

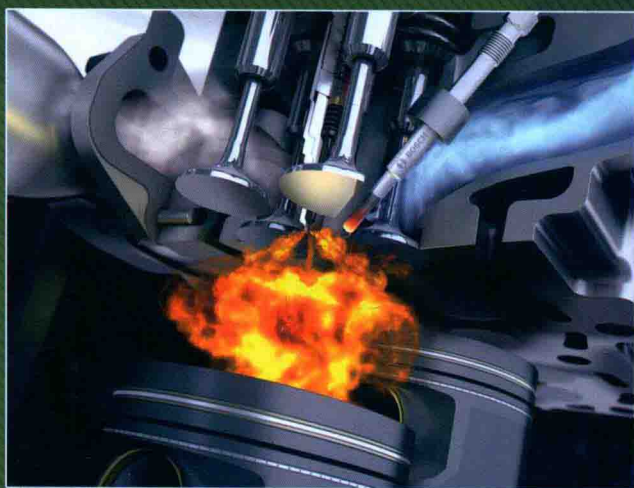


出版社出版基金资助项目
CHUBANSHECHUBANJINZIZHUXIANGMU

低热值气体燃料发动机 燃烧过程及火焰稳定性

Combustion Process and Flame Stability
of Low Caloric Value Gases Fueled Engine

© 许 健 张 欣 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

低热值气体燃料发动机 燃烧过程及火焰稳定性

许 健 张 欣 著



北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

随着日益严峻的能源与环境危机,低热值气体燃料以其清洁性与可持续性给气体发动机的推广应用带来了较大的发展空间。本书采用多维数值仿真模拟的方法,对低热值气体燃料发动机缸内预混燃烧的涡团与火焰面相互作用及火焰内在 D-L 不稳定性等进行了模拟研究,主要内容为:气体燃料湍流预混火焰 T-M-S 方程及其数值算法研究;低热值气体燃料发动机点火与湍流燃烧的数学模型研究;低热值气体燃料发动机燃烧过程数值模拟仿真平台的研究;低热值气体燃料发动机湍流燃烧过程及火焰的稳定性研究。

本书适合机电相关专业的研究生和科研人员阅读。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

低热值气体燃料发动机燃烧过程及火焰稳定性 / 许健, 张欣著. — 北京: 北京交通大学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-5121-2440-0

I. ① 低… II. ① 许… ② 张… III. ① 气体燃料-发动机-燃烧过程-火焰稳定性 IV. ① TK43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 236876 号

低热值气体燃料发动机燃烧过程及火焰稳定性

DIREZHI QITI RANLIAO FADONGJI RANSHAO GUOCHENG JI HUOYAN WENDINGXING

责任编辑: 田秀青 特邀编辑: 李晓敏

出版发行: 北京交通大学出版社 电话: 010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印 刷 者: 北京艺堂印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170 mm×235 mm 印张: 13.25 字数: 196 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-2440-0/TK·5

定 价: 39.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。
投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前言

近年来随着日益严峻的能源与环境危机，低热值气体燃料以其清洁性与可持续性给气体燃料发动机的推广应用带来了较大的发展空间。因为燃用低热值气体时发动机容易发生燃烧过程不稳定现象，所以如何提高低热值气体燃料发动机的燃烧稳定性已成为代用燃料发动机研究领域的热点问题。为了进一步深化气体燃料发动机缸内湍流燃烧的理论研究，推进缸内混合气形成与燃烧过程控制的技术发展，本书以低热值气体燃料发动机缸内着火与燃烧过程中火焰面结构的微观演化过程为研究重点，开展了缸内预混燃烧的湍流涡团与火焰面的相互作用过程及火焰内在不稳定性效应等的多维数值模拟的基础研究。研究工作阐明了低热值气体燃料发动机缸内燃烧过程中火焰面形态与结构的演化机理，为清洁高效气体发动机燃烧系统的优化和设计提供了理论支持，具有较高的学术意义和应用价值。

本书研究了湍流扰动下平面火焰传播过程中 D-L 不稳定性（Darrieus-Landau 不稳定性）的发展过程，求解了湍流场作用下的 M-S 方程（Michelson-Sivashinsky 方程），在此基础上得出了平面火焰传播速度增量的修正公式；在湍流燃烧三维模型中采用桥函数的方法将 D-L 不稳定性的函数表达式引入组分方程的化学反应源项中，建立了包含 D-L 不稳定性效应的 PaSR-LES（partially stirred reactor-large eddy simulation，部分搅拌反应器-大涡模拟）燃烧模型，并研究了发动机缸内流场的湍流分形维数、涡团周转时间与黏性截止尺度等特征参数的内在联系，提出了湍流微混合时间尺度和湍流分形维数的函数表达式；基于 AKTIM-Euler（火核跟踪-欧拉）方法，建立了适用于大涡模拟的火花点火模

型，描述了以燃烧反应进程变量为权重的点火能量分配方式；搭建了低热值气体燃料发动机缸内燃烧的三维数值模拟仿真平台，提出了多面体顶点运动和分裂重构的动网格耦合算法，此方法解决了网格单元结构出现的偏斜度较大与负体积等问题；开展了燃用低热值气体燃料的定容弹湍流燃烧试验和发动机缸压测定试验研究，分别验证了本书的湍流燃烧模型和发动机缸内燃烧的数值模拟仿真平台。

本书分析了湍流强度和无量纲马库斯坦长度特征参数对平面火焰锋面的位置和形态随时间变化的影响规律；通过低热值气体发动机工作过程的模拟计算，研究了进气与压缩过程中各阶段缸内大尺度拟序结构的演变规律，比较了不同发动机转速下缸内拟序结构的生成、发展及耗散等过程；研究了从点火到初始火核形成的过程中火核半径等参数的变化历程和各发动机转速下涡对与火核相互作用的特征区域范围；分析了缸内涡团运动对各火焰面结构形态的作用；研究了 D-L 不稳定性效应作用下湍流火焰面结构的演化历程，分析了斜压扭矩对增加火焰面皱褶的作用等。由计算结果的分析可得出如下结论。

1. 高强度涡团容易出现在远离燃烧室壁面的火焰自由发展区域，火焰锋面处的涡团有助于增大火焰面皱褶度，提高湍流火焰传播速度；涡对运动会对火焰面产生卷吸与拉伸的作用，从而促使火焰面上皱褶的产生。

2. 当低热值气体中惰性气体组分体积比增大时，火焰面皱褶度减小；低热值气体中掺混一定量氢气将有利于提高火焰传播速度，促进涡团运动对火焰面的作用，增大火焰面皱褶程度。

3. D-L 不稳定性会导致火焰锋面处产生斜压扭矩，此斜压扭矩将会增加火焰面皱褶程度；火焰面穿过湍流涡对，应变率随之被 D-L 不稳定性效应影响，其正负符号与曲率相同，火焰锋面的焰后已燃区逐渐出现与焰前未燃区中方向相反的涡团。

许 健
2015 年 12 月

目 录

第 1 章 研究背景、现状及内容	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.3 研究内容	(30)
第 2 章 气体燃料湍流预混火焰 T-M-S 方程及其数值算法研究	(32)
2.1 湍流预混火焰 T-M-S 方程的特性分析	(34)
2.2 湍流预混火焰 T-M-S 方程的数值算法研究	(36)
2.3 基于 T-M-S 方程解的火焰不稳定性的研究	(46)
2.4 本章小结	(56)
第 3 章 低热值气体燃料发动机点火与湍流燃烧的数学模型研究	(58)
3.1 湍流大涡模拟控制方程及亚网格模型的研究	(58)
3.2 AKTIM-Euler 火花点火模型的研究	(61)
3.3 PaSR-LES 湍流燃烧模型的研究	(66)
3.4 燃烧反应进程变量与火焰面亚网格褶皱度因子的研究	(79)
3.5 本章小结	(81)
第 4 章 低热值气体燃料发动机燃烧过程数值模拟仿真平台的研究	(83)
4.1 发动机三维数值模拟计算的动网格研究	(84)

4.2 发动机湍流燃烧过程数值模拟的程序开发 (100)

4.3 计算网格的独立性分析 (112)

4.4 湍流燃烧数值模拟的试验验证 (118)

4.5 本章小结 (127)

第5章 低热值气体燃料发动机湍流燃烧过程及火焰的稳定性研究..... (129)

5.1 进气与压缩过程缸内湍流拟序结构与涡团运动的研究 (130)

5.2 涡团对缸内火焰着火及火焰传播过程的研究 (140)

5.3 火焰面结构与发展的影响因素分析 (156)

5.4 火焰 D-L 不稳定性对缸内火焰形态与发展的作用研究 (168)

5.5 本章小结 (181)

第6章 总结与展望..... (183)

6.1 本书的主要工作及结论 (183)

6.2 本书的主要创新点 (185)

6.3 展望 (186)

参考文献..... (187)



第 1 章

研究背景、现状及内容

1.1 研究背景及意义

随着科学技术的发展,内燃机已经成为融合现代电子、信息、石油化工、新型材料和精密制造等多学科的高新技术产品。尽管国内外很多研究工作者一直在研究、寻找替代内燃机的新型动力装置,但至今尚未找到一种合适的、经济高效的、可以完全替代内燃机的源动力装置。从能源发展趋势和国内外内燃机市场需求来看,未来几十年,石油基燃料的内燃机仍将是各种机械设备的主导动力,中国内燃机工业协会的数据显示我国 2011 年车用内燃机总数为 1 770 万台。如此巨大的市场需求与目前石油基燃料资源的严重匮乏之间的矛盾使得世界各国对新型替代能源的研究非常迫切,我国为应对节约石油资源的需求,加快了各种发动机替代燃料的研究开发与推广应用,并已经获得了阶段性的成果。目前替代燃料的使用情况可分为以下三种^[1]。

(1) 含氧燃料（醇、醚、酯），主要为甲醇（ CH_3OH ）、乙醇（ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ）、二甲醚（ $\text{CH}_3\text{—O—CH}_3$ ）及生物柴油等。

(2) 合成油，主要为由煤、天然气或生物质等生产的液体燃油。

(3) 气体燃料，主要为压缩天然气（CNG）、液化天然气（LNG）、液化石油气（LPG）、氢气、煤层气、沼气等。

在发动机燃用气体燃料的研究领域，天然气等因其丰富的产量和良好的特性已经成为研究的热点。发动机燃用气体燃料可以有效地降低污染物排放和燃料消耗，天然气发动机与汽油发动机相比，NMHC（非甲烷碳氢）排放可下降 70%， NO_x 排放可下降 40%， CO_2 排放可下降 20%。如何更好地利用这些存在广泛的气体燃料资源是各国学者在世界能源危机环境下的新机遇和新挑战。

除了天然气以外，越来越多的研究者目光开始投向诸多传统上利用率偏低的低品质气体燃料（如沼气、煤层气）。由于这些燃料中一般甲烷（ CH_4 ）的含量相对较低，非烃类气体（多为 CO_2 、 N_2 等）的含量较高，从而其体积热值（或燃烧焓）相对于天然气明显较低（即体积热值低于 34.96 MJ/m^3 ），因此本书中称这类气体为低热值气体。燃用低热值气体时，发动机所面临的最大挑战是燃气中存在较多的 CO_2 和 N_2 ，对燃烧具有强烈的抑制作用，火焰传播速度和放热率下降，可燃极限范围变窄，使得发动机更容易产生部分燃烧和失火等不正常的燃烧现象，并且发动机循环变动较为严重。对于沼气而言，其中 CO_2 体积分数为 20%~40%，在理论空燃比为 6.2 时最大传播速度为 0.23 m/s ，这导致沼气发动机在实际运行中燃烧持续期变长，后燃严重，排气温度增高，严重损害了沼气发动机的经济性和可靠性。因此低热值气体燃料的成分和性能的多变性对发动机的工作稳定性提出了更高的要求，有必要对低热值气体燃料发动机的缸内燃烧稳定性进行系统和深入的研究。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 气体燃料发动机缸内燃烧循环变动的研究

对于气体燃料发动机,当可燃混合气中惰性气体组分百分比较大时或者空燃比增大到一定值之后,在一些工况下稀薄燃烧会带来燃烧稳定性降低、循环变动加大等问题,因此会对发动机的排放性、经济性等性能产生不利的影响。燃烧循环变动是发动机燃烧过程的一个重要特征。在发动机以某一工况稳定运转时,某一循环与下一循环燃烧过程的情况不断变化,使发动机各循环间的运行状态出现波动。强烈的燃烧循环变动严重影响发动机的动力性、经济性和排放特性。尤其在发动机采用稀薄燃烧方式时,循环变动会加剧,以至于发动机无法稳定工作。

1. 气体燃料发动机缸内燃烧循环变动的试验研究

由于燃烧循环变动对发动机的性能具有十分重要的影响,国内外对气体发动机燃烧循环变动的影响因素开展了大量的试验研究。国外学者 Selim 基于单缸四冲程的柴油/CNG 双燃料发动机燃烧压力数据开展了发动机循环变动研究,对最大缸压、最大缸内压升率、平均指示压力等数据的均值、标准差、变动系数等参数进行了计算,研究指出发动机的燃用燃料、运行工况和设计参数等均对燃烧稳定性影响显著^[2]。Liu 在一台变压缩比的燃用石油基参比燃料的 HCCI (均质充量压燃) 发动机上考察了过量空气系数、压缩比、 N_2 、 CO_2 和 CH_4 掺入量等对缸内燃烧循环变动的影响,表明优化后的 N_2 、 CO_2 、 CH_4 掺入量可以改善发动机的动力性并减少缸内循环变动^[3]。国内学者在气体发动机燃烧循环变动方面的研究如下。李国岫等人开展了天然气发动机稀薄燃烧稳定性方面的试验研究,结果表明在怠速工况下,天然气发动机燃用稀混合气时,燃烧循环变动明显;与低速大

负荷工况相比,稀薄燃烧天然气发动机在高速大负荷工况下的平均指示压力燃烧循环变动系数上升了一倍^[4]。王金华等人在定容燃烧弹中开展了天然气掺混10%~40%氢气混合燃料直喷燃烧循环变动研究,结果表明燃烧循环变动起始于火焰发展初期阶段。随着掺氢比增加,火焰形态更规则且更集中于点火电极,同时由于直喷燃烧方式混合气分层分布,更能够实现低循环变动的稳定稀燃^[5]。

在低热值气体发动机缸内循环变动的研究方面,国内外研究相对较少,并且主要集中于掺混氢气对降低低热值气体发动机循环变动的影响方面。由于氢气在空气中的层流火焰传播速度较高(为291~310 cm/s),约为汽油的7.2倍,故在低热值气体中加入适量的氢气可以提高层流火焰传播速度;其次氢气的点火能量很低(为15.1~20 μJ),可燃范围很广并且稀薄燃烧能力很强,因此氢气的加入可以提高低热值气体的点火稳定性并拓宽其稀燃极限,进而改善低热值气体发动机的循环变动状况。Porpatham等人在一台火花点火发动机上研究分别向沼气中掺混5%、10%和15%体积分数的氢气时对发动机性能的影响。结果表明,掺入氢气以后,发动机稀燃极限拓宽,循环变动降低,且掺混10%的氢气时发动机总体性能最佳^[6]。Narayanan等人建立了沼气与氢气混合气的火花点火发动机的仿真模型,并基于双区燃烧模型对发动机的燃烧性能参数进行了研究和分析,结果表明低热值气体掺氢后燃烧稳定性得以增强^[7]。Ando等人对两种不同组分的低热值气体发动机进行了对比研究,结果表明掺混甲烷与氢气等组分的低热值混合气可以显著降低 NO_x 的排放量,并且能在更宽的空燃比范围内稳定燃烧^[8]。

2. 火花点火发动机燃烧循环变动产生机理的研究

对于火花点火发动机燃烧循环变动产生机理的研究,需要对缸内各时刻火焰的发生和发展形态进行探测和分析。尽管通过试验的方法可以对发动机宏观性能的各表征参数进行分析,但无法对火焰微观结构的演变及其影响因素等开展深入的探究。近几年来试验技术水平虽有很大的发展,却依然面临以下几方面的瓶颈:

- (1) 精确控制边界条件和运行工况,使得试验的复杂度提高;
- (2) 活塞的往复运动,使得光学诊断中光路受限并且精确度无法保证;
- (3) 发动机缸内多因素的强耦合,使得问题的分离和分析非常困难。

然而,采用数值计算方法却能够弥补以上诸多的不足,并可从多重角度来对问题进行预测和分析。

随着目前计算水平的提高,采用大涡模拟 (LES) 的方法对发动机气缸内湍流火焰进行精确的计算变得可行。通过采用湍流燃烧大涡模拟方法,可获取固定边界条件和运行工况下的缸内燃烧进程和火焰形态,进而对各可变参数的影响规律进行分析和总结。虽然雷诺平均模拟 (RANS) 的方法在发动机的工业应用与预测方面仍然具有很高的地位,但只有借助大涡模拟和直接数值模拟 (DNS) 的方法才可以对发动机的流动与燃烧的循环变动^[9,10]、敲缸现象^[11,12]及燃烧火焰的微观形态^[13]等方面进行模拟计算。与 DNS 相比,LES 的求解范围更大。由于计算机能力的限制,DNS 只能对层流及较低 Re 数湍流现象进行求解,而 LES 可对工程实际中大量存在的高 Re 数湍流及湍流燃烧现象进行有效的求解。与传统的 RANS 方法相比,LES 的求解结果更精确。因为 RANS 忽略了大涡与小涡在本质上的区别,必然带来误差;而 LES 则对受边界条件和流动类型影响较大的大涡进行直接求解,对基本各向同性的小涡采用模型,结果也更精确^[14]。

湍流大涡模拟的燃烧模型是采用 LES 的模拟方法对燃烧过程中的流动与化学反应等物理和化学过程相互耦合的现象所建立的数学描述。目前,湍流预混大涡模拟的燃烧模型大致可分为以下几类。

(1) 通用燃烧模型:过滤密度函数方法^[15,16]、线性涡模型^[17-20]、人工增厚火焰面模型^[21,22]等。

(2) 完全预混燃烧模型:湍流燃烧封闭模型^[23]、火焰面密度模型^[24,25]等。

(3) 部分预混燃烧模型:Domingo 等人提出了一种适合于非预混湍流燃烧模式的部分预混燃烧模型^[26]。由于预混湍流燃烧发生于很薄的小火焰燃烧区域,

所以需要结合完全预混合和完全非预混合模型中的亚网格封闭项。

基于湍流燃烧大涡模拟的方法，学者们相继开展了发动机缸内流动与燃烧的循环变动机理的研究。Vermorel 等人采用多循环大涡模拟的方法对一台四气门单缸火花点火发动机的燃烧循环变动进行了模拟，图 1-1 和图 1-2 分别为通过大涡模拟得到的连续 10 个发动机循环的缸内压力曲线和某一个发动机循环进气阀开启后 140° CA 时缸内速度场的分布^[11]。研究表明，采用大涡模拟的方法完全可以对循环变动的现象进行描述，并提出循环之间火花塞周围流场及组分不均匀度等的变动是燃烧循环变动的主要影响因素。

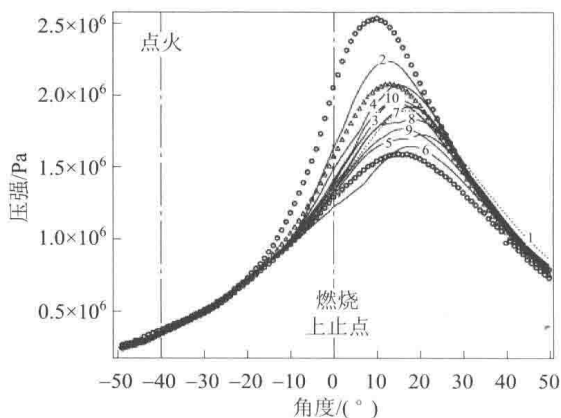


图 1-1 大涡模拟得到的连续 10 个发动机循环的缸内压力曲线

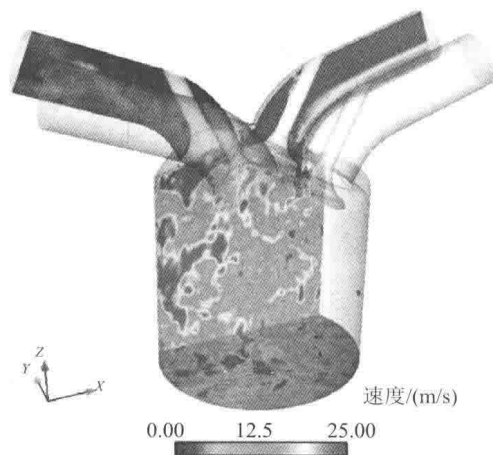


图 1-2 某一个发动机循环进气阀开启后 140° CA 时缸内速度场分布

Goryntsev 等人在 KIVA-3V 中采用大涡模拟的方法，并选取标准 Smagorinsky 亚网格模型，对一台火花点火缸内直喷发动机进行了仿真模拟，研究了流场速度脉动值的循环变动对缸内湍流场与混合气形成过程的影响^[27,28]。图 1-3、图 1-4 分别为发动机压缩冲程某曲轴转角下各循环的瞬时速度及其平均速度曲线和各循环的脉动速度及其均方根曲线，图 1-5 为压缩冲程下燃烧室各截面上的平均速度场流线及速度标准差等值线场。

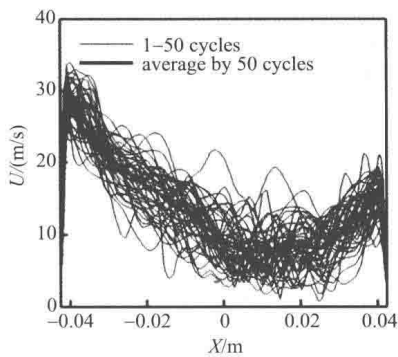


图 1-3 各循环的瞬时速度及其平均速度曲线

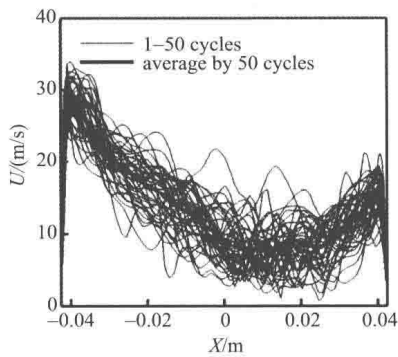


图 1-4 各循环的脉动速度及其均方根曲线

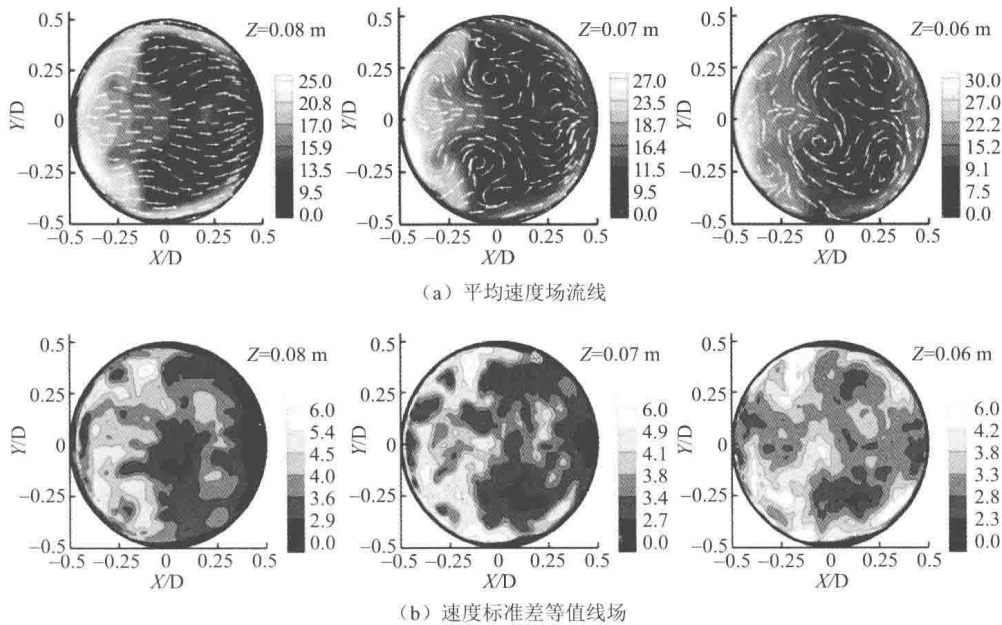


图 1-5 压缩冲程下燃烧室各截面上的参数分布

研究结果显示,进气冲程中在射流尖端和初期滚流中心存在较强的循环变动,湍流本身的随机性和进气道的射流效应共同作用是缸内流动速度循环变动的起因。进气冲程的流动对压缩和膨胀冲程的湍流发展具有重要的作用,在这些冲程中缸内湍流基本上均由燃烧室的几何形状决定,且气缸内滚流中心处的循环变动强度最大。由于在压缩冲程后期,滚流中心位置接近于火花塞区域,因此流动速度的循环变动将显著地影响此关键区域的流动参数,也是失火循环产生的重要原因。经分析表明,在发动机工作过程中,最大强度的循环变动出现在压缩冲程中接近点火的时刻,这将直接影响每个发动机循环的有效功率及发动机工作的粗暴程度。

Enaux 等人采用 ECFM-LES (ECFM, 扩展相干火焰模型) 燃烧模型对一台四冲程发动机缸内流动与燃烧连续进行了 25 个循环的模拟计算^[29,30],图 1-6 给出了 C14、C15 和 C16 循环的缸内速度矢量场及火焰面的形态。经分析表明,火花塞附近局部流场的循环波动是火花点火发动机循环变动的主因。

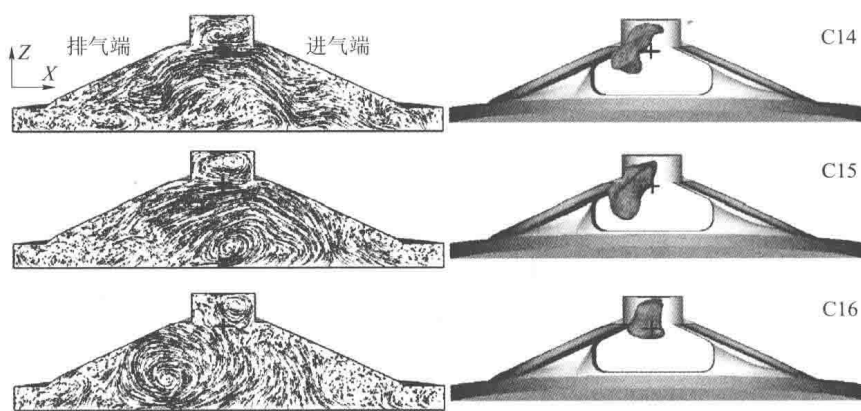


图 1-6 缸内速度矢量场及火焰面的形态

Albi 等人开展了更为深入的研究,通过采用表征火焰不稳定性的微分方程建立了缸内燃烧循环变动的二维模型,分析了火焰不稳定性与燃烧循环变动之间的内在关系,并指出缸内涡流场与火焰不稳定性之间的相互耦合作用是发动机

燃烧循环变动的微观诱导因素^[31]。图 1-7 为在火焰锋面运动模型中有无 D-L 不稳定性效应项的各时刻火焰面形态对比。由图 1-7 可见, 在考虑 D-L 不稳定性的情况下火焰面具有更快的传播速度, 并且火焰面皱褶更加明显。

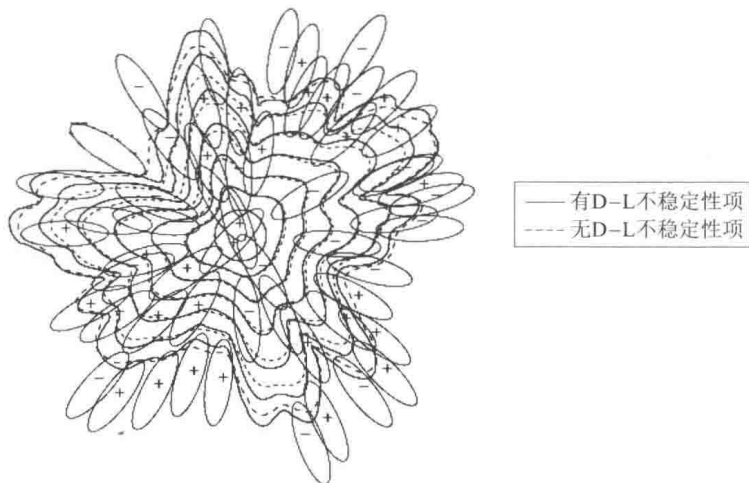


图 1-7 有无 D-L 不稳定性效应项的各时刻火焰面形态对比

图 1-8 (a)、(b) 分别为火焰面半径达到 4 cm 与 10 cm 时的标准化燃烧期的概率密度函数分布直方图 (标准化燃烧时间为: $(t_{\max} - m) / s$, $t_{\max}$ 为火焰面最大半径达到指定值的时长, m 为 $t_{\max}$ 的平均值, s 为 $t_{\max}$ 的均方根)。由图 1-8 可知, 火焰面半径较小时, 燃烧时长的概率密度函数的分布呈现较为无序的双峰结构, 燃烧时长的大小受到湍流场的分布等因素的影响较为显著, 某些燃烧循环会出现不正常燃烧现象; 然而, 对于火焰面半径较大的情况, 燃烧时长的概率密度函数分布呈现近似标准的高斯分布, 燃烧不再局限于初始条件及早期湍流流场的影响。

Ramos 综合了国外学者对于发动机燃烧循环变动的原因及影响因素等的相关研究, 得出了以下结论^[32]:

- (1) 从火花点火到形成稳定火核所需要的时间是循环变动的直接主因;
- (2) 涡流与湍流脉动及火焰锋面处的速度梯度会导致火焰面发生扭曲与皱

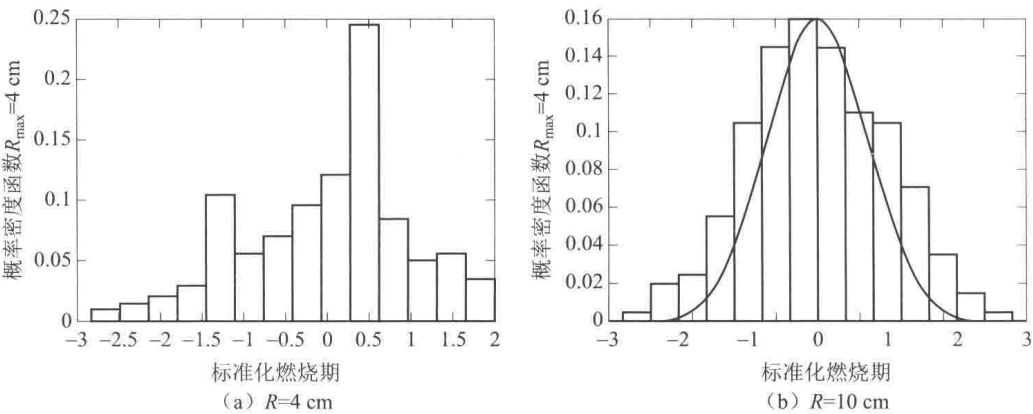


图 1-8 火焰半径达到某一值时的标准化燃烧期的概率密度函数分布直方图

- 褶，从而影响燃烧循环变动；
- (3) 小尺度湍流结构及其对反应物混合过程的影响直接导致了不稳定微小火核的生长，而大尺度湍流结构则影响火焰锋面的表面面积；
- (4) 湍流强度、湍流应变率场与可燃混合气的当量比的波动可影响燃烧循环变动的大小；
- (5) 增加发动机转速将增大缸内脉动速度分量，进而使得可燃气混合完全、湍流火焰传播速度增大，总燃烧时间和火焰传播时间减少，缸内燃烧等容度提高，燃烧循环变动降低。

由上述分析可知，为了更加清晰和深入地了解气体燃料发动机燃烧循环变动的发生机理，本书有必要深化气体燃料发动机缸内燃烧过程中湍流涡团与火焰的相互作用过程及火焰不稳定性等方面的基础研究，从而揭示发动机稳定燃烧的机理。

1.2.2 气体燃料预混燃烧火焰不稳定性的研究

近年来，Kadowaki、Steinberg 及 Creta 等学者提出外在湍流涡团与内在火焰不稳定性等两大因素作用的结合最终导致了预混湍流燃烧火焰面结构及其传播过