

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目: <u>基于双相激光诱导荧光技术的</u> <u>汽油直喷喷雾蒸发特性的研究</u>

学生姓名:	李天云
学生学号:	5080209234
专业:	机械工程及自动化
指导教师:	张玉银
学院(系):	机械与动力工程学院



基于双相激光诱导荧光技术的汽油直喷喷雾蒸发特性的研究

摘要

液体燃油喷雾的蒸发特性对直喷发动机缸内的混合气形成、燃烧过程和有害排放物的 形成具有十分重要的影响。为了达到高效清洁的燃烧,必须利用先进的激光诊断技术对燃 油喷雾的蒸发过程进行精确的测量。作为影响燃油喷雾蒸发的两个最重要的物理量,燃油 蒸汽的浓度和液相的温度对蒸发过程至关重要。本研究首先基于双相激光诱导荧光技术实 现对直喷喷雾的气相和液相进行分别测量,然后通过一系列的标定实验实现直喷喷雾的气 相浓度的定量测量;最后在双相激光诱导荧光基础上,利用双色测温法原理,开发出直喷 喷雾的液相温度测量技术。设计相应的标定装置,获得了温度变化和液相荧光之间的定量 关系,为实现喷雾内液相温度的二维测量打下了坚实的基础。本课题的研究成果将对直喷 喷雾的蒸发过程提供深入而详细的信息,为控制,优化直喷喷雾的蒸发过程打下坚实的基 础。

关键词: 直喷喷雾, 蒸发, 浓度, 温度, 双相激光诱导荧光, 双色测温



STUDY OF EVAPORATION CHARACTERISTICS OF DIRECT INJECTION SPRAYS BASED ON LASER INDUCED EXCIPLEX FLUORESCENCE TECHNIQUE

ABSTRACT

The spray evaporation of liquid fuel in the engine cylinder is crucial for fuel-air mixture formation, combustion and harmful emission formation process in spark ignition direct injection (SIDI) engines. To achieve high efficiency clean combustion, the fuel spray evaporation need to be accurately measured using advanced laser diagnostic techniques. Among the various factors to influence the evaporation, the vapor concentration and liquid temperature play dominating roles in the spray evaporation process. Developing advanced laser diagnostic techniques to measure those two factors is the objective of this study. In this study, the liquid and vapor phase of the spray was firstly separately imaged using laser induced exciplex (LIEF) technique. The quantitative vapor concentration measurement was then achieved through various calibration procedures. The measurement of the liquid temperature was done by combining the LIEF technique with two-color thermometry technique. A specially designed calibration device was used to quantitatively correlate the liquid temperature with detected fluorescence signal. The calibration results show the fluorescence ratio is strongly dependent on liquid temperature, while the effects of ambient pressure, laser energy and spatial position are negligible. Those information provides a solid foundation for the future 2D temperature measurement with in DI spray. The results of the study will provide detailed insightful information for spray evaporation process, thus pace the way to high efficiency clean combustion.

Key words: Direct injection spray, evaporation, concentration, temperature, laser induced exciplex fluorescence, two-color thermometry



日不

第一章 绪论	1
1.1 我国汽车发展现状	1
1.1.1 汽车节能与环保	1
1.1.2 汽车排放法规	1
1.2 汽车缸内直喷技术	2
1.3 直喷喷雾	3
1.3.1 直喷喷雾重要性	3
1.3.2 直喷喷雾特点	4
1.3.3 激光诊断技术特点	4
1.3.4 激光诊断技术在直喷喷雾测量上的运用综述	5
1.3.5 直喷喷雾的蒸发过程及相关特性	6
1.4 课题研究目的及意义	7
1.5 课题研究内容	8
1.6 本章小结	8
第二章 理论研究	9
2.1 测试方法文献调查和综述	9
2.1.1 浓度测试方法	9
2.1.2 温度测试方法	10
2.2 LIEF 浓度-温度测量原理	11
2.2.1 LIEF 气液两相分离原理	11
2.2.2 气相浓度测量原理	11
2.2.3 液相温度测量原理	12
2.2.4 实验测试燃料选择	13
2.2.5 LIEF 技术的局限性	14
2.3 本章小结	15
第三章 实验流程及实验设备	16
3.1 实验测试技术路线	16
3.2 实验设备	17
3.2.1 喷射系统	17



3.2.2 环境控制系统	
3.2.3 激光测试系统	21
3.2.3 浓度标定与温度标定装置	24
3.3 测试工况	26
3.3.1 气相浓度测试工况	26
3.3.2 液相温度标定工况	26
3.4 实验操作方法	27
3.5 本章小结	
第四章 数据分析与处理	29
4.1 荧光光谱干涉标定结果	29
4.2 激光能量衰减校正	
4.3 定量的浓度测试结果	32
4.4 喷雾气相浓度标定的结果	
4.5 喷雾气相燃油浓度分布	33
4.6 燃油液相温度标定	34
4.6.1 图像处理方法	34
4.6.2 测量影响因素分析	
4.6.3 不同 FB 浓度的燃油温度标定结果	
4.7 本章小结	42
第五章 结论	43
第六章 后续工作	44
参考文献	45
谢辞	47
附录	48



第一章 绪论

1.1 我国汽车发展现状

工信部统计数据显示,近年来我国汽车工业发展迅速,过去的十年可能是我国汽车发展 史上空前绝后的高速发展期,汽车产销量平均增长率达到 25%左右。2000年,我国汽车产 量仅为 207万辆,至"十五"末期的 2005年,产量达到 571万辆,增长了约 1.76倍。"十 一五"期间我国汽车产业继续保持高速增长,尤其是 2009、2010年,年均分别增长 48.3% 和 32.4%,产量迅速增至 1379万辆及 1826.5万辆。2010年汽车产量占全球汽车产量 7760.99 万辆的 23.5%,而 2000年这一比重还不到 5%。汽车工业总产值由 2000年的 3612 亿增至 2010年 4.05万亿,增长了 10倍,已成为世界第一汽车产销大国。^[1]

1.1.1 汽车节能与环保

联合国环保组织的调查显示,目前城市中的空气污染,50%来自燃油汽车的废气排放, 而汽车拥有量聚集的欧美国家的一些城市,空气污染源的60%来自汽车废气^[2]。目前,我国 汽车保有量已超过10000万辆,汽车在我国能源消耗和大气排放中均占较大比重。其年耗油 量已接近全国成品油总量的65%,而汽车尾气已成为我国城市大气污染中数量最大、累积 性最强的毒气。2009年国家环保总局的报道显示,我国机动车污染物排放在城市大气污染 中的分担率继续提高,已达到近70%。由于机动车是低空排放,对低空大气环境污染和人 体健康危害更大。城市空气环境的恶化已经对我国国民经济持续发展和人民身体健康产生了 极大的负面影响。在直接危害人体健康的同时,也极大破坏了人类的生存环境。

汽车产业的节能环保即提高内燃机的能量利用率,降低有害排放物,符合我国能源供 给实际和大众消费水平,有利于缓解能源紧张状况,保护环境,对于落实国家能源发展战 略,加快建设资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。为了规范汽车的能源利用效率 和有害物质的排放,世界各国都制定相应的法规,对车辆的燃油经济性、排放作出强制性 的要求。随着能源形势的日益紧张以及对环境保护的日益重视,这些法规正朝着越来越严 格的方向发展。

1.1.2 汽车排放法规

美国、欧洲和日本的排放法规是当今世界上的三个主要法规体系。美国的法规又分为 联邦环保署(EPA)排放法规和加利福尼亚州空气资源管理局(CARB)法规,其中加州法 规最为严格。欧盟(EU)制定的法规不仅在欧盟成员国内强制执行,也被世界上其他很多 国家例如中国、俄罗斯、印度、新加坡、阿根廷和澳大利亚等国所采纳,因为其法规相对 美国适当宽松一点,测试方法设备也相对简单。日本的尾气排放控制技术比较先进,测试 方法和工况与欧美不太相同,无法直接比较限值,基本属于自成体系的法规。

为了限制汽车尾气排放,保护和改善环境,我国从 20 世纪 80 年代以来根据我国具体 情况仿效欧盟建立起了我国的汽车排放控制体系。我国大城市例如北京自 2005 年底率先 实行国三排放标准以来,已在 2008 年全面起动了相当于欧四的国四排放标准。全国范围内 的国四排放法规也于 2010 年开始生效。图 1.1 为国 II、国III、国IV排放标准限值的对比, 从图表中可以看出,国IV标准与国III标准相比,排放限值全面降低了将近 50%。排放限值的降低意味着必须提高发动机的燃烧特性,减少有害物质的生成,提高发动机的排放性能。

		10100	基准质量	21	-	0.000			限值(g/k	m)	1	ocalities 14
		(Rw)kg	CO		HC		NOx		HC+NOx		PM	
阶段	类别	级别		汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油(直喷/非直喷)	柴油(直噴/非直喷)
11	第一类车		全部	2.2	1.0	-	-	-	-	0.5	0.7/0.9	0.08/0.10
	第二类车	-1	Rw≤1250	2.2	1.0		1.1.4	18 -8-8	-	0.5	0.7/0.9	0.08/0.10
		-	1250 <rm≤1700< td=""><td>4.0</td><td>1.25</td><td></td><td></td><td>-</td><td></td><td>0.6</td><td>1.0/1.3</td><td>0.12/0.14</td></rm≤1700<>	4.0	1.25			-		0.6	1.0/1.3	0.12/0.14
			1700 < Rw	5.0	1.5	1 Harris	-	1425	100-12	0.7	1.2/1.6	0.17/0.20
	第一类车	-	全部	2.30	0.64	0.20	-	0.15	0.50	-	0.56	0.050
		1	Rw≤1305	2.30	0.64	0.20	-	0.15	0.50	-	0.56	0.050
		-	1305 < Rw≤1760	4.17	0.80	0.25	_	0.18	0.65	-	0.72	0.070
		=	1760 < Rw	5.22	0.95	0.29	-	0.21	0.78	-	0.86	0.100
IV	第一类车	1	全部	1.00	0.50	0.10		0.08	0.25	11-1	0.30	0.025
			Rw≤1305	1.00	0.50	0.10	10-10	0.08	0.25	-	0.30	0.025
		-	1305 < Rw≤1760	1.81	0.63	0.13	-	0.10	0.33	-	0.39	0.040
			1760 < Rw	2.27	0.74	0.16	KIN S	0.11	0.39	HOLE .	0.46	0.060

图 1.1 国Ⅱ、国Ⅲ、国Ⅳ排放标准限值^[3]

1.2 汽车缸内直喷技术

在国际能源形势日益紧张以及环保法规越来越严格的大环境下,国内外工业界和学术界一直致力于开发新的车用内燃机燃烧系统,其中汽油直喷火花塞点火式汽油机(Spark ignition direct injection gasoline engine)成为众多新技术的典型代表。世界上主流的主机厂都 推出了具有各自特点的汽油直喷燃烧系统和产品系列,国内的汽车厂商近年来也加快了在 SIDI 发动机方面的研发投入。





如图 1.2 所示,在 PFI 发动机中,燃油注入每个气缸的进气道,燃油喷射和进气时刻有 一个时间延迟。大部分现有的 PFI 发动机在进气阀关闭时,由喷油器定时喷射在进气阀背面。 液体燃料会在进气阀口的壁面上形成暂时的油膜或者冷凝液滴,这将导致燃料进入气缸产生 时间延迟,且由于燃料部分汽化,导致燃料供应量计算产生误差,使实际需要的燃料喷射量 大大超过理想计算量。这些现象将导致发动机产生失火或初始的 4-10 个循环内燃料部分燃 烧,并导致未燃烧的碳氢化合物排放显著增加^[4]。



与传统的进气道喷射汽油机不同,缸内直喷汽油机的燃油直接由高压喷油嘴喷射到气缸 中,在很短的时间内,喷射的燃油射流发生破碎并雾化成很小的燃油颗粒,这些燃油液滴迅 速蒸发并和新鲜空气混合形成可燃混合气。由于缸内直喷汽油机的燃油喷射压力比传统的 PFI 发动机大大提高,燃油能够雾化成为更小的液滴,液滴表面积大大增加,从而大大加快 其蒸发的速度。此外,汽油直喷系统更易于实现精确控制空燃比,并具有快速的冷启动、减 速以及快速断油的特点。缸内直喷汽油机喷射的油滴蒸发从可燃混合气中吸收热量,降低了 可燃混合气的温度和体积,减小爆燃倾向,提高发动机压缩比。同时,由于改变了可燃混合 气的混合机理,缸内直喷汽油机可采用稀薄分层燃烧技术,能够有效的降低 HC 等有害气体 的排放。除去传统的节气门,缸内直喷汽油机不会在进气道形成残留油膜,能大大降低发动 机未燃碳氢的排放,并且能够大大减少部分负荷时的泵气损失,提高发动机的充气效率和热 效率。

相对于传统的 PFI 发动机,直喷喷雾在发动机的燃烧系统开发中的重要性大大提高。由 于有了缸内直喷技术,燃油蒸发的时间相对 PFI 发动机大大的缩短,这要求直喷喷雾具有更 小的液滴直径。燃油蒸发形成的混合气在缸内的空间分布直接决定燃烧的稳定性、能量利用 效率和排放物的形成,因此,在直喷燃烧系统中必须对燃油的蒸发和混合过程具有深入的了 解和研究,从而对蒸发和混合过程进行精确的控制。因此,对直喷喷雾的研究成为直喷燃烧 系统开发中最为关键的步骤,燃油的雾化、蒸发和混合技术也是各大汽车主机厂商直喷系统 的核心技术。

1.3 直喷喷雾

1.3.1 直喷喷雾重要性



图 1.3 直喷燃烧发动机燃烧过程

直喷汽油机燃烧的主要物理过程包括进气、燃油喷雾的雾化和蒸发、混合气的形成(均 质或分层)、点火、早期火核的形成、湍流火焰传播、排气及后处理,如图 1.3 所示。相对 于气道喷射汽油机,直喷汽油机要求气流、喷雾和燃烧室三者的完全匹配,其对燃油喷射、



混合和燃烧过程的控制精度大大提高。在先进直喷汽油机(SIDI) 燃烧系统的研发中,喷雾 激光测试、缸内工作过程三维计算流体力学 (CFD)仿真和基于光学发动机的燃烧诊断技术 三位一体,是匹配与优化直喷燃烧系统中喷雾、气流运动和燃烧室形状的不可或缺的重要技 术手段。

利用喷雾激光测试对直喷喷雾的结构、雾化和蒸发特性进行精确测量,测量的结果将作为喷嘴选型和布置的重要依据。同时,通过喷雾激光测试能够实现喷雾的特征化,迅速直观地对喷油器和喷雾进行评价。通过将喷雾激光测试的结果和三维 CFD 模拟的结果进行对比 实现对 CFD 中的喷雾模型的验证和标定,喷雾激光测试与三维 CFD 模拟是两个相互指导、验证和促进的过程。利用三维 CFD 模拟计算确认燃烧系统后,则可以根据优化的数据和结果制造样机,在台架上进行多次反复试验。

通过喷雾的激光诊断可实现对燃油雾化与蒸发过程进行可视化以及定量测量,为数值计 算和建模提供实验验证进而提高模拟仿真的精确性,还为缸内混合气形成过程及燃烧诊断提 供直观的物理描述和解释,其重要性不言而喻。喷雾的性能直接关系到缸内燃油分布,从而 决定燃烧的效率和有害物质的生成。因此,开发高效、清洁的汽油直喷发动机,必须对直喷 喷雾的雾化、蒸发和混合过程进行精确的测量。

1.3.2 直喷喷雾特点

由于直接将燃油喷射到燃烧室中,燃油必须快速的完成雾化、蒸发和混合过程。为加 快燃油的蒸发,必须对燃油由连续的流体转化成为微小的颗粒,进而大大增加液体和空气 接触的总表面积,促进喷雾蒸发和混合。因此,目前的直喷燃烧系统大多采用较高的喷射 压力,结合特殊形状的喷油器将连续的液体燃油在极端的时间内雾化成为离散的液滴。和 一般的流体系统不同,直喷喷雾具有如下的特点:

直喷喷雾具有瞬时性。随着汽车车速的提高,发动机转速越来越高。以发动机正常转速 3000r/min 为例,四冲程发动机每个冲程的平均时间为 0.01s,即 10ms,发动机在进气冲程喷油,燃油喷射时间极短,需要在 10ms 之内完成喷雾雾化、蒸发、混合等过程。因此直喷喷雾过程时间极短,具有很高的瞬时性。

直喷喷雾具有动态性。由于直喷系统采用高压喷射,燃油喷射时间极短,喷射速度极高,喷孔出口处的速度可达100m/s以上,同时燃油与周围的高速气流发生强烈的相互作用, 在几毫秒内完成喷雾的雾化、蒸发、混合等过程,喷雾状态变化非常快,可以说是瞬息万变。因此直喷喷雾具有很强的动态性。

直喷喷雾具有复杂性。燃油从喷孔处喷出时,由于瞬间摆脱了喷油器孔径的束缚,高 速喷射的燃油立即发生变化,由连续的射流转变为大量的小液滴,具有高度的不稳定性和 不规则性。同时由于喷雾中大多是气液两相共存的区域,同一空间喷雾的雾化和流动具有 高度的不规则性,致使喷雾的空间结构十分复杂。

直喷喷雾的上述特点决定了任何对其进行测量的技术都必须具有快速响应、精度高、 非接触等特点。在众多的测试技术中,基于光学诊断,特别是激光诊断的技术在近年来获 得了长远的发展,逐渐成为主流^[5]。

1.3.3 激光诊断技术特点

自 1955 年 C.H.Townes 开发出激光的前身 MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)以来,短短 50 多年激光技术在喷雾燃烧测试方面的应用获得了巨大的发展。究其原因,激光诊断技术的优势和直喷喷雾的本身特点密切相关^[5]。

第4页共49页



第一,相对于非光学测试技术,激光诊断技术是一种非接触式的光学测量方法,它几 乎不会对测试对象产生任何干扰和影响^[6]。

第二,直喷喷雾本身具有瞬时性、动态性和复杂性等特点,其喷雾在发动机内的雾化、 蒸发以及混合的时间极短,只有几毫秒到数十毫秒。因此要求诊断技术具有响应速度快的 特点,而激光的瞬时性恰好能够满足这一要求。随着技术的不断发展,现今的脉冲式激光 器的激光脉宽可以短到纳秒(ns)、皮秒(ps)和飞秒(fs)级(1ns=10⁻⁹s,1ps=10⁻¹²s,1fs=10⁻¹⁵s), 可以实现瞬时"冻结"喷雾,完成瞬时测量。

第三,直喷喷雾中大多为气液两相共存区,同一空间喷雾的雾化和流动具有高度的不 规则性,致使直喷喷雾的空间复杂性很高。由此要求诊断技术具有较高的灵敏度和空间分 辨率。激光具备能量密度高、单色性好、可干涉性强、偏光度好等性质,使其能够满足不 同喷雾测试的要求。

激光的这些特点使它在喷雾的多种测量方法中占据优势,具有明显的不可替代性[7]。

1.3.4 激光诊断技术在直喷喷雾测量上的运用综述

随着计算机、激光、微电子、相机等技术的发展和应用,利用激光光的物理特性,如激 光散射、干涉原理,激光光子能量等特性,人们逐渐开发出多种喷雾测试技术,以获取和研 究喷雾宏观和微观特性。按照喷雾和激光信号的相互作用的不同,可将喷雾激光诊断技术分 为六类:弹性散射法、衍射法、干涉法、吸收法、分光法、激光诱导荧光法^[5]。

1、弹性散射法是利用液滴或者液体分子对入射光折射或反射所导致的光强的衰减和光 线方向的变化进行测量的测试方法。在喷雾测试中,基于这种原理的常用测试技术或测试仪 有:平面激光米氏散射技术、粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)、瑞利散射 图像法、直接照相法(白光成像法)、背光阴影摄影法、显微成像法等。

2、衍射法是利用激光通过障碍物时产生衍射光斑,根据衍射光斑的光强变化获得障碍物粒径大小的测试方法。在用于喷雾特性测试时,平均粒径可以根据激光通过喷雾场中液滴群时的液滴衍射像的大小与粒径成反比关系来确定。典型的测试仪器有马尔文激光粒度仪(Malvern laser particle size analyzer)。

3、干涉法是利用激光的高单色性进行测量的技术方法,待测物理量的大小常会引起光 波的相位发生不同程度的变化。利用激光干涉特性的测量仪器有多种,喷雾测试中常用的有 激光多普勒仪(Doppler velocipedes, LDV)和相位多普勒干涉仪(phase Doppler interferometry, PDI)等。

4、吸收法是利用激光通过喷雾时,由于喷雾中蒸汽相的吸收而使激光光强发生衰减,测量其衰减程度即可获得喷雾中蒸汽相浓度的密度的测量方法。目前常见的吸收法有紫外吸收法和红外吸收法。

5、分光法是利用吸收光谱或散射光谱随被测物理量的大小而变化或移动特性进行测量 的测试方法。常用的方法有拉曼分光法(Raman scattering),主要用于测量温度或某种化学 物质的分子浓度。

6、激光诱导荧光法(Laser induced fluorescence, LIF)是利用激光激发喷雾场中的某些 分子,这些分子在返回基态时产生荧光,通过测量荧光强度而获得测量物理量的方法。和散 射光不同,LIF产生的荧光相对于入射光有较大的频移,可以使用滤光镜去除入射光的干扰。 在喷雾测试中,LIF目前主要被应用于对喷雾的结构和喷雾场中蒸汽浓度的测量中。

	表 1.1 激光	测试手段及目的	
物理过程	喷雾	混合	燃烧
白光 (White light)	液相整体外形		
纹影 (Schlieren)	● 气液两相整体外 形	流场特性	● 火焰前锋形状和传播
米氏散射 (Mie scattering)	• 内部结构		
高速米氏散射 (HS Mie)	内部结构变化		
高速摄影 (HS imaging)	喷雾结构的发展		● 火焰的形态和传播
粒子成像测速 (PIV)	喷雾流场	喷雾流场环境空气流场混合率	
相位多普勒 (PDI)	粒子直径及分布粒子速度及分布		
激光诱导荧光 (LIF)	喷雾质量分布	 蒸汽质量分布 	 燃烧中间产物 尾气浓度 放热率
双相激光诱导荧光 ● (LIEF) ●	液相质量分布 气相质量分布	▶ 定量气相分布	
显微成像 (Microscopic)	初次破碎二次破碎粒径大小和分布		

如表 1.1 所示, 在如此众多的激光诊断技术中, 对喷雾的蒸发过程的测量成为了目前喷 雾研究的重点,究其原因,主要是由于喷雾的最终目的是加快燃油的蒸发和混合,从而在缸 内达到一定的混合气浓度分布,便于燃烧的进行。

1.3.5 直喷喷雾的蒸发过程及相关特性

在直喷汽油机中,燃油直接由高压喷油嘴喷射到气缸中,喷射的燃油要在很短的时间 内发生破碎并雾化成很小的燃油颗粒,这些燃油液滴必须迅速蒸发并和新鲜空气混合形成 可燃混合气。由于燃料只能在气态的时候能够燃烧,因而燃料的雾化、蒸发以及与空气的 混合过程对于燃烧具有决定性的意义。

喷雾蒸发的影响因素有多种,除了与燃油特性相关外,还与温度、蒸汽浓度、液体表 面积、对流速度、混合气浓度等环境因素相关:1)喷雾蒸发的速度与温度高低直接相关。 喷雾场中液相燃油温度越高,其蒸发越快。随着液相温度的升高,液相燃油分子的运动速 度加快,其分子平均动能增大,燃油分子更容易脱离液面,成为气态分子。2)喷雾蒸发速 率与液体表面积大小相关。液体表面积越大,处于液体表面积附近的分子越多,在相同时 间内,从液相中进入气相的燃油分子越多,蒸发就越快。喷雾的液体表面积大小主要取决

第6页共49页



于喷雾的雾化状况,与喷射压力等条件相关。3)喷雾蒸发速率与对流速度相关。喷雾对流 速度越快,进入气相的燃油分子返回液体的概率越小,蒸发速度越快;4)喷雾蒸发速率与 混合气浓度相关,混合气浓度越高,喷雾燃油蒸发越慢。

在众多因素中,喷雾的温度和浓度分布与油汽混合气的形成过程关系最为直接和密切, 而同时当今条件下研究者对喷雾场的温度和浓度分布研究远没有达到认识清楚的底部。对 喷雾的温度场以及油汽混合气的浓度场的准确测量能够提供油汽混合气最直接的信息,这 些信息可以直接用于现有喷雾雾化模型、蒸发模型以及混合模型的验证,同时喷雾内温度 和浓度的分布也可以直接用于发动机燃烧系统的开发和优化,具有重要的理论价值和实际 运用前景。

1.4 课题研究目的及意义

随着发动机技术的日益成熟,发动机效率、动力输出和尾气排放等性能的要求越来越 高。燃料的雾化、蒸发以及与空气的混合过程对于燃烧具有决定性的意义,进而影响发动 机的性能提高。因而要获得高性能的发动机则必须不断改善优化燃料的雾化、蒸发以及与 空气的混合状况。为了了解喷雾的蒸发过程,必须利用先进的技术对喷雾的蒸汽浓度和空 间分布进行定量测量,从而对蒸发的结果有全面的了解。同时,喷雾液态的温度直接决定 着蒸发的速度,通过液态喷雾的温度测量可以了解蒸发的机理,从而为精确控制蒸发打下 基础。

对燃料喷雾浓度场和温度场的测量一直是国内外相关科技人员所关注的重点^[8-10]。但目前这一问题远远没有达到清楚认识的地步,喷雾蒸发过程以及油汽混合物形成机理在学术界和工业界存在广泛的争议。究其原因,主要是由于这个过程的复杂性和动态性所致。首先,任何喷雾都是一个气液共存的两相流系统,在喷雾内空间任何一点,都同时存在着液滴以及燃油蒸汽。由于液滴和蒸汽性质的巨大不同,要对它们分别测量具有很大的难度。它要求测量方法能够对液态和气态喷雾有不同输出,从而将其分开。同时,喷射过程本身是一个高速变化过程。目前所有的高压直喷系统的喷射时间都在毫秒量级,而在实际发动机中喷雾和周围空气相互混合的时间也在几个到十几个毫秒之间,所以测量方法需要有很好的时间解析度,能够在极短的时间内给出喷雾内部浓度分布的准确信息。最后,喷雾在空间上也是一个多变的非稳态系统,在不同的空间位置其混合气的浓度具有很大的差异,这不仅要求测量系统能够对喷雾内较大的空间测量,而且能在每个测量位置给出准确的信息,因而测量系统应该同时具有较大的测量空间以及空间解析度^[5]。

在本课题研究开始之前,上海交通大学激光喷雾实验室已经进行了大量的直喷喷雾混合 气浓度的定量测量方面^[11,12]的研究。他们利用双相激光诱导荧光(Laser induced exciplex fluorescence, LIEF)实现了喷雾气液两相共存条件下对两相进行分别成像;并通过标定和后期 图像处理算法成功的实现了喷雾气相的定量测量。本课题将基于前期的研究,对双相激光诱 导荧光技术进行改进,提高气相浓度的测量精度。为了对喷雾液相温度进行测量,本课题对 LIEF 技术进行深入的二次开发,将 LIEF 技术和双色测温法(Two-color thermometry)结合, 成功实现两相共存条件下液相喷雾的温度测量。同时设计加工标定装置,利用标定装置获取 准确的标定曲线。最后将这些标定运用于直喷喷雾中,获取其液相的两维温度分布。

通过本课题对喷雾的浓度场和温度场的二维分布的研究,能够提供油汽混合气最直接的 信息,这些信息可以直接用于现有喷雾雾化模型、蒸发模型以及混合模型的验证,同时喷雾 内温度和浓度的分布也可以直接用于发动机燃烧系统的开发和优化,具有重要的理论价值和 实际运用前景。



1.5 课题研究内容

本课题拟利用双相激光诱导荧光技术 LIEF 对汽油直喷喷雾在典型的发动机缸内环境下 的气液两相进行成像,测量直喷喷雾内的温度场和形成的油汽混合气的浓度场,通过分析喷 雾气液两相的形成过程和分布情况,了解直喷喷雾的蒸发和混合气的形成过程。具体研究内 容如下:

1) LIEF 理论研究

双波长激光诱导荧光(LIEF)技术建立在 LIF 技术之上,能很好的分离喷雾的液相和 气相,并能对测量的物理量进行很好的量化。为建立 LIEF 技术测试系统,需对 LIEF 技术 的理论进行深入研究,掌握 LIEF 技术测试原理以及其自身所具有的优点和缺点,探究如何 最大限度的对气液两相信号进行分离,以及针对气相浓度和液相温度测量的量化理论和方法。 根据 LIEF 的技术优点,搭建良好的测试系统,完成实验测试。同时依据 LIEF 技术中的缺 点,如荧光光谱干涉、激光能量衰减等缺点,需研究并提出解决方案,克服这些缺点,避免 其干扰实验测量,减小实验误差。

2)利用 LIEF 进行定量浓度测量的研究结果

利用 LIEF 技术对喷雾气相浓度进行定量测量,首先需要对燃油蒸汽浓度进行标定。利用浓度标定装置,标定出燃油蒸汽浓度与喷雾气相荧光的关系,得出喷雾气相荧光强度与燃油蒸汽浓度成正比的关系曲线。利用浓度标定曲线,对喷雾测试图像中气相浓度进行量化处理,得出喷雾气相浓度分布图,并对比不同工况条件下对喷雾气相浓度的影响。

3) 温度标定装置的设计

针对喷雾液相温度标定,需依据双色法测温理论和量化原理,建立合理的喷雾液相温度测量方案。根据测量方案,设计符合实验测试条件的温度标定装置。首先提出几种不同的温度标定装置方案,根据其中的优缺点对比,选择一种最优方案,然后绘制三维模型,验证其可行性。最后,绘制温度标定装置 CAD 图纸,依据图纸对温度标定装置进行加工,获得最终标定装置。

4)利用标定装置获取标定

根据双色法测温理论和量化原理,全面分析温度标定测量中的影响因素,安排合理的温度测量工况及测量方案。利用设计加工获得的温度标定装置,按照温度测量工况及测量方案,完成喷雾液相温度标定测试,得出喷雾液相温度与荧光强度的关系曲线。

1.6 本章小结

本章主要对此次课题的主要研究背景进行了详细的介绍。随着能源短缺和环境污染加剧, 汽车行业不断朝着节能环保的方向发展,新技术新方法不断涌现。直喷发动机因其高燃油经 济性和低排放性而逐渐成为市场主流。而在直喷发动机的设计与开发中,喷雾研究能为发动 机开发中的数值计算和建模提供实验验证,进而提高模拟仿真的精确性,还为缸内混合气形 成过程及燃烧诊断提供直观的物理描述和解释,因而喷雾研究的地位越来越重要。

在喷雾研究中,我们主要关心喷雾的雾化、蒸发以及油气混合过程。而其中喷雾的蒸发 又是喷雾研究中的核心,直接影响着喷雾的燃烧性能和有害物质生成和排放。作为喷雾蒸发 的关键影响因素,喷雾气相浓度和液相温度分布存在着众多的未知性。因此,此次课题通过 研究喷雾气相浓度和液相温度分布,为研究喷雾的蒸发机理,建立喷雾蒸发模型打下基础。



第二章 理论研究

学术界和工业界很早就开始喷雾内混合气浓度和温度测量的研究,形成了众多的测量方法。每种方法都有各自的优缺点,在选择合适的测量方法之前,必须对现有的测量方法进行 调研、总结和综述,在前人的研究基础上,最终选择合适的测量方法。先分别将喷雾内气相 浓度和液相温度的测量技术总结如下:

2.1 测试方法文献调查和综述

2.1.1 浓度测试方法

用于喷雾的浓度测量方法主要有散射法,吸收方法,激光诱导荧光,双相激光诱导荧光 法。

1. 散射法 (Scattering): 利用物质分子或者小颗粒对入射光线折射或反射,导致光强的衰减和光线方向的变化与颗粒的浓度成正比的关系来进行浓度的测量。常用的散射方法有 瑞利散射 (Rayleigh Scattering)和拉曼散射 (Raman Scattering)。瑞利散射是当散射粒子的 直径远小于入射光的波长而发生的散射现象,产生的散射光的波长和入射光的波长相同。拉 曼散射则是光通过介质时由于散射分子的转动能态和振动能态发生变化而引起的不同于入 射光波长频率的散射现象。

瑞利散射和拉曼散射能够提供混合气内燃油蒸汽的摩尔浓度的信息,但是这两种方法也存在着很多的缺点。瑞利散射的主要缺点是入射光和散射光的波长相同,入射光在壁面的反射光将对测试结果造成很大的干扰误差。其次,在气液两相共存区域,液滴的散射光强度远远大于气态分子散射光的强度,因而瑞利散射在两相共存的喷雾区域无法提供定量的油汽混合气的浓度分布,只能测量燃油完全蒸发后的燃油混合气浓度。拉曼散射虽然能够提供气液两相共存区域内气态的浓度信息,但拉曼散射的散射光强度很弱,在目前的激光能量下,大多数的拉曼散射都只能进行单点式的测量,空间分辨率较差。宾夕法尼亚州立大学的Scantavicca教授^[13]等人利用瑞利散射成功的测试了在上止点附近柴油的空间分布;Sandia国家实验室的Pickett博士^[14]等人则在高温高压容器内模拟了柴油机缸内的环境,并利用瑞利散射方法测试了在这些环境下面燃油的分布;日本广岛大学的广安博之教授等人^[15, 16]则利用瑞利散射测试了汽油机中燃油分布。德国斯图加特大学的Bruggermann教授^[17]等则利用拉曼散射测量了乙醇喷雾中蒸汽的浓度。

2. 吸收方法 (Absorption):利用激光通过喷雾时,由于喷雾中蒸汽相的吸收而使激光 光强发生衰减,测量其衰减程度即可获得喷雾中蒸汽相浓度的密度的测量方法,是测量物质 浓度的有效方法之一。根据比尔定律,物质的吸光度 A 与吸光物质的浓度 c 和吸收光程长 度 L 成正比,即:A=αcL,比例系数 α 称为物质的吸光系数,取决于入射光的波长、吸收物 质的种类以及环境的压力和温度。吸收方法主要缺点是它获得的是吸收光程上浓度的平均值, 在空间上的解析度较低。斯坦福大学的 Hanson 教授^[18,19]等人利用了 2μm 附近的中红外吸收 方法在气液共存的状态下测试混合蒸汽的浓度和温度;日本广岛大学广安博之研究室^[20,21] 则将吸收和散射方法相结合,利用激光散射-吸收方法(Laser Absorption Scattering, LAS) 定量测试了喷雾中气液两相的浓度分布。

3. 激光诱导荧光方法(Laser Induce Fluorescence, LIF): 在燃料中添加一些具有荧光特性的示踪粒子(Tracer),利用一定波长的激光激发喷雾场中的处于基态的示踪粒子,示踪粒子吸收光子的能量使其电子跃迁至较高能级成为激发态分子,激发态不稳定,在很短的时间内,激发态分子的电子跃迁返回基态,并释放一个光子,即荧光,在特定的条件下(激光能量远小于分子饱和激发能量),荧光的强度和示踪粒子的浓度成正比。由于无论处于液态还是处于气态,燃油分子都能够被激发,所以荧光信号代表了喷雾气态和液态的行为,所以



利用激光诱导荧光不能将喷雾的液态和气态进行分离。同时,由于液态中示踪粒子的浓度远远高于气态中示踪粒子的浓度,在喷雾气液两相共存区,荧光信号大部分来源于液态喷雾而导致无法获得燃油蒸汽的信息。故目前大多利用激光诱导荧光技术测量浓度都仅限于没有液态粒子存在的环境中,这些运用集中在火焰中活性粒子的测量。^[22-24]

4. 双相激光诱导荧光法(Laser induced exciplex fluorescence, LIEF):为了克服 LIF 技术在测量浓度方面的缺点,Melton 在 1980 年代提出了双波长激光诱导荧光方法(Laser Induced Exciplex Fluorescence,LIEF)^[25],为解决 LIF 技术无法分离喷雾中液态和气态提供了全新的思路。LIEF 的特点是采用二元示踪剂,其原理是一种示踪剂呈气相时受激发出荧光,二受激的分子同时能与另一种示踪剂分子发生化学反应形成新的受激分子,新分子的荧光波长相对前述荧光波长会变长,故两种荧光能够得以区分。而在液相中上述反应比气相中多,因此,两个不同波长的荧光即可分别代表燃油气相和液相的分布。通过借助分光镜(光学分频半透半反镜),我们就可以分离出气液两相图像,实现气液相喷雾的同时分离测量。目前已经有大量的学者进行这方面的研究,获得了较好的效果。通用汽车公司研发中心的Fansler 博士等人^[10]和德国的学者合作^[26],成功从光谱学角度准确测量了氟苯(fluorobenzene,FB)和 2,6-二乙基-4-甲基苯胺(Diethyl-methyl-amine,DEMA)组成的Exciplex系统,并将结果运用到蒸发喷雾的气液两相的定量测试中。威斯康星大学的Ghandhi 教授^[27]等人则利用复合激光诱导荧光定量测试了柴油机缸内的浓度分布。

2.1.2 温度测试方法

在喷雾温度分布测量方面,目前最为成功的测温方法是基于激光诱导荧光或者激光诱导 磷光的双色法以及激光诱导磷光的衰减法。

1. 双色法测温(Two-Color Thermometry)利用激光诱导荧光的光谱随温度的变化来测 定温度的。由于激光诱导荧光强度与荧光物质、光学系统、激光强度、荧光物质浓度、待测 样本温度等众多参数有关,且其中多个参数无法通过测量得到的常数,因此这些常数需要利 用不同波长的荧光强度的比值消去,得到不同波长的荧光强度比值与温度敏感系数、待测样 本温度有关的方程。而温度敏感系数只与波长有关,因此确定两个测试波长后,即可获得不 同波长的荧光强度比值与待测样本温度有关的方程,利用这个方程即可测量待测样本的温度。

目前双色法已经成功的用于发动机内喷雾以及油汽混合气的温度测量中。美国密西根大学 Sick 教授^[29]利用两个波长的激光去激发丙酮后利用不同波长荧光强度的比测定了缸内进 气过程的温度分布。法国南希大学的 Lemoine 教授^[30]则利用双色法和激光多普勒效应相结 合同时测量了喷雾内燃油颗粒的温度、速度和粒径。

2. 衰减法测温(Lifetime thermometry)衰减法主要用于激光诱导磷光测温,当磷光物质(phosphor)收到一定波长的激光激发后,其磷光强度的衰减满足指数衰减规律: $I = I_0 e^{-t/\tau}$ (2-1)

其中τ为磷光的衰减时间常数。对于一些特定的磷光物质,衰减时间常数τ在很大程度上依赖 于温度,因此通过测量激光诱导磷光的衰减常数则可以获得物质的温度。利用磷光物质测量 温度在近年来获得了较快的发展,由于其具有高灵敏度而被很多学者所关注。其中瑞典 Lund 大学的 Marcus Alden 教授^[31]在这方面进行了较多的工作。

综上所述,目前对于喷雾的浓度场和温度场的测量提出了很多种方法,但每种方法都有 其自身的不足。在对各种测试方法对比后我们发现,双波长激光诱导荧光 LIEF 能很好的分 离喷雾的液相和气相,并且 LIEF 技术建立在 LIF 技术之上,能很好的对测量的物理量进行 量化。同时,激光诱导荧光可以用于双色法测温,这为双波长激光诱导荧光 LIEF 技术提供 了交叉点,可以利用 LIEF 技术中提供的气相和液相两个诱导荧光波长之一进行双色法的测 试,利用其荧光的强度比值即可测量出喷雾内部的温度场。

本项目拟利用双波长激光诱导荧光技术 LIEF 对喷雾的气液两相进行分离,分别提取喷



雾的气相和液相的荧光信号。对于气相的荧光信号,通过标定量化油汽混合气的浓度分布; 而对于液相荧光信号,利用其光谱较宽的特点,在其宽广的谱线上面截取两个不同的波长的 带宽,利用两个波长带的荧光强度之比便可以获取喷雾液相的温度了。下面将对 LIEF 技术 定量的浓度和温度测试进行详细的叙述。

2.2 LIEF 浓度-温度测量原理

2.2.1 LIEF 气液两相分离原理

在 LIEF 技术中,需要选择一种不发出荧光的物质作为基础燃油,这种物质的特性应该 尽可能和实际的燃油相近,以便使测试结果具有代表性。和一般的 LIF 技术中只添加一种荧 光剂不同,在 LIEF 技术中添加了两种不同的荧光剂,将这两种荧光剂分别称为单体 (monomer,以M 表示)和复合体形成分子(Exciplex forming molecule,以G 表示)。当含 有 M 和 G 的基础燃料受到特定波长的激光激发后,单体 M 能够被激发到激发态 M*。当 M*返回到基态时能够发出一定波长的荧光,如式 2-2 所示:

 $M^* \rightarrow M + h\nu_1$

(2-2)

同时,M*能够和G相结合生成复合体E(Exciplex),如式2-3所示:
 M*+G→E (2-3)
 当E返回基态时能够发出另外一种波长的荧光,如式2-4所示:

 $E \rightarrow M + G + h\nu_2$

(2-4)

生成复合体 E 必须具备两个条件: (1)存在激发态粒子 M*; (2) M*在其衰减期内能 够碰到分子 G 并与之结合生成复合体 Exciplex。由于喷雾气相中示踪粒子 G 的浓度远远低 于液相中 G 的浓度,很难满足生成复合体 E 的第二个条件,因此反应式 2-3 在气相中发生 的几率非常低,可以忽略不计。所以喷雾蒸汽相发生M*,产生的荧光波长为 λ_1 。在液态相 中,由于燃料中添加过量的 G,使得任意一个激发态分子 M*都能够和 G 相结合生成复合体 E,故在液态中没有 M*衰减。所以在液态中荧光的波长为 λ_2 。由于反应 2-3 要消耗一定的能 量,所以液态荧光的波长长于气态波长,即: $\lambda_2 > \lambda_1$,从而可以将喷雾中液态和气态进行 分离。利用 LIEF 进行气液两相的信号进行分离可以由图 2.1 表示。



图 2.1 LIEF 气液两相分离原理图

2.2.2 气相浓度测量原理

典型的喷雾气液两相的光谱如图 2.3 所示,通过不同的光学滤镜就可以成功的将喷雾的 气相和液相进行分离。双波长激光诱导荧光不仅能够利用激光诱导荧光对喷雾蒸汽的浓度进 行定量化的测量,同时还巧妙的利用荧光的红移现象对喷雾的液态和气态进行信号分离,因 而是定量研究喷雾混合气形成过程以及混合气分布的有效技术。

第11页共49页





图 2.2 双波长激光诱导荧光气液两相光谱及滤镜透过率曲线

由理论计算得出气相荧光强度与浓度的关系方程:

 $S_f = K \times C$

(2-5)

(2-6)

根据式 2-5 得出荧光强度与浓度成正比,通过标定即可获得参数 K 的值,然后利用 matlab 图像处理技术对喷雾气相荧光图像进行处理,即可获得喷雾气相浓度分布图。

2.2.3 液相温度测量原理

从 LIEF 的气液两相的光谱中可以看出,液相的光谱的范围较为宽广,这为双色测温法 提供了较为有利的条件,一般地,荧光强度可以由下面的式子表示:

$$I_{LIF} = K_{ont} K_{snec} I_0 C e^{\beta(\lambda)/2}$$

其中 K_{opt} 和 K_{spec} 是描述荧光物质和光学系统的两个参数, I_0 为激光的光强,C为荧光物质的浓度, β 为温度敏感系数, T 为测试样本的温度。

由于式 2-6 中含有多个未知且无法测量的常数,因此需要利用不同波长荧光强度的值相 比消去这些常数。为此,我们需要利用两个不同的波长**λ**₁和**λ**₂下荧光强度的比值:

$$R = \frac{I_{LIF,\lambda_1}}{I_{LIF,\lambda_{12}}} = \frac{K_{opt}K_{spec}I_0Ce^{\beta(\lambda_1)/T}}{K_{opt}K_{spec}I_0Ce^{\beta(\lambda_2)/T}} = e^{\frac{\beta(\lambda_1)-\beta(\lambda_2)}{T}}$$
(2-7)

由 2-7 式得出,两个波长的荧光强度比值 *R* 只与测试燃油温度 T 和温度敏感系数 β 有 关。根据研究发现,在正己烷、FB 和 DEMA 组成的测试燃油中,其液相荧光在不同温度下 的温度敏感系数 β 不同,如图 2.3 所示,且 β 与温度无关,只与波长相关^[26]。因此,式 2-7 中*β*(λ₁) – *β*(λ₂)为常数,且不为零,比值 R 与 T 的关系方程成立。



图 2.3 不同温度下燃油液相荧光光谱曲线^[26]

第12页共49页



(2-10)

在参考温度下测量两个波长的荧光强度的比值可以获得参数 $\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)$ 的值,对于任意温度T可以由下式获得:

$$T = \frac{\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)}{\ln R} = \frac{T_{ref} \ln R_{ref}}{\ln R}$$
(2-8)

由 2-8 可知,只要测得在参考温度下两个波长上荧光的强度比则可以获得喷雾在二维空间上面的温度分布。

对式 2-7 进行取对数处理,可以得到:

$$ln(R(T)) = \frac{\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)}{T}$$

由此得出, $T = T_0$ 时, (2-9)

$$ln(R(T_0)) = \frac{\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)}{T_0}$$

式 2-9 与式 2-10 相减, 可得出:

$$ln\left(\frac{R(T)}{R(T_0)}\right) = \left(\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)\right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$
(2-11)

在确定波长后, $\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)$ 即为常数,由此可以得出一个 $ln\left(\frac{R(T)}{R(T_0)}\right)$ 与 $\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$ 的线性关系。通过温度标定得出该线性关系后,利用图像处理,即可获得喷雾中液相温度场的分布。

2.2.4 实验测试燃料选择

由于汽油为混合物,其中多种物质在激光激发时能够产生各种波长的荧光,不符合 LIEF 测试原理中燃料不受激光激发产生荧光的测试条件,干扰 LIEF 测试。故本课题利用正己烷 (n-hexane) 作为基础燃料,代替汽油进行测试。在两种添加剂(即示踪粒子)的选择上,我们根据查阅的文献资料,对比其荧光特性,总结如下:

作者(年份)	添加剂	体积百分比(%)	荧光中心波长
Melton (83)	TMPD/Naphthalene	10/1	380/470
Parigger (98)	TMPD/Naphthalene	2.5/1	380/470
Leipertz (00)	TEA/Benzene	2.9/2	290/350
Skogsberg(05)	TEA/Benzene	9/1	290/337
Ghandhi (94)	DEMA/FB	9/0.5	290/380
Lee (96)	DEMA/FB	9/2	290/380
Wieske (06)	DEMA/FB	9/0.5	290/380

表 2-1 LIEF 燃料添加剂对比

为了确保 LIEF 测试技术能够很好的反映燃料的喷雾蒸发过程,必须保证添加剂的共蒸 发性较好,即添加剂的各组分以及燃料能够以相同的蒸发率蒸发。根据对比,我们选择氟苯 (Fluorobenzene, FB)和2,6-二乙基-4-甲基苯胺(Diethyl-Methyl-Amine, DEMA)作为 添加剂,这一混合物不仅和汽油的物理性质相近,而且各个组分的共同蒸发特性好,可以很 好的跟随基础燃料的特性。在气相中 FB 的荧光可以反映出气相特征,而在液相中 FB 和 DEMA 形成的复合体(Exciplex)可以很好的反映出液相的特征;由于两者的荧光波长范围 相距较远,利用不同的光学滤镜即可将喷雾的气液两相的荧光信号分离。

Ghandhi 等通过研究发现, 0.5%的 FB 与 9%的 DEMA 组合添加剂与正己烷混合后能够 很好的共同蒸发,其三种组分的质量百分比几乎没有波动。但是,这种组合添加剂产生的气



相信号较弱,不利于实验应用和测量。为了增大气相信号的敏感度,研究者增加 FB 的体积 百分比至 2%。在这种组合下,添加剂的共同蒸发特性没有明显的缺陷,同时气相信号也达 到实验测试所需的要求。因此,在本次实验中,我们选择 2%FB+9%DEMA+89%n-hexane 的燃料组合。

2.2.5 LIEF 技术的局限性

在 LIEF 激光测试中,液相荧光和气相荧光都受到众多因素的影响,如果不对这些因素进行修正,在激光测试中将会对实验数据和结果产生重大影响,甚至导致出现错误结果。在这些因素中,主要有两个因素对测试影响较大:荧光光谱干涉(Crosstalk)、激光能量的吸收衰减。前者将通过标定实验进行修正,后者通过图像后处理进行修正。

1) 荧光光谱干涉

如图 2.4 所示,荧光光谱干涉是指气相和液相的荧光光谱发生重叠的现象。重叠区域的 荧光会产生叠加,当荧光光谱干涉区域处于气相滤镜的通带时,使用气相滤镜拍摄出的图像 将会存在液相荧光,因此荧光光谱干涉将会对测试产生重大影响。由于液相荧光强度比气相 荧光强度高 2~3 个数量级,荧光光谱干涉将会在气相浓度量化上产生不可忽略的误差。而荧 光光谱干涉的强度取决于特定的光学检测系统以及液相温度。因此我们需要利用同一光学检 测系统,在不同的燃油液相温度条件下对荧光光谱干涉进行标定处理,以修正荧光光谱干涉 产生的实验误差。





2) 激光能量的衰减

如图 2.5 所示,当平面激光通过喷雾时,由于激光光子能够被喷雾液滴中处于基态的氟苯(FB)吸收,产生处于激发态的氟苯(FB),同时激光在通过喷雾液滴时发生散射,从而导致激光能量产生衰减。由于激光能量在图像平面上的逐渐衰减,而导致由相机拍摄的图像上呈现左侧荧光较强,右侧荧光较弱的现象。在喷雾测试中,喷雾气相浓度的量化直接取决于激光诱导荧光的强度,激光能量的衰减会导致喷雾气相浓度测试产生较大的误差甚至错误。因此,我们必须校正激光能量的衰减,得出合理的图像。在数据分析与处理中,我们将通过图像后处理对激光能量衰减进行校正。

基于双相激光诱导荧光技术的汽油直喷喷雾蒸发特性的研究





2.3 本章小结

本章首先对比国内外喷雾气相浓度和液相温度的激光测试方法,比较不同测试方法的优缺点,并根据我们的测试目的和要求,选择一种能够很好的分离喷雾气相和液相,并能对测量物理量进行很好的量化的测试方法——双波长激光诱导荧光技术(LIEF)。针对 LIEF 技术中的局限性,我们通过对其原理的学习和研究,提出合理的解决方案。在数据分析与处理中,我们将对 LIEF 技术中的激光光谱干涉和激光能量衰减进行校正。



第三章 实验流程及实验设备

3.1 实验测试技术路线

为了获得喷雾内部的浓度和温度方面的信息,对气液两相的荧光进行分别的处理。对于 气相的荧光信号,通过标定可以直接获得油汽混合气的浓度信号;而对于液相部分,则利用 另一套光学装置在两个不同的波段上面进行成像,利用两者的比值获得温度相关的信息。最 后通过后处理的方法把温度和浓度标定应用到两相的图片中对喷雾内的温度和浓度进行量 化。

根据以上的测量原理、研究内容和所要解决的关键问题,项目研究的技术路线可具体表 达如下:

(1)建立双相诱导激光同时测量直喷喷雾内温度和浓度的理论体系:对激光诱导荧光 理论研究,推导出荧光强度和各种参数之间的联系,建立见光诱导荧光的强度和油汽混合气 之间的定量关系并结合实验验证量化关系的准确性;由于双波长激光诱导荧光存在着相分离 不完全以及喷雾对激光能量的吸收和散射带来的喷雾内部激光强度不均匀的问题,需要利用 标定和图像后处理的方法来进行矫正。其中两相分离不完全是通过不同温度下相分离程度来 进行标定;而激光能量的吸收和散射问题这通过 Lambert-Beer 定律进行矫正。通过实验选 定实验用到的燃油的配方,在同步的温度和压力下确定配方的适用性。

(2)构建测量光学测量系统:测量系统由激光光源、入射光学系统、接受光学系统、 图像采集系统四个部分组成。激光光源由一台 Nd:YAG 激光器提供,激光器输出后的光源 经过两次倍频(frequency doubling)后,波长变为 266nm 的紫外线激光。入射光学系统将 由一组球面镜和柱面镜组成,激光的光斑在经过这两个光学器件后被扩展成为一束厚度小于 Imm 的片状光,利用这组片状可以对喷雾的测试平面进行照亮。接受光学系统由光学滤镜、 图像倍增器(image doubler)以及 CCD 相机组成。浓度场测量时,喷雾的激光诱导荧光被 一台 CCD 相机捕捉,这台相机的前面装有气相光学滤镜,通过它可以获得喷雾气相的荧光 信号,通过定量的标定来获得喷雾内部的油汽混合气浓度信号,将气相光学滤镜更换为液相 光学滤镜,即可获得喷雾液相的荧光信号,通过定量的标定获得喷雾内部的液相浓度信号; 温度场测量时,激光首先通过一个图像倍增器被分离成两束光线,其中在图像倍增器有两个 光学入口,我们在这两个光学入口前面分别安装了不同的透过范围的液相滤镜,从而将液相 信号在不同的波长范围内进行了分离。利用图像倍增器则可以将这两路信号同时成像到相机 的 CCD 芯片上面,利用后处理可以获得这两个波长范围的强度比值,从而获得温度的分布, 同理使用气相滤镜即可获得气相温度分布。

(3)浓度和温度标定:这一步的主要目的是将测量得到的荧光信号与浓度和温度相对应。其中浓度的标定是通过产生已知浓度的蒸汽,测定其荧光信号的强度。而温度的标定则 是测量温度已知的液体在两个波长上面荧光强度的比值,以此作为参考温度。标定用到的实 验光学布置和喷雾实验用到的光学布置完全一致,确保获得标定系数的可靠。

(4) 编制后处理软件:对获得图像进行相分离不完全和激光能量不均匀的矫正。其中相分 离不完全通过不同温度下的标定系数获得。激光能量的不均匀则需要在 Lambert-Beer 定律 的基础上对喷雾的图像进行最优化处理。在经过这些后处理程序后,可以保证最终获得图像 是喷雾内部每一个空间位置上面的荧光信号,并且这些保证这些荧光信号的强度只和温度和 浓度相关联。最后利用标定获得关系,量化出喷雾内部的温度和浓度分布。



3.2 实验设备

上海交大-GM 喷雾激光测试实验室始建于 2008 年,在几年的发展建设中购进大量先进 设备,搭建多种国际先进测试系统,能够完成粒子成像测速(PIV)、相位多普勒法(PDI)、 显微摄影、背光阴影摄影、双相激光诱导荧光法(LIEF)等多种测试。

如图 3.1 所示,本次实验中主要使用设备为:喷射系统、环境控制系统、激光测试系统、、浓度标定与温度标定装置以及其他一些辅助设备。



图 3.1 LIEF 测试系统

3.2.1 喷射系统

(1) 油路供给系统

油路供给系统由供油管路、过滤器、燃油蓄压器等组成。其中供油管路由 1/4 油管连接喷油器和燃油蓄压器,为喷油器供应燃油。

实验中采用美国TOBUL生产的3AT30活塞式蓄压器储存并向喷油器提供一定压力的燃料。活塞式蓄压器的横截面如图3.2所示。蓄压器中有两个腔室,上部为氮气腔室,下部为燃油腔室,中间利用一个活塞将燃油和气体分离开来。通过氮气供应系统向氮气腔室供应一定的高压氮气,活塞移动使燃油获得同样压力,为喷油器提供实验所需的喷射压力的燃油。与传统的囊式蓄压器相比,活塞式蓄压器可以获得更加稳定的压力并且使用的寿命也更长。活塞式蓄压器与高压氮气瓶配合,可以提供0-20.7MPa的燃料喷射压力,满足实验喷射压力需求。





蓄压器燃油腔室出口安装一个粒径为 2μm 过滤器,可将燃 油中的杂质有效剔除,以防止喷油器被杂质堵塞。

(2) 喷油器

实验中,我们采用的喷嘴是八孔直喷喷油器,孔径为 0.3mm,长径比 L/D=2。喷油器喷出的 8 束油束的分布如图 3.3 所示。在同一个喷嘴平面上的两束喷雾之间的锥角为 70°。



3.2.2 环境控制系统

图 3.3 喷油器

(1) 常温高压容器

如图3.4所示,常温高压容器主要用于为燃料喷雾实验提供背压和光学观察路径。容器 内径为203mm,高692mm。容器上装有四个石英的窗户,设计时为了避免全部的光能穿过 喷雾,四个窗户中一个为方形,另外三个为圆形。根据容器的材质以及尺寸设计,容器可承 受的最大安全压力为2MPa。容器顶部中心设计有一个模块用于安装固定喷油器。



图3.4 常温高压容器图



图3.5 压力传感器

容器由底座、下端容器、上端容器、上盖四部分组成,并使用 3 根直径 45mm 的螺栓 连接固定。石英窗户设计在上端容器上,根据不同的测试方法对石英窗户的位置要求,可以 更换不同的上端容器。容器内侧顶部布置一个环形铜管,其直径略小于容器内径,通过一根 直径约为 15mm 的铜管与底部的进气管相接。环形铜管上开有 12 个均匀分布的小孔,氦气 首先由进气管进入环形铜管,随后由环形铜管上均布的小孔进入容器里,使氦气从容器顶部 均匀进入容器内,避免容器内充气不均和压力不均,同时,充入氦气形成的气流能够迅速带 走上次喷雾的残留蒸汽和液滴,从排气管排出,避免干扰下次喷雾测试,并且在氦气的保护 下,也避免了喷油器喷射出的燃料对容器内部造成污染和腐蚀。容器下方侧面有一旁路,使 用压力传感器检测容器内部压力,如图 3.5 所示,当容器内的气压超过 2MPa 时,该旁路会 自动开启,为容器泄压,避免容器超过荷定压力。

(2) 高温高压容器



高温高压容器由上海交大-GM 喷雾激光测试实验室克服多种技术难关,独立自主设计研发,为喷雾、混合气形成和燃烧的研究提供了理性的可控环境,结合各种的激光诊断手段,可以获得全面的信息,以满足未来技术发展和研究方向的要求。该容器在国内尚属首例自主设计的高温高压容器,其设计工作压力和工作温度分别为 8MPa 和 700℃,加热器内置于容器中,故该容器属于静态测试容器。



图 3.6 高温高压容器图



3.7 高温高压容器控制系统

如图 3.6 所示高温高压容器由底座、主体、上盖、石英窗户四部分组成。四个石英窗户按 90°分布安装在主体上,窗户直径 108mm。在上盖中心设计独立模块,用于安装固定喷嘴,并在该模块中设计循环水套,用以预先加热喷油器中的燃料和保护喷油器,避免喷油器温度过高而被损坏。加热器设计布置于容器内底部,使用特殊装置在保证密封的情况下保证安全供电以及内部的压力和温度监测,并通过底部回旋进气口将加热器的热量带入容器上部,使容器内温度分布均匀。该容器使用自主研发设计的"三明治"结构,在非冷却条件下完成密封,并将容器的热量损失降到最低,达到容器内部全保温。

该容器使用远程控制系统,将操作控制区与容器测试区分离,布置在两个不同的房间, 以保护实验操作人员的安全。如图 3.7 与图 3.8 所示,该远程控制系统分为主电路和控制电 路,主电路为 220V 交流强电,控制电路为 24V 直流弱电。控制电路完全控制主电路的切断 和接通以及主电路上的加热器的功率。加热器的功率控制分为自动挡控制和手动挡控制,自 动挡能够根据设定目标温度自动控制加热器功率,对容器内气体进行加热,达到目标温度够 能自动维持在目标温度上,同时能够对自动挡进行设置,调节自动挡下的加热器功率输出上 限,以保证实验安全。高温高压容器内的温度和压力由控制电路进行监视,发生异常情况时 能及时自动切断主电路,并关闭进气阀门,同时开启排气阀门,防止出现安全事故。此外该 远程控制系统预先保留了一定的端口,便于未来其他安全功能的扩展。





图 3.8 加热器控制系统 上图:加热器控制策略;下图:加热器控制电路

(3) 氮气供应系统

实验室中氮气压力调节为手动调节控制,为保障操作人员安全,将氮气瓶、调压阀及排 气针阀设计布置操控室,采用四个独立的氮气供应系统,通过 1/4 金属管将氮气接入高温高 压容器、常温高压容器及燃油蓄压器。通过分别调节调压阀,控制燃油蓄压器油压、测试环 境压力(背压),保证喷油器喷射压力和背压稳定,达到实验要求。

氮气供应系统包括:

a)2个40L普压氮气瓶,可提供15MPa压力的氮气;

b)2个80L高压氮气瓶,可提供20MPa的高压氮气;

c)4个调压阀,4个排气针阀,用来调节和保持喷射压力和背压。

(4) 真空泵

根据不同实验工况要求,喷油器喷射背压不同。喷射背压等于或高于 1atm 时,背压由 氮气供应系统供应,并利用调压阀和排气针阀控制;喷射背压低于 1atm 即负压时,背压由 真空泵和氮气供应系统共同控制。如图 3.9 所示,真空泵安装于高温高压容器和常温高压容 器的排气管路上,通过真空泵控制阀和氮气供应系统供气共同维持容器内部负压,保证实验



测试条件。



图3.9 真空泵

3.2.3 激光测试系统

(1) 激光系统

此次实验采用 LaVision 公司生产的 Nd:Yag 激光发生器作为激光光源。该激光发生器是高功率 4 级激光发生器,激光的原始波长为 1064nm (红外波段),经过两次衰减之后可以产生波长分别为 532nm (可见波段)与 266nm (紫外波段)的激光。激光器的一些相关数据如表 3-1:

•	
参数	数值
激光束直径(mm)	5
最大输出功率	298mJ@1264nm
	203mJ@532nm
	38mJ@266nm
重复频率(Hz)	15
脉冲宽度(ns)	4~9

表 3-1: Nd:Yag 激光器参数

此次实验中采用平面激光照射由喷油器喷出的喷雾,以研究喷雾的浓度和温度的二维分 布特性。因此需要将激光发生器产生的激光束转换为平面激光(Laser Sheet)。在激光光导 臂(Laser Arm)输出端安装了一组棱镜,包括平凹透镜、弯月凸透镜、平凹柱透镜。调节 平凹透镜和弯月凸透镜间的距离可以改变平面激光最薄处的位置,使用不同的平凹柱透镜可 以获得不同张角的平面激光。

(2) 光学与成像系统

实验中所采用的光学与成像系统为 LaVision 公司生产的 SprayMaster 激光摄像系统。该系统包括: LaVision 图像增强 CCD 相机、LaVision 25mm 图像增强器、LaVision 分光器

a) LaVision 图像增强 CCD 相机

如图 3.10 所示,图像增强 CCD 相机能以 15fps 的速率拍摄单张图片,以 10fps 的速率、 至少 500ns 的时间间隔拍摄两张连续图片。CCD 相机分辨率像素为 1376×1040,像素尺寸为 6.45um×6.45um。具体性能参数见表 3-2:



表 3-2	LaVision 图像增强 CCD 照相机参数
参数	数值
像素	1376(h) ×1040(v)
像素尺寸	6.45um×6.45um
扫描区域	8.9mm×6.7mm
扫描频率	16MHz
最大摄像频率	15Hz@Single frame
	10Hz@Double frame
最小曝光间隔	500ns



图 3.10 CCD 相机

b) LaVision25mm 图像增强中转器

图像增强中转器是安装于 CCD 相机前方用于增加光强的电子光学设备。借助于安装在 IRO (Intensified Relay Optics)中的图像增强器和高压控制器, CCD 相机的曝光时间可在 5ns 到几毫秒之间大范围调整,放大倍数可达 500 倍,如图 3.11 所示。



图 3.11 图像增强中转器

IRO 由光学继电器、图像增强仪以及控制单元组成,如图 3.12 所示。其中控制单元用 于设置曝光时间和增强器增益。图像增强仪是一个具有宽广的曝光时间范围的电子快门设备。 CCD 相机的最小曝光时间通常在毫秒级,而图像增强仪只能开启几纳秒的时间。光线聚焦 在图像增强仪的入口视窗上,在相机阴极被转换为电子信号,并在 MCP 内部放大再转化为 光线出现在图像增强仪出口视窗上。出口视窗上的图像通过透镜耦合器聚焦在 CCD 相机板 上。当一个具有门限值的增强器安装在 CCD 相机时,CCD 曝光的时间就会与荧光消失的 时间间隔一样。





图 3.12 IRO、CCD 摄像机以及控制单元的结构简图

c) LaVision 分光器

在此次实验中,浓度场分布测试和温度场分布测试均需要同时捕捉两种波长的荧光信号,因此需要在相机镜头前安装一个分光器(Doubler),并安装相应的滤镜。浓度场分布测试中需要在分光器上分别安装捕捉气相(中心波长 289nm)与液相信号(中心波长 365nm)所需的两种滤镜,以记录同一束喷雾中液相和气相的荧光信号;而温度场分布测试中需要安装捕捉两个波长的液相信号(中心波长分别为 340nm 和 400nm),以记录液相荧光信号在两个波长下的荧光强度。

d) 滤镜

在喷雾气相浓度测试中,需进行气液两相分离测试,分别获得气相荧光图像和液相荧光 图像,因此需要在相机前安装两种不同的滤镜。如图 3.13 所示,根据测试燃油的气相荧光 光谱和液相荧光光谱,为避免获得的荧光信号过弱,需选择能够最大限度通过气相荧光信号 的气相滤镜和最大限度能通过液相荧光信号的液相滤镜,同时需避免气相滤镜和液相滤镜光 谱产生干涉,防止引起测量误差。因此,我们选择图 3.13 所示的两种符合条件的气相滤镜 和液相滤镜。



图 3.13 气相浓度测试滤镜



在两色法测温实验中,需利用液相荧光光谱带宽的特性,选择两个波长的荧光信号进行测试,因此需要选择两种通光率高、带宽窄的滤镜,以获得较强的荧光信号,同时避免两个波段的信号互相干涉。因此我们选择如图 3.14 所示的 340nm 和 400nm 的滤镜。



图 3.14 双色法测温滤镜

3.2.3 浓度标定与温度标定装置

为了从激光诱导荧光强度中得到喷雾内的气相浓度和液相温度,必须利用标定装置对荧光的强度进行标定,建立荧光强度和喷雾浓度、温度的定量关系。

(1) 气相浓度标定装置



图 3.15 浓度标定装置

如图 3.15 所示,利用该浓度标定装置对燃油蒸汽浓度进行标定。氮气经过流量计进入 2%FB、9%DEMA 和 89%正己烷的燃油中,带出燃油蒸汽。燃油蒸汽的温度由加热器对蒸 汽加热进行控制,燃油蒸发速率通过改变水浴温度进行控制,燃油蒸汽浓度则由燃油蒸发速 率和氮气流量进行控制,最后通过导流板获得已知温度和浓度的燃油蒸汽,其中蒸汽温度由 热电偶在燃油蒸汽出口处测量获得,燃油浓度由氮气流量和燃油蒸发量计算得出。

(2) 液相温度标定装置

温度的标定是测量已知温度的液体在两个波长上荧光强度的比值,以此作为参考温度。 标定用到的实验光学布置和喷雾实验用到的光学布置完全一致,确保获得标定系数的可靠。

该标定装置的设计主要存在以下难点:1)由于测试标定液体为燃料,所以在加热或者 温度较高、压力较小时极易挥发,需对测试燃料进行密封;2)依据激光测试条件的要求,



不宜使用较大容器来进行测试,且具有良好的光学视窗;3)由于标定需要测试已知温度的 液体,故而需要对测试液体的温度进行实时监控测量;4)为最大限度接近发动机实际工况, 同时提高燃料沸点,扩大温度测试范围,需对测试燃料施加一定的环境压力。

通过对多种设计方案的分析比较,选择图 3.16 所示方案,采用一个 1cm×1cm×4.5cm 的石英比色皿进行测量,测试区域较小,便于布置,且透光率高。然后使用上下两块金属板、 垫片以及螺杆将石英容器压紧封住,防止测试液体因加热而产生挥发,影响标定测试。为保 证压紧力,通过双头螺柱中段长度、金属板槽深、垫片厚度以及比色皿高度的公差进行控制, 防止压力过大或过小,如图 3.17 所示。





图 3.16 温度标定装置设计方案



在上方的金属板中心开出两个螺纹孔:较大的 M6 螺纹孔可以连接螺钉热电偶,将热电 偶探头深入适应容器内,实时测量标定液体的温度;较小的 M3 螺纹孔为通气孔,在测试较 高压力和温度时通过螺钉封住,防止标定液体挥发,在测试较高温度较低压力时打开,避免 标定液体加热时内部压力较高,以此扩大温度测试范围,获得宽广的标定曲线。标定装置设 计如图 3.18 所示。





图 3.18 温度标定装置 左图:三维模型;右图:实物图



3.3 测试工况

3.3.1 气相浓度测试工况

表 3-3 中,列出了此次实验测试的工况,测试燃油为 89% 正己烷(N-hexane)、2% 氟苯(FB)和 9%2, 6-二乙基-4-甲基苯胺(DEMA)混合燃油,该燃油已被证实具有良好的共同蒸发特性。由于燃油在低环境压力下沸点低,易于蒸发,能够更好的观察气相喷雾特性,故此次实验选择 20kPa 和 40kPa 的环境压力。燃油过热度(燃油温度-燃油沸点)作为实验中的独立变量。

	VV)()) VV # (<u>-</u>)0	
参数	数(直
喷油器	8孔,1	5cc/s
喷油脉宽	1.21	ns
燃油组分	N-hexane (89%), FB	(2%), DEMA(9%)
喷射压力	10 MPa	a (abs)
环境压力	20kPa (abs)	40kPa (abs)
燃油温度(过热度,°C)	25(0), 55(30), 85(60)	25(-),52(10), 82(40)
环境温度	$25^{\circ}C\pm$	1°C

表 3-3 喷雾测试工况

3.3.2 液相温度标定工况

液相温度标定测试分为:不同 FB 浓度条件下的温度标定测试和实验影响因素测试。实验影响因素测试中包括:图像拍摄张数影响测试、环境压力影响测试、燃油蒸发量影响测试、激光能量影响测试。

1、 不同 FB 浓度条件下的温度标定测试:

FB 浓度的改变会影响燃油的荧光光谱特性,其对温度的敏感性将产生变化。因此通过 改变 FB 浓度对其温度敏感性进行研究,得出最佳的 FB 浓度范围。

	べうう 血反体に上加
参数	数值
环境压力/bar	20
FB 浓度	0.0125% 0.125% 0.5% 2.0%
燃油温度/℃	30~150, 温度间隔 5
图像拍摄张数	50

表 3-4 温度标定工况

2、 实验影响因素测试:

在实验影响因素测试中,选定 2%FB、9%DEMA、89%正己烷为标准测试燃料。燃油温度为 50℃时,温度高于室温,易于测量蒸发影响,且在 50℃时荧光强度较高,受环境因素干扰少。因此选择 50℃为测试温度,通过改变影响因素对其影响进行测试。

图像半均乐致测试上沉
数值
20
50
2%
200



参数	数值
环境压力/bar	1、3、5、7.5、10、15、20
FB 浓度	2%
燃油温度/℃	30、50
图像拍摄张数	50

表 3-6	环境压力影响测试工况
12 3-0	

表 3-7 燃油蒸发影响测试工况

参数	数值
环境压力/bar	1.5
FB 浓度	2%
燃油温度/℃	50
图像拍摄张数	50
燃油蒸发量	0%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%

3.4 实验操作方法

在确定实验测试方法以及实验测试工况后,即可开始进行实验测试。本次实验分为四个部分,即利用 LIEF 进行喷雾实验、定量的浓度标定实验、喷雾场内气相浓度分布、定量的温度标定实验。四部分实验的操作流程与方法均相同,其中喷雾测试中使用 289nm 和 365nm 滤镜,喷雾液相温度标定测试中使用 340nm 和 400nm 滤镜。

此次实验的操作方法主要分为以下几步:1)搭建实验台架;2)布置并调整相机和激光; 3)清洗设备和配制测试燃油;5)实验测试,记录实验数据。

1) 搭建实验台架

根据实验测试要求,明确测试工况和条件,对实验台架进行搭建,其中喷雾测试在常温 高压容器中进行,喷雾液相温度标定测试在高温高压容器中进行。

首先对石英窗户进行清洗。将石英窗户从容器上拆下,并用无水乙醇洗去石英玻璃上残 留的喷雾燃油和其他杂质,防止其干扰激光信号和相机摄像。在清洗完石英窗户后将其安装 至测试容器上,并按照操作规范加载规定的扭矩,保证安全和防止漏气。

其次安装喷油器,并布置油路。将喷油器安装在由实验室自主设计的水套上,并利用压 块将喷油器压紧固定。然后将水套安装在测试容器上盖,固定压紧,防止其漏气和松动。

最后将水套的进出水口与恒温水循环器的进出水口连接,控制喷油器中燃油温度,并防 止喷油器工作温度过高。

2) 布置并调整相机和激光

首先将相机和激光布置在容器上相互垂直的两个窗户前,并保证激光和相机与对应的窗户垂直。同时调整激光与窗户的距离,保证激光与测试容器窗户的距离尽量小,以减少激光能量损失。

其次,将图像增强中转器安装在相机前方,并将镜头安装在图像增强中转器上。然后根 据产品说明书,连接相机、激光、电脑、图像增强中转器控制器的电源线以及信号线。

接着,打开电脑、激光、相机、图像增强中转器控制器,并在电脑中打开 DaVis 操作软件。调整激光,使平面激光中心刚好照射在窗户中心,并使激光照射在喷油器喷孔上。随后,将带有标定网格的标定板放置在喷油器下方,并利用平面激光调整标定板的位置,使平面激光刚好照射标定板平面上,即此时标定板位于喷油器正下方。接着,盖住 CCD 相机镜头,在



DaVis 软件中点击 Take Background Image, 拍摄一组背景, 并选中 Background suntraction, 使测试拍摄照片减去该背景, 排除噪声等信号对相机拍摄的干扰。打开 CCD 相机镜头, 然后 点击 DaVis 软件中按钮 Grab, 进行连续拍摄照片, 该照片不存储。调整 CCD 相机前后、左 右位置, 使相机的视窗与测试容器的窗户大小相当, 窗户中心位于相机视窗中心, 以拍摄完 整的喷雾照片, 然后调整相机镜头焦距, 使相机能够清晰的拍摄到放于喷油器下方的标定板, 然后点击 DaVis 中 StartRecording, 拍摄一组照片, 取平均后利用标定板上的网格距离标 定图像中像素格对应的实际尺寸。由此, 完成相机和激光的布置与标定。

3) 清洗设备和配制测试燃油

首先,使用高纯正己烷清洗石英比色皿,内外壁面均需清洗,然后在石英比色皿中滴入高纯正己烷,并将石英比色皿放置于喷油器正下方,打开激光,然后分别在365nm和289nm滤镜下拍摄其液相和气相荧光,照片中的荧光值均小于20时,即可认为石英比色皿清洗干净。然后,使用高纯正己烷清洗烧杯、胶头滴管、量筒、玻璃搅拌棒等,洗净后将其最后一次清洗的正己烷滴入洗净的石英比色皿中,用相同方法检测其液相和气相荧光,荧光值小于20时即可。然后,使用烧杯、胶头滴管、量筒等按照2%FB、9%DEMA、89%正己烷的比例配制测试燃油。

然后使用同样清洗方法,清洗蓄压器、1/4油管、管接口、油管滤芯、油压表等,保证 在实验过程中燃料流经的部位被清洗干净。然后将配制好测试燃油加入蓄压器中。

最后利用 1/4 油管连接喷油器和蓄压器,布置好油路。

4) 实验测试,记录实验数据

首先,打开恒温水循环器,设定实验测试所需油温所对应的水温。然后打开油路氮气, 缓慢加压至实验所需压力值,并检测油路接口是否存在泄漏。如出现泄漏须立即关闭氮气, 并进行泄压,紧固漏油接口后,重新开始缓慢加压。随后,打开环境压力控制气路,根据测 试要求背压,调节氮气和真空泵,达到实验测试工况。

接着开启喷油器电源,调整激光为外部触发,由电脑进行控制,利用软件触发并同步激 光、相机、喷油器,完成实验测试拍照。通过调整恒温水循环器水温、油压、环境背压等完 成喷雾测试。

实验完成后,依次关闭喷油器电源、激光、相机、电脑、恒温水循环器等,然后卸去油路、容器内压力,最后拆除实验台架,将实验装置摆放至指定位置。

3.5 本章小结

本章首先讲述了此次实验的测试技术路线,建立双相诱导激光同时测量直喷喷雾内温度 和浓度的理论体系,构建测量光学测量系统,喷雾气相浓度和液相温度的标定,编制后处理 软件,明确此次实验的主要内容。随后对此次实验所使用的主要实验系统与设备进行了说明 和介绍,了解实验设备的使用和操作方法。最后详细说明了此次实验的主要操作方法与实验 流程,通过搭建实验台架、布置并调整相机和激光、清洗设备和配制测试燃油、实验测试并 记录实验数据等步骤完成此次实验。通过本章的介绍,对实验的操作与流程有了全面而详细 的了解。



第四章 数据分析与处理

4.1 荧光光谱干涉标定结果

此次实验中,荧光光谱干涉通过对测试燃油标定进行校正。将测试燃油液体置于温度可 控的石英比色皿中,利用激光对其进行激发产生荧光,然后通过气相滤镜和液相滤镜对相同 的燃油液体进行摄像,并确保该测试系统与喷雾激光测试系统相同。荧光光谱干涉校正系数 C为在气相滤镜和液相相滤镜下的液相荧光强度的比值,如下式:

$$C = \frac{I_{Vapor}}{I_{Liquid}}$$

(4-1)

其中*I_{Vapor}*为通过气相滤镜获得的燃油液相荧光强度,*I_{Liquid}*为通过液相滤镜获得的燃油液相荧光强度。

通过标定获得不同温度下荧光光谱干涉校正系数 C 的值,并绘出荧光光谱干涉校正系数随温度变化的曲线。利用荧光光谱干涉校正系数 C 对校正喷雾气相的图像进行校正。该校正公式为:

 $I_{V}' = I_{V} - C \times I_{L} \tag{4-2}$

其中I_V[']为校正后的喷雾气相荧光值,*I_V*为通过气相滤镜获得的喷雾荧光值,*I_L*为通过液 相滤镜获得的喷雾荧光值。由于液相荧光强度比气相荧光强度高 2~3 个数量级,因此,*I_L*近 似为喷雾液相荧光值。利用公式 4-2 即可获得校正后的喷雾气相荧光强度。



图 4.1 荧光光谱干涉标定图像

第29页共49页



图 4.1 所示为使用气相滤镜和液相滤镜拍摄的纯液体燃油的荧光图像,由于混合燃油对激光能量具有很强的吸收特性,激光前进距离不足 1mm 即完全衰减,形成一个明亮的荧光 谱线。右侧图像为通过气相滤镜拍摄得到的液相荧光图像,即为气相光谱干涉信号,其强度 取决于检测系统和燃油液体温度。60℃下的气相光谱干涉信号要明显强于 25℃下的气相光 谱干涉信号。图 4.2 为荧光光谱干涉标定曲线,随着燃油液体温度的增加,荧光光谱干涉信 号增强;选择通带带宽较窄的气相滤镜和液相滤镜,可以发现其荧光光谱干涉强度降低很多。



图 4.2 荧光光谱干涉标定曲线

4.2 激光能量衰减校正

激光能量衰减的校正采用图像后处理方法进行校正,该校正方法采用 Lambert-Beer 吸收定律:

$$S^{new}(x,y) = S^{old}(x,y) \left[K \int_0^x S^{new}(x',y) dx' \right]$$

$$(4-3)$$

设定激光前进方向为 X,则在 X 方向上激光能量I(x)和相机信号S(x)分别为:

$$I(x) = I_0 e^{-\int_0^x \rho(x') dx'}$$
(4-4)

$$S(x) = C_0 \rho(x) I(x)$$
 (4-5)
由此得到:

 $S(x) = C_0 \rho(x) I_0 e^{-\int_0^x \rho(x') dx'}$ (4-6)

$$S_0 = C_0 \rho_0 I_0 \tag{4-7}$$

$$C_0 I_0 = \frac{S_0}{\rho_0} \tag{4-8}$$

$$\mathbb{M}S(x) = \frac{s_0}{\rho_0} \rho(x) e^{-\int_0^x \rho(x') dx'}$$
(4-9)

$$\frac{d}{dx}\left(e^{-\int_0^x \rho(x')dx'}\right) = -\rho(x)e^{-\int_0^x \rho(x')dx'} = -\frac{S(x)}{S_0/\rho_0}$$
(4-10)

$$e^{-\int_0^x \rho(x') dx'} = -\frac{\rho_0}{s_0} \int_0^x S(x') dx' + C$$
(4-11)

在 x=0 时,得到 C=1,则结合式 4-10 和 4-11 得到:

$$\rho(x) = \frac{S(x)}{S_0/\rho_0 - \int_0^x S(x') dx'}$$
(4-12)



由式 4-9 得到:

$$S(x)e^{\int_0^x \rho(x')dx'} = \frac{S_0}{\rho_0}\rho(x)$$
(4-13)

由式 4-4 知, $e^{-\int_0^x \rho(x')dx'}$ 为激光能量在 X 方向的衰减系数,故要消除荧光信号的衰减, 必须将该系数消除,故在荧光强度值中乘以 $e^{\int_0^x \rho(x')dx'}$,即可修正激光能量的衰减造成的荧 光信号衰减。

$$S^{new}(x) = S(x)e^{\int_0^x \rho(x')dx'} = S(x)\left[\frac{S_0}{\rho_0}\int_0^x S(x')\,dx'\right]$$
(4-14)

将式 4-14 离散化得到

$$S_i^{new}(x) = S_i^{old} \left(K \sum_{j=0}^{j-i-1} S_j^{new} \right) \qquad \qquad \pm \oplus K = \frac{S_0}{\rho_0}$$

$$\tag{4-15}$$



图 4.3 激光能量衰减校正系数曲线

由上述方程推导可知,该方程中存在一个未知参数 *K*,*K*表示在每一行的第一个像素的 信号强度和激光强度比值,参数 *K* 求解程序参见附录一。根据喷雾场的对称性,该参数 *K* 可以通过喷雾图像左右两侧的总荧光强度的差值为零时得到,如图 4.3 所示。然后根据方程 4-15 即可对喷雾场图像进行校正。校正前后的图像比较如图 4.4 所示,右侧校正后的喷雾束 的荧光强度分布更加均匀。图 4.5 中的两张图为距离喷油器喷孔 30mm 处的剖面上校正前后 的激光能量分布图。



图 4.4 校正前后的喷雾图像





图 4.5 距离喷孔 30mm 截面处的激光能量分布

4.3 定量的浓度测试结果

图 4.6 为通过 LIEF 激光诊断技术拍摄到的喷雾图像。该组喷雾图像为 10MPa喷射压力、 20kPa 环境压力, 0.7ms 喷油时刻条件下, 25℃、55℃、85℃油温下的气液两相分布图像。 左侧一组为液相分布图像, 右侧一组为气相分布图像。由图像得出随着温度的升高, 喷雾气 相浓度逐渐升高, 且其形态也逐渐发生变化。



图 4.6 不同燃油温度下的气液两相的喷雾图像

第32页共49页



4.4 喷雾气相浓度标定的结果

首先,根据燃油蒸发量和流量计检测的氮气流量,计算得出燃油蒸汽浓度。通过改变燃油蒸汽浓度,获得不同燃油蒸汽浓度下的荧光图像。由于蒸汽外部区域与环境气体混合,形成中心区域蒸汽浓度较高,周边区域浓度较低,因此只有中心区域蒸汽浓度是控制条件下的蒸汽浓度。图 4.7 为燃油蒸汽浓度标定测试中拍摄获得的不同燃油蒸汽浓度下的中心区域燃油蒸汽炭光图像,随着燃油蒸汽浓度的增加,蒸汽的荧光强度也不断增强。图 4.8 为燃油蒸汽浓度标定曲线,其荧光强度为中心区域的荧光强度的平均值,在 35℃、75℃条件下,燃油蒸汽荧光强度与燃油蒸汽浓度成正比,燃油蒸汽温度的变化对喷雾气相荧光强度的影响极小,故而可近似认为燃油蒸汽温度对喷雾气相荧光无影响。利用该燃油蒸汽浓度标定结果可以得到定量的喷雾气相浓度分布。



图 4.7 不同燃油蒸汽浓度下的标定图像



图 4.8 燃油气相浓度标定曲线

4.5 喷雾气相燃油浓度分布

根据燃油蒸汽浓度标定曲线,利用 matlab 软件编程可对喷雾图像进行处理,获得喷雾 气相浓度分布图。

首先,根据荧光光谱干涉系数对喷雾气相荧光图像进行校正处理,消去液相荧光干扰。 然后利用 matlab 编程处理,编写程序对激光能量衰减进行校正处理,获得真实的喷雾气相 荧光图像。最后,编写 matlab 程序,根据荧光强度与燃油蒸汽浓度的对应关系,获得喷雾 气相的浓度梯度图,处理结果如图 4.9 所示。随着燃油温度的升高,可以明显发现喷雾气相



基于双相激光诱导荧光技术的汽油直喷喷雾蒸发特性的研究



图 4.9 不同燃油温度下液相喷雾图像与喷雾气相浓度分布图像

4.6 燃油液相温度标定

依据双色法测温理论和量化原理,对燃油液相温度进行标定实验。在实验中,首先分析 实验标定过程中可能对实验测量结果产生影响的因素,并对其进行定量测量与分析,以排除 干扰因素。然后对不同 FB 浓度的燃油进行标定测试,得出其浓度的变化对温度敏感性的影 响。

在实验得出图像数据之后,需对图像进行分析处理。首先研究开发图像处理方法,依据 良好的处理方法,对测试图像进行准确分析。其次对实验影响因素进行数据处理和分析,确 认实验测试数据的准确度。最后则是对不同 FB 浓度的燃油温度的标定图像进行处理,获得 不同 FB 浓度下的燃油液相温度标定曲线。

4.6.1 图像处理方法

液相燃油温度标定通过 matlab 编程进行处理。由于分光器(doubler)镜片产生微小变动,使得 400nm 滤镜拍摄获得的荧光图像上的荧光带有一个小角度倾斜,故而需编写 matlab 对图像进行旋转处理,使 340nm 与 400nm 滤镜下获得的荧光带保持一致。编写程序如下: cd('G:\Tempreture\Temperature Sensing\doubler_biaoding1\30C\SumAvgRmsMinMax')

第34页共49页



%%读取拍摄图像地址 %%获取图像文件名 Dir I340=loadvec('B00001_avg.im7', 'frame', 0); %%读取 340nm 图像 I340=rot90(I.w): I400=loadvec('B00001_avg.im7', 'frame', 1); I400=rot90(I.w); %%读取 400nm 图像 subplot(121), imshow(I340, [0 4096]), set(gcf, 'colormap', jet), title('340nm') subplot(122), imshow(I400, [0 2048]), set(gcf, 'colormap', jet), title('400nm') %%显示 340nm 和 400nm 图像 base1=ginput(1); base2=ginput(1); %%选取 340nm 图像中两个点作为基点 input1=ginput(1); input2=ginput(1); %%选取 400nm 图像中两个点作为对应点 %%获得340nm图像中的旋转基点矩阵 base=[base1; base2]; %%获得 400nm 图像旋转对应矩阵 input=[input1; input2]; TFORM=cp2tform(input, base, 'linear conformal') %%获得旋转矩阵 I400T=imtransform(I400, TFORM); %%利用旋转矩阵对 400nm 图像进行旋转 figure subplot(121), imshow(I340, [0 4096]), set(gcf, 'colormap', jet), title('340nm') subplot(122), imshow(I400T, [0 2048]), set(gcf, 'colormap', jet), title('400nmT') %%显示 340nm 图像和旋转后的 400nm 图像 利用该程序即可获得旋转后的图像,并使 340nm 与 400nm 图像中的荧光带相对应。由

利用该程序即可获得旋转后的图像,开使 340nm 与 400nm 图像甲的荧光带相对应。田 于荧光带中心荧光强度高,两侧荧光强度较低,因此,选取中心荧光强度较高的区域作为有 效数据进行分析处理。

首先,编写程序,获取荧光带中心有效数据的范围。编写程序如下:

P340=mean(I340(500:690, 377:397));

P400=mean(I400T(500:690, 354:374)); %%由荧光带中心向两侧各取十个像素,并平均每一列的荧光值

P340=P340'; P400=P400';

由此得出 340nm 和 400nm 图像中的荧光带中心两侧各十个像素处的各列平均荧光值荧 光强度,并绘出图像,如图 4.10 左图所示,并根据两个波长的比值,绘出图 4.10 右图。可 以得出荧光带中心两侧 2~3 个像素处的各列平均荧光值的比值较为稳定,荧光带中心两侧较 远处的各列平均荧光值的比值存在较大波动,其原因为该区域荧光值绝对值远小于荧光中心 处的荧光值,信噪比低,环境干扰因素对其影响较大,故取荧光带中心两侧 2~3 个像素区域 为有效数据区域。





第35页共49页



4.6.2 测量影响因素分析

在实验测试过程中,不可避免的存在许多误差影响因素。因此在实验中需要分析实验的 可能影响因素,并对其所造成的误差大小进行分析处理,减小甚至消除误差。通过分析知, 实验测试中可能产生影响的主要有以下因素:图像平均处理的张数、环境压力、燃油蒸发量、 激光能量等。因此在实验中,需要对这些因素进行测量分析,研究其对温度标定测试的影响 程度。

1)图像平均数量影响

如图 4.11 所示,在实验测试过程中,激光和相机会产生一定的波动,同时实验环境中存在着噪声等随机干扰因素。为避免实验中随机干扰因素对实验结果产生影响,需在测试中连续拍摄多张图像,然后对图像进行平均处理,以获得稳定分布的图像。



图 4.11 荧光图像 左图:一次拍摄图像;右图:50 张平均后的图像

为确定获得稳定准确的图像所需图像平均的张数,我们进行了改变图像平均张数的测试。 图 4.12 为使用不同数目连续拍摄的图像进行平均后,340nm 与400nm 图像的荧光强度变化 曲线。由图像上获知,在图像张数较少时,平均荧光强度波动较大,平均图像的张数逐渐增 加时,其平均荧光强度波动趋于平稳。连续拍摄图像大于 50 张以后,图像的平均荧光值已 处于稳定状态,故选取连续拍摄 50 张图像进行实验。



图 4.12 选用不同数量图像平均对荧光强度的影响曲线

2) 环境压力的影响

由于测试燃油中主要成分正己烷易挥发,沸点为 68.7℃。为避免在加温测试过程,测试



燃油迅速挥发甚至沸腾,同时为更接近发动机内的真实工况,我们需要提高环境压力,以提高测试燃油沸点,减慢其挥发速度,避免其液面迅速下降导致无法对较高燃油温度进行测试,进而扩大温度测试范围。图 4.13 为一系列压力工况对荧光强度比值的影响,从图像中可以得出压力变化对荧光强度比值的影响很小,在50℃和30℃下的荧光强度比值波动仅为1.77%和 6.40%,其中 30℃时由于接近室温,温度存在小范围波动,因此误差稍大,由此我们可以得出环境压力变化的影响可近似忽略不计。



图 4.13 环境压力变化对燃油液相荧光的影响曲线

3) 燃油蒸发的影响

由于 89% 正己烷、2% FB、9% DEMA 按比例混合配制得到测试燃油,每种组分的沸点 和挥发性不同,燃油的蒸发可能会引起燃油中添加剂的浓度发生变化,最终对荧光强度产生 影响。因此,我们需要通过实验确认燃油蒸发的影响,验证其共蒸发特性。

图 4.14 为燃油蒸发量对荧光强度比值的影响曲线图,从曲线图中可以得出,燃油蒸发量对荧光强度的比值影响很小,其中荧光强度的比值的波动仅为 3.9%,说明该比例混合的正己烷、FB 和 DEMA 的共蒸发特性很好,可近似认为燃油蒸发量对荧光强度比值的变化无影响。



图 4.14 燃油蒸发量对燃油荧光强度比值的影响

4) 激光能量的影响

在使用激光进行测试时,由于激光的绝对能量未知,且平面激光的分布并不是绝对的均 与,所以不同区域的能量变化可能会对标定测试产生较大影响。因此我们通过改变激光能量 的输出百分比对激光能量的影响进行测试。



如图 4.15 所示,随着激光能量的提高,400nm 和 340nm 下的荧光强度均增强,但两波 长下的荧光强度增长成线性关系,其对两波长下的荧光强度比值波动很小,仅为 3.1%。因 此我们得出激光能量对燃油温度标定影响很小,可以忽略。



图 4.15 激光能量变化影响曲线

4.6.3 不同 FB 浓度的燃油温度标定结果

图 4.16 和图 4.17 为 2MPa 环境压力下 2%FB 燃油在不同燃油温度时的测试图像,该图像为 50 张平均后的图像。左侧为 340nm 滤镜拍摄得到的图像,右侧为 400nm 滤镜拍摄得到的图像。由于液相燃油中富含 FB 和 DEMA,故而激光通过液相燃油时,很快被燃油吸收反应,反应生成的复合体不稳定,迅速释放出荧光,产生一条很细的荧光带。由图像分析知,随着温度的升高,其液面不可避免的产生下降,同时两个波长下的液相荧光强度也逐渐下降。



图 4.16 2%FB 浓度下的荧光图像

第38页共49页





图 4.17 2%FB 浓度下的荧光图像

通过编写程序,选取有效数据区域对图像进行处理,得出一系列温度与荧光强度的关系 曲线。该程序如下:

load bjet

P=[];

for t=30:20:150

cd(['G:\Tempreture\Temperature Sensing\doubler_biaoding1\' num2str(t)

'C\SumAvgRmsMinMax']);

```
I340=loadvec('B00001_avg.im7', 'frame', 0);
I340=rot90(I340.w);
I400=loadvec('B00001_avg.im7', 'frame', 1);
I400=rot90(I400.w);
base1=ginput(1); base2=ginput(1); %%选取 340nm 图像中两个点作为基点
input1=ginput(1); input2=ginput(1); %%选取 400nm 图像中两个点作为对应点
                              %%获得 340nm 图像中的旋转基点矩阵
base=[base1; base2];
                               %%获得 400nm 图像旋转对应矩阵
input=[input1; input2];
TFORM=cp2tform(input, base, 'linear conformal');
I340T=imtransform(I340, TFORM);
                                   %%获得旋转矩阵,并旋转图像
figure
subplot(121), imshow(I340T, [0 3096]), set(gcf, 'colormap', bjet), title('340Tnm');
subplot(122), imshow(I400, [0 2048]), set(gcf, 'colormap', bjet), title('400nm');
P400=mean(mean(I400(565:600, 341:342)));P400=P400-20;
P340=mean(mean(I340T(550:585, 332:333)));P340=P340-20;
P=[P;P340 P400];
pause(0.1)
```



由此,获得不同温度下 340nm 和 400nm 波长下的荧光强度的平均值,将两者相比求得 R_f 的值。以测试温度起点 30℃为 T_0 ,340nm 与 400nm 荧光强度比值为 R_0 ,绘制出 $Ln(R_f/R_0)$ 与 $\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{T_0}\right)$ 的关系曲线图,如图 4.18 所示。 $Ln(R_f/R_0)$ 与 $\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{T_0}\right)$ 成线性关系,线性度 $R^2 = 0.991$,与理论推导结果相符,系数($\beta(\lambda_1) - \beta(\lambda_2)$)为定值。



图 4.18 液相燃油温度标定曲线

由于测试燃油为混合物,故其组分百分比的改变能改变测试燃油光谱特性,对荧光结果 也会产生影响,因此需要通过实验得出改变燃油组分百分比,其温度敏感性的变化,以及荧 光强度比值与温度是否依旧满足线性关系。图 4.19为不同 FB 浓度条件下的燃油荧光强度比 值与温度的关系曲线对比,温度范围为 30~100℃,由图中可以随着 FB 浓度的减小,在 30~100℃ 范围内燃油的荧光强度比值与温度依旧成线性关系,其标定曲线斜率逐渐变大。



图 4.19 不同 FB 浓度的燃油荧光强度与温度(30~100℃)的关系曲线对比



扩大测试燃料的温度范围,如图 4.20 所示,在温度范围为 30~150℃范围时,随着 FB 浓度的降低,在温度大于 100℃时,其比值出现较大波动,其线性度逐渐下降。这是由于 FB 浓度降低时,温度敏感性高,其在高温时荧光强度低,信噪比低,受外界干扰大,导致 荧光强度比值产生较大的波动。





由此得出结论:随着 FB 浓度的减小,燃油的温度敏感性增强,但其在 100℃时的荧光 强度降低,如图 4.21 所示。由于荧光强度较低时,其信噪比低,易受外界信号干扰,增大 实验误差。因此,我们得出 FB 浓度在 0.1%~0.5%区间内为最佳浓度区域,其温度敏感性高, 100℃时荧光强度高。



图 4.21 温度敏感性及 100℃下荧光强度与 FB 浓度的关系



4.7 本章小结

本章首先通过理论研究,利用实验标定和图像后处理的方法,对荧光光谱干涉和激光能 量衰减进行校正,解决 LIEF 测试技术中的技术难题,得出准确的喷雾气液两相图像。

首先通过喷雾气相浓度标定实验,得出准确的标定结果,结合 matlab 编程,对喷雾测试的气相荧光图像进行处理,获得准确的喷雾气相燃油浓度分布图像。其次,通过对 LIEF 测温的研究,利用设计的标定装置,对燃油液相温度进行标定。使用 matlab 编程对燃油液相温度标定图像进行分析处理,得出不同 FB 浓度的燃油温度标定曲线,获得一个最优的 FB 浓度区间。同时对实验中的误差影响因素进行考虑,并对其进行相应的定量测量和分析,排除其干扰。



第五章 结论

随着汽车行业的发展,开发出高效、清洁的汽油直喷发动机,必须对直喷喷雾的雾化、 蒸发和混合过程进行精确的测量。针对直喷喷雾的特点,本文基于双相激光诱导荧光技术

(LIEF)对影响直喷喷雾蒸发特性的液相温度和混合气浓度进行定量的研究与分析。通过本次课题研究,得出以下结论:

1. 此次实验成功的完成了喷雾场气相浓度和液相温度的标定,以及喷雾场气相浓度分布的定量测量。

2. 通过喷雾场气相浓度的标定与测试以及液相温度的标定的结果,符合理论推算,证明 LIEF 技术能够实现喷雾气液两相分离,并且成功完成喷雾气相浓度的定量测量。

3. 成功将 LIEF 与双色法测温结合,对喷雾液相温度进行标定,得出喷雾液相温度标定曲线, 且线性度很好,与理论计算符合。

4. 通过温度标定实验,证明环境压力、燃油蒸发、激光能量等因素的变化对温度标定没有 影响; FB浓度的变化影响温度标定的敏感性,获得 FB浓度为 0.001~0.005 区间内的最佳的 FB浓度区域。



第六章 后续工作

本文基于双相激光诱导荧光技术(LIEF)对影响直喷喷雾蒸发特性的液相温度和混合 气浓度进行定量的研究与分析,完成了喷雾气相浓度的标定与气相浓度分布测试,以及喷雾 液相温度的标定。由于时间的限制,此次实验研究仍有大量的工作未能完成,下一步工作中, 需要对喷雾液相温度分布进行测试,同时测量喷雾场气相浓度与液相温度,建立喷雾蒸发模 型,研究浓度和温度对喷雾蒸发的影响机理。

1) 喷雾液相温度分布的测试

根据此次实验中对喷雾液相温度标定的结果,利用 LIEF 技术在同一测试系统中对喷雾 液相进行测试,标定出喷雾液相温度,获得喷雾液相分布图。

2) 喷雾场内浓度温度同时测量

目前喷雾的温度和浓度分布这一问题远远没有达到清楚认识的地步,喷雾蒸发过程以及 油汽混合物形成机理在学术界和工业界存在广泛的争议。学术界和工业界已经开发了多种用 于喷雾内温度和浓度的测量方法,这些方法能够提供喷雾内油汽混合气的浓度和温度的信息, 但是,由于喷雾中温度和浓度相互作用,共同影响喷雾蒸发,因此建立对温度和浓度进行同 时测量的方法,同时获得喷雾场中气相浓度和液相温度,在喷雾蒸发过程与油气混合机理的 研究中将取得突破性进展。

3) 建立喷雾蒸发模型

目前有大量学者建立与研究了喷雾场蒸发模型,但由于无法准确获得喷雾场中温度和浓度信息,因此多数学者依据液滴蒸发模型或液滴群蒸发模型对喷雾场的蒸发进行研究。但喷雾是一种高速流场,存在大量的气液两相共存区,与液滴和液滴群有着很大的区别,所以根据喷雾场内浓度温度同时测量获得的温度与浓度信息将会对喷雾场蒸发模型的建立提供更为准确的数据,能够建立一种全新的喷雾蒸发模型。



参考文献

- [1] 汽车产业高速增长空前绝后,中国经济周刊,2011.5.10.
- [2] 马强,未来汽车行业发展对环境的影响分析,2007 中国环境科学学会学术年会优秀论 文集(下卷),F426.471;X820.3.
- [3] 吴憩棠,国II、国III、国IV排放标准的区别,《汽车与配件》技术与市场,APT(No.2) 2008-3
- [4] F Zhao, M.-C Lai, D.L Harrington, Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, Progress in Energy and Combustion Science 25 (1999) 437–562
- [5] 张玉银,张高明,许敏等.直喷汽油机燃烧系统开发中的喷雾激光诊断技术[J].汽车安 全与节能学报,2(4):294-307,2011.
- [6] Zhao H, Ladommatos N. Engine combustion instrumentation and diagnostics [M]. Pennsylvania, USA:SAE International, 1999.
- [7] Ohsawa T, Obokata T. Lasermetrics, 2nd Edition [M]. Tokyo: Shokabo, 1996.
- [8] 丁宁,高卫民,平银生等,喷雾引导型直喷汽油机燃油喷射对缸内流动特性影响的数值研究,内燃机工程 31 (5): 16-20,2011
- [9] 刘俊杰,吴志军,范钱旺等,直喷汽油机中乙醇汽油宏观喷雾特性的试验研究,汽车工程 33 (10): 860-864,2011
- [10] Fansler T. D., Drake C. M., Gajdeczko B., et al. Quantitative liquid and vapor distribution measurements in evaporating fuel sprays using laser-induced exciplex fluorescence, *Meas. Sci. Technol.* 20:1-13, 2009
- [11] Gaoming Zhang, Min Xu, Yuyin Zhang, Ming Zhang, David J. Cleary, Macroscopic Characterization of Flash Boiling Sprays using Laser Induced Exciplex Fluorescence from a Multi-Hole DI Injector, ILASS-Asia 2010
- [12] Gaoming Zhang, Min Xu, Yuying Zhang, Wei Zeng, Quantitative Measurements of Liquid and Vapor Distributions in Flash Boiling Fuel Sprays using Planar Laser Induced Exciplex Technique, JSAE 20119216
- [13] Espey, C., Dec, J. E., Litzinger, T. A., Scantavicca, D., A., Planar Laser Rayleigh Scattering for Quantitative Vapor-Fuel Imaging in a Diesel Jet, Combustion and Flame, Vol. 109, NO. 1-2, 1997
- [14] Idicheria, A., C., Pickett, L., M., Quantitative Mixing Measurements in a Vaporizing Diesel Spray by Rayleigh Scattering, SAE Technical Papers 2007-01-0647
- [15] Zhao, F., Q., Taketomi M., Nishida K., Hiroyasu H., Quantitative Imaging of the Fuel Concentration in a SI Engine with Laser Rayleigh Scattering, SAE Technical Papers 932641
- [16] Zhao, F., Q., Taketomi M., Nishida K., Hiroyasu H., Two-Dimensional Measurement of Fuel Vapor Concentration in the Combustion Chamber of SI Engine with Laser Rayleigh Scattering
- [17] Mewes, B., Bauer, G., Bruggemann, D., Fuel Vapor Measurements by Linear Raman Spectroscopy using Spectral Discrimination from Droplet Interference, Applied Optics, Vol. 38, NO. 6, pp 1040-1045, 1999
- [18] Klingbeil, A., E., Jeffries, J., Hanson, R., K., Tunable Mid-IR Laser Absorption Sensor for Time-Resolved Hydrocarbon Fuel Measurement, Proceedings of Combustion Institute, Vol. 31, NO. 1, pp807-815, 2007
- [19] Klingbeil, A., E., Porter, J. M., Jeffries, J., Hanson, R., K., Two-Wavelength Mid-IR Absorption Diagnostics for Simultaneous Measurement of Temperature and Hydrocarbon Fuel Cocentration, Proceedings of Combustion Institute, Vol. 32, NO. 1, pp821-829, 2009
- [20] Zhang, Y. Y., Yoshizaki, T., and Nishida, K., Imaging of Droplets and Vapor Distributions in a Diesel Fuel Spray by Means of Laser Absorption-Scattering Technique, Applied Optics, Vol.



39, NO. 33, pp. 6221-6229, 2000

- [21] Gao, J., Nishida, K., Laser Absorption-Scattering Technique Applied to Asymmetric Evaporating Fuel Sprays for Simultaneous Measurement of Vapor/Liquid Mass Distribution, Applied Physics B, Vol. 101, NO. 1-2, pp. 433-443, 2009
- [22] Cruyningen, I., Lozano, A., and Hanson, R. K., Quantitative Imaging of Concentration by Planar Laser-Induced Fluorescence, Experiment in Fluids, Vol. 10, NO. 1, pp. 41-49, 1991
- [23] Mosburger, M. J., and Sick, V., Single Laser Detection of CO and OH via Laser Induced Fluorescence, Applied Physics B, Vol. 99, NO. 1, pp. 1-6, 2010
- [24] Luong, M., Zhang, R., Schulz, C., Sick, V., Toluene laser-induced fluorescence for in-cylinder temperature imaging in internal combustion engines, Applied Physics B, Vol. 91, pp. 669-675, 2008
- [25] Melton L. A. Spectrally Separated Fluorescence for Diesel Fuel Droplets and Vapor, Appl. Opt., vol. 22, pp2224-6, 1983
- [26] Duwel I., Koban, W., Dreier, T., Zimmermann, F.P.,andSchulz, C. Spectroscopic Characterization of the Fluorobenzene/DEMA Tracer System for Laser-induced Exciplex Fluorescence for the Quantitative Study of Evaporating Fuel Sprays, Applied Physics B, Vol. 97, pp. 909-918, 2009
- [27] Kim, T., and Ghandhi B. J., Quantitative 2-D Fuel Vapor Concentration Measurements in an Evaporating Diesel Spray using the Exciplex Fluorescence Method, SAE Technical Paper, 2001-01-3495
- [28] Su, W. H., Su, T., Guo, H. S., Mao, L. W., Xie, T. F., Quantitative Study of Concentration and Temperature of a Diesel Spray by using Planar Laser Induced Exciplex Fluorescence Technique, SEA Technical Papers, 2010-01-0878
- [29] Luong, M., Zhang, R., Schulz, C., Sick, V., Toluene Laser-induced Fluorescence for In-cylinder Temperature Imaging in Internal Combustion Engines, Applied Physics B, Vol. 91, pp. 669-675, 2008
- [30] Labergue, A., Depredurand, V., Delconte, A., Gastanet, G., Lemoine, F., New Insight into Two-color LIF Thermometry Applied to Temperature Measurement of Droplets, Experiment in Fluids, Vol. 49, pp. 547-556, 2010
- [31] Alden M., et al., Thermographic Phosphors for Thermometry: A survey of Combustion Applications, Progress in Energy and Combustion Science, doi:10.1016/j.pecs.2010.07.001



谢辞

四年的时光匆匆逝去,大学的本科生涯也即将画上句号。四年之前,青涩稚嫩的我在父亲的陪同下来到交大,对周围的一切显得陌生却又好奇;四年之中,我刻苦努力的学习,认真细致的完成实验和作业,积极参加各类校内校外活动;四年之后,我已成长了许多,成长的不仅仅是学来的知识,也有能力的锻炼,还有生活的体验以及思想的成熟等等。

在此次本科毕业设计中,我认真学习研究课题理论,提出自己的想法和思路,一步步解 决实验难点,认认真真地完成实验以及数据的处理与分析,得出最终的结论。在这一过程中, 我付出了许多,也从中得到了大量的学习与锻炼,很好的获取经验与能力提升,而这一切的 获得离不开实验室中老师和同学的帮助。

首先,我要感谢我的本科毕业设计指导老师——张玉银老师,以及许敏老师、李铁老师 和孔令逊老师。此次本科毕业设计,从最初的开题报告,到最后的毕业论文定稿,都离不开 几位老师的亲切关怀和悉心指导。在此次毕业设计期间,几位老师给予了我许多指导与帮助, 提出了大量的建议和意见,并及时指出我在实验过程中的错误和偏差,使我能够顺利完成此 次毕设。同时,几位老师在和蔼待人、认真处事、严谨治学等方面深深地影响了我,使我受 益匪浅,这将是我人生中一笔重要的精神财富。

其次,我要感谢实验室的张高明、曾纬、张铭、陈豪、王振侃、吴胜奇、黎磊、李世琰、 李明等几位学长在实验理论研究、实验操作、数据处理与分析以及论文写作和修改等方面的 帮助与指导。同时还要感谢与我一同在喷雾实验室中做本科毕业设计的高昊,给我提出了许 多建议和帮助。此次本科毕业设计凝聚了实验室中每个人的汗水,是他们给予我无私的帮助, 帮助我顺利的完成毕业设计。

此外,我还要感谢我的同班同学,是他们使我的生活更加绚丽多彩,充实而美好。无论 是在日常的生活中,还是在学习中,他们都给予了我很大的帮助,让我能够迅速克服困难, 完成目标。

最后我还要感谢我的母校——上海交通大学!交大提供给我们最好的学习、生活环境以 及众多的锻炼机会,使我们能够更好的学习知识,提高自身能力和素质。同时,也要感谢学 院的教务老师,尤其是我们的年级思政郭莉老师和教务处齐建芬老师,在学习和生活上给予 了我们许多的关怀与帮助,让我们茁壮成长!

在即将毕业之际,我要感谢我的父母,感谢父母赐予我生命,含辛茹苦的将我抚养成人, 并竭尽所能的让我接受良好的教育,在我遭遇困难与挫折时给予我信心与勇气,帮助我渡过 难关。



附录

附录一:激光能量衰减处理程序:

function [I, f]=compAttenuation(I0,vK, centerC, varComp, logFile)

```
[r, c]=size(I0);
kst=vK(1);
kstep=vK(2);
knd=vK(3);
h=waitbar(0, 'Pls wait...');
rFlag=1;
for i=1:r
    if sum(I0(i, :))==0
         I(i, :)=I0(i, :);
          f(i)=0;
          continue;
    end
    kFlag=1;
     for k=kst:kstep:knd
         temp=zeros(1, c);
          temp(1)=I0(i, 1);
         for j=2:c
              if I0(i, j)==0
                   temp(j)=0;
                   continue;
               end
              temp(j)=I0(i, j)*exp(k*sum(temp));
              if isnan(temp(j))
                   break;
               end
         end
          varValue(kFlag)=varComp(temp, centerC);
         if isnan(varValue(kFlag))
               kFlag=kFlag+1;
               break;
         end
         kFlag=kFlag+1;
    end
     [varMin, varPos]=min(varValue);
```



```
f(rFlag)=kst+(varPos-1)*kstep;
     I(i, :)=zeros(1, c);
     I(i, 1)=I0(i, 1);
     for j=2:c
          I(i, j)=IO(i, j)*exp(f(rFlag)*sum(I(i, :)));
     end
     rFlag=rFlag+1;
     clear varValue;
     waitbar(i/r, h,['processing ' num2str(i) ' row']);
end
waitbar(i/r, h, 'Task completed');
if nargin==5
     wf=f';
     wf(:,2)=wf;
     wf(:,1)=[1:1:size(I0, 1)]';
     fid=fopen(logFile, 'w');
     fprintf(fid, '%4.0f %12.8f\r\n', wf);
     fclose(fid);
end
close(h);
```



STUDY OF EVAPORATION CHARACTERISTICS OF DIRECT INJECTION SPRAYS BASED ON LASER INDUCED EXCIPLEX FLUORESCENCE TECHNIQUE

As increasing concern on the oil depletion and environmental protection, government all over the world are passing increasing stringent legislation to regulate the energy efficiency and harmful emissions of the automobiles. Increasing the fuel economy and reducing the harmful emission have become one of the major challenges faced by worldwide automotive companies. To reach those objectives, automotive researchers and engineers are constantly developing new combustion concepts and systems for automotive internal combustion engines (ICE). One of the most promising concepts is the spark ignition direct injection (SIDI) gasoline engines. The main auto-makers in the world have invested enormous amount of resources to research and develop SIDI engines. Some of those concepts have gone into production and significant fuel economy and emission reductions are achieved. The SIDI gasoline engine has become the main stream for new engine combustion systems. The R&D activities of SIDI engines will continue growth in the forthcoming future.

Comparing the traditional port fuel injection (PFI) engines, SIDI engines directly inject the fuel into the engine cylinder. The direct injection enables significantly improved dynamic response, fuel economy and emission reduction (especially in the cold start stage). However, to achieve those potential, the atomization and vaporization of fuel sprays have to be accurately optimized and controlled. Thus, understanding the mechanisms governing the fuel spray atomization and vaporization is crucial for developing successful SID combustion system. The research on fuel sprays is one f the central topic for SIDI engine development. Among all the processes to affect the combustion efficiency and emission formation, fuel evaporation may be the most important one since only fuel of gaseous state is combustible. It's the objective of this study to investigate the mechanisms of fuel spray evaporation.

Among all the factors that influence the fuel spray evaporation, the distribution of the fuel vapor concentration and the liquid phase temperature is the most important one. Developing advanced non-intrusive laser diagnostic technique to measure the fuel vapor concentration and liquid temperature can significantly improve the knowledge of fuel spray evaporation process. Although various techniques were developed to achieve such information, the two-phase co-existence nature of the fuel spray pose an extreme challenge and most of those techniques are ineffective in the typical area of fuel sprays.

In this study, the two-dimensional (2D) fuel vapor concentration and liquid temperature were obtained using laser induced exciplex fluorescence (LIEF) technique. In the LIEF technique, two different fluorescing tracers were added into a non-fluorescing base fuel. After excitation of the laser, the two tracers have different spectral characteristics and the liquid and vapor phase is separately imaged. Comparing with other laser diagnostics, LIEF technique provides the



capability to separately image the liquid and vapor phase. Base on this separation, the vapor concentration and liquid temperature distributions could be obtained by manipulating the spectrum of each phase. Combing with proper calibration procedures, the quantitative information is achievable.

The quantitative vapor phase concentration measurements were done by directly applying the laser induced fluorescence theory. To achieve high measurement accuracy, the crosstalk of liquid phase was calibrated under various liquid temperatures conditions. A MatLAB based imaging processing routine was also developed to correct the laser energy attenuation through the spray field. Based on those calibrations and corrections, the vapor concentration was calibrated and the 2D quantitative vapor concentration in the spray was obtained.

The liquid phase temperature of the spray was obtained by combining the LIEF technique with two-color thermometry technique. During the implementation of this technique, two fluorescence bands were selected in the liquid phase spectrum. The intensity ratio between those two bands is directly proportional to liquid temperature. Two specially selected optical filters were used to separate the bands in order to maximize the temperature sensitivity. To establish the correlation between the resultant fluorescence and the liquid temperature, a special calibration device was designed and calibration experiments were carried out using the device.

The calibration experiment was carried out in the following order. Firstly, a calibration device was designed to control the temperature of the sample and also provide the maximal optical access. This calibration needed accurately control the liquid temperature and provide maximum optical access. After careful design, a "sandwich" structure was chosen, in which a quartz cell was embedded in a double-layer metal structure. The quartz cell provided the needed optical access while the metal layer provides the mechanical strength to support the structure. Due to the remarkable material and mechanical difference between the quartz cell and metal used in the device, the compensation for different mechanical behavior of those two materials becomes specially challenging. During the design process, the mechanical tolerance theory were applied to make sure those two material can work well. The mechanical and thermal expansions of those materials were compensated using the tolerance of the dimension. Those dimension also enable a good assembly be made. After the calibration device was designed, manufactured and assembled, the calibration cell was put into a high pressure high temperature (HPHT) environment. The temperature and pressure of the sample were regulated under the HPHT environment. The temperature and pressure of the test sample were then controlled. The laser system was set up around the calibration device to excite the test sample and the fluorescence photons from each band were collected using an intensified CCD camera coupled with an image doubler.

During the calibration experiments, the effects of various factors were validated to clarify their effects on the final calibration results. This is necessary since those factors are constantly changing in the spray. Specially, the effects of image averaging, ambient pressure, laser energy and fluorescence tracer concentration were investigated. It was found that the effects of averaged images numbers, ambient pressure, and laser energy had very small effects on the resultant fluorescence ratios. Neglecting the influence of those factors only introduces acceptable error to the calibration results. The fluorescence ratio between the two selected bands only depends on the liquid temperature, which is consistent with two-color thermometry theory. After the effects of those factors were clarified, the test sample was heated to different temperatures (from 30° C to 150° C with an increment of 5° C) by regulating the temperature and pressure within the HPHT





environment. The fluorescent ratios of those two bands were then recorded under the tested temperature conditions. After the fluorescence images were collected, a imaging processing routine was developed using the MatLAB image processing toolbox to (IPT) extract the fluorescence ratios. The fluorescence ratios were then plotted versus the liquid temperatures. The result was encouraging and promising. A linear correlation between the fluorescence ratio and temperature is established, which is consistent with the theory. The effects of tracer concentration were finally investigated by changing the tracer concentration in an order of tens. The results show that decreasing the tracer concentration can result in increased temperature sensitivity. However, the absolute fluorescence intensity also decreases as the concentration is lower, resulting reduced signal to noise ratio (SNR). Based on this observation, a trade-off has to be made to achieve optimal sensitivity and SNR. Our result shows such trade-off exists when the tracer concentration is between $0.5\% \sim 0.125\%$. This conclusion does not consider the effects of concentration on vapor concentration measurement. To achieve the optimal vapor concentration and liquid temperature measurements, a tracer concentration of 0.5% may be the most appropriate candidate.

Based on the temperature calibration results, several future works are highlighted. First, those temperature need to be applied to droplet temperature measurements or spray measurements to provide quantitative temperature distribution information. This is the ultimate goal for all the calibration work. The resultant 2D liquid temperature calibration could provide the insightful information of the liquid fuel evaporation process. Secondly, the vapor concentration and liquid temperature measurements should be carried simultaneously to get the 2D vapor concentration and liquid temperature distribution. Those information is crucial towards the understanding of the evaporation process with in the fuel spray. Thus provide the guidance for accurately control the spray evaporation process. Finally, based on those measurements, new spray evaporation model need to establish to overtake the current widely used spray evaporation models which is based on single droplet evaporation experiment and theoretical analysis. Those models would be a breakthrough for fuel spray combustion technologies.

第3页共3页