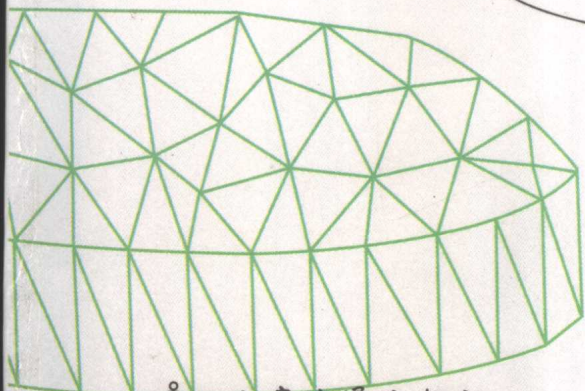
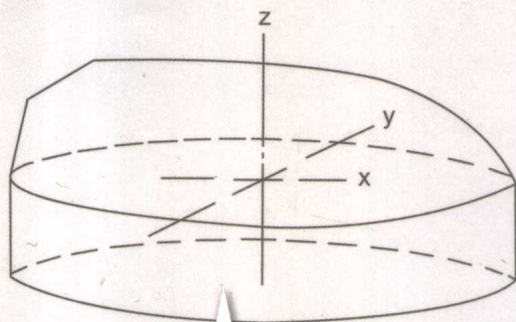
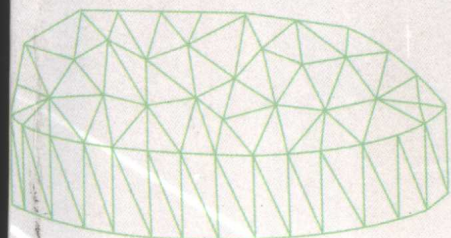


汽油机多区燃烧模型 的建立及应用研究

李岳林 著



人民交通出版社
China Communications Press

Qiyouji Duoqu Ranshao Moxing de
Jianli ji Yingyong Yanjiu

汽油机多区燃烧模型的 建立及应用研究

李岳林 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书的主要内容有:绪论、汽油机多区燃烧模型、燃烧室几何形状的处理、气缸压力和火焰传播的测定、计算及结果分析、分形在准维燃烧模型中的应用和烃自燃模型在汽油机爆震预测中的应用等知识,可供汽车工程技术人员、科研人员以及大、中专院校的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽油机多区燃烧模型的建立及应用研究 / 李岳林著.
北京:人民交通出版社, 2002.6
ISBN 7-114-04355-4

I.汽... II.李... III.汽油机—燃烧化学—化学
模型—研究 IV.TK411

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 044590 号

汽油机多区燃烧模型的建立及应用研究

李岳林 著

正文设计:姚亚妮 责任校对:宿秀英 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 3.5 字数: 87 千

2002 年 9 月 第 1 版

2002 年 9 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—2000 册 定价: 8.00 元

ISBN 7-114-04355-4

U · 03204

前 言

本书建立了汽油机燃烧过程的双区及多区诊断和预测模型,其中包括了热力学模型、火焰传播模型、燃烧室结构几何模型及废气排放模型。分析讨论了缸内压力及火焰传播的测量方法。在质量燃烧率的计算中直接反映了紊流对燃烧过程的影响。由实验结果进行的诊断分析表明:对一定的节气门开度,紊流燃烧速度与层流燃烧速度之比 FSR 在压缩上止点前后,亦即在火焰充分传播阶段时,仅与转速成线性关系。预测结果表明:预测示功图和预测指示功与实测值的平均相对误差小于 5%。此外还进行了改变点火提前角、燃空比、残余废气系数、压缩比和火花塞位置的预测计算,预测的变化趋势正确。

在湍流燃烧速度方面,将分形表示的湍流燃烧速度并入燃烧模型,重点研究了分形中低端转捩尺度的选取问题。研究表明:Gibson 尺度比 Kolmogorov 尺度更适合作为低端转捩尺度。作为燃烧过程的一种现象学描述,分形同样是一种模拟燃烧过程的有效手段。在质量燃烧率方面,发展了一种基于指数规律的燃烧模型,模型认为不同时期形成的涡的燃烧过程是彼此独立的,单个涡的燃烧率是指数形式。

提出了一个由 13 种成分、20 个反应组成的简化自燃模型。模型首先被快速压缩机试验验证,然后并入到准维模型中通过提高实际发动机的压缩比进行了爆震预测。结果表明:提高压缩比后预测到了爆震的发生,爆震不仅与压缩比有关,而且还与燃烧室的结构有关。

JAC 83 / 6

目 录

第一章 绪论	1
1.1 开展内燃机燃烧过程研究的目的意义	1
1.2 汽油机燃烧过程研究的发展与现状	2
1.2.1 汽油机的燃烧模型	2
1.2.2 汽油机燃烧过程的实验研究	7
1.3 本课题的研究工作	8
参考文献	9
第二章 汽油机多区燃烧模型	12
2.1 双区模型	12
2.1.1 诊断模型	13
2.1.2 预测模型	15
2.1.3 紊流火焰传播模型	16
2.1.4 传热模型	18
2.2 多区燃烧模型	19
2.2.1 诊断模型	20
2.2.2 预测模型	22
2.2.3 传热计算	23
2.3 NO_x 的生成模型	24
2.4 结论	27
参考文献	28
第三章 燃烧室几何形状的处理	30
3.1 问题的提出	30
3.2 “拼块”结构法和“网格”法介绍	31
3.3 节点积分法	32
3.3.1 节点划分与处理	33
3.3.2 火焰前锋面积的计算	35

3.3.3 已燃区传热面积的计算	36
3.3.4 已燃区体积的计算	37
3.3.5 未燃区体积与传热面积的计算	38
3.4 计算过程	38
参考文献	40
第四章 气缸压力和火焰传播的测定	42
4.1 实验台架	42
4.2 示功图的测录	43
4.3 火焰传播的测定	45
4.3.1 测量装置和方法	45
4.3.2 与其他测量方法的比较	48
4.4 结论	49
参考文献	49
第五章 计算及结果分析	50
5.1 诊断计算与 FSR 经验公式的建立	50
5.1.1 诊断计算	50
5.1.2 FSR 公式的建立	53
5.2 试验验证	54
5.3 变参数性能预测计算	55
5.3.1 改变点火提前角对性能参数的影响	55
5.3.2 改变残余废气系数对性能参数的影响	55
5.3.3 改变当量燃空比对性能参数的影响	55
5.3.4 改变压缩比和火花塞位置对性能参数的影响	57
5.4 多区模型计算实例分析	61
5.5 结论	64
参考文献	65
第六章 分形在准维燃烧模型中的应用	66
6.1 分形理论	66
6.2 分形在湍流燃烧中的研究	68
6.3 计算结果及分析	70
6.4 本章小结	73
参考文献	73

第七章 烃自燃模型在汽油机爆震预测中的应用	76
7.1 爆震预测模型研究的目的意义	76
7.2 自燃模型的发展概况	77
7.3 20 反应自燃模型	79
7.3.1 总体反应机理	79
7.3.2 RO_2 的分子异构反应	83
7.4 快速压缩机试验的模拟	87
7.4.1 模型方程及求解	88
7.4.1.1 模型方程	88
7.4.1.2 求解中几点注意的问题	89
7.4.2 模拟结果分析	91
7.4.2.1 两阶段着火的模拟	91
7.4.2.2 模型对反应数据的敏感性	92
7.4.2.3 初始状态对滞燃期的影响	95
7.5 发动机的爆震预测	96
7.5.1 热力学方程组	97
7.5.2 计算结果及分析	98
7.6 本章小结	99
参考文献	100

第一章 绪 论

1.1 开展内燃机燃烧过程研究的目的意义

内燃机的诞生已有 100 多年的历史。经过长期不断的改进和提高,内燃机已经成为一种比较成熟、完善的机械门类。由于它的热效率高、适应性好、结构紧凑等优点而在车辆、船舶、工程机械等广阔的应用领域内取得了优势地位,发挥着日益巨大的作用。这种情形在今后几十年以至更长的时期内将不会改变,因此内燃机的发展水平对我国国民经济的发展有着重要的影响。

为了节约能源,克服石油危机,内燃机经济性能的提高和新燃料的应用研究日益受到重视;为了保护环境,降低大气污染,对内燃机有害排放指标和噪声的限制也越来越高。这些都对内燃机的工作过程提出了更加严格的要求。几十年来,科研工作者已尝试了采用多种技术来达到这一目的,取得了很多成果,但同时也付出了很大的代价。因为传统的内燃机设计是以生产—试验为基础的,这是一个昂贵而漫长的过程。而影响内燃机工作性能的因素又如此之多,完全靠试验来研究它们的影响其代价太大,因此逐渐出现了模拟这一领域。特别是近些年来,随着计算技术的发展,数值模拟在内燃机的设计研究过程中扮演着越来越重要的角色。而燃烧过程是内燃机工作循环的中心环节,它与内燃机的基本运行特性参数,如功率、效率和排放等直接关联。利用较为完善的数学模型,可以分析缸内燃烧的发生、发展情况,有助于分析理解燃烧的机理;研究各种结构参数、运行参数对发动机性能的影响,指导选型设计,优化内燃机整机系统;预测内燃机参数变化后高性能参数的变化规律,简化实验工作,缩短研制周期,加速内燃机研究工

工作的开展^{[1],[2]}。因此,燃烧模型的研究已逐步成为内燃机学科的一个新的研究领域,对提高内燃机性能和降低有害排放物(碳烟、 NO_x 、CO、HC等)浓度有重要的作用。

当然,内燃机的燃烧过程十分复杂,涉及到热力学、流体力学、传热传质学、化学反应动力学等学科,燃烧的进行受到有限而又变化的燃烧室空间形状的影响,并伴随有复杂的物理化学反应及三维、非定常紊流流动^{[3],[4]},所以要精确地描述这一过程在目前来说条件还不具备,因此所建立的模型均不同程度地进行了一些假设,这样计算结果的准确性也将受到不同程度的影响。为了全面把握数学模型的现状,有必要对现存的有影响的、公认的几类数学模型进行分析,以便对本文的研究提供有实用价值的信息。

本文拟重点放在多区燃烧模型的研究上,区别于常用双区模型将已燃区作为一个整体而算出来的值是整个区域的平均值。本研究拟将燃烧室按等质量划分为若干小区,小区之间绝热且互不混合,各小区相当于一零维模型,这样计算的结果更接近于实际情况。此设想已在“内燃机学报”2000年第一期上发表,专家认为“此设想对提高汽油机模拟计算精度有一定的学术与工程应用价值,与前人工作无重复,有创新。并建议在排放和爆震的应用研究方面作深入研究”。本文就是力图建立多区燃烧模型,并通过拟提出的研究方法和实验方案证明该模型比双区和其他模型具有更高的模拟精度,为进一步研究汽油机的燃烧过程和爆震机理提供有效的工具。

1.2 汽油机燃烧过程研究的发展与现状

本节对汽油机燃烧过程的计算模型和实验研究两方面的发展与现状进行简略回顾与展望。

1.2.1 汽油机的燃烧模型

从20世纪40年代以来,对于燃烧模型的研究逐渐开展并提出了各种内燃机燃烧模型及其计算程序,1943年出现了研究汽油机燃烧模型的Damkoler-Shelkin的皱折理论^[1],认为紊流的脉

动作用使光滑的层流火焰面弯曲且皱折变形;1956年出现了另一种 Summerfield 微容积扩散燃烧理论^{[5]、[6]},认为湍流对燃烧的影响以微扩散为主;1968年 Tennkes 首先提出了湍流场结构的猜想^{[5]、[6]};1991年,日本九州大学城户裕之等人提出了具有群岛状和分型几何火焰面的预混合湍流传播火焰构造模型。事实上,对内燃机工作过程的计算直到30年前,还是建立在理想循环的假定基础上,对实际工作过程作了大量的简化。例如用闭口循环模型伴随着不稳定气体流动的开口循环;用等容或混合加热代替燃烧过程;用等容放热代替排气过程等。现在随着环境保护和节约能源两方面要求的越来越高,使内燃机的设计大为复杂,要在满足规定的排放和燃料经济性标准的前提下获得最佳的使用特性,燃烧模型这一工具在应付这一挑战中变得越来越重要,引起人们的广泛重视。各类燃烧模型不断涌现,其中有的已日趋完善,应用于设计研究和产品的开发上,对内燃机的发展起到了很大的推动作用,也使内燃机的理论建立在一个新的基础之上。

对发动机燃烧室内温度场、压力场、组分浓度场和流场的不同处理方法决定了燃烧模型的不同分类。对于燃烧过程数值模拟的研究已经历了单纯的放热规律计算、零维燃烧模型、准维燃烧模型和多维燃烧模型4个阶段。不同类别的燃烧室由于各自不同的形式体系,适应于考察不同类型的燃烧问题。下面以汽油机为研究对象,分别对其分析论述。

(1) 零维模型

这是最早出现的一种汽油机燃烧模型,也称热力学模型,是了解燃烧室内宏观参数和现象随时间而变化的模型。该模型将系统边界内的所有各点参量假定为完全相同,以时间作为唯一的变量,并用子模型(传热、排放生成等)来协助计算。它是从能量的角度研究燃烧现象,求解以热力学第一定律为中心建立起来的一组封闭系统的能量守恒方程。燃烧室被火焰前锋分为已燃区和未燃区,火焰前锋面厚度忽略不计,并假设燃烧室内压力、温度、组分浓度瞬时均匀。已未燃区气体的性质通过热力平衡确定。

这类模型对质量燃烧率的处理上是采用了半经验的方法,即给定质量燃烧函数关系,经过与大量实验数据匹配后,确定有关经验常数,用于计算工作过程中温度、压力等值。用作燃烧率的典型函数形式是余弦函数和韦伯函数^[3,7]。

$$X(\theta) = \frac{1}{2} \{1 - \cos[\pi(\theta - \theta_0)/\Delta\theta_b]\} \quad (1-1)$$

$$X(\theta) = 1 - \exp\{-a[(\theta - \theta_0)/\Delta\theta_b]^{m+1}\} \quad (1-2)$$

式中: $X(\theta)$ ——曲轴转角为 θ 时已燃的质量分数;

θ_0 ——燃烧开始的曲轴转角;

$\Delta\theta_b$ ——燃烧持续时间对应的曲轴转角;

a 和 m ——针对某一燃烧系统的经验常数,其典型值分别为 5 和 2。

后来为了体现湍流对汽油机燃烧过程的作用,人们套用层流燃烧的概念,引用湍流燃烧速度来说明预混合湍流燃烧现象。通常将湍流燃烧速度表示为层流燃烧速度的函数。

$$S_T = C \cdot S_L \quad (1-3)$$

式中: C ——由实验确定的常数。它和发动机结构、转速等参数有关。这类公式的应用使零维模型有了较明确的物理意义,因而得到了广泛的应用,例如文献^[2~12]的计算均是使用这种方法或以此为基础的。

零维模型计算简单,求解容易,可以用于汽油机燃烧过程有关性能和 NO_x 排放浓度的计算,也能预测一些参数的有关变化对发动机性能的影响,但不能给出燃烧过程的细节问题。零维模型对实验有较大的依赖性,在给出的燃烧过程经验公式的范围内,可以得到与实验值很一致的结果。

(2) 准维模型

准维模型是在零维模型的基础之上发展而成,该模型通过一个近似反映几何细节的现象子模型预测内燃机设计和运转参数的变化对燃烧过程细节的影响。因此,这样的模型能把零维模型的热力学框架可以应用的范围拓宽到燃烧过程的变化可能是主导因

素之一的问题。因为计算成本不算太高,当燃烧过程的更好直觉物理模型发展起来后,准维模型很可能成为对于内燃机的运行特性和排放特性进行广泛的变参数研究的模型。

准维模型不需要预先给定一燃烧放热率,而是将火焰传播过程视为随空间而变化的过程,从更加基本的物理量出发,导出质量燃烧率,间接反映结构参数、运转参数以及紊流对燃烧的影响,而对于其他过程,仍按零维处理。对于火花点火发动机,假定着火后生成的火焰呈球面状向未燃混合气推进,燃烧速度为 S_T ,则瞬时质量燃烧率为:

$$\frac{dM_b}{dt} = \rho_u S_T A_f \quad (1-4)$$

式中: A_f ——火焰前锋面积;

ρ_u ——未燃混合气密度。

在内燃机的燃烧过程中,紊流的存在提高了燃烧速度,在早期的模型中,用层流火焰速度 S_L 与一系数 K 相乘获得紊流燃烧速度,即:

$$S_T = K \times S_L \quad (1-5)$$

该表达式由 Annand 于 1970 年提出^[13],其中 K 称之为火焰因素,是发动机运行及结构参数的函数。Lucas 和 James 等^[14]提出了一个随发动机转速 n 变化计算 K 的公式:

$$K = 1 + 0.00197 \times n \quad (1-6)$$

Mattavi 等^[15]总结了儿种火花点火发动机燃烧室内的紊流与火焰传播之间的关系,发现紊流燃烧速度主要受层流燃烧速度和紊流强度 u' 的影响,并得到一经验关系式:

$$S_T = a S_L + b u' \quad (1-7)$$

式中: a 、 b ——分别取为 1.0 和 4.01。

Heikai^[16]比拟分子输送过程,提出了一个类似于分子和湍流涡输送过程之间的模型,把湍流燃烧速度表示为:

$$\frac{S_T}{S_L} = \left(1 + \frac{b v}{\alpha \text{Pr}_t} \left[\frac{D(S_T + c \cdot c_m^d)}{v} \right]^a \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-8)$$

式中： α ——分子热扩散系数；

Pr_t ——紊流普朗特数；

ν ——运动粘度；

c_m ——活塞平均速度；

D ——缸径；

a 、 b 、 c 、 d ——经验常数，需根据实测的示功图确定。

Blizard^[17]在1974年提出了准维湍流卷吸模型，将火焰前锋卷吸速度和涡半径这两个参数引入到质量燃烧率的计算中。假定点火后，燃烧现象归结为有限厚度的火焰前锋面以涡被卷吸的速度向未燃混合气扩散，由于相邻涡之间H、OH、O等基团的扩散，被卷入的涡立即以层流速度燃烧。燃烧特征涡半径的特征时间为：

$$\tau = l_e / S_L \quad (1-9)$$

式中： l_e ——特征涡半径。

质量燃烧率为：

$$\frac{dm_b}{dt} = (m_e - m_b) / \tau \quad (1-10)$$

Mccuiston 和 Tabaczynski 等^[18~22]对湍流涡的结构作了进一步的深化，认为积分长度尺度为 L 的湍流涡的结构是被直径为 Kolmogrov，长度尺度为 η 的高耗区所分开，以 Taylor 微长度尺度 λ 的许多空间所组成。

Davia^[23]在卷吸速率的计算中加入湍流动能的影响，突出了湍流在燃烧过程中的作用。

虽然准维模型对质量燃烧率的预测，其基础是建立在间接的实验数据，物理直觉及某种程度的数学方便性上，但其计算结果表明能预测燃烧过程的正确趋势。因此国外对准维模型的研究和应用较多，国内也开展过这方面的工作^[8~12]。

准维模型能提供某些有关燃烧过程的细节信息，例如着火延迟期，燃烧持续期和废气再循环的影响等的预测，虽然仅仅是近似的，但计算比较容易。在估计发动机运行条件的改变及几何参数

的不大变化对发动机性能的影响时,准维模型能得到较零维模型深入的结果。

(3) 多维模型

多维模型是一种正在发展中的燃烧模型,它与前两类模型具有完全不同的性质。其特点是对实验的依赖较弱,立足于有关学科最新理论成就的基础上,对燃烧过程进行全面深入的模拟,模型具有更完整的理论基础。

多维模型要对各控制性偏微分守恒方程(包括质量守恒、动量守恒、能量守恒和各种化学成分守恒方程)与描述湍流过程、化学过程、边界层过程等相应的子模型一起,针对适当的边界条件用数值方法求解。它不仅解决燃烧过程随时间的变化,而且提供气体速度、湍流特性、温度和组分浓度在燃烧室分布的详细信息。

多维模型在形式上要比零维和准维模型复杂得多。从零维和准维模型(控制方程是常微分方程)过渡到多维模型(一、二或三个空间尺度和时间都是自变量,控制方程是偏微分方程)时,会添加极大的数值计算方面和子模型物理化学方面的困难。目前对湍流、燃烧化学等方面的许多现象的机理尚不清楚,加上计算机容量和计算成本的限制,多维模型的计算和应用还存在着很大的局限性。但已发表的用多维模型计算燃烧过程的某些结果^[24~27]已经显示了这类模型的巨大潜力。随着人们对湍流混合、化学动力学、火焰形成及传播机理、传热及边界等方面的研究加以突破和计算技术的进步,多维模型将得到迅速发展并趋于完善。

总之,零维模型和准维模型都具有形式简单、便于计算的特点,适于一般性能预测及发动机的综合参数进行研究。多维模型代表了燃烧模型的发展方向,它可以向内燃机研究和设计人员提供有关燃烧过程的更多的有用信息。随着现代科学技术的发展,多维模型有望成为一种通用的汽油机燃烧模型。

1.2.2 汽油机燃烧过程的实验研究

在内燃机问世 100 多年的历史中,实验研究对其发展和进步起了关键的作用。内燃机研究领域的矛盾不断要求用新的实验

方法来解决,而新实验方法在内燃机中的应用又揭示出新的研究内容,从而促进了内燃机工程的发展。从初期简单的实验发展到现在,研究内燃机燃烧过程的实验方法已有多种,本文仅涉及气缸压力和火焰传播性质的测量。

测量气缸内的压力变化,即测录示功图,一直是广泛应用的有研究燃烧过程的方法。燃烧室内部进行的复杂热力过程的特征可通过示功图反映出来;许多重要参数可以从示功图求出;示功图也是检验发动机工作过程数值模拟计算精度的重要依据。现代化的数据采集与处理系统的发展为准确方便地测录内燃机示功图提供了条件。示功图已成为研究内燃机工作过程的必不可少的手段。

汽油机的燃烧过程是具有很高的火焰传播速率的非稳态预混焰的湍流燃烧过程,在燃烧过程中的湍流火焰传播是其燃烧的标志性特征。对火焰传播的测量迄今已有了近 60 年的历史,使用的主要方法有高速摄影法、光纤维测量法等^[2,5~23]。通过测量所得到的火焰传播的性质及其对燃烧过程的影响的信息,已经应用在发动机设计和改进工作中,促进了汽油机性能指标的提高。但是由于燃烧过程的复杂性和测量方法的局限性,湍流火焰传播的机理至今尚不十分清楚。为了获得有关的详细资料,需要不断发展更多的适应性强、方便实用测量火焰传播的新方法。火焰传播的测定是汽油机燃烧过程研究的一个方面。

1.3 本课题的研究工作

本文主要完成以下几个方面的工作:

(1) 发展了一个具有明确物理概念的较为完善的汽油机燃烧过程的双区和多区燃烧模型,其中包括火焰传播模型、缸内传热模型和氧化氮排放因子模型。

(2) 对一台汽油机的燃烧过程进行数值计算和实验研究,用实验结果检验数值计算的精度。

(3) 将模型应用到 BJ492 发动机的工作过程模拟研究中,对计算结果进行了分析和应用研究,得到了针对汽油机燃烧过程的

具有实际指导意义的结论。

(4) 从湍流燃烧速度出发开展了模型的改进工作,研究了分形在燃烧模型中的应用。

(5) 进行了烃系燃料自燃机理的研究,提出了一个包括 13 种成分、20 个反应的自燃模型,并将其并入到准维模型中进行了爆震预测研究。

参考文献

- [1] J. N. Mattavi, E. G. Groff, J. H. Linesch, F. A. Matekunas and R. N. Noyes. Engine Improvement through Combustion Modeling. In: Combustion Modeling in Reciprocating Engines (Mattavi J N and Amann C A, eds.), New York: Plenum Press, 1980
- [2] 李岳林, 张志沛, 张雨. 汽油机燃烧过程模拟分析. 内燃机学报, 2000(1)
- [3] Heywood J B. Engine Combustion Modeling - An Overview. In: Combustion Modeling in Reciprocating Engines (Mattavi J N and Amann C A, eds.), New York: Plenum Press, 1980, 1 - 35
- [4] Ramos J I. Mathematical Models of Rotary Engines. In: Computer Simulation of Fluid Flow, Heat, and Mass Transfer, and Combustion in Reciprocating Engines (Markatos N C, ed.), New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988
- [5] 刘永长. 内燃机工作过程模拟. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
- [6] 蒋德明等. 火花点火发动机的燃烧, 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- [7] E. H. James. Mathematical Modeling of SI Engine Combustion.

Combustion Modeling in Science and Technology, 1983(14)

- [8] 葛贤康, 蒋平. 汽油机工作过程的数值模拟. 内燃机学报, 1987(4)
- [9] 王志明, 胡玉平. 准维模型中若干参数对建模精度的影响分析. 内燃机学报, 1998, 16(3)
- [10] 李岳林等. 汽油机燃烧过程的数值模拟. 长沙交通学院学报, 1999(3): 19~23
- [11] 李岳林等. 预混燃烧研究的现状和动向. 公路与汽运, 2001(3)
- [12] 李岳林等. 汽油机多区燃烧模型的建立及应用研究. 内燃机工程, 2002(1)
- [13] W. J. D. Annand. Research Notes. J. M. E. S., Vol. 12, No2, 1970
- [14] G. G. Lueas, E. H. James, SAE paper No. 730053, 1973
- [15] Mattavi J. N. et al. Turbulence, Flame Notion and Combustion Chamber Engine. Fuel Economy and Emission of Lean Burn Engines, I. Mech. E. Conference Publication, 1979
- [16] M. R. Heikal, R. S. Benson, and W. J. D. Annand. A Model for Turbulent Burning in Spark Ignition Engines. Fuel Economy and Emission of Lean Burn Engines, I Mech E. Conference Publication, 1979
- [17] Blizard N. C. et al. Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Burning Model for ICE. SAE740191
- [18] Mccuiston F. D. et al. Validation of a Turbulent Flame Propagation Model for a Spark-Ignition Engine. SAE770045
- [19] Tabaczynski R. J. Turbulence and Turbulent Combustion in Spark Ignition Engines. Prog. In Energy and Comb. Sci., Vol. 2, 1976. 10
- [20] Tabaczynski R. J. et al. A Turbulent Entrainment Model for SI Engine Combustion. SAE 770647