



同济大学 1907-2017
Tongji



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

高原 李理光 著

基于高压共轨喷射系统的 生物柴油喷雾特性试验及模拟研究

The Study of Biodiesel Spray Characteristics by
Experiment and Simulation Based on High Injection
Pressure of CRS



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

高原 李理光 著

基于高压共轨喷射系统的 生物柴油喷雾特性试验及模拟研究

The Study of Biodiesel Spray Characteristics by
Experiment and Simulation Based on High Injection
Pressure of CRS



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书从整个喷射系统入手,首先对影响生物柴油喷雾的燃料特性进行前期分析;然后在搭建的高压共轨喷雾台架上,基于单孔喷油器研究外界条件变化对生物柴油喷雾特性的影响,并结合对生物柴油喷雾特性参数的模拟计算进一步加深对生物柴油喷射、破碎和雾化过程的理解;最后从喷雾宏观特征、燃油质量分布以及喷嘴内部结构尺寸等多方面考察了多孔喷嘴的喷雾对称性。

图书在版编目(CIP)数据

基于高压共轨喷射系统的生物柴油喷雾特性试验及模拟研究/高原,李理光著. —上海:同济大学出版社, 2017. 8

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6995-7

I. ①基… II. ①高…②李… III. ①生物燃料—柴油—喷雾燃烧—燃烧性能—研究 IV. ①TK63②TK428.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093747 号

基于高压共轨喷射系统的生物柴油喷雾特性试验及模拟研究

高 原 李理光 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 郁 峰 熊磊丽

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 13

字 数 260 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6995-7

定 价 62.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佶红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

生物柴油是一种很有发展前景的柴油替代燃料。基于生物柴油具有可再生特点所带来减少温室效应气体排放的好处,目前为止,较多的研究着重在柴油机上使用不同掺混比下的生物柴油时的动力性、经济性和排放性能,对于生物柴油喷雾研究的相关工作开展较少。生物柴油的喷射、雾化以及与缸内运动气流相互作用后的破碎过程与气缸内混合气的形成以及后续的燃烧和排放过程有着密切的联系。影响生物柴油喷雾的因素众多,本书的研究从整个喷射系统入手,首先对影响生物柴油喷雾的燃料特性进行前期分析;然后在搭建的高压共轨喷雾台架上,基于单孔喷油器研究外界条件变化对生物柴油喷雾特性的影响,并结合对生物柴油喷雾特性参数的模拟计算,进一步加深对生物柴油喷射、破碎和雾化过程的理解;最后从喷雾宏观特征、燃油质量分布以及喷嘴内部结构尺寸等多方面考察了多孔喷嘴的喷雾对称性。

研究生物柴油的喷射、破碎和雾化特性,首先需要了解生物柴油燃料与喷雾、破碎相关的理化特性参数。书中首先采用高精度测量仪器对生物柴油与柴油不同掺混比下组成的燃料在温度范围为 $5\sim 95^{\circ}\text{C}$ 时的密度和黏度以及 $15\sim 80^{\circ}\text{C}$ 时的表面张力进行测量。研究发现,生物柴

油与柴油不同掺混比下组成的混合燃料密度以及表面张力随温度升高会呈线性减小,黏度随温度升高呈指数下降趋势。在相同温度下,混合燃料中生物柴油的掺混比越大,燃料的密度、黏度与表面张力值也越高。

为了开展生物柴油喷雾特性研究,搭建了一套生物柴油高压共轨喷雾试验台,该喷雾试验台由高压共轨喷射系统、定容弹、气体加热装置、容弹加压装置、高速摄影拍摄装置、数据采集和喷射控制系统等几部分组成。通过在大视场的定容装置内模拟气体压力、气体温度、燃油温度等外部条件变化,利用高速摄影仪记录不同外部条件下喷雾形态的图像数据。试验中采用将燃油喷射时 ECU 的电脉冲信号转换为激光脉冲,同时结合高速摄影的喷雾图像,得到不同喷射情况下的喷雾启喷延时与喷射结束延时信息,并对各种外界条件变化对生物柴油启喷延时和结束延时特性影响进行了分析。研究表明,餐饮废油及棕榈油与柴油不同掺混比的混合燃料喷雾启喷延时均在 $430\ \mu\text{s}$ 左右。不同燃料的启喷延时会随着混合燃料中生物柴油的掺混比例的不同而略有差异,但差异非常小。燃料的启喷延时随着喷射压力的增大而缩短。各喷射脉宽下 ECU 设定喷射脉宽均小于燃料的实际喷射脉宽,二者差值在 $450\sim 550\ \mu\text{s}$ 之间。

为了能利用计算机图像处理技术对喷雾图像特征参数自动计算提取,书中对反映喷雾特性的特征参数进行定义。同时对目前使用较多的喷雾锥角计算方法进行对比分析,研究结果显示,各种不同的喷雾锥角计算方法均能在一定准确程度上反映喷雾锥角随时间的变化,但采用喷雾切线算法得到的锥角计算准确度和锥角变化趋势的跟随性能最佳,最后将喷雾各特征参数的计算方法融合在通过 Matlab 编写的图像处理软件中,为了加强软件在计算过程中与人之间的交互把喷雾计算特征参数曲线同步显示出来。

对喷雾试验采用喷孔直径分别为 0.14 mm 和 0.18 mm 的单孔喷油器,用 EFS8246 型喷油速率测量仪对不同喷射压力和 1500 μ s 喷射脉宽下燃料的喷射规律以及喷射质量进行了测量。研究改变外界条件如燃料喷射压力、容弹气体密度、燃油温度、生物柴油掺混比以及喷孔直径等参数对喷雾宏观特性如喷雾贯穿距、喷雾锥角、喷雾前锋面速度、喷雾轴截面积和喷雾体积的影响。研究结果表明,增加燃料的喷射压力生物柴油喷雾贯穿距也随之增大,而喷射压力的增大会增加喷雾周边气体的卷吸效果,从而在一定程度上导致计算得到的喷雾锥角增大。提高生物柴油的喷射压力可以缩短达到相同喷雾轴截面积所用的时间,使生物柴油燃料在更短的时间内与更多的周围空气接触,增强燃料的雾化效果。增大容弹内气体的密度,相同喷雾持续时间下所对的喷雾轴截面积和喷雾体积减小。在相同喷射时间下,生物柴油燃料在 0.18 mm 喷孔直径下的喷雾轴截面积和喷雾体积要大于 0.14 mm 喷孔直径下所对应的喷雾轴截面积和体积。随着混合燃料的黏度增大,燃料所对应的喷雾锥角呈减小的趋势,而贯穿距呈递增趋势。为了加深对生物柴油喷射和雾化过程的了解,开展了对生物柴油的喷雾特性参数模拟计算。本书根据前人对柴油喷雾贯穿距的计算模型进行修正后提出适合生物柴油的喷雾贯穿距计算公式,并对公式中各影响喷雾贯穿距的参数项指数敏感性进行研究。研究发现,喷雾贯穿距曲线中时间参数项的指数值对喷雾贯穿距曲线的形态影响最大,喷射压力指数值对喷雾贯穿距曲线形态影响次之,燃料的黏度、喷孔直径以及气体密度参数项指数值对喷雾贯穿距曲线的形态影响最小。

研究多孔喷嘴的喷雾相对于研究单孔喷嘴喷雾无疑更接近发动机实际状况。多孔喷嘴各喷孔喷雾的对称性是影响发动机缸内混合气分布均匀性的主要因素之一。本书通过对 6 孔喷嘴各喷孔的喷雾宏观特

征参数的对比分析,并结合自行设计的6孔喷雾燃油质量收集装置对各喷孔燃油质量进行对比,研究了多孔喷嘴喷雾的对称性。研究发现,提高燃料的喷射压力可以改善喷雾的对称性以及各喷孔喷射燃料质量的均匀性。不同的燃料黏度对多孔喷嘴的喷雾对称性的影响较小。借助于上海光源的高能X射线断层扫描技术对不同结构尺寸的喷嘴建立了高清晰的三维数字模型,进一步通过喷嘴内部结构的对称性来揭示喷雾的对称性。通过对喷嘴内部结构三维数字模型的测量分析表明,对称喷嘴的喷孔锥角、喷孔间夹角以及喷孔直径在加工时能较好地保持结构对称性和加工一致性,因此,相对于非对称多孔喷嘴,对称喷嘴各喷雾油束在空间的分布更均匀并具有更好的贯穿距长度对称性。

符号说明

字母符号	含义	单位
D	柴油	
U	生物柴油餐饮废油	
P	生物柴油棕榈油	
BX	生物柴油占混合燃料的体积比	
ρ	燃料密度	g/cm^3
r	线性相关系数	
η	燃料黏度	$\text{mPa} \cdot \text{s}$
ξ	燃料表面张力	mN/m
A	喷雾轴截面积	cm^2
V	喷雾体积	cm^3
I	喷雾图像	
t_b	破碎时间	s
ρ_l	液体燃料密度	kg/m^3
D	喷孔直径	m
ρ_g	气体燃料密度	kg/m^3
ΔP	喷嘴前、后两端压差	MPa

字母符号	含义	单位
S	喷雾贯穿距	mm
M	动量	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$
β	贯穿距差异系数	
λ	同圆度差异系数	
α	喷嘴差异系数	
ϕ	燃油质量差异系数	
γ	喷孔锥角	°
θ	喷孔间夹角	°
σ^2	方差	

英文缩写表

缩写	全称	意义
CO	Carbon Oxide	一氧化碳
HC	Hydrocarbon	碳氢化合物
NO _x	Nitrogen Oxides	氮氧化物
PM	Particulate Matter	微粒
SO ₂	Sulfur Dioxide	二氧化硫
SCR	Selective Catalyst Reduction	选择性还原
DPF	Diesel Particle Filter	颗粒捕集器
EPA	Environment Protection Agency	美国环保署
NBB	National Biodiesel Board	美国国家生物柴油委员会
NREL	National Renewable Energy Laboratory	美国国家可更新实验室
SMD	Sauter Mean Diameter	索特平均直径
PCV	Pressure Control Valve	压力控制阀
VCV	Volume Control Valve	体积控制阀
DRAM	Dynamic Random Access Memory	闪存
MIPS	Million Instructions Per Second	每秒百万条指令
PWM	Pulse Width Modulation	脉宽调制