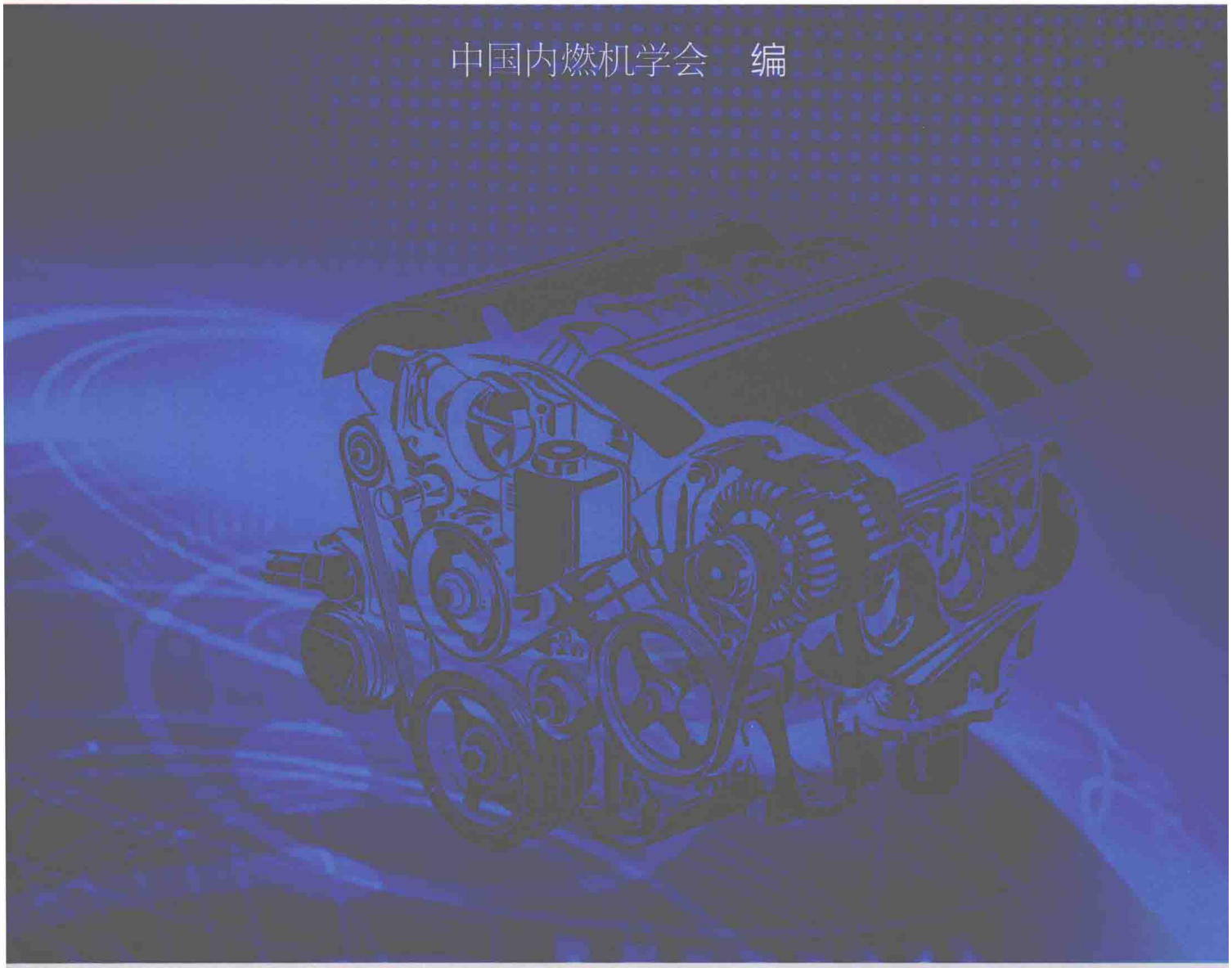
Chinese Society for
Internal Combustion Engines

内燃机科技

——2018年世界内燃机大会学术交流论文集

（下册）

中国内燃机学会　编



上海大学出版社

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

内燃机科技

——2018年世界内燃机大会学术交流论文集

（下册）

中国内燃机学会　编

上海大学出版社

·上 海·

图书在版编目(CIP)数据

内燃机科技：2018年世界内燃机大会学术交流论文集/中国内燃机学会编. —上海：上海大学出版社，2018.11

ISBN 978-7-5671-3273-3

Ⅰ.①内… Ⅱ.①中… Ⅲ.①内燃机—学术会议—文集 Ⅳ.①TK4-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第234375号

责任编辑 王悦生
封面设计 柯国富
技术编辑 金 鑫 钱宇坤

内燃机科技

——2018年世界内燃机大会学术交流论文集

(上、中、下册)

中国内燃机学会 编

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路99号 邮政编码200444)

(http://www.shupress.cn 发行热线021-66135112)

出版人 戴骏豪

*

南京展望文化发展有限公司排版

江苏凤凰数码印务有限公司印刷 各地新华书店经销

开本889mm×1 194mm 1/16 印张145 字数4 500千

2018年11月第1版 2018年11月第1次印刷

ISBN 978-7-5671-3273-3/TK·003 定价 780.00元(全三册)

前　言

学术发展必须靠交流，尤其是当今科学技术的发展，越来越离不开跨学科的交叉、融合；交流才能实现创新。中国内燃机学会是学术性社会团体，要服务于国家和社会，学术交流就是服务社会和国家的基本方式。中国内燃机学会每年举办学术年会，在推动学术交流方面发挥了不可替代的作用。经八届二次常务理事会会议决定，将于2018年11月8日至11日在江苏省无锡市举办首届“世界内燃机大会”，旨在为全球内燃机行业提供一个交流、展示的平台，进一步促进内燃机学科领域的技术创新和发展。此次大会由中国内燃机学会和无锡市人民政府共同主办，是国际内燃机界的盛会，届时，将有国内外著名院士、专家、教授和工程技术人员等1 000人与会，同时还将举行国际内燃机及制造装备展览会。为了筹备和召开本次大会，学会于2018年1月下旬发出征文通知，希望广大内燃机科技工作者积极踊跃投稿，并请各分会、各省市内燃机学会大力支持及推荐学术论文。截至2018年7月14日，共征集到学术论文414篇。为了保证本次大会的论文质量，于2018年7月14日在无锡召开了论文评审会，邀请来自高等院校、科研院所和企业等单位的12位专家、教授与会，对全部应征论文进行了认真、细致的审读，经过初审和复审择优录用了397篇学术论文，其中宣读交流138篇，墙报交流259篇。本论文集分为上、中、下三册，上册收录论文179篇，中册目录论文95篇，下册收录论文123篇。

本论文集的出版印刷是按照论文作者提供的电子文档排版的，在编辑中除了一些明显的书写错误和印刷中的技术措施需要修正外，一般未作修改。由于时间仓促，编者水平有限，编印中的错误和不足之处在所难免，敬请广大读者和论文作者批评指正。我们感谢所有投稿的论文作者对本次学术会议的支持。

我们相信，大会的召开和论文集的出版，定能为我国内燃机学科领域的技术发展和学科进步起到积极的促进作用。

中国内燃机学会

2018年9月

目　录

墙报交流论文

2018WICE-275　柴油火焰中碳烟在临界生成条件下的光学测试研究
…… 玄铁民　Jose Maria Garcia-oliver　何志霞　王　谦(1524)
2018WICE-276　醇类燃料自燃主导反应分析及其对燃料滞燃期的影响
…… 张　爽　韩永强　范鲁艳　刘佳会(1529)
2018WICE-277　点火室结构对射流引燃预混合气过程影响研究
…… 田江平　付佳聪　任中永　周　洋　隆武强(1535)
2018WICE-278　高低活性混合燃料燃烧和排放特性研究 …… 魏明智　许　允　李润钊　韩永强(1542)
2018WICE-279　高压空气射流控制压缩着火(JCCI)方式燃烧特性分析
…… 孟相宇　祝　佩　田　华　崔靖晨　礼　博　田江平　隆武强(1550)
2018WICE-280　基于 CONVERGE 氢内燃机爆震特点研究 …… 李　勇　高文志(1555)
2018WICE-281　基于二维消光法的乙醇汽油碳烟体积分数测试研究
…… 赵玺乾　魏胜利　徐　睿　何　旭　何春晖(1561)
2018WICE-282　加氢催化生物柴油的瞬时燃烧特性测试
…… 商伟伟　何志霞　展亮亮　李　贝　李　达(1567)
2018WICE-283　燃气喷射方向对柴油/天然气双燃料发动机混合气形成与燃烧特性的影响
…… 杨志鹏　宋恩哲　杨立平　刘振廷　梅加化　朱月樱(1572)
2018WICE-284　燃气喷射规律对稀燃天然气发动机喷气流动和燃烧特性的影响
…… 刘振廷　宋恩哲　王立媛　杨立平(1578)
2018WICE-285　液压可变气门机构设计及其运动特性研究
…… 解方喜　郑文良　刘洪涛　周思佟　赵志宏　洪　伟　钟　兵(1587)
2018WICE-286　预燃室结构对船用低压双燃料发动机的性能影响研究
…… 郭　浩　周　松　冯永明　白皆松(1596)
2018WICE-287　预燃室喷孔直径和长径比对天然气发动机燃烧特性的影响
…… 葛琪琪　冷先银　何志霞　王　梅　魏胜利　祝传艮(1604)
2018WICE-288　约束环境下氢-空气预混诱导加速燃烧研究
…… 李率毅　刘福水　黎一锴　吴　晗　张小玉(1610)
2018WICE-289　高温环境下汽油燃料的射流特性
…… 袁列杰　秦　静　裴毅强　任　源　王志东　刘　威(1616)
2018WICE-290　单液滴汽油撞击机油油膜特性研究
…… 卢莉莉　秦　静　朱庆洋　彭振山　刘　懿　裴毅强(1622)
2018WICE-291　亚临界/超临界环境下汽油的喷雾特性
…… 刘　威　裴毅强　秦　静　任　源　袁列杰　王志东(1628)
2018WICE-292　利用微波改善汽油机冷启动排放的试验研究 …… 张克松　吕　彬　张旖昕(1633)
2018WICE-293　PODE/柴油混合燃烧 NO 和 SOOT 生成过程数值模拟
…… 张　琦　刘军恒　孙　平　姚肖华　杨　晨　范　义(1637)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2018WICE-294 喷油定时对GDI汽油机燃用含水乙醇汽油的燃烧和颗粒排放的影响
…… 李 菲 陈振斌 孙 姣(1643)
2018WICE-295 喷油参数对双燃料发动机排放特性影响试验研究
…… 董 全 李 莹 宋恩哲 卢昌浩(1651)
2018WICE-296 基于dSPACE的SCR硬件在环仿真研究
…… 肖友洪 谭文阳 朱天宇 赵 辉 宋青青(1656)
2018WICE-297 燃油清净剂对缸内直喷汽油机喷嘴积碳及颗粒物排放的影响
…… 张文彬 丁海春 张 周 王 磊 帅石金(1663)
2018WICE-298 DOC+CDPF在防爆柴油机上的应用研究
…… 刘 颖 王 铁 高 吉 乔 靖 李文杰 陈东东(1670)
2018WICE-299 混合器结构对船舶低速柴油机低压SCR系统性能影响的仿真研究
…… 张荣沛 朱元清 张光伟 刘佃涛 周 松(1677)
2018WICE-300 Effects of oxygenated fuel and particle oxidation catalyst (POC) on diesel engine n-alkane and PAHs emissions …… Jian Zheng Xinling Li He Lin(1684)
2018WICE-301 MoS_2 润滑膜在内燃机润滑系统中应用的分子动力学基础研究
…… 易昌利 胡成志 吕继祖 白敏丽(1696)
2018WICE-302 纳米氧化铈颗粒浓度对柴油液滴蒸发速率的影响
…… 戴明露 王筱蓉 王继刚 谢玉龙(1701)
2018WICE-303 高压共轨柴油机润滑油消耗与窜气特性研究
…… 杨海翔 雷基林 文 均 温志高 申立中(1711)
2018WICE-304 柴油机燃用F-T柴油/含氧混合燃料的排放性能
…… 李文杰 王 铁 乔 靖 高 吉 刘 颖(1717)
2018WICE-305 燃用F-T柴油对防爆柴油机性能的影响 … 陈东东 张翠平 张瑞亮 刘 颖(1722)
2018WICE-306 三种流场下柴油喷雾扩散特性研究 …… 李 恒 魏衍举 章旭东 王若菡(1727)
2018WICE-307 添加剂对汽车尾气排放特性及燃油经济性影响研究
…… 朱仁成 王梦雷 金博强 祖 雷 王运静 李顺义 鲍晓峰 张瑞芹(1732)
2018WICE-308 双煤基燃料压燃发动机排放特性研究 …… 李 鹏 朱建军 武文捷(1736)
2018WICE-309 环境条件对航空煤油与柴油燃烧特性影响研究
…… 田江平 周 洋 张腾义 隆武强 袁文华(1741)
2018WICE-310 某柴油机配气机构动力学对比分析
…… 刘洪建 白书战 李振宁 柳海涛 郭长清 李国祥(1747)
2018WICE-311 某卡车用柴油机最佳EGR率和EGR冷却温度的确定
…… 王翠平 李 威 王海坤 白书战 王桂华(1754)
2018WICE-312 低速船用二冲程柴油机连杆轴承润滑性能分析
…… 徐含章 卢熙群 赵 滨 钟 宁(1761)
2018WICE-313 热参数对DPF热管理的影响 …… 仝 畅 刘晓日 张铁臣 黎 苏(1769)
2018WICE-314 柴油机ECU热仿真分析及优化设计…… 史家涛 程 克 张纪宝 田 颖(1774)
2018WICE-315 620柴油机活塞瞬态耦合应力场数值模拟 …… 任雪美 田 雨 刘 友(1780)
2018WICE-316 某型低速机轴瓦应力分析 …… 苏衍畔 李晓波 王贵新 吴文涛(1786)
2018WICE-317 润滑油黏度模型对活塞裙部-缸套摩擦润滑特性影响的仿真研究
…… 辛 固 成东康 孙楠楠 刘晓日 郑清平(1791)

2018WICE-318　活塞二阶运动对非道路高压共轨柴油机振动及噪声影响分析
…… 毕玉华　吴　彪　吴礼民　张　宁　宋国富　申立中　唐明超(1797)
2018WICE-319　船用低速二冲程柴油机的故障模拟仿真研究
…… 戴　琳　丁　宇　张　熠　李金成　向　拉(1806)
2018WICE-320　基于 LabVIEW 的发动机全可变配气试验测控系统设计
…… 苗立贤　李　建　路　勇(1812)
2018WICE-321　基于神经网络模型的柴油机动态性能预测 …… 马生平　丁　宇　王　彬(1819)
2018WICE-322　火焰进气预热塞的试验研究 …… 张乾坤　杜　巍　李　萌　侯金赤(1825)
2018WICE-323　基于 MC33816 的电磁阀驱动设计与研究…… 史　杰　吴长水　董　哲(1830)
2018WICE-324　大功率气体机氧传感器闭环加热控制策略设计 …… 陈　昊　吴长水(1836)
2018WICE-325　柴油机喷嘴动态流动特性数值模拟研究 …… 洪恩哲　廖日东　钱德省(1841)
2018WICE-326　中置式电辅助涡轮增压系统性能仿真与分析 …… 韩冀宁　张　虹　段雪莹(1851)
2018WICE-327　低压夹气燃油系统雾化特性试验研究
…… 胡敬超　刘波澜　高宏力　王晓刚　张　超　余锡洋　赵振峰(1859)
2018WICE-328　高速电磁阀参数对电控喷油器喷油特性的影响分析
…… 李汝宁　冯　兴　何双毅　高　怡　李华乐(1865)
2018WICE-329　煤油空气辅助喷射喷雾特性研究
…… 王利利　吴　晗　吴　洋　孙柏刚　赵振峰　刘福水(1871)
2018WICE-330　涡轮增压器转子系统流固耦合模态分析 …… 田佳浩　杨传雷　王银燕　李　旭(1877)
2018WICE-331　军车柴油机瞬态特性劣变机理及优化策略研究
…… 张众杰　陆辰起　马家明　刘瑞林(1883)
2018WICE-332　喷油参数对柴油燃料 JCCI 性能及排放影响试验研究
…… 礼　博　曹建林　田　华　孟相宇　田江平　隆武强(1889)
2018WICE-333　基于实船测试的港作拖轮主机颗粒物排放特性 …… 刘登国　刘　娟　楼狄明(1894)
2018WICE-334　增程式电动客车能量管理策略优化及排放特性分析 …… 楼狄明　王亚馨　徐　宁(1900)
2018WICE-335　缸内高压直喷式柴油微引燃 LNG 发动机喷雾及着火特性研究
…… 李徐程　张尊华　毛立通　龙焱祥　朱晨婷　李格升(1906)
2018WICE-336　天然气和柴油喷孔位置对船用天然气发动机燃烧及排放影响的模拟研究
…… 黄英杰　王　谦　芮　璐　康佳明(1915)
2018WICE-337　点火室燃用 CH_4 和 H_2 对 JCCI 发动机性能和排放的影响
…… 田　华　礼　博　崔靖晨　隆武强　任晓辉　丁　艳(1920)
2018WICE-338　内燃机鼻梁区内氧化硅-水纳米流体强迫对流过冷沸腾传热模拟实验研究
…… 薛易君　吕继组　白敏丽　胡成志(1927)
2018WICE-339　基于遗传支持向量机的对置二冲程柴油机气口高度优化研究
…… 鲁雪田　张付军　刘宇航　王苏飞(1935)
2018WICE-340　微纳米结构表面调控柴油机缸内辐射传热的基础数值模拟研究
…… 蒋　磊　吕继组　白敏丽　胡成志　张永飞(1941)
2018WICE-341　配气相位对废气涡轮增压汽油机动力性的影响与优化
…… 刘庚非　赵顺超　马成功　黎　苏(1945)
2018WICE-342　高压共轨喷油器喷嘴内流场与燃油雾的耦合特性研究
…… 彭　璐　张纪宝　张　欣(1950)

2018WICE-343 VNT与EGR对涡轮增压柴油机进排气压力波动的影响研究
…… 刘少华 毕玉华 尹 升(1957)
2018WICE-344 EGR降低大缸径船用柴油机NO_x排放的机理研究
…… 梁兴雨 杨佩剑 张 飞 张恩兴 曹欣怡 刘 腾(1962)
2018WICE-345 压缩比对直喷汽油机稀燃与EGR节油特性的影响
…… 王金秋 晁岳栋 朱登豪 邓 俊 李理光(1969)
2018WICE-346 低负荷下二次喷油柴油引燃天然气发动机燃烧和排放的影响
…… 杜桂枝 王忠恕 王 丹 许 允(1977)
2018WICE-347 柴油/天然气双燃料发动机二次喷油策略试验研究
…… 杜桂枝 王忠恕 王 丹 许 允(1986)
2018WICE-348 柴油机二级增压系统增压压力的神经网络模型预测控制算法仿真研究
…… 赵文强 黄 英 杨 龙 夏 萌(1995)
2018WICE-349 F-T柴油混合燃料的燃烧和排放特性研究
…… 张正午 王 铁 石晋宏 胡田天 刘瑞卿(2003)
2018WICE-350 不同气门倒角对柴油机缸内流动特性影响研究
…… 姜开誉 雷基林 曾 响 杨永忠 宋国富 申立中(2007)
2018WICE-351 柴油-天然气发动机RCCI燃烧性能的数值研究
…… 谢昆鹏 张光德 雷 鹏 彭春萌(2012)
2018WICE-352 船用中速柴油机热效率优化研究 …… 胡建华 肖佳峰 刘 龙(2018)
2018WICE-353 大功率气体发动机空燃比闭环控制策略研究 …… 吴习文 吴长水(2023)
2018WICE-354 大压缩比柴油机缸内工作过程模拟网格划分策略与仿真研究
…… 路 勇 齐华岳 李 博 李 建 潘振嘉(2028)
2018WICE-355 含水乙醇重整燃料发动机理论循环分析 …… 游伏兵 王忠俊 张新塘(2034)
2018WICE-356 基于MC33810智能点火驱动系统的设计…… 税 静 吴长水(2037)
2018WICE-357 冷、热EGR及空气稀释对甲醇发动机性能的影响
…… 周 遊 洪 伟 苏 岩 解方喜 李小平 刘洪涛 孙 博 赵志宏(2041)
2018WICE-358 喷油特性对F-T煤制油柴油机性能的影响
…… 石晋宏 王 铁 张正午 胡田天(2048)
2018WICE-359 喷油模式和转速协调作用对重型柴油机高密度低温燃烧及排放的影响
…… 鹿盈盈 王宏楠 裴毅强(2052)
2018WICE-360 柴油机排气火星熄灭器性能数值模拟 …… 张新玉 王路宇(2059)
2018WICE-361 国Ⅵ柴油机Urea-SCR系统催化器转化效率影响因素的研究
…… 吴 恒 程晓章 产 贝 韦 伟(2063)
2018WICE-362 柴油机米勒循环结合EGR技术的优化分析
…… 田佳浩 杨传雷 王银燕 宋贵涛(2068)
2018WICE-363 SCR系统混合装置性能数值模拟计算 …… 张 钊 杨智远 周 松(2075)
2018WICE-364 船用柴油机双区域仿真的NO_x排放预测模型研究
…… 张 熠 丁 宇 向 拉(2081)
2018WICE-365 运用模糊分析法的SCR系统运行状态评价方法 …… 肖友洪 冯明芳 邵延忠(2087)
2018WICE-366 基于模糊综合评价体系的船舶低速二冲程柴油机高、低压EGR系统分析
…… 王占广 周 松 冯永明 朱元清(2090)

2018WICE-367　富氧环境对柴油机 DPF 热再生过程的影响
…… 周一闻　汤　东　缪晓峰　钟祥麟(2097)
2018WICE-368　内燃机缸套振动减摩的建模与试验研究
…… 刘星辰　王　铁　卢浩宇　胡田天　李国兴(2103)
2018WICE-369　柴油/聚甲氧基二甲醚掺混燃料的燃烧与排放特性
…… 任彤彤　姜　飒　梁人之　刘圣华　李东华(2109)
2018WICE-370　船用天然气发动机爆震边界影响因素研究
…… 崔海宁　丁　宇　贲虹凯　向　拉(2114)
2018WICE-371　基于双色法的煤基合成燃料及其含氧混合燃料燃烧过程可视化研究
…… 张　浩　孙万臣　郭　亮　程　鹏　范鲁艳　孙　毅　王　乔　韩提亮(2121)
2018WICE-372　柴油机活塞内冷油腔振荡传热试验研究 …… 邓晰文　雷基林　杨海翔(2128)
2018WICE-373　航空煤油柴油非蒸发喷雾特性可视化试验研究
…… 田江平　武化文　王　维　隆武强　袁文华(2235)
2018WICE-374　基于有限元的某柴油机温度场分析 …… 阮寅生　刘锦荣　陈　勇　和晓峰(2142)
2018WICE-375　曲轴主轴颈油孔位置对曲轴轴承润滑特性的影响分析
…… 李振宁　柳海涛　郭长清　白书战　李国祥(2145)
2018WICE-376　柴油机活塞温度场与应力场三维有限元分析
…… 杨永春　杨　婷　石代龙　白书战　王桂华(2151)
2018WICE-377　基于多体动力学和集总参数法的柴油机曲轴可靠性研究
…… 杨　婷　杨永春　石代龙　白书战　李国祥(2158)
2018WICE-378　内冷油腔振荡冷却仿真方法研究 …… 穆艳丽　雷基林　陈　康　邓晰文(2165)
2018WICE-379　底置凸轮轴式柴油机 CVVL 机构设计及仿真分析
…… 崔靖晨　刘　威　王　阳　许　多　隆武强(2172)
2018WICE-380　基于多场耦合的非道路高压共轨柴油机干式缸套失圆变形分析
…… 罗　力　毕玉华　王　会　申立中　雷基林(2177)
2018WICE-381　复合增压系统电动压气机转速控制方法研究
…… 李甜甜　韩　恺　王东洋　冯宇驰(2187)
2018WICE-382　高压共轨喷油器喷嘴几何参数对内部流动特性的影响
…… 姜　飒　任彤彤　梁人之　刘圣华　李东华(2193)
2018WICE-383　基于 AMEsim 的超高压共轨系统建模及仿真分析
…… 周　磊　杨　昆　安士杰　刘　楠　王小说　应宇辰(2198)
2018WICE-384　某型柴油机燃油喷射系统动态特性计算分析
…… 苏衍畔　李晓波　王贵新　陈广库(2204)
2018WICE-385　影响柴油机 Urea－SCR 系统催化器转化效率因素研究
…… 吴　恒　程晓章　赵剑波　韦　伟(2210)
2018WICE-386　预喷射对柴油机燃烧以及排放影响 …… 唐志辉(2214)
2018WICE-387　低速二冲程柴油机活塞振荡冷却数值模拟分析
…… 吕　行　冯立岩　吴安民　刘　腾　刘　超(2220)
2018WICE-388　基于 EGR 的二冲程柴油机排放模式切换瞬态过程研究
…… 刘　伟　石　磊　邓康耀　张　哲　桂　勇　钱跃华　刘　博(2225)

2018WICE-389 气缸旁通对高压EGR方案影响的仿真研究
…… 王大为 钱跃华 桂 勇 刘 博 吴朝晖 石 磊 邓康耀(2232)
2018WICE-390 船舶推进系统动态性能预测仿真 …… 徐家润 丁 宇 随从标(2240)
2018WICE-391 柴油机连杆疲劳强度计算与模态分析 …… 杨 瑞 王贵新 李晓波 陆 瑶(2246)
2018WICE-392 基于GT-POWER的柴油机限制特性及运行区域分析
…… 杨 瑞 王贵新 李晓波 陈广库(2253)
2018WICE-393 EGR对微自由活塞动力装置内甲烷HCCI燃烧影响的数值模拟研究
…… 赵 岩 王 谦 吴 凡 柏 金(2261)
2018WICE-394 船用低速柴油机低压SCR系统性能试验研究 …… 李晓波 钟庆源(2269)
2018WICE-395 某型柴油机怠速滑油压力低报警研究 …… 鄢 岚 杨 涛 李新才 张振山(2273)
2018WICE-396 双燃料船用柴油机供气系统的研究进展 …… 王冬冬 王 璞 王 磊(2277)
2018WICE-397 舰船柴油机新技术及发展途径分析 …… 陈新传 程明灿 霍柏琦(2283)

消光技术和双色法的同步测试。光学部件和相机具体设置详见[1]。此处仅对一些主要步骤做简单阐述。

1.2.1 扩散背景消光法

一个峰值为446 nm蓝色LED和一个扩散片作为光源创建一个高频输出的扩散背景光。一个菲涅尔透镜放置窗口附近用以扩大光束使其可以覆盖整个视窗范围。在燃烧室另一侧，光路通过一个光学透、分光镜和一个窄通滤波片(峰值为450 nm)后被一个高速数码相机接收。通过Beer-lambert原理即可计算碳烟的光学KL因子。如下所示：

$$\frac{I-I_f}{I_0}=\exp(-KL) \tag{1}$$

LED灯的脉冲由相机触发且设定其频率为高速数码相机帧频率的一半，这样就形成一张LED灯打开一张LED灯关闭的连续图片。当LED灯打开时，得到I，其为LED灯背景光穿过碳烟剩余的光强和碳烟热辐射光强之和。当LED灯关闭时，得到碳烟自身辐射光强I_f。此外，假设碳烟密度(ρ_{soot})为1.8 g/cm^3[8]，可以计算每个像素点光学路径上的碳烟质量(m_{soot})，如下式所示：

$$m_{soot}=\rho_{soot}KL\frac{\lambda_I}{k_e}\times \text{pixel area} \tag{2}$$

式中，λ_I为消光波长，k_e为无量纲量消光系数。因此，可以通过积分进一步计算得到每个时刻火焰中碳烟的总体质量。

1.2.2 双色法

在消光法测量同时，碳烟的辐射强度通过两个分光镜导入到另外两个加载了不同窄通滤波片(550 nm和660 nm)的高速数码相机中。双色法中，假设火焰的辐射强度取决于辐射波长、火焰温度和碳烟量。碳烟的辐射强度可用下式表示：

$$I_{soot}=\varepsilon\cdot I_b \tag{3}$$

式中，I_b为黑体辐射强度，可根据Planck原理得到：

$$I_b(\lambda,T)=\frac{1}{\lambda^5}\frac{c_1}{\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)-1\right]} \tag{4}$$

辐射率(ε)可通过Hottel-Broughton(1932)[9]经验公式得到：

$$\varepsilon(KL,\lambda)=1-\exp\left(\frac{-KL_{2C}}{\lambda^\alpha}\right) \tag{5}$$

式中，c_1和c_2为常数，$c_1=1.191\,043\,9\times10^{-16}$ wm^{2}sr^{-1}，$c_2=1.438\,8\times10^{-2}$ mk。通过文献可知，DBI和2C法的碳烟光学厚度可按下式表示：

$$KL_I=3.034\cdot KL_{2C} \tag{6}$$

式中，KL_I和KL_{2C}分别为DBI和2C得到的碳烟光学厚度。

2 试验方案

本文中研究的工况条件如表1所示。本实验方案中包括三个工况条件，分别表示为高温(HT)、高密度(HD)和标准工况(NO)，每个工况测试了三个喷油压力。实验中应用的燃油为正庚烷。每次喷油激励时间为4 ms，实际喷油时间接近5 ms。每个工况点记录30次喷油循环。

表1 实验工况

工况	P_{inj}[bar]	T_a [K]	ρ_a [kg/m^3]	O_2 [%]	备注
HT	500/1 000/1 500	**870**	21.2	21	高温
NO	500/1 000/1 500	826	21.2	21	基准工况
HD	500/1 000/1 500	826	**28.4**	21	高密度

3 结果与讨论

3.1 碳烟生成循环的概率

图3所示为在HD1000(1 000表示喷油压力为1 000 bar)工况条件下9次喷油循环(共30次喷油)得到的消光法图像和对应的双色法660 nm相机碳烟辐射图像。燃油图像上方喷入。消光法图像顶部消光主要由燃油液相米散射造成。由图可以看出，两种技术在碳烟位置和碳烟量上具有很好的一致性，碳烟生成表现出强烈的循环变动。从第二列图片中可以观察到强烈的碳烟生成，但是第4列和第8列图像中几乎没有碳烟生成。

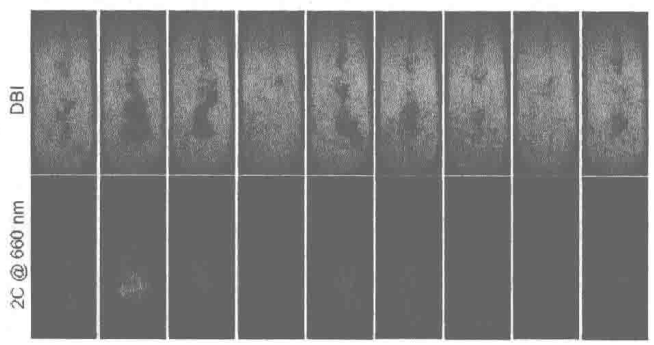


图3 碳烟循环变动(3 050 μs ASOI，HD，P_{inj}=1 000 bar)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图 4 所示为对应工况条件下 30 次喷油循环的缸压曲线，一个倒拖工况下的缸压曲线显示图中作为参照。从图中可以看出不同循环下的缸压曲线具有非常好的可重复性。换而言之，着火延迟和放热率也具有较高重复性，因此并不是造成此碳烟循环波动的主要原因。

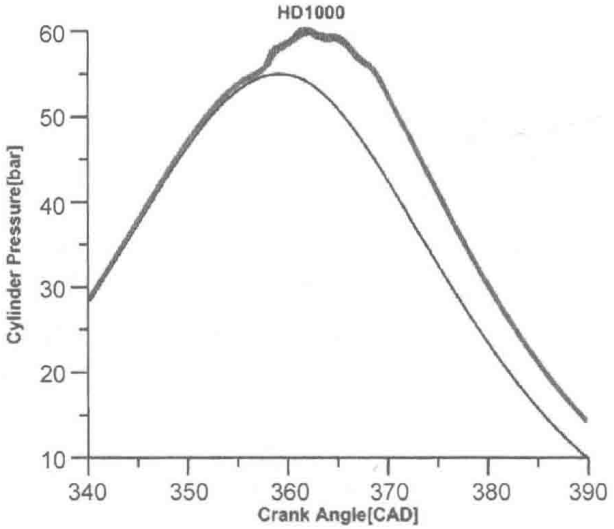


图 4 HD1000 工况条件 30 次喷油循环的缸压曲线（红色）和倒拖下的缸压曲线（黑色）

本论文中，通过 660 nm 碳烟辐射图像来定义循环过程中是否有碳烟生成，具体步骤如图 5 所示。首先，对每次喷油的每张图片上的辐射强度积分得到每张图片总体辐射强度随时间的变化曲线如图 5(a)。然后对所有图片的总体辐射强度按时间变化再次进行积分得到每次循环的总体碳烟辐射强度值如图 5(b)。最后选取背景噪声积分的 1.2 倍作为区分碳烟循环和非碳烟循环的边界值。

图 6 显示了根据图 5 得到的所有工况下有碳烟生成的循环数。可以看出，有碳烟生成的循环概率随环境温度、环境密度升高和喷油压力降低而升高。然而，由于实验条件所限，很难确定碳烟/非碳烟循环形成的决定因素。其中一种可能性是由活塞运动导致的缸内气流运动造成。之前的 PIV 测量[10]表明此缸内的气流运动具有强烈的循环变动，气流运动速度的标准差甚至具有和平均速度相同的数量级。由图 4 所示，此气流运动并未对着火延迟产生明显影响，主要是因为着火位置发生在喷雾上游的喷嘴附近，之前研究[10]证明此处气流运动很小。然而，强烈的气流运动会对火焰扶起长度产生剧烈影响[11]。这可能是由于缸内气流与喷雾具有相反的运动方向，这样会导致燃烧过的高温气体向喷雾相反方向运动进而影

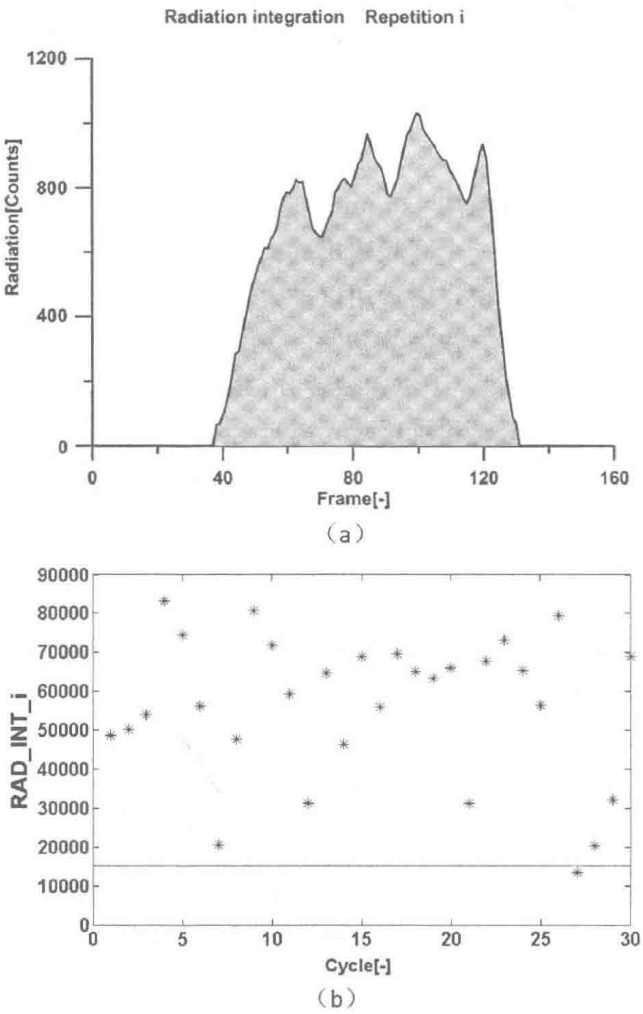


图 5 HT500 工况条件下每个图片积分得到的各时刻碳烟辐射强度(a)和每次喷油循环得到的总体碳烟辐射强度(b)

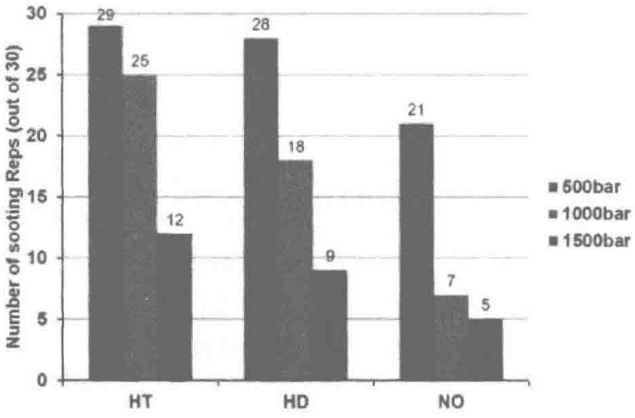


图 6 所有工况下碳烟循环数

响火焰扶起长度。另外，火焰扶起长度和碳烟生成具有密切关系，因此在较长火焰扶起长度情况下就会导致碳烟不会形成。

3.2 碳烟定量测量

为了对火焰中碳烟生成量进行不同工况下的比较，需定义平均 KL 值。首先，通过对碳烟循环的图

片进行平均计算得到了碳烟循环中平均 KL 值($\langle\overline{KL}\rangle_{soot}$)。如下式所示：

$$\langle\overline{KL}\rangle_{soot}=\ln\left(\frac{\langle\bar{I}\rangle_{0,\,soot}}{\langle\bar{I}\rangle_{soot}-\langle\bar{I}\rangle_{f,\,soot}}\right) \tag{7}$$

图 7 所示为通过公式(7)得到的 NO 工况下三个喷油压力对轴线上 KL 值的影响。由图可以看出，NO1000 工况下的 KL 值高于了 NO500，碳烟生成量随喷油压力的变化趋势与之前的研究相矛盾，之前研究表明由于较短的火焰抬起长度和较长的高温驻留时间碳烟生成随喷油压力降低而升高。因此，为了考虑非碳烟循环的影响，得到更加合理的 KL 值，将 $\langle\overline{KL}\rangle_{soot}$ 乘以一个碳烟循环概率的加权因子，如下式所示：

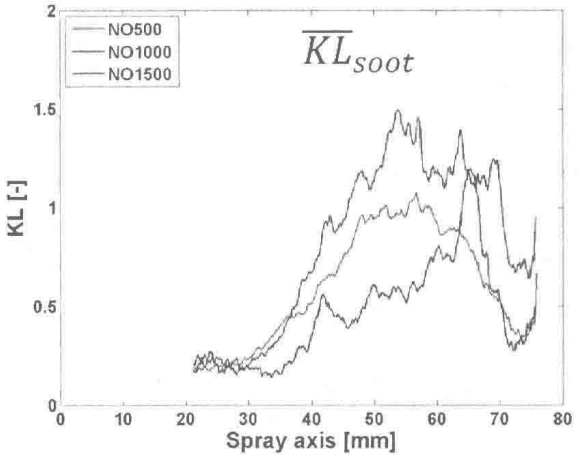


图 7 由碳烟循环图像平均得到的轴线上 KL 值(4 700 μs ASOI)

$$\langle\overline{KL}\rangle_{all}=\langle\overline{KL}\rangle_{soot}\cdot\frac{n_{soot}}{n_{all}} \tag{8}$$

式中，n_{soot} 为碳烟循环数，n_{all} 为此工况下总的喷油循环数。图 7 经过公式(7)加权后得到图 8。可以看出，图 8 中 KL 值随喷油压力变化趋势与之前研究保持一致。

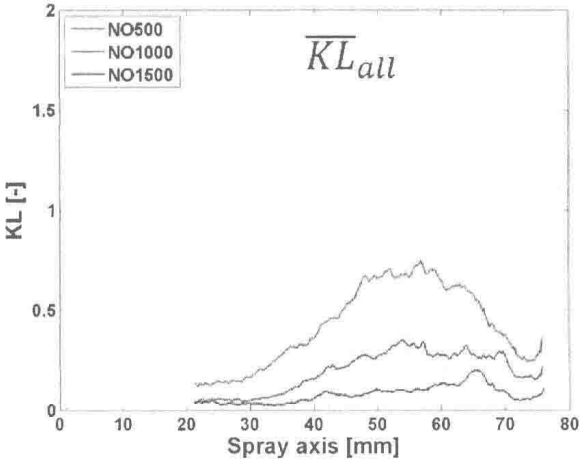


图 8 通过非碳烟循环概率加权得到的轴线上 KL 值(4 700 μs ASOI)

用相同方法，由双色法得到的 KL 值同样乘以碳烟循环概率。图 9 所示为两种技术得到的轴线上 KL 值和温度值分布，喷油压力为 500 bar。需要特别说明的是，双色法得到的 KL 值已通过公式(6)转换。由图 9 可以看出，两种技术展现了较好的一致性，意味着在此低碳烟的环境下由碳烟信号自吸导致的误差可忽略不计。碳烟温度随轴线距离增长而

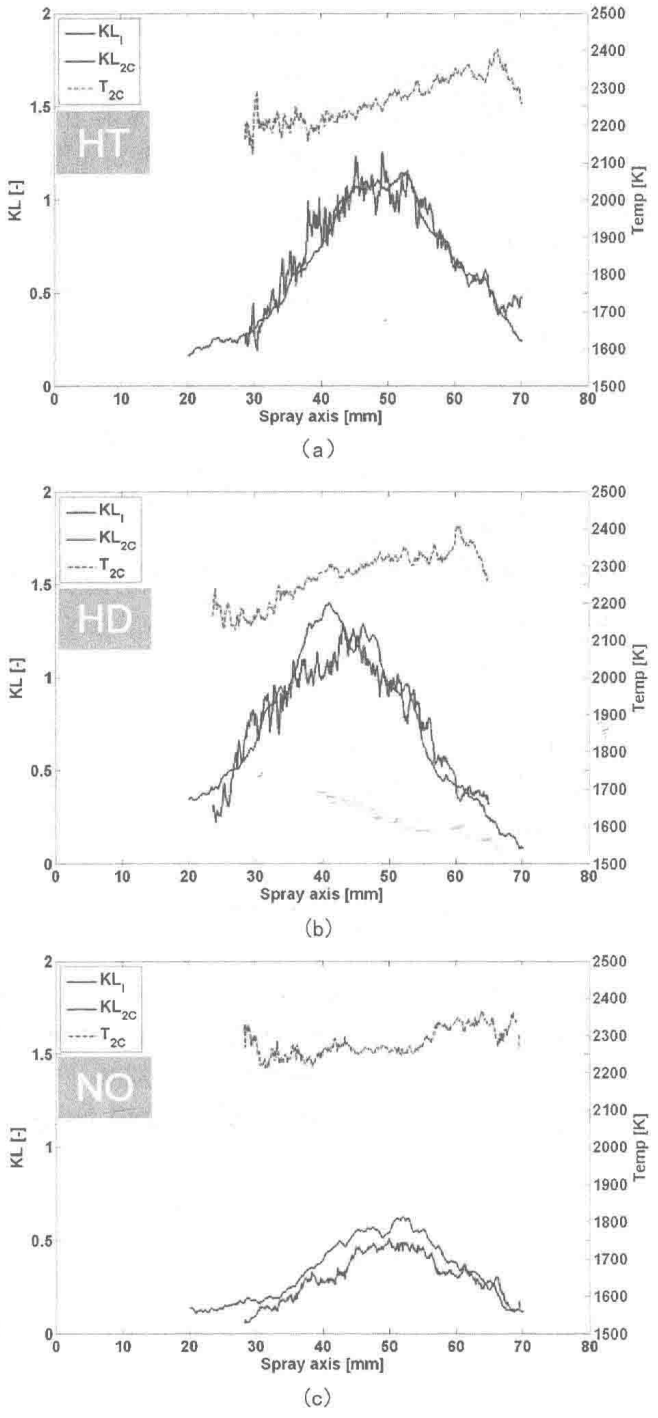


图 9 在 3 800 μs ASOI 时轴线上碳烟的 KL 值和温度值分布(P_{inj}=500 bar)

蓝色实线和红色虚线分别代表双色法得到的 KL 值和温度值，黑色实线代表消光法得到的 KL 值。

增长，展现了跟之前研究较好的一致性。然而，需要指出的是此碳烟温度是由碳烟循环的平均图像获得，其碳烟量引起的不一致性可能导致碳烟温度的一些不确定性。

4 结论

本文对临界条件下对柴油机喷雾过程中火焰中的碳烟生成进行了实验研究。实验过程在一个加载了单孔喷油器的单缸二冲程发动机中实现。实验中应用背景消光法和双色法对正庚烷的瞬态碳烟生成过程进行了定量测量。得到以下主要结论：

(1) 本研究的实验工况中，碳烟生成存在强烈的循环变动。然而，缸压曲线具有较好的可重复性。碳烟循环的概率随环境温度和环境密度的升高、喷油压力的降低而升高。

(2) 强烈的缸内气流波动可导致火焰扶起长度的循环变动，进而最终导致碳烟的循环变动。

(3) 由碳烟循环平均图像得到的KL值可能会与之前研究结果矛盾。但是，考虑碳烟循环概率加权因子后得到的KL值与之前研究结果一致。

(4) 在研究的工况下，背景消光法和双色法对于碳烟量的定量测量展现了较好的一致性，碳烟自吸光效应导致的不确定性可忽略不计。

参考文献

[1] Pastor, J., Garcia-Oliver, J., et al., Soot Quantification of Single-Hole Diesel Sprays by Means of Extinction Imaging, SAE Int. J. Engines, 8 (2015) 2068 - 2077.

[2] José V. Pastor, José M. García-Oliver, Antonio García, Carlos Micó, Sebastian Mller, Application of optical diagnostics to the quantification of soot in n-alkane flames under diesel conditions, Combustion and Flame, Volume 164, 2016, Pages 212 - 223.

[3] Pickett LM and Siebers DL, Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure. Combust. Flame 2004; 138: 114 - 135.

[4] Bardi, M., Bruneaux, G., Nicolle, A., and Colin, O., Experimental Methodology for the Understanding of Soot-Fuel Relationship in Diesel Combustion: Fuel Characterization and Surrogate Validation, SAE Technical Paper 2017 - 01 - 0721, 2017.

[5] Westlye Fredrik R., Penney Keith, et al, Diffuse back-illumination setup for high temporally resolved extinction imaging. Applied Optics, 56 (2017) 5028 - 5038.

[6] Manin J, Pickett L., and Skeen S., Two-Color Diffused Back-Illumination Imaging as a Diagnostic for Time-Resolved Soot Measurements in Reacting Sprays. SAE Int. J. Engines 2013; 6: 1908 - 1921.

[7] Bermúdez, V., García, J., Juliá, E., and Martínez, S., Engine with Optically Accessible Cylinder Head: A Research Tool for Injection and Combustion Processes, SAE Technical Paper 2003 - 01 - 1110, 2003.

[8] Skeen, S., Yasutomi, K., Cenker, E., Adamson, B. et al., Observations of Soot Optical Property Characteristics Using High-Speed, Multiple Wavelength, Extinction Imaging in Heavy-Duty Diesel Sprays, SAE Technical Paper 2018 - 01 - 0233, 2018.

[9] Hua Zhao, N. Ladommatos, Engine combustion instrumentation and diagnostics. Warrrendale PA: Society of Automotive Engineers, 2001.

[10] Pastor, J., García J. M., Garcia, A., Zhong, W. et al., An experimental study on Diesel spray injection into a non-quiescent chamber, SAE Int. J. Fuels Lubr. 10(2017).

[11] Tiemin Xuan, Optical investigation on diesel spray dynamics and in-flame soot formation. PhD Thesis, 2017.

醇类燃料自燃主导反应分析及其对燃料滞燃期的影响

张　爽　韩永强　范鲁艳　刘佳会

（吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室，吉林长春　130025）

摘要：本文通过 CHEMKIN 软件分别对甲醇、乙醇和正丁醇在初始边界条件 $T=800$ K，$P=560$psi，$\Phi=1$ 下进行模拟，绘制出了甲醇、乙醇和正丁醇的反应路径图。根据反应路径图找到醇类燃料燃烧的链式反应关系，确立了醇类燃料的主导反应均为以 C—H 键断裂为标志的脱氢反应，从而将主导反应的两个反应物之间的分子碰撞能与滞燃期建立起联系。分别选取温度为 800 K、1 000 K 和 1 200 K，根据初始压力调整当量比的大小来保证燃料中 C—H 键数目相等，仿真结果显示在同一温度下，同一种醇类燃料的滞燃期波动非常小基本维持不变；不同种燃料的滞燃期仍然有所差异，其中同一初始压力下的甲醇的滞燃期约为乙醇的 2 倍、正丁醇的 20 倍。究其原因主要是乙醇和正丁醇分子中含有的 C—C 键引发的键的断裂也会对反应速率产生影响，致使三者的滞燃期不同。

关键词：醇类燃料；主导反应；分子碰撞能；滞燃期

醇类燃料燃烧存在一系列的化学反应，且这些化学反应比较单一，即基元反应总存在着一些特定的反应主导着反应的进行，我们将具有标志功能、首先发生的反应称为“主导反应”。从更高的时间分辨率、更细的空间分辨率来看，对于每一个燃烧反应区而言，其起燃过程不应该是所有反应物、所有可能基元反应同时发生的，而仅是分子碰撞能高于反应活化能的两个反应物先导反应，产生了更高的分子碰撞能或降低了另一个反应的活化能，从而引起了整个燃烧反应区燃烧完成。本文根据醇类燃料（甲醇、乙醇、正丁醇）的反应路径图找出了醇类燃料的主导反应，并讨论主导反应的两种反应物间的分子碰撞能与滞燃期之间的关系。

1　醇类燃料主导反应分析

1.1　利用 Chemkin 建立反应路径

Chemkin 是燃烧领域用来解决带有化学反应流动问题的模拟计算工具[1]。本文利用 Chemkin 软件中的封闭均相反应器模型，对几种醇类燃料的自燃主导反应进行分析，建立了醇类燃料自燃燃烧的反应路径图。

为了确保燃料能够可靠自燃，这里选取了特定的边界条件 $T=800$ K，$P=560$ psi，$\Phi=1.0$，对 Chemkin 软件的封闭均相反应器模型具体参数设置如表 1 所示。反应路径的获取方法主要是对醇类燃料燃烧时的重要中间产物进行产率分析，画出燃烧时重要物质的产率分析图，再对每个反应的产率曲线进行积分，即可计算出这个反应在这段时间内生成（或消耗）燃料的摩尔分数，用所得积分数除上该种物质生成（或消耗）所有涉及反应的产率曲线积分数之和，所得百分数即为这个反应对该种物质生成（或消耗）反应的影响大小。图 1～图 3 分别为根据仿真结果绘制出的三种醇类燃料自燃的反应路径图。

表 1　Chemkin 模拟醇类燃料氧化的参数设置

参　数	数　值
问题类型	定容条件解决能量平衡
时间(s)	10
温度(K)	800
压力(psi)	560
体积(m^3)	0.001 014
热量损失(cal/sec)	0
表面温度(℃)	与大气温度相同
当量比	1
燃料	甲醇/乙醇/正丁醇
氧化剂	$O_2/N_2=21/79$vol%
完全燃烧产物	$CO_2/H_2O/N_2$

作者简介：张爽（1992—　），女，硕士研究生；研究方向：内燃机公害与控制。
E-mail：18245033495@163.com

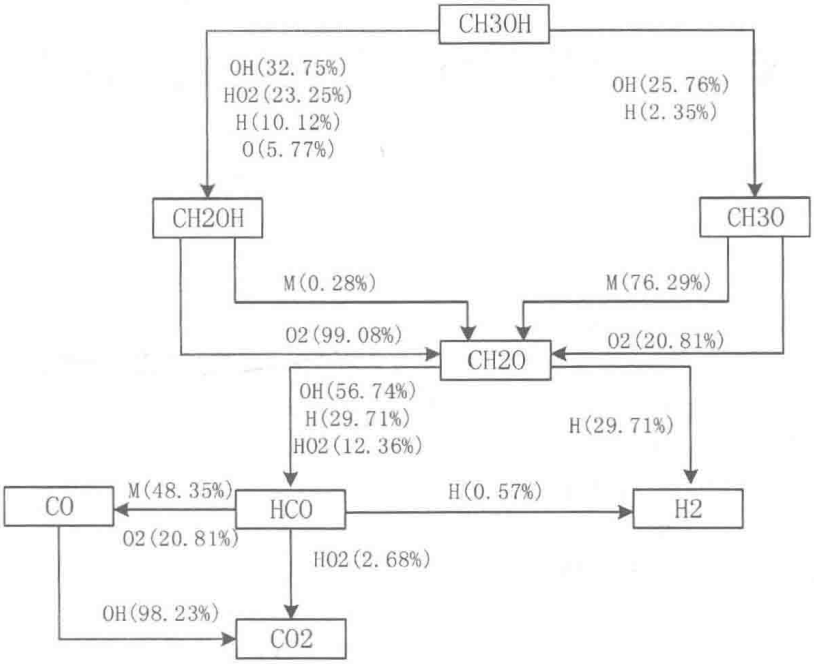


图 1 甲醇自燃反应路径分析图

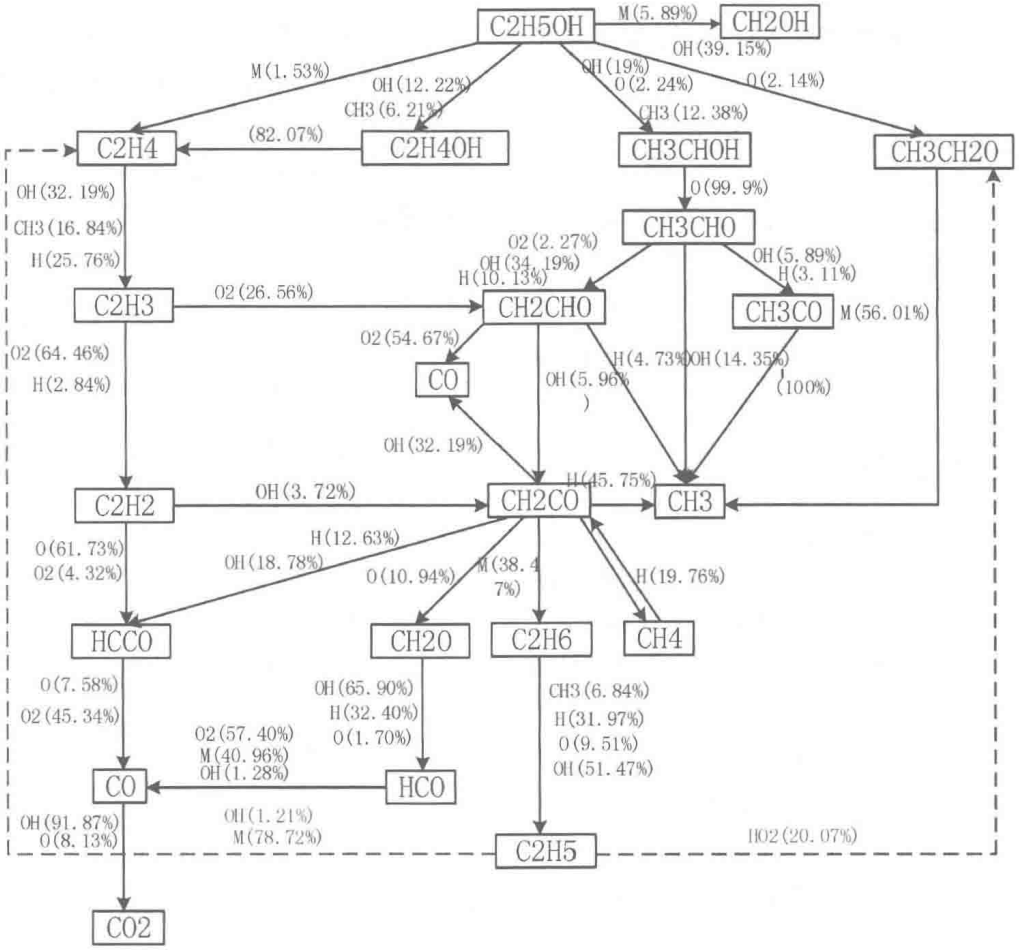


图 2 乙醇自燃反应路径分析图

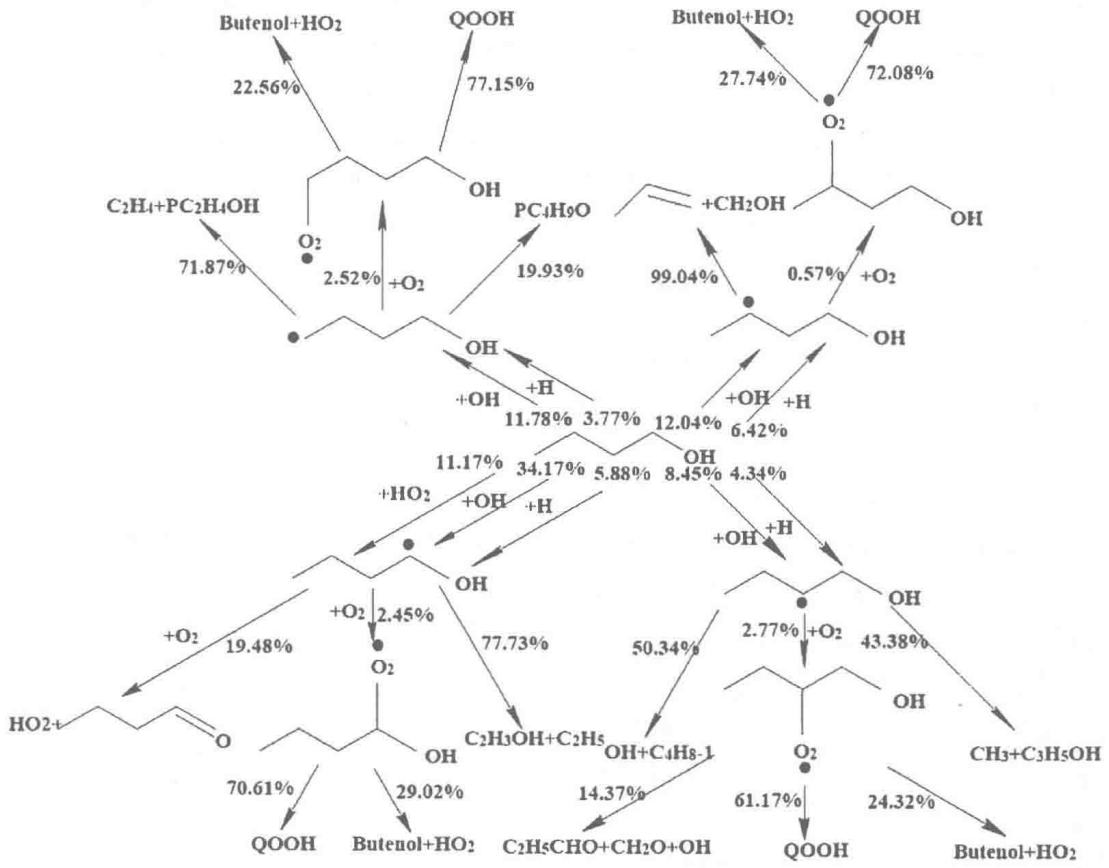


图 3 正丁醇自燃反应路径分析图

1.2 醇类燃料燃烧的主导反应

链式反应是一种非常重要的化学反应历程，它包含三个基本过程：链引发、链传递、链终止[3-5]。其中链引发反应需要断裂分子中化学键的键能，所以它也是整体反应中最难进行的一步，在整个化学反应的过程中具有主导作用，因此我们将醇类燃料燃烧链引发阶段的主要反应既定为醇类燃料的主导反应。这里以甲醇为例，研究甲醇燃烧的链式反应过程并找出甲醇燃烧的主导反应。

(1) 链引发。根据甲醇自燃反应路径图可以看出甲醇燃烧的链引发阶段主要进行的是脱氢反应，氢原子主要包括甲基位上的氢原子和羟基氢原子，由于甲基位上的氢原子键能较低，所以在 OH、O 和 H 等活性基作用下，主要进行的是 C—H 键的断裂，生成 CH_2OH；随着反应系统能量的进一步积聚，O—H 键开始断裂并伴随着少量 CH_3O 的生成，其链引发主要反应为：

R84：$CH_3OH+H=CH_2OH+H_2$

R85：$CH_3OH+H=CH_3O+H_2$

R86：$CH_3OH+O=CH_2OH+OH$

R87：$CH_3OH+OH=CH_3O+H_2O$

R88：$CH_3OH+OH=CH_2OH+H_2O$

R91：$CH_3OH+HO_2=CH_2OH+H_2O_2$

(2) 链传递。甲醇的链传递过程主要是指 CH_2OH 的 O—H 键断裂和 CH_3O 的 C—H 键断裂生成 CH_2O 和 H、HO_2 等自由基，其链传递的主要反应如下：

R59：$CH_2OH+M=CH_2O+H+M$

R64：$CH_2OH+O_2=CH_2O+HO_2$

R71：$CH_3O+M=CH_2O+H+M$

R75：$CH_3O+O_2=CH_2O+HO_2$

R42：$CH_2O+H=HCO+H_2$

R46：$CH_2O+HO_2=HCO+H_2O_2$

R44：$CH_2O+OH=HCO+H_2O$

(3) 链终止：甲醇的链终止主要反应如下：

R32：$HCO+H=CO+H_2$

在氧气的作用下 CO 和 H_2 再进一步氧化为 CO_2 和 H_2O

从上述分析可得：甲醇燃烧在链引发阶段发生的脱氢反应即为甲醇自燃的主导反应，OH 进攻 H 原子从而引起了 C—H 键的断裂是该反应的标志，且主导反应的两个反应物间的分子碰撞能在数值上与 C—H 键的键能相等。

根据乙醇自燃的反应路径图可得乙醇燃烧的链引发反应主要分两种：裂解反应和脱氢反应。裂解反应主要是乙醇分子中 C—C 键的断裂，此反应可

需要全本请访问 www.ertongbook.com