不吝指正。

作者

1991年3月于武汉

THE FIRST BATCH OF BOOKS FOR
GRADUATE STUDENTS

“研究生用书”书目(第一批)

书 名	作 者
机械工程测试·信息·信号分析 Measurement, Information and Signal Analysis in Mechanical Engineering	卢文祥 Lu Wenxiang 杜润生 Du Runsheng
粘弹性力学 Theory of Viscoelasticity	杨挺青 Yang Tingqing
网络分析与综合原理 Network Analysis and Synthesis Theory	曾凡刊 Zeng Fankan
现代数字设计 Modern Digital Design	陈耀奎 Chen Yaokui
随机过程 Stochastic Process	申鼎煊 Sheng Dingxuan
应用泛函简明教程 A Course in Applied Functional Analysis	李大华 Li Dahua
协同学原理和应用 Principles and Application of synergetics	吴大进 Wu Dajin
现代中央银行导论 An Introduction to Modern Central Bank	黄芳泉 Huang Fangquan
高级英语阅读系列文选(I) Advanced English Reading Series(Book 1)	朱月珍 Zhu Yuezhen

THE SECOND BATCH OF BOOKS FOR
GRADUATE STUDENTS

“研究生用书”书目
(第二批)

书 名	作 者
高级英语阅读系列文选 (I) Advanced English Reading Series (Book 2)	樊长荣 Fan Changrong
时间序列分析与工程应用 (上)(下) Time Series Analysis in Engineering Application	杨叔子 Yang Shuzi 吴 雅 Wu Ya
实用偏微分方程数值解法 Numerical Solution of Practical Partial Differential Equations	徐长发 Xu Changfa
遥感图象数字处理 Digital Processing of Remotely Sensed Images	万发贯 Wan Faguan 柳健 文灏 Liu Jian Wen Hao
线性多变量系统 Linear Multiple Variable Systems	庞富胜 Pang Fusheng
内燃机燃烧学 Theory of Combustion for Internal Combustion Engines	金国栋 Jin Guodong
控制系统 CAD 基础 CAD Basics of Control Systems	罗宗虔 Luo Zongqian

THE THIRD BATCH OF BOOKS FOR GRADUATE STUDENTS

“研究生用书”书目(第三批)

书 名	作 者
企业管理专家模拟系统 An Expert Simulation System for Enterprise Management	黎志成 等 Li Zhicheng et al.
数字语音处理 Digital Speech Processing	姚天任 Yao Tianren
高等内燃机教程 An Advanced Course on Internal Combustion Engines	刘永长 Liu Yongchang
液压故障分析与状态监测 Fault Analysis and Condition Monitoring for Hydraulic Components and Systems	李壮云 Li Zhuangyun
数据库设计与分析 Database Design and Analysis	刘云生 Liu Yunsheng
辩证法史论稿 On Dialectics History	阳作华 Yang Zuohua 张 峰 Zhang Feng
大型复杂结构优化设计 Optimum Design Calculation for Large Complex Structures	宋天霞 等 Song Tianxia et al.
自适应光学 Adaptive Optics	叶嘉雄 Ye Jiaxiong 余永林 Yu Yonglin

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 燃烧与人类文明的关系	(1)
第二节 燃烧学的多学科性	(2)
第三节 内燃机燃烧学的内容概要	(7)
第二章 燃烧的热力学分析	(10)
第一节 反应热和生成热	(10)
第二节 化学平衡	(14)
第三节 C/H/O/N系统的化学平衡	(17)
第四节 化学平衡的稳定性	(22)
第五节 绝热火焰温度	(23)
第六节 内燃机燃烧的热力学分析	(26)
第三章 化学反应动力学基础	(32)
第一节 引言	(32)
第二节 反应类型和基本反应步骤	(34)
第三节 气相碰撞控制的双分子反应理论	(38)
第四节 反应速率计算的基本方法	(40)
第五节 对反应速率的进一步讨论	(43)
第四章 分子扩散和湍流扩散	(46)
第一节 基本定义	(46)
第二节 费克定律和质量扩散系数	(48)

第三节	斯蒂芬流和斯蒂芬定律	(51)
第四节	传质微分方程	(53)
第五节	湍流扩散	(56)
第五章	液滴蒸发	(62)
第一节	液滴蒸发的一般特征	(62)
第二节	液滴蒸发模型假设条件的讨论	(65)
第三节	无对流情况下的液滴蒸发分析	(70)
第四节	内燃机中液滴蒸发的讨论	(74)
第六章	着火	(82)
第一节	碳氢燃料氧化的一般特点	(82)
第二节	热着火理论	(86)
第三节	柴油机中的着火迟延	(91)
第四节	火花点火	(100)
第五节	汽油机的点火要求	(106)
第七章	火焰传播	(112)
第一节	火焰类型和火焰传播现象	(112)
第二节	层流火焰传播	(113)
第三节	湍流火焰传播	(127)
第四节	汽油机中火焰传播的特点	(130)
第八章	爆震	(136)
第一节	火焰向爆震的转变	(136)
第二节	爆震速度和爆震波结构	(139)
第三节	汽油机的不正常燃烧现象	(142)
第九章	扩散火焰	(145)

第一节	气相射流火焰·····	(145)
第二节	液滴燃烧·····	(160)
第三节	表面燃烧·····	(165)
第十章	喷雾燃烧·····	(167)
第一节	雾化与雾注结构·····	(167)
第二节	雾注与空气的相互作用·····	(176)
第三节	雾注的蒸发与燃烧·····	(184)
第四节	柴油机喷雾燃烧过程分析·····	(188)
第十一章	燃烧对环境的污染·····	(195)
第一节	引言·····	(195)
第二节	NO ₂ 生成机理·····	(197)
第三节	未燃烃生成机理·····	(202)
第四节	CO生成机理·····	(205)
第五节	微粒生成机理·····	(207)
第六节	汽油机排放物生成特征·····	(216)
第七节	柴油机排放物生成特征·····	(219)
第八节	降低内燃机有害排放物的途径·····	(224)
第十二章	燃烧模型·····	(228)
第一节	燃烧模型的分类与发展·····	(228)
第二节	比拟法·····	(230)
第三节	内燃机的零维燃烧模型·····	(235)
第四节	内燃机的准维燃烧模型·····	(239)
第五节	内燃机的多维燃烧模型·····	(246)
参考文献	·····	(255)

第一章 绪 论

第一节 燃烧与人类文明的关系

早在百万年前，人类就知道利用火。火的利用，就某种意义上讲，开创了人类的文明史。约3万年前，人类懂得了人工取火。公元850年，中国人发明了火药，这可说是燃烧应用的一个重大突破。但对燃烧现象形成较系统的理性认识却是19世纪的事。19世纪末，马拉特（Mallard）和勒查脱利（Lechatelier）创立了火焰传播理论；1900年，查泊曼（Chapman）和朱盖特（Jouquet）区别了正常火焰和爆震；1928年，成立了世界上第一个燃烧学会；1938年，有了第一本燃烧学教科书。燃烧理论研究的发展使火箭、燃气轮机、喷气发动机等燃烧动力装置继内燃机后在工业上得到应用。第二次世界大战后，燃烧理论的研究和应用得到了更为迅速的发展，成为人类文明发展的重要推动力。

众所周知，能源、交通和环境保护已成为当今世界迫切需要解决的三大问题。然而，它们又都与燃烧有着密切的关系。以能源为例，尽管近年来各国越来越重视原子能、太阳能、水能和风能的利用，但由燃料燃烧获取能量的方式仍占主导地位。因此，解决能源短缺的任务主要还是落在燃烧装置设计和研究人员的肩上。解决能源问题既包括开源，又包括节流。开源是指对劣质燃料、代用燃料等的有效利用；节流是通过提高燃烧效率、装置热效率，以及废热利用等降低燃料消耗率。

再以环境保护为例。污染是人类文明的大敌，而大气污染则是环境污染的重要组成部分。大气污染的主要来源首推燃烧化石燃料的动力装置，其中尤以运输动力装置为最甚。为保护人类文明，各国纷纷制定法规，限制燃烧污染物的排放量。这种限制在客观上推动了燃烧的研究，现在，对包括污染物生成机理在内的燃烧机理比过去任何时候有了更深刻的认识，并发展了各种低污染燃烧系统。

由于内燃机在动力装置中无论在数量上还是总功率上都占相当大的比例，因此，内燃机在节能与净化上的每一进步都具有重大的经济效益和社会效益。可以毫不夸张地说，内燃机燃烧研究对保护和发展人类文明有着不可低估的重要意义。

人们一方面要利用燃烧为人类服务，另一方面要防止燃烧造成灾害性事故。所以，灭火研究也是燃烧学的内容之一。

第二节 燃烧学的多学科性

描述燃烧现象的理论诞生得这么晚，与它具有多学科性不无关系。究竟什么叫燃烧，至今仍难下一个精确定义。粗略地讲，凡发生于气相的通过处于基态和电子激发态的自由基的链而进行的快速放热反应称为燃烧。对这一定义稍作分析可看出，研究燃烧必然与流体力学、工程热力学、传热学、传质学和化学反应动力学等发生关系。下面举例说明燃烧学与这些学科间的密切联系。

一、燃烧学与流体力学

燃烧室内的气体流动，无论是大尺度的宏观平均流动，还是小尺度或微尺度的湍流流动，都对燃烧过程有重要影响。由于燃料除气相的外，还可能是液相的或固相的，因此，对燃烧室内物质流动的研究，除涉及气相流动外，有时要涉及到多相流动。实践证明，燃烧技术的进步在相当程度上依赖于流体力学的发展。例

如，只有在激波理论的基础上，才能建立爆震燃烧的理论；只有在计算流体力学的基础上，才能发展出今天的计算燃烧学。实际上，燃烧学与流体力学的密切联系已使燃烧空气动力学成为燃烧学的一个重要分支。

在实际燃烧装置中，往往只有把流场研究清楚了，才能把有关的燃烧现象解释清楚。图 1-1 所示的钝体，所以能够稳焰，是因为钝体使流动的气体在其下游区产生了一个尾迹区。该尾迹区成为热气体的回流区，从而保证了火焰稳定所需的能量。

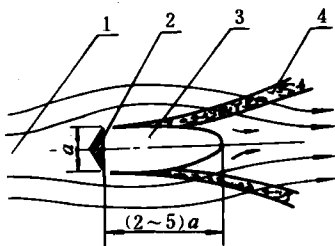


图 1-1 钝体稳焰原理

- 1—新鲜可燃混合气流；2—钝体；
3—燃气回流区；4—火焰锋面

图 1-2 所示的钝体，所以能够稳焰，是因为钝体使流动的气体在其下游区产生了一个尾迹区。该尾迹区成为热气体的回流区，从而保证了火焰稳定所需的能量。



图 1-2 泼金斯新型四方形燃烧室

当进气旋流在压缩过程中衰减时，在“口袋”中形成丰富的微尺度湍流，有利于燃料与空气在该处迅速和充分地混合，从而改善了发动机的性能和排放。

图 1-2 所示的是英国泼金斯发动机公司发展的一种新型四方形燃烧室。这种用于直喷式柴油机的燃烧室设在活塞顶部，从顶部方向看去，燃烧腔几乎

图 1-3 所示的是能在稀薄混合气条件下迅速燃烧的汽油机稀燃系统。该燃烧室分主燃烧室和内插式涡流室

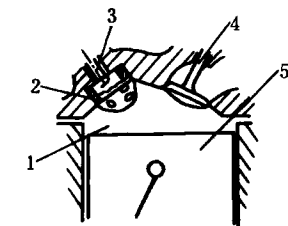


图 1-3 一种汽油机稀燃系统

- 1—主燃烧室；2—涡流室；3—火花塞；4—进气门；5—活塞