

内燃机燃烧与控制

朱万华

内燃机燃烧与控制

苏万华

内容提要

本书是苏万华教授代表性论著的文集，记录了苏万华教授及其学生们在过去的 20 多年里潜心研究内燃机燃烧新理论和新技术的成果。本书分为 4 个部分：第一部分是不同时期关于内燃机燃烧理论与技术的发展趋势分析；第二部分是内燃机燃烧现象的基础研究，内容涉及高压燃油喷雾特性激光诊断研究，射流场中速度和浓度的测量技术和变化规律的研究，燃烧室形状对近壁混合率影响的研究等；第三部分是内燃机燃烧过程的诊断与控制，重点介绍发动机电控单元（ECU）的设计和开发；第四部分是新一代内燃机燃烧理论与技术，主要介绍均质压燃低温燃烧技术及其在柴油机上的应用。

本书可供汽车工业和科研单位的发动机研发人员以及高等院校内燃机方面的教师和研究生阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

内燃机燃烧与控制/苏万华著. —天津：天津大学出版社，2010.10

ISBN 978-7-5618-3748-1

I. ①内… II. ①苏… III. ①内燃机—燃烧理论—文集 IV. ①TK4—53

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 188503 号

出版发行 天津大学出版社

出版人 杨欢

地址 天津市卫津路 92 号天津大学内（邮编：300072）

电话 发行部：022—27403647 邮购部：022—27402742

网址 www.tjup.com

印刷 天津市豪迈印务有限公司

经销 全国各地新华书店

开本 210mm×297mm

印张 50.5

字数 2230 千

版次 2010 年 10 月第 1 版

印次 2010 年 10 月第 1 次

定价 168.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页等质量问题，烦请向我社发行部门联系调换。

版权所有 侵权必究

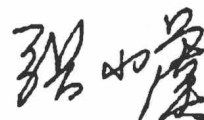
序——加强学术交流促进技术进步

在可预见的未来，内燃机仍是汽车、工程机械、农用机械、船舶和军用装备等动力装置的主要原动机，石油仍是内燃机的主要燃料。内燃机的石油消费量占石油总消费量的61%以上。内燃机也是大气环境特别是城市大气环境的主要污染源。汽车内燃机所带来的能源的短缺已成为环境污染和经济社会可持续发展中迫切解决的重大问题。开发高效、清洁的内燃机是国家节约石油资源和保护环境的唯一途径。

内燃机是通过燃烧将燃料内能转换为机械功的动力装置，燃烧技术是内燃机技术的核心技术之一。现代内燃机燃烧技术已经不是传统意义的热力循环发动机，而是燃烧学、热力学、流体力学、传热学、化学催化动力学、计算机、信息科学、新材料和先进制造技术等多学科交叉的结晶，是现代高新技术的集成。为了把我国从内燃机制造大国转化为内燃机技术创新和制造强国，我们必须潜心发展我国内燃机燃烧新技术。

苏万华教授及其学生，在过去的20多年里，承担了包括国家“973”重点基础研究规划项目、国家自然科学基金重点基金课题和国家攻关计划项目等多项重大项目，以国家产业需求为目标，自觉地参与国际内燃机新技术的竞赛，作为科研工作的总结在国内外的主要刊物上先后发表了160余篇论文，经过认真地精选，从内燃机燃烧理论与技术的发展趋势研究、内燃机燃烧现象的基础研究、内燃机燃烧过程的诊断与控制 and 新一代内燃机燃烧理论与技术等4个领域选出97篇代表性论文，编辑了“内燃机燃烧与控制”论文选集，力求内容系统完整，以方便在学研究生和有关工程技术人员查阅和交流。

中国内燃机学会作为内燃机科技工作者的最高学术团体，一直致力于促进学术交流。我欣喜地注意到，在过去的五年里，随着我国内燃机产品开发和技术创新的日趋活跃，我会已经出版了内燃机系列丛书等著作，科技刊物的水平也显著提高。在“内燃机燃烧与控制”一书出版之际，我谨对全国内燃机科技工作者辛勤耕耘的成果表示祝贺和敬佩。



2010年9月

前 言

内燃机始终是工程技术学科中最活跃的领域之一。20世纪60年代出现在美国加州，由汽车排放和其他工业污染引发的“环境危机”和70年代初第一次“世界能源危机”极大地刺激了内燃机科学技术的发展。人们渴望了解内燃机有害排放物的构成、生成机理以及减少内燃机有害排放的技术途径。同时，迫切希望探索内燃机节能的新技术。因为节能就是最现实的新能源。恰巧也正是在20世纪60年代末和70年代初，计算机技术和激光技术已经发展到实际应用的阶段，这为内燃机科学研究提供了新的手段和工具，推动了内燃机科学的快速发展。现代激光诊断技术和计算机数值模拟技术已经成为内燃机基础研究和产品开发的重要手段，它们为20世纪80年代以来以智能控制和信息技术为标志的第三次内燃机技术革命的出现奠定了基础。目前，内燃机的各种有害排放物与20世纪70年代初相比，已分别减少了90%~99%。如此突飞猛进的技术进步在制造业中是为数不多的，可见内燃机科技充满了活力和生机。

现代高效、清洁的内燃机已经不是传统意义的热力发动机，而是燃烧学、热力学、流体力学、传热学、化学动力学、计算机技术、信息科学、新材料和先进制造技术等多学科交叉的结晶，是现代高新技术的载体和集成。

新世纪以来，我国汽车和内燃机工业呈现了“井喷式”的快速发展势头。与此同时，我国内燃机工业也迎来了从未有过的节能和减排的巨大压力。我国汽车年产量已经超过1500万辆，柴油机年产量达6000万台，这样巨大的内燃机生产大国，如果没有快速增长的创新能力，汽车和内燃机工业将难以实现可持续发展。

我和我的同事及历届的学生们自20世纪80年代以来，每个五年计划都承担国家重大科研项目，作为科研工作的总结，在国内外发表了160余篇论文，它们反映了我们科研工作的轨迹和进程。现在回过头来看，它与国际内燃机技术进步的步伐和方向基本是一致的，我和我的同事及学生们，希望把它们整理编辑出版，以方便在学研究生和有关工程技术人员查阅和交流。

这些工作致力服务于我国内燃机事业发展的需求。在80年代和90年代，我们集中精力进行柴油机混合气形成过程的研究，其中包括高压燃油喷雾特性激光诊断研究、射流场中速度和浓度的测量技术和变化规律的研究、高压燃油喷射技术的研究、高压共轨技术的开发研究、燃烧室形状对近壁混合率影响的研究等。在高压共轨燃油系统的开发过程中，我们建立了“把先进燃烧技术和计算机智能控制技术结合起来”的学术思想。“九五”期间，进行了汽油和柴油混合燃烧发动机的研究，完成了气口顺序喷射、全电控双燃料天然气发动机的开发，开发出高性能的32位微处理器的电控单元（ECU）。

“新概念燃烧过程”和“新一代内燃机燃烧理论与技术”的提出标志着我们融入了国际新一轮内燃机技术创新的浪潮。“973”新一代内燃机燃烧理论和技术项目研究队伍的建立，使国内外的学术交流呈现从未有过的紧密和有效，极大地提高了我们自身的研究水平和学术声誉。目前，已经有许多新一代内燃机燃烧技术元素在我国内燃机企业中得到应用。然而，我们确信更有价值的是这一研究过程所形成的对燃烧过程的深切理解，它将对我国内燃机燃烧技术的进步产生推动作用，这也是出版此书的主要动力。

为了本书内容的系统和完整性，为了便于读者浏览，本书将精选的97篇论文，分为4个部分：第一，不同时期对燃烧研究发展趋势的分析；第二，内燃机基础燃烧现象的研究；第三，内燃机燃烧过程控制和诊断技术；第四，新一代内燃机燃烧理论与技术。

我的同事和同学为此书的出版作了大量的工作。其中，裴毅强和黄豪中博士花了大量的时间与国内外的校友联系，安排有关出版的事务。黄豪中博士承担了全书的整理和编辑工作。在此，对他们及所有为此书出版做出辛勤劳动和贡献的同事和同学表示衷心感谢。

苏万华

2010.9.10

目 录

第一部分 内燃机燃烧理论与技术的发展概述

均质压燃低温燃烧发动机理论与技术概述	(3)
高密度-低温柴油机燃烧理论与技术的研究与进展	(12)
内燃机燃烧研究中的几个前沿问题	(22)

第二部分 发动机燃烧现象的基础研究

复合激光诱导荧光定量标定技术及其对喷雾特性研究的应用 第一部分：燃油喷雾当量比定量标定方法的研究	(33)
复合激光诱导荧光定量标定技术及其对喷雾特性研究的应用 第二部分：喷射参数和环境参数对喷雾特性的定量分析	(44)
两种燃烧室内燃油空气混合情况的定量比较分析	(55)
新型定容燃烧喷雾模拟实验装置的开发及应用	(63)
一个新的用于 HCCI 发动机燃烧研究的正庚烷化学反应动力学简化模型	(69)
“Bump 燃烧室”内新概念稀扩散燃烧混合气形成机理的研究	(78)
一种新的 HCCI 柴油机燃油喷雾特性的 PLIF 法测试装置	(87)
柴油喷雾撞壁混合过程的研究	(91)
柴油引燃天然气发动机着火特性及其影响因素的研究	(99)
“BUMP 燃烧室”内混合气形成的多维数值研究	(104)
限流沿对撞壁射流近壁区混合过程影响的实验研究 (一)	(111)
限流沿对撞壁射流近壁区混合过程影响的实验研究 (二)	(115)
圆柱尾迹中气体射流平均浓度分布的实验研究	(118)
圆柱尾迹中湍流结构对气体射流混合过程影响的实验研究	(125)
瞬态气体射流中速度和浓度同步测量系统的研究	(132)
直喷式柴油机缸内涡流场中燃油喷雾的发展及其壁面限制作用的研究	(138)
直喷式柴油机燃烧室内挤流谱的显示和挤流速度的解析	(144)
中小缸径直喷式柴油机喷雾特性的研究	(149)
喷油压力和燃烧室壁面干涉对喷雾混合过程的影响	(154)
现象学燃烧分析模型及其在柴油机燃烧研究中的应用	(158)
利用气体模拟技术研究直喷式柴油机的燃油喷雾特性	(164)
一个多功能燃烧模拟实验装置	(169)
直喷式柴油机燃烧过程现象学分析模型	(174)
内燃机示功图误差修正的热力学方法	(179)
柴油机劣质燃料着火和燃烧特性的实验研究和热力学分析	(183)
压燃式发动机中挤流运动的研究	(190)
Spray Structure and Characteristics in Modern Diesel-Engine-like Conditions	(201)
Quantitative Study of Concentration and Temperature of a Diesel Spray by Using Planar Laser Induced Exciplex Fluorescence Technique	(210)
Numerical Investigation on Relationship Between Injection Pressure Fluctuations and Unsteady Cavitation	(210)

Processes inside High-Pressure Diesel Nozzle Holes	(228)
A Numerical Study of Cavitating Flows in High-pressure Diesel Injection Nozzle Holes Using a Two-fluid Model	(241)
A Theoretical Investigation on the Effects of Mixing on Low- Temperature Diesel Combustion and Emissions	(251)
Effect of injection pressure on spray characteristics and fuel distribution in diesel engine conditions by planar laser-induced exciplex fluorescence (PLIEF) technology	(259)
Optimization of a Reduced Chemical Kinetic Model for HCCI Engine Simulations by Micro-Genetic Algorithm	(273)
Development and Calibration of a Reduced Chemical Kinetic Model of <i>n</i> -heptane for HCCI Engine combustion	(281)
Enhancement of Near Wall Mixing of An Impinging Jet By Means of a Bump on the Wall	(298)
Experimental Study on the Effects of Spray Impingement and Turbulence Structure on Spray Mixing Rate By Gas Jet Simulation	(309)
A New Approach To Air/Fuel Mixture Formation Through Spray Impingement And Reflex In A Small Single Spray D. I. Diesel Engine	(318)
Development of A Four-Zone Analytical Combustion Model for A D. I. Compresssion-Ignition Engine	(326)
Experimental Investigation of Effects of Fuel Injection Parameters and Chamber Wall Confinement On Spray Characteristics in Constant Volume Bomb	(337)
Experimental Study on the Effects of Turbulence Structure in the wake of a Circular Cylinder on Jet Mixing Rate	(351)

第三部分 发动机燃烧过程的诊断与控制

新型高压共轨 ECU 升压模块的数字化开发与优化	(361)
高压油管对共轨系统性能影响的研究	(369)
基于 CPLD 的柴油机高压共轨电控系统控制信号的产生	(376)
柴油机模糊诊断专家系统的研究	(382)
大功率机车柴油机诊断系统的开发及应用	(387)
柴油智能状态跟踪及故障诊断系统的开发	(391)
BUMP 燃烧室的稀扩散燃烧机理	(395)
无量纲参数和控制策略对多次喷射响应特性及喷油规律的影响	(401)
Bump 环强化柴油混合过程的数值模拟研究	(410)
大功率柴油机综合故障诊断系统的研究与开发	(419)
基于 LaGrange-SUMT 方法的全电控柴油引燃天然气发动机 MAP 优化标定技术	(423)
共轨蓄压式电控喷射系统的喷油规律对发动机燃烧特性及排放性能的影响	(428)
LaGrange-SUMT 方法及其在共轨式电控喷油系统发动机控制参数 MAP 生成中的应用	(434)
高压共轨柴油机 32 位电控单元及其可靠性设计	(438)
共轨柴油机 ECU 的软件分层模型及实时多任务机制	(443)
电控发动机自动优化匹配管理平台的开发研究	(447)
高压共轴喷油器设计参数对性能影响的研究	(454)
高压共轨式喷油器的无量纲几何参数对喷油规律和喷油特性一致性影响的研究	(461)
新型中压共轨式柴油机电控燃油系统的开发	(467)
车用柴油机电控开发系统的软、硬件设计及应用	(474)
A Study of Effects of Design Parameters on Transient Response and Injection Rate Shaping for a Common Rail Injector System	(481)
Paircui-A New Pressure Accumulative, Injection Rate Controllable Unit Injector for Diesel Engine Fuel Systems	(488)

第四部分 新一代内燃机燃烧理论与技术

基于多脉冲喷射、可增压以及进气门晚关技术的变工况混合燃烧控制策略	(501)
MULINBUMP 复合燃烧系统多次脉冲喷油控制参数的优化研究 (I) —— 发动机参数优化模拟平台的建立	(518)
MULINBUMP 复合燃烧系统多次脉冲喷油控制参数的优化研究 (II) —— 5 次脉冲喷油控制参数的优化	(529)
微种群遗传算法在电控柴油机控制参数优化中的应用	(540)
利用特征时间燃烧模型研究燃料分层对柴油 PCCI 燃烧过程的影响	(547)
油嘴喷射锥角对柴油可控预混压燃燃烧特性的影响	(557)
调制多脉冲喷油策略的实现及对 HCCI 燃烧过程影响的研究	(563)
基于调制多脉冲喷油模式的柴油预混合燃烧和排放特性的研究	(571)
MULINBUMP HCCI 燃烧控制特性的试验和数值模拟	(579)
喷射参数对柴油 HCCI 复合燃烧过程燃烧效率及散热损失影响的研究	(585)
柴油机 HCCI 燃烧过程中自燃着火和燃烧速率控制的研究	(591)
一种基于稀扩散燃烧的 BUMP 燃烧室及其对柴油机碳烟和 NO _x 排放影响的实验研究	(596)
基于电控高压共轨燃油系统的多脉冲复合控制燃烧系统	(602)
柴油/汽油双燃料发动机粗暴现象的发生机理及控制措施	(608)
柴油/汽油双燃料发动机排放性能的研究	(612)
气口顺序喷射、稀燃、全电控柴油/天然气双燃料发动机的研究	(616)
空气/天然气 λ 对 QHCCI 燃烧过程影响的研究	(624)
预喷射对柴油机燃烧及排放影响的实验研究	(629)
混合燃烧系统柴油喷射提前角对缸内压力的影响	(635)
一种新的小缸径柴油机单孔直喷燃烧系统的研究	(639)
Effect of Charge Density and Oxygen Concentration on Emissions in a High Density-LTC Diesel Engine by Retarding Intake Valve Timing and Raising Boost Pressure	(645)
Role of Charge Density in Combustion and Emissions in a Diesel Engine	(655)
High Density-Low Temperature Combustion in Diesel Engine Based on Technologies of Variable Boost Pressure and Intake Valve Timing	(666)
Mixing-enhanced Combustion in the Circumstances of Diluted Combustion in Direct-injection Diesel Engines	(684)
Effects of Multi-Injection Mode on Diesel HCCI Combustion	(700)
Mixing Enhancement by a Bump Ring in a Combustion Chamber for Compound Combustion	(713)
Injection Mode Modulation for HCCI Diesel Combustion	(726)
Effects of Heat Release Mode on Emissions and Efficiencies of a Compound Diesel Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion Engine	(739)
Research and Development of an Advanced Combustion System for the Direct Injection Diesel Engine	(753)
A Study on the Amount of Pilot Injection and Its Effects on Rich and Lean Boundaries of the Premixed CNG/Air Mixture for a CNG/Diesel Dual-fuel Engine	(767)
A Diesel Compound HCCI Combustion Engine Based on Injection Strategy Control	(776)
A Compound Technology for HCCI Combustion in a DI Diesel Engine Based on the Multi-Pulse Injection and the Bump Combustion Chamber	(786)

第一部分

内燃机燃烧理论与技术的发展概述

均质压燃低温燃烧发动机理论与技术概述

苏万华

1.1 新一代内燃机燃烧理论的意义和内涵

由于内燃机至今仍然是热效率最高、单位体积和单位重量功率最大(达 100 kW/L)的原动机,所以应用广泛,全世界保有量已超过十几亿台。国际汽车和内燃机界普遍认为,在可预见的未来,内燃机仍是汽车等动力装置的主要原动机,石油仍是内燃机的主要燃料。预计内燃机仍有 25%~50%的节油潜力。燃烧过程的创新,是实现内燃机高效和清洁的最有效、最节约的途径。如果石油资源可供使用 60 年,降低油耗 25% 就可以延长使用时间至 80 年,多出整整 20 年。为开发和利用新能源争取时间。

内燃机作为汽车、机车、轮船、农用机械(农用车)、工程机械及军用车辆等移动装置的动力源,是我国石油的主要消费需求。2006 年我国石油进口依赖度已达 47%。内燃机的石油消费量占我国石油总消费量的 66% 以上,但我国目前内燃机的能源利用率很低。据统计,我国内燃机燃油消耗率平均为每千瓦小时 0.22~0.35 kg/(kW·h)。但能源利用率与国外先进机型相比要低 20% 左右,每年多耗油 3 000 万吨以上,相当于年石油消费量的六分之一。因此,内燃机的节能是国家节能工作的主战场之一,开展内燃机的节能研究事关国家能源安全,意义极为重大。

内燃机也是大气环境、特别是城市大气环境的主要污染源。上海城区内机动车排放的一氧化碳(CO)、未燃碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO_x)分担率分别为 86%、90%和 56%,北京在非采暖期,机动车排放的 CO、HC 和 NO_x 分担率分别为 60%、86.8%和 54.7%。内燃机排气中含有 HC、CO、醛类化合物、NO_x 及颗粒物(PM)等多种有害成分,HC 与 NO_x 在太阳光照射下会引起光化学反应,形成光化学烟雾,刺激眼睛和喉咙,阻碍植物生长。内燃机排出的颗粒物(PM),一般小于 1 μm,可吸入到人肺的底部,微粒中的多环芳烃,如苯并芘是致癌物质,威胁人的健康。国家环保局提供的数据表明,全世界 20 个大气质量最差的城市中,中国占了 16 个。汽车内燃机所带来的环境污染是我国社会和经济可持续发展中必须解决的重大问题。

为了满足国 II 或更严格的排放法规,内燃机都需要借助于“尾气净化设备”。随着排放法规越来越严格,后处理设备也变得愈来愈复杂,人们称之为“内燃机后处理化工厂”,其价格占原发动机成本的 40%~70%,特别是它需要消耗大量的贵金属。据美国权威机构统计,全世界汽车工业每年消耗的贵金属大约占总消耗的 54%,而世界贵金属资源非常有限,贵金属早已成为各大汽车公司实施金融运作的重要物质。

近年来,“新一代内燃机燃烧理论和技术”取得快速进展,已经证明应用新一代内燃机燃烧技术可以同时提高内燃机热效率和降低尾气排放,减少或消除对后处理器的依赖,从而对节约贵金属资源发挥重要作用。

国外汽车和内燃机发达国家(美国、欧盟国家和日本)都在努力研发汽车燃油动力技术。2001 年后主要是大力支持“均质压燃(homogeneous charge compression ignition, HCCI)、低温燃烧(low temperature combustion, LTC)”新一代内燃机燃烧理论和技术的研究。汽车内燃机工业研究和开发的中心始终放在燃油发动机上,因为燃油发动机至少是未来 50~70 年的主要原动机。我国内燃机工业过去实际上没有认真参与至关重要的国际燃油发动机技术领域的激烈竞赛,产品开发主要依赖国外,致使我国成为国外过时技术的转接地,20 多年来产品水平始终落后发达国家 10 年左右,能量利用率则始终低大约 20%。近几年我国工业界已开始重视发动机产品的设计能力,但并未真正重视对燃油动力技术的创新。

2000 年以来,在国家重点基础研究发展计划(973 项目)——“新一代内燃机燃烧理论及石油燃料替代途径的基础研究”(2001CB209200)和国家自然科学基金重点课题的支持下,我国第一次在国家的组织下参加了国际燃油动力新理论和新技术的竞赛。通过近 10 年的研究工作,我国构筑了新一代内燃机燃烧理论的框架,基于新理论的指导,开发了柴油、汽油和天然气等多种新技术原理样机,除显示了重要的节油效果外,在不过分依赖后处理器的条件下,大幅降低了尾气排放(可达到国 IV 排放标准),在工程上可节约大量铂、铈、钯等贵金属资源。

新一代内燃机燃烧理论是对传统燃烧理论的突破,它必将迅速向产品和实用技术转化。本文扼要介绍

“均质压燃、低温燃烧”——新一代内燃机理论与技术的基本理论内涵和技术途径,旨在与广大同行和相关科技工作者共享。新一代内燃机燃烧理论的科学内涵和研究的意义如下。

(1) “均质压燃,低温燃烧”理论开辟一个全新燃烧学领域。

“均质压燃,低温燃烧”不同于传统的汽油机燃烧过程,也不同于传统的柴油机燃烧过程,它的基本学术思想是在现代内燃机控制技术的基础上,通过控制内燃机燃烧室内的温度和压力、控制燃料、活化基以及再循环废气的浓度,实现“燃烧边界条件与燃料化学的协同控制”。从而实现对燃料燃烧化学反应过程的控制,实现可控的高效、清洁燃烧,最大限度地提高热效率、降低有害污染物的生成。它的科学意义在于正在开辟一个全新燃烧学领域:它不同于传统燃烧学中均质混合气火焰传播理论,也不同于射流扩散燃烧或滴群扩散燃烧理论。“均质压燃、低温燃烧”理论本质上是湍流混合与化学动力学耦合作用的有限反应速率的化学动力学理论。

(2) 内燃机“均质压燃、低温燃烧”过程是一种“极限”条件下的燃烧过程。

这里主要指着火极限和稳定燃烧极限。目前人们已经把着火极限扩展到远远超出传统燃烧学中的“着火极限”,人们已经可以使稀薄到只有理论化学当量比二十分之一的燃料混合气自燃着火,并且被应用于发动机燃烧控制;人们也可以“随心所欲地”拖长或缩短燃料的着火过程,控制快速化学反应的相位。“极限”条件下的燃烧速率控制也是新燃烧科学领域的重要科学问题之一,其中包括爆燃的控制(见汽油机燃烧),其研究工作是要把传统燃烧的爆震(火焰传播速度大于 1 000 km/h)极限向混合气更浓的方向推迟;“燃烧路径的控制”(见柴油机燃烧),是通过控制柴油喷雾的混合率、着火过程、放热过程和充量的温升,使燃烧有利于提高热效率,同时避开碳烟和 NO_x 的生成区域,从而实现“节能、清洁、轻声”的目标。

(3) 基于燃烧机理研究的燃烧控制是对传统燃烧学的发展。

通过反应物质的组分、浓度、温度和压力与燃料理化特性的协同控制,能够控制燃烧过程的速率和方向,从而控制燃烧效率和产物的生成。燃烧控制是燃烧学、信息和控制科学的交叉,是传统燃烧学的重要发展。

(4) “均质压燃、低温燃烧理论”研究具有普适的基础科学意义。

“均质压燃、低温燃烧”理论与其他动力装置和微尺度燃烧中的低温燃烧面临许多共性的基础问题,例如:①非稳态、复杂流动边界条件下强化混合过程的机理;②均质混合气(存在浓度和温度分层)自燃着火与燃烧速率控制的基础理论;③多组分均质混合气湍流混合过程与燃烧化学动力学耦合作用的理论等。因此,该理论研究在科学层面上具有普适的基础科学意义。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

20 世纪 90 年代后期,国内外开展了大量的均质压燃、低温燃烧研究。人们发现,这种燃烧是一种全新的燃烧理论,它摒弃了传统的柴油机和汽油机概念,但保留了传统柴油机和汽油机的优点。根据这一理论可以组织最清洁、热效率最高的燃烧过程。人们普遍认为,这是满足未来超低排放、甚至零排放内燃机最具潜力的新型燃烧方式,是国际上新一轮燃油发动机技术的竞赛。

进入 21 世纪以来,世界各国政府、内燃机学术界和工业界都十分重视新一代内燃机燃烧理论的研究,并积极开展这一领域的研究工作。2001 年美国国会批准了能源部报告^[1],组织由美国 8 所著名大学和 5 个国家实验室(圣地亚(Sandia)、阿贡(Argonne)、橡树(Oak Ridge)、劳伦斯(LLNL),劳师阿莫斯(Los Alamos))和包括三大汽车公司在内的工业界共同参加的两个项目,开展均质压燃、低温燃烧(HCCI)研究。2005 年,白宫预算继续追加经费加强 HCCI 的研究。欧洲则通过第六框架组织包括英国、德国、瑞典等国家大学和企业开展 HCCI 的研究。我国也在 2001 年批准了苏万华为首席科学家的 973 项目——“新一代内燃机燃烧理论和石油燃料替代途径基础研究”,在国内组织了以天津大学、西安交通大学、清华大学和上海交通大学等为主的 8 所高校,开展新一代内燃机燃烧理论的基础研究。这是我国第一次有组织地参加国际新一轮内燃机新技术竞赛。

近几年,国内外在新一代内燃机燃烧理论研究中分别在基础理论研究、柴油燃料 HCCI 燃烧控制研究和汽油燃料 HCCI 燃烧控制研究 3 个方面取得了新的进展。

1.2.1 HCCI 燃烧基础理论研究进展概况

早在 1983 年 Najt 等^[2]就发现了 HCCI 的燃烧现象,并对其机理进行了研究,但直到 20 世纪 90 年代后

期,随着各国排放法规日趋严格和石油供求矛盾日趋尖锐,人们发现传统内燃机存在最低排放和最高热效率两个极限,为了突破这些极限,人们开始了新一代内燃机燃烧技术的探索,发现 HCCI 燃烧理论是最有潜力的替代理论和技术,而受到越来越多的重视。最初人们认为 HCCI 燃烧是化学动力学控制的燃烧过程,使发动机燃烧化学动力学模型得到了很大发展,包括对较复杂燃料($C_5 - C_8$)的详细氧化机理的研究也取得了很大进展。例如,对正庚烷(C_7H_{16})详细化学动力学模型^[3],有德国 Heidelberg 大学 Nehse 等的模型、英国帝国理工学院 Lindstedt 和 Maurice 的模型、美国 Lawrence Livermore 国家实验室 Curran 等的模型和普林斯顿大学 Held 等的模型。复杂的计算模型,对计算机提出了很高的要求,很难成为实用的工具。特别是对于工程实践,人们并不需要了解燃烧过程中每一种组分详尽的演变过程,而只关心反应系统的总体变化历程和某些主要组分的详情。采用骨架(Skeletal)形式构建的化学动力学简化模型就具有明显的优越性。如 Li 模型、Griffiths 模型、Hu-Keck 模型、苏万华提出的 SKLE 模型和解茂昭提出的骨架机理。近年来,国内外主要是进行基于零维热力学模型的详细化学动力学机理研究、基于分散多区 CFD 模型与详细化学动力学机理耦合和基于多维 CFD 与简化动力学耦合研究。清华大学和天津大学建立了一整套从零维到三维耦合化学反应动力学的数值模型,建立了控制参数优化和燃烧控制策略研究的先进平台。

燃料的物理化学特性对 HCCI 燃烧动力学过程有决定性作用。研究发现,HCCI 能够适用于多种燃料,基础燃料、汽油、柴油、醇类燃料和天然气对 HCCI 燃烧与排放有显著影响。传统的燃料辛烷值不能表征 HCCI 的爆性^[4],降低汽油燃料的辛烷值和柴油燃料的十六烷值更有利于提高 HCCI 的工况范围^[5,6]。醇类燃料的 HCCI 工况范围比汽油大,在汽油中掺入部分醇类燃料可以显著扩展 HCCI 工况范围^[7]。

最近人们发现,尽管化学动力学对 HCCI 燃烧起重要作用,但是混合过程对 HCCI 燃烧仍有重要的影响。混合时出现的微观的燃料分布和温度的不均匀性都对着火和燃烧过程有显著的影响。Sjöberg 等^[8]研究认为,实际发动机中都自然存在热分层,使燃烧速率变慢。John Dec 等^[9]最新的研究结果进一步证明,HCCI 的燃烧不是均匀的,即使是在缸外预混好的混合气,也是带有很强的扰动结构。这主要是由于在压缩冲程的传热和湍流运动,产生了热分层,而这些热分层导致了 HCCI 燃烧的不均匀性。HCCI 燃烧的发生是由最热最适宜着火的点向较冷的区域逐渐发展的,而这个发展过程,可以有效地降低压力升高率。但人们发现,混合气燃烧主要是由于自燃引起的,在亚网格尺度内湍流对燃烧有相当的影响。通过在气团内扩大热分层,可控制最大爆发压力升高率,从而使 HCCI 向大负荷工况扩展。Zhao 等^[10]在单缸光学发动机上采用 PLIF 技术研究了再循环废气对新鲜充量物理和化学作用,直接光学图像和 PLIF 图像显示,通过排气门早关得到的再循环残余热废气在缸内与可燃混合气形成了明显的分层。在再循环废气与可燃混合气之间边界区域中出现的较高温区,推动了自燃着火过程的进行。Sankaran 等^[11]对燃空混合气与热废气的混合充量反应锋面的着火和扩散过程,以及热量和活化基输运的影响进行了研究。结果表明,标量耗散率和混合气的不均匀性对局部混合气的自燃着火有明显的影响,着火延迟可归纳为混合气成分和标量耗散率的函数。标量混合和湍流度对着火核心的初始位置和进一步的发展具有明显影响,热核的出现导致着火提前,而冷核则使得反应变慢。

上述研究结果从不同侧面揭示,充量成分和温度的不均匀性与着火燃烧过程之间存在着明显的相关性,通过控制充量成分和温度的不均匀性,有可能实现对着火燃烧过程的有效控制。实现内燃机高效低污染燃烧的重要途径就是合理地利用充量成分的不均匀性和温度不均匀性来控制着火燃烧过程。因而,在 HCCI 燃烧过程控制中,先进的混合气控制策略比简单的“均质混合气”更为重要,混合气全历程热分层、浓度和组份控制是实现内燃机高效清洁燃烧的关键。热分层控制可采用改变循环冷却水温度、进气加热和废气再循环等。混合气浓度控制主要通过先进的燃油喷射技术和缸内湍流控制,如下面将要介绍的苏万华提出的 MULINBUMP(multi-injection and BUMP combustion chamber)燃烧系统、AVL 公司 CSI 燃烧系统和王建昕提出的 ASSCI(assistant spark stratified compression ignition)燃烧系统等。Thirouard 等^[12]的研究表明,进气道不均匀混合,尽管直接影响着火位置,但对燃烧相位并没有直接影响,多次燃油喷射结合负气门重叠能够精确调整优化燃烧放热相位,进而扩展工况范围,改善经济性。John Dec 等^[13]研究发现,在降低压力升高率,延长燃烧持续期方面,低温燃烧对混合气浓度分层比较敏感。其最新的研究结果表明,缸内混合气分层使 HCCI 运行工况范围从 537 kPa 升高到 590 kPa。Aroonsrisopon 等^[14]在一台 CFR 发动机上用进气道喷射和缸内直喷两种喷射方式的结合来对燃料分层的影响进行研究,结果表明燃料分层能拓宽 HCCI 燃烧的稀燃极限,使燃烧更加稳定。通过外部的 EGR 或残余废气(内部 EGR)不仅可实现组分分层,还可以

实现热分层,进而控制 HCCI 燃烧过程。Aleiferis 等^[15]在高涡流比、低压缩比发动机上,使用进气加热和缸内残余废气结合喷雾控制实现混合气浓度、组分和热分层来控制 HCCI 燃烧。实验结果表明:轴向分层与均质相比,可以降低最大爆发压力,推迟着火时刻,轴向分层的着火是开始于排气阀和次要进气阀之间,更接近活塞中心的位置,而均质充量时,着火开始于进气阀靠近缸壁的位置。在 EGR 率为 40% 条件下,缸内混合气温度梯度增大,导致燃烧反应速度降低。尧命发等^[16]最新的研究结果也表明,适当的混合气分层可以使 HCCI 在低负荷工况下燃烧更为稳定,分层可使 HCCI 向小负荷工况扩展,同时分层也可以降低高负荷工况下的最大压力升高率,使 HCCI 向大负荷工况扩展。本书柴油机和汽油机部分将分别给出作者通过 CFD 模拟和实验研究控制柴油机和汽油机预混充量压燃着火 (premixed charge compression ignition, PCCI) 机理和燃油喷射控制的优化方法。

HCCI 是由化学动力学和混合过程的耦合支配的,燃油与空气的混合是 HCCI 需要解决的一个重要课题,控制燃油与空气的混合速率成为最近几年 HCCI 研究的一个重点。为了理解混合气的准备策略是如何影响 HCCI 发动机的燃烧和排放性能,美国 Sandia 国家实验室的 Richard 使用 PLIEF 诊断方法通过测量燃油的分布情况来研究 HCCI 燃油喷射和燃料与空气的混合过程,并着重研究了喷雾定时对混合气准备过程的影响。Beckman 和 Farrell^[17]提出一种喷雾气相浓度场定量标定的方法。他们在燃烧弹中拍摄高温、高压环境中柴油机喷雾气液相图像,着重讨论温度对喷雾气相分布的影响。但至今尚没有直喷式发动机燃烧室内气液相浓度分布的三维定量标定技术的报道。本书将在柴油机燃烧部分介绍作者最近研究成功的复合激光诱导荧光法 (PLIEF) 定量标定燃油喷雾场中燃空当量比的技术,阐述燃油喷雾在高温、高压和高充量密度现代内燃机燃烧室环境下,喷雾混合过程的研究结果,其中包括超高压 (高达 1 900 bar) 喷射和超高密度下气液两相喷雾特性。

1.2.2 柴油燃料 HCCI 燃烧过程及燃烧控制技术的研究进展

由于柴油高黏度、低挥发性、低自燃温度的特性,柴油机实现 HCCI 更加困难。柴油的汽化温度高,进气温度低,均质混合气形成困难;柴油的自燃着火温度低,压缩温度超过 800 K 就会有明显的焰前反应,导致燃烧提前、燃烧速率过快。因此,柴油机实现均质压燃的关键是混合气控制,包括提高燃油与空气的混合速率,实现快速混合,同时需要全历程的混合气浓度和成分控制、全历程燃烧温度控制。

通过缸内早喷方式实现柴油机 HCCI 燃烧是研究最多的方法。如日本新 ACE 研究院的“预混稀燃柴油机燃烧过程” (premixed diesel combustion, PRIDIC) 及随后提出的“多级喷射柴油机燃烧过程” (multiple stage diesel combustion, MULDIC)、丰田公司均匀 Bulky 燃烧系统 (uniform bulky combustion system, UNIBUS) 等。PRIDIC 系统采用侧置喷油器,通过增加喷孔数、减小喷孔直径 (0.17 μm 减小到 0.08 μm) 改进喷油来改善燃油分布,采用早喷 (120 $^{\circ}\text{C}$ A BTDC) 方式实现均质压燃。通过燃烧系统结构参数、废气再循环和柴油中添加 MTBE 等措施使发动机 HCCI 运行工况范围扩展到原机的 50%。为了保证发动机在全负荷工况下运行,在 PRIDIC 系统基础上, MULDIC 系统两个侧面喷嘴中间安装一个第二次燃烧用的中间喷油器。在大负荷工况采用多次喷油技术,侧面喷油器早喷 (PRIDIC),中间喷油器晚喷,实现二级燃烧。即首先 PRIDIC 燃烧,PRIDIC 燃烧结束后缸内 CO_2 浓度高,降低了氧的浓度,周围温度高而二次喷油燃烧温度低,降低了 NO_x 排放。该燃烧方式大幅度降低了有害排放,日本柴油机 13 工况测试结果表明,其 NO_x 排放仅为 1 g/(kW·h)。丰田公司 UNIBUS 系统使用中空锥形喷雾,喷嘴前端设置了碰撞部,以缩短喷雾穿距,采用早喷和晚喷实现两次喷油,通过 EGR 控制着火时刻实现柴油机 HCCI 燃烧,该系统在发动机 50% 负荷和 50% 转速实现 UNIBUS 燃烧,已应用于实际发动机中。

日产公司 MK (Modulated Kinities) 燃烧系统则是采用晚喷方式实现柴油机 HCCI 燃烧。它通过晚喷 (上止点后) 喷油,延长滞燃期,通过废气再循环,提高燃烧室内惰性物质的浓度,减少氧浓度,降低燃烧温度,使柴油喷雾自燃着火的滞后期延长,从而使喷入燃烧室的燃料获得更多的混合时间。同时设法提高混合速率,使 MK 发动机在中低负荷下实现均质压燃着火和可控燃烧速度的目标。进一步拓宽其工况范围的途径是通过提高喷油压力,缩短喷油持续期,提高燃油与空气的混合速率,并采用冷却的 EGR 和降低发动机压缩比延长滞燃期。

由于上述燃烧系统只能在部分负荷工况下运行,最初的 HCCI 研究认为,HCCI 主要应用于轻型柴油机上,只能覆盖轻型车常用低转速、部分负荷工况,但是,最近几年国内外研究进展表明,不仅在轻型车上,在重

型柴油机大负荷工况也可以实现 HCCI。本书作者在 2003 年提出了利用多脉冲喷射实现预混压燃燃烧与利用高混合率燃烧室实现稀扩散燃烧相结合的 MULINBUMP 复合燃烧过程^[18],2006 年完成了原理性样机的开发。该燃烧技术的基本思路是:在柴油机低负荷工况,通过多脉冲燃料喷射策略实现对均质压燃燃烧过程的控制,实现了 NO_x 和微粒的超低排放($<10 \text{ ppm}$);在中高负荷工况,采用均质压燃燃烧与稀扩散燃烧相结合的策略,发明了一种高混合率燃烧室与超高压喷射相结合,提高燃油与空气的混合速率,实现快速混合。在柴油机运行的全工况范围,应用“喷油模式”调制技术,实现了发动机不同工况下最佳喷油模式的目标,从而实现柴油机全工况范围的高效清洁燃烧。与国外同类燃烧过程相比,该复合燃烧技术具有与传统柴油机兼容和更大范围超低排放的优势,在不使用后处理器条件下实现柴油机超低排放。该方案是国际上最早提出的利用多次窄脉冲燃油喷射组织预混压燃燃烧技术方案。2005 年发表的“喷油模式调制及其对 HCCI 的影响”的文章^[19],评阅人在评审中认为所提出的研究成果是对 HCCI 技术大家庭的重要贡献。2004 年美国 Caterpillar 公司报道,通过采用高增压比、提高燃油与空气混合速率、废气再循环等控制策略,结合燃油改性,在重型柴油机上 HCCI 运行工况最大能拓宽到原机的 80%(1.6 MPa)。2006 年,欧洲 Scania 公司报道了采用高压共轨燃油喷射系统和新型燃烧方式,在满足欧 IV 和欧 V 排放法规仍不需要使用微粒和 NO_x 后处理器的实验样机。上述研究结果改变了传统的柴油机排放控制技术的观念,通过燃烧过程控制实现超低排放甚至是零排放仍有很大潜力,燃烧过程控制仍是实现柴油机高效、清洁和低成本的重要技术途径。

近年来,柴油机 HCCI 研究重点仍是向大负荷工况扩展,2006 年美国通用公司 Mike Potter 撰文提出了柴油机高效清洁燃烧设计的概念^[20],即采用高压、甚至超高压提高燃油混合速率,采用高比例 EGR 率降低混合气和燃烧温度,并延长滞燃期,实现均质、低温燃烧。燃烧过程的控制关键是喷雾控制和 EGR 控制并结合可变控制技术,解决发动机瞬态工况控制问题。本书作者最近提出一种基于可变增压技术和可变进气门晚关技术的高密度-低温燃烧概念,为燃烧过程路径控制提供了新的技术途径,在一个平均有效压力(BMEP)为 2 MPa 的高强化柴油机上,实现了全负荷高效清洁燃烧,在实验发动机上不采用后处理器可以达到欧 V 排放水平,热效率好于原机。这一成果在国际上尚未见报道,本书柴油机部分将给出详细的机理分析。

1.2.3 汽油燃料 HCCI 燃烧控制研究进展

汽油机燃料挥发性好,易形成均质混合气,其缺点是着火温度高,不易压燃。由于汽油机主要应用于轻型车,汽油机 HCCI 燃烧研究的重点是中小负荷工况的节能和排放问题。

由于汽油不易压燃,又需要与大负荷工况与传统点燃式汽油机的兼容性,通过进气加热或缸内残余废气提高缸内混合气温度是汽油机实现 HCCI 的主要途径。美国福特公司提出“优化动力学过程(Optimized Kinetic Process, OKP)”汽油机燃烧系统,该系统在缸内直喷汽油机上采用冷却液和排气热加热进气空气,同时采用气门定时改变(variable valve timing, VVT)压缩比和残余废气的方法,实现汽油机 HCCI 燃烧,通过该方法,HCCI 工况范围得到了拓宽,平均指示压力可达 0.55 MPa,燃料利用率比原机提高了 10%~30%, NO_x 排放比原机降低了 98%~99%。本书作者之一赵华在一台气口喷射的普通汽油机上,取消节气门,采用 EGR,改变了氧浓度、惰性气体浓度和比热,进而改变了混合气的燃烧特性;采用进气加热,在不同工况下把进气加热到 390~450℃,研究了适合轿车道路运行工况下实现均质压燃着火燃烧过程的控制条件, NO_x 排放降低了 99%,燃料利用率提高了 10%~30%。奥地利 AVL 公司首次提出了汽油机缸内多次喷射技术,提出了“压缩和火花点火(compression and spark ignition, CSI)”汽油机均质压燃燃烧系统,该系统是通过可变气门升程(variable valve lift, VVL)、可变气门定时(VVT)和可变气门驱动(variable valve actuation, VVA)控制残余废气,采用缸内灵活的燃油喷射控制,实现汽油多次喷射。在燃烧过程控制方面,实现各缸变量实时控制。工况控制还采集实时燃烧信息,发展能够精确预测混合气成分以及混合气温度等参数对燃烧影响的燃烧模型,实现混合气成分和温度瞬态闭环控制。该系统的缺点是机构复杂、成本高,但为汽油机均质压燃燃烧过程控制提出了很好的发展方向。日本本田公司在解决汽油机 HCCI 工况范围向小负荷工况扩展问题也提出了一个新的技术途径。该技术的要点是:可变气门定时(VVT)、缸内直喷和发动机增压,通过在负气门重叠角期间喷油,发动机怠速 750 rpm 时,最低负荷扩展了 0.16 MPa(压缩比 11.5),采用多孔喷嘴,最大负荷扩展到了 0.65 MPa,该发动机 HCCI 工况范围基本满足了日本 10~15 运行工况范围。

我国在汽油机 HCCI 研究也取得重要进展,王建昕等^[21,22]提出了基于缸内直喷混合气制备,以混合气浓度分层、火花辅助点火和燃料改质的综合控制 HCCI 燃烧的新方法,开发了相应的火花点火辅助分层压燃 (ASSCI) 燃烧系统,2006 年完成了原理性样机开发。该系统通过缸内二次喷射实现分层压燃控制着火,通过火花辅助均质压燃 (HCCI) 临界状态下着火稳定以及燃料重整拓宽 HCCI 运行工况范围,并在国际上首次详细研究了火花点火对 HCCI 燃烧特性的影响,提出了利用缸内直喷、可变配气以及节气门协同控制进行点燃 (spark ignition, SI) 与 HCCI 燃烧模式切换的新思路,实现发动机在 1~2 个循环内完成燃烧模式切换。与原 EQ491 汽油机相比节油 16%; NO_x 与原机相比下降 95% 以上;与缸内直喷汽油机 (gasoline direct injection, GDI) 相比,具有低排放的优势。该燃烧系统已在我国奇瑞汽车公司新开发的汽油机产品中得到了初步的应用,并于今年 3 月通过了科技部的验收。

赵华等^[23,24]创新开发了“进排气门联动控制”的均质压燃汽油机技术,采用大批量生产的可变气门机构零部件,研制了进、排气门升程和相位连续可变的汽油机 HCCI 原理性样机。该方案的优点是燃烧过程容易控制,与传统的汽油机有较大的兼容性,成本低,易产业化推广。该样机 HCCI 的运行转速可以达到 4 500 r/min,最大平均指示压力 (IMEP) 可以达到 5.2 bar,可以覆盖轿车主要的常用工况。其综合工况节油率可达 9.7%,市区工况节油率达 14%,郊区工况节油率达 5.8%,比英国 Lotus 公司和 Brunel 大学报道的节油率更高。除 HC 之外,在不加后处理器条件下, NO_x 和 CO 均小于欧 IV 的限值。该原理样机主要技术指标在国际同类研究中处于先进水平。本书作者之一王建昕在缸内直喷汽油机技术的基础上,通过灵活的喷射技术与“内部”和“外部”EGR 技术相结合,实现了大负荷变化范围内高效清洁燃烧,节能效果达 16%。本书汽油机本分将对上述研究给予详细介绍。

1.3 新一代内燃机燃烧技术的核心学术问题

新一代内燃机燃烧理论的核心学术思想是“燃烧过程边界条件与燃料化学的协同控制”。通过燃烧边界条件的控制,控制燃料均匀程度、燃料浓度、氧浓度以及再循环废气浓度等与燃料化学动力学过程相关的物理和化学参数,从而使燃烧化学反应按着预定的高效、低污染的方向和速率进行。这种物理和化学参数的控制是通过对燃料和空气的供给与混合,稀释气体(通常用排出的废气参与再循环)的利用,壁面的传热,进气温度等参数的控制实现的。这就必须对内燃机的燃料和空气供给系统、废气再循环系统及散热系统等进行高度灵活的、智能化的控制,以达到“协同”控制的目的。

基于“协同控制”的学术思想,如在 1.2 节中所介绍的那样,国内外的研究者,提出了多种燃烧控制方案,有些方案取得了巨大的成功(包括我们提出的原理样机)。但是,长期以来制约新一代内燃机技术发展的瓶颈,第一是人们不能在发动机全部对节能和超低排放具有重大作用的全部运行区域内实现均质压燃、低温燃烧运行。例如汽油机的怠速或负荷很低的区域,以及柴油机高负荷(平均有效压力大于 1 MPa)区域运行。这些区域超出了常规手段可以实现的着火和稳定燃烧的极限。第二个技术瓶颈是发动机瞬变工况下,由于控制参数响应特性的不同,使一个稳定状态下本已平衡的状态被打破,如何对其补偿,如何快速实现新的“平衡状态”是应用新一代内燃机燃烧理论,实现高效、清洁燃烧的另一个关键问题。本书拟从基础理论上给读者继续深入研究这些问题提供一条线索,本书也力图从技术和工程层面介绍成功的经验供读者参考。

根据新一代内燃机燃烧理论的核心学术思想,新一代内燃机燃烧技术的研究需要解决以下 4 个重要的科学问题。

(1) 超高压,超短脉冲燃料喷射下,燃料射流的雾化机理及燃烧全历程强化混合过程的研究。

由于柴油高黏度、低挥发性、低自燃温度的特性,柴油燃料必须在较高的喷射压力下,通过细小的喷孔喷入柴油机燃烧室。大量研究证明,即使喷射在超高压,超细喷孔的条件下,柴油燃料在燃烧室内形成的“喷雾”也处于贫氧的或“过浓”的状态(通常比理论化学当量比浓 4 倍),这种高温缺氧的状态,正好有利于多环芳烃 (PAHs) 生成,而多环芳烃的生成正是碳烟生成的源头。另一方面,柴油喷雾的外围部分在燃烧室高温作用下首先自燃着火,形成一个包围喷雾的火焰,这个火焰层一方面不断得到从喷雾内部扩散至火焰的燃料,另一方面不断得到从周围扩散而来的空气,火焰层就维持在燃料与空气为理论当量比的区域。因此,燃烧学把这种传统柴油机的燃烧称为“理论当量比下的扩散燃烧”,由化学动力学理论可知,理论当量比下的燃烧火焰温度最高,可达 2 700 K,此时伴随着最大的氮氧化物 (NO_x) 生成率。为了规避这种“理论当量比下的扩散燃烧”,新一代内燃机燃烧理论追求“适当燃空当量比混合气的均质压燃”,而为了在有限混合时间内,

特别是大供油量的高负荷情况下,实现相对均匀的混合气,强化混合率是重要科学问题之一。

由于当代先进燃料供给过程控制的灵活性,利用燃料喷射也是汽油机、天然气发动机的重要的燃料供给方式,燃料通过喷孔喷入燃烧室之后,都表现为燃料的射流。研究强化混合过程的机理,必须从雾核的破碎和雾化过程的强化开始,因为雾化引起的油滴的形成和空气的卷吸对喷雾的发展,有着至关重要的影响。为了在 1 ms 左右的混合时间里,完成均匀化的混合,我们必须提高喷射压力,进行超高压(>185 MPa)和超细喷孔(<100 μm)喷射。最新的研究表明,在这样的喷射条件下,压力室内存在强烈的高频压力震荡、喷孔内会存在“气泡”(空化)现象,而这种喷孔内的流态会影响喷孔近场的流态和油滴雾化。由于此现象固有复杂性,国内外研究甚少。研究利用空化现象,强化雾化和混合,将对柴油喷射系统的发展和混合过程控制方法产生重要的影响。

此外,喷雾的混合是大尺度的混合,由于内燃机燃烧室十分狭小,再加上燃烧的间断性和瞬态特性,虽然国内外进行了大量的研究工作,尚不能对混合过程进行定量的设计和控制。进一步开展脉动喷雾的研究,开展湍流尺度和强度诱发与控制的研究,开展全燃烧历程高混合率实现方法的研究,始终是柴油机和直喷汽油机的关键科学和技术问题,它涉及:超高压、强压力振荡非定常条件下,喷孔内空化现象的发生、发展规律及其对雾化强化的作用研究;借助喷射能量和燃烧室结构设计诱发湍流的研究;湍流尺度和强度对强化喷雾混合的研究;后燃期低混合能量下,强化混合途径的研究。

(2) 燃烧室内充量流态,组分(燃料、空气和再循环废气)的浓度和温度分布对着火和燃烧过程影响及控制的研究。

“均质压燃、低温燃烧”理论应用于汽油机可以大幅度提高燃料利用率,节油通常在 10% 以上,同时把氮氧化物排放减少 99%,其节油的机理是大大减少了进排气过程的泵吸损失,实现了稀混合气(燃料空气比远小于理论燃空比)可控自燃,混合气的稀薄程度已远远低于传统燃烧学中着火极限。新的燃烧理论证明,如果使处于着火极限之外的稀薄混合气得到足够的热量,例如燃空当量比为理论当量比 1/20 的稀薄汽油混合气也可稳定自燃着火。取得热量最方便的技术措施是利用排出的废气,组织已燃的废气参与再循环。所以,在均质压燃低温燃烧汽油机中充量组份是由废气、空气、燃料组成的,充量的流态将决定组分(废气、空气、燃料)的浓度和温度分布,进而决定空间化学动力学过程,决定着火的发生、燃烧的效率、有害产物的生成等。

在柴油机中再循环废气同样发挥重要作用,再循环气体含有大量的二氧化碳,它可以起到稀释氧浓度,增大充量的比热,增加化学反应中的惰性物质,改变充量温度等作用,从而改变燃料着火和燃烧过程。充量的流态是组分输运过程及组分最终混合与分层的能量来源,而充量的流态决定于燃料喷射和燃烧室形状的耦合,进排气道的结构和气门定时的耦合。通过燃油喷射参数和新型燃烧室的开发,通过进气和排气道以及气门开闭定时的设计与控制,控制不同工况下的充量流态,研究其对组分浓度和温度分布及相应化学动力学过程的影响是重要科学问题之一。它涉及:发动机进、排气门开闭定时,升程和气道结构对充量流态影响的研究;充量流态对组分浓度和温度分布规律的影响及控制方法;组分浓度和温度分布特性对着火,有害产物生成,燃烧噪声和热效率的影响及控制方法等。

(3) 均质压燃、低温燃烧过程中湍流混合与化学动力学耦合及其对有害产物生成和热效率影响的研究。

如前所述,“均质压燃、低温燃烧”理论是对传统的非均质扩散燃烧(柴油机)和分区燃烧(汽油机)的突破,追求“均质、整体、低温”的燃烧。但从微观而言,在均质中存在着不均匀,在整体燃烧中存在着空间和时间的燃烧过程的差异和变动。深入研究这种现象和规律,将可以更有效地控制着火的发生和放热的历程,从而影响燃烧的效率和燃烧的粗暴程度。

这种不均匀性包括充量组分(燃料、空气、再循环废气)浓度的不均匀和温度的不均匀。温度的不均匀与壁面传热、组份之间的传热有关,也与充量组分浓度的不均匀性引起的比热等热物性的差异和化学过程的差异有关;浓度的不均匀与充量的流态和燃料喷雾特性引起的传质和混合过程有关。这就必须要通过流体力学、热力学和化学动力学的耦合研究,发展“均质压燃、低温燃烧”理论和技术。它涉及:通过湍流混合与化学动力学耦合作用的研究,探讨燃烧速率的更精确的计算方法;研究和理解过浓和过稀混合气涡团从部分氧化反应向完全氧化反应过渡的物理和化学过程,为新燃烧控制技术提供依据。

(4) 内燃机瞬变工况下,均质压燃低温燃烧过程中,充量的流态、热状态,组份的浓度和温度分布的滞后效应及协同控制的基础问题。

内燃机作为原动机主要应用于汽车等移动式动力装置,其转速和负荷是动态变化的。稳定工作状态下