

全国燃烧节能净化标准化技术委员会 (SAC/TC441)

国家标准

《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》

编

制

说

明

《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》

国家标准编写工作组

2024年03月

一、工作简况：

1、制定背景及任务来源

液体燃料是应用于工业、农业、建筑业和航空航天等领域机械动力装置的能量来源，液体混合燃料在喷入动力装置中首先需要经过雾化才能燃烧，在雾化的过程中会形成不同粒径和速度的微型液滴，这些微型液滴在加热过程中会发生微爆和喷射等现象，这些现象对燃料的燃烧效率和污染物排放有重要影响。

碳中和是未来全球应对气候变化工作的重点，降低航空污染可以在一定程度上解决二氧化碳排放量过高的问题。据统计，2018年全球机队的规模已达25830架，由此带来了巨大的燃油消耗，大量的燃油消耗在加速了化石燃料的枯竭的同时也带来了严重的环境污染。此外，由于民航客机通常是在8000-10000米的高度巡航，航空发动机排放的二氧化碳直接作用于平流层，因此民航客机所引起温室效应的危害更加严重。同时航空发动机的排放污染物还有NOX、CO、HC和碳烟等。航空燃料在发动机燃烧室内雾化燃烧的过程中会形成不同尺寸的微型液滴，这些液滴的燃烧过程严重影响着航空发动机的功率、效率和污染物的排放。解决这些问题的方法之一是采用可再生且含氧量高的生物航空燃料。当前美国、中国、德国、新西兰和巴西等国家采用生物柴油代替航空燃油成功进行了超过1500架次的航空飞行试验，相关研究者预计到2024年生物燃料在商业航空总燃料消耗中的比例将达15.5%。但是，单一采用生物柴油存在着流动性差、着火延迟时间较长以及燃烧效率较低等特性，这些特性限制了生物柴油作为航空燃油的使用。生物柴油的低流动性不仅导致飞机燃油泵负荷增加，从而导致供油系统故障，而且还导致滑油的散热效率降低，进而导致滑油系统故障。不仅如此，生物柴油还存在着着火延迟时间低于航空燃料的缺点，这个缺点影响高空中发动机的再次启动。添加一定比例的乙醇，可以显著改善生物柴油的流动及着火等特性。这类混合燃料在加热的过程燃料液滴在短时间内迅速膨胀然后破裂的现象，被称之为混合燃料的微爆。微爆技术可以提高发动机的燃烧效率和推力，同时减少燃料消耗和排放。同时液滴微爆后产生的次级液滴尺寸和速度等参数是评估燃及燃烧装置性能的重要参数。因此如何科学评价液体燃料的微爆特性，是燃烧系统开发的关键，对未来开发替代燃料、燃烧装置以及燃料节能减排都具有重要意义。

尽管很多行业的动力机械装置需要对燃料的基础特性进行测试，但目前尚缺乏相关统一标准来进行规范并评估数据可信度。不同的高校和研究机构自行搭建试验平

台，采用不同测试方法进行测试，这不仅会增加时间和经济成本，而且测试结果缺乏可比性和溯源性，不利于研究单位间的数据共享、评估和模型验证。由安徽交通职业技术学院、上海信环固雅环境集团有限公司、中国科学技术大学等单位提出编制《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》国家标准的建议将满足这方面的需求。

根据国家标准化管理委员会2023年12月29日下达“国家标准化管理委员会关于下达碳达峰碳中和国家标准专项计划及相关标准外文版计划的通知”，《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》国家标准项目立项，由全国燃烧节能净化标准化技术委员会（TC441）归口管理《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》（中文计划号：20232508-T-469）国家标准的制修订工作。

2、工作过程

（1）2023年2月份主要起草单位向全国燃烧节能净化标准化技术委员会(TC441)提出申请，拟上报《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》项目提案；

（2）2023年4月份，经过多方调研和论证，形成《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》（草案）；

（3）2023年5月31日，标委会按程序发起《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》项目提案投票并向国家标准委申报；

（4）2023年7月20日，参加国家标准委组织的2023年交通能源与资源环境领域第四次推荐性国家标准立项评估会，进行立项答辩；

（5）2023年9月28日在国标网上公示，到2023年10月28日公示结束。

（6）2023年12月29日经国家标准化管理委员会国家标准委发文批准，全国燃烧节能净化标准化技术委员会（TC441）承担《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》（中文计划号：20232508-T-469）标准的归口管理和制修订工作。

（7）2024年1月25日，全国燃烧节能净化标准化技术委员会“燃标字〔2024〕003号”文：成立《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》国家标准编写工作组，人员构成如下：孙晓雷（安徽交通职业技术学院）任组长；何立群（中国科学技术大学）、孟柯生（安徽交通职业技术学院）任副组长；工作组成员包括：瞿兆舟（上海信环固雅环境集团有限公司）、司晓亮（合肥航太电物理技术有限公司）王高峰（浙江大学）、乔信起（上海交通大学）、何旭（北京理工大学）、苏庆运（大连理工大学）、沈

茂林（安徽省凤形新材料科技有限公司）、吴保宁（安徽省通航控股集团有限公司）、李奉誉+付炜+周坤（合肥通用机械研究院有限公司）、夏斌（安徽民航机场集团有限公司）、江毅（中国南方航空工程技术分公司）、张海涛+张凤安（安徽省特种设备检测院）、章全奎和程文强（安徽省产品质量监督检验研究院）、张文秋（安徽省质量和标准化研究院）、凌新闻（合肥低碳研究院）、李小民（中原工学院）、王成军+江春龙（安徽理工大学）、周涛涛（合肥工业大学）、周宇（六盘水师范学院）、张铁纯+黄燕晓（中国民航大学）、王昌昊（成都航空职业技术学院）、林其钊（中国科学技术大学）；
秘书组成员：徐咏梅（全国燃烧节能净化标准化技术委员会）。

（8）2024年2月23日，全国燃烧节能净化标准化技术委员会发文“燃标字〔2024〕004号：关于召开《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》国家标准编写启动会的通知”，发给本领域有关专家（特邀）及标准编写工作组成员。

（9）2024年3月5日—至今，3月5日在安徽交通职业技术学院召开《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》国家标准编写启动会，本领域有关专家（特邀）及标准编写工作组成员参加了启动会，会上对《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》（工作组讨论稿）进行了讨论并提出修正意见，共收集意见95条，采纳71条，部分采纳10条；不采纳14条；修正后形成的征求意见稿按期展开征求意见，相关工作正在进行中。

二、标准编制原则和主要内容：

1、标准编制原则

本标准的编制遵循“系统性、科学性、统一性、协调性、适用性、规范性”的原则，注重标准的可操作性和利用方便性。

本标准依据GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定要求，确定标准的结构和组成要素；坚持科学性原则，标准模式与理论基础及标准要求之间具有清晰的逻辑关系，即理论-模式-标准要求，逐层转化，作到结构合理，层次清晰，体现科学性原则；坚持先进性和实用性相结合的原则，既广泛吸收经典术语和词汇，又吸收和借鉴先进概念；坚持可操作性原则，即标准应在具有广泛的适用性的基础上，有较高的可操作性。

2、标准主要内容

《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》标准规定了在以混合燃料为对象的加热实验装置中，通过模拟液滴周围不同温度和气体氛围，进行混合

液滴的膨胀、喷射和微爆特性测试的相关术语定义、测试流程、数据分析处理规范和试验报告。主要包括测试系统、测试仪器、测试条件、记录规范等方面的要求。

本文件适用于航空器、汽车和轮船等替代燃料特性的测试和实验装置的设计，如生物柴油、乙醇及其混合物的特性测试等。

三、主要试验的分析、综述报告、技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

1、混合燃料微爆特性相关原理

(1) 混合液滴在加热过程中发生的微爆现象不仅增加了液滴与周围氧气的接触面积，促进了燃烧，而且降低了环境温度，进而减少了NOX等污染物的排放。混合燃料液滴微爆原理如图1所示。

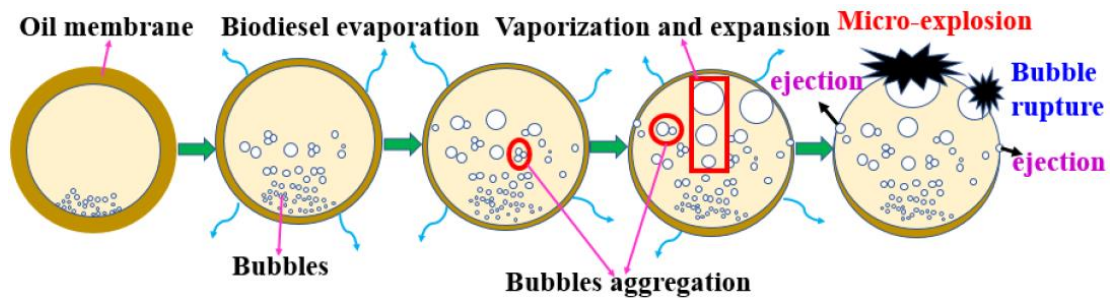


图1.混合燃料液滴微爆原理

(2) 混合液滴微爆现象的发现让广大科研人员在面对如何提高燃烧速率及节能减排的方向上有了新的思路。为了满足日益严格的排放标准并增强燃料的燃烧速率，研究者尝试通过使用高氧生物燃料来减少排放，利用混合燃料的微爆特性提高燃料的燃烧速率，如图2所示。

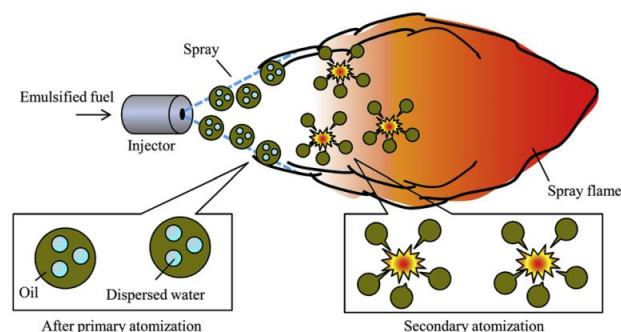


图2. 混合燃料液滴的微爆和二次雾化原理

(3) 基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法原理如图3所示，

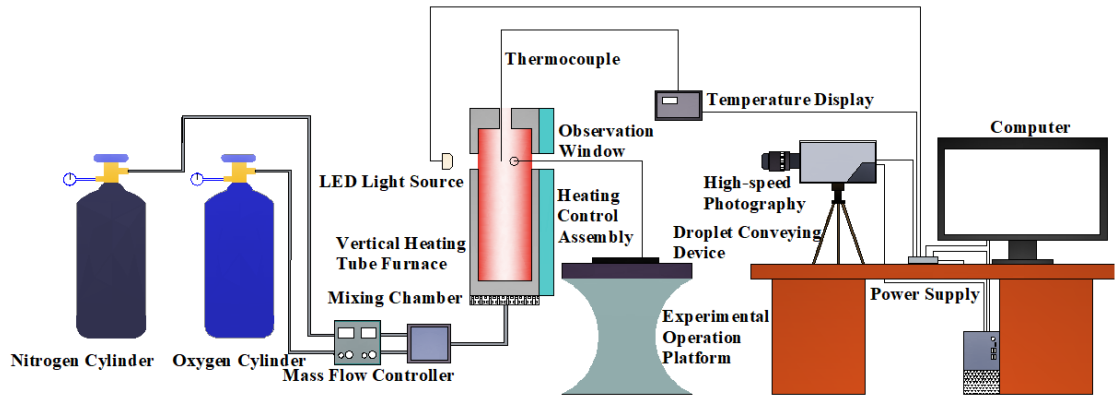


图3基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法原理

2、混合燃料液滴的微爆强度

通常采用各种参数来判断微爆的强弱，如液滴微爆前后的直径差、微爆持续时间、微爆后次级液滴的数量等。

3、混合燃料的微爆特性实验平台主要组成

A、加热系统：实验采用可以承受一定压力的立式燃烧炉，它为混合液滴的加热提供了热氛围，它主要由石英管、加热电阻丝、石棉隔热层、外钢板框架、加热控制柜、温度采集及显示系统、稳流器和观察窗组成。气体从混合器中出来后经过稳流器到达石英管内部，稳流器使进入石英管的混合气体能够均匀的流过液滴，它为液滴的加热提供了一个稳定的外部环境。为了观察液滴在不同温度下的微爆特性，在实验平台的一侧设置了加热控制柜，该控制柜可以调节液滴周围的环境温度最高至1600摄氏度。在距离管式炉底部1.5米处设置了一个10mm*10mm的观察窗，该观察窗为高速摄影机的拍摄提供了可视窗口；

B、数字导轨系统：导轨控制系统由碳化硅（SiC）纤维丝（直径200 μm ）、GPS梯形丝杆直线导轨滑台、ZD-2HD542步进驱动器、KH01步进电机控制器、变压整流器和若干导线及开关组成，它可以将液滴以恒定的速度输送到距离中间加热片指定位置，该控制系统不仅可以调整速度，还可以保证在每一次的实验中液滴在到达焦点位置前经历了相同的加热时间。

C、数据采集系统：信息采集及处理系统：信息采集及处理系统由高速摄影（FASTCAM SA5 1000K-M3）、电脑及其处理软件组成，其中高速摄影的分辨率不低于1024×1024像素，实验设置的速度应不低于1000帧/秒，分辨率设为1024×1024像素。

两束具有相同波长的相干激光汇聚于一点，形成测量体，测量体处产生干涉条纹。当两束激光的波长和夹角已知时，即可得到干涉条纹的间距。当液滴以一定的速度经过测量体时，由于干涉条纹的存在，其散射光的光强也以一定的频率发生周期性变化。通过测量光强变化的频率，结合干涉条纹的间距，即可得到液滴在干涉条纹垂直方向上的速度分量。若有三组波长不同且方向不同的入射激光，则可以实现液滴三维速度的测量。测量液滴粒径的原理为洛伦兹-米氏散射理论，通过测量相位差即可得到液滴直径，并且无需对测量结果进行标定。

4、混合燃料的微爆特性测试方法相关研究

目前在该领域已发表学术论文20余篇，这些研究发现：混合燃料的膨胀及微爆次数与混合燃料的比例及温度高度相关（*Journal of the Energy Institute* 92（2019）1527-1536）；混合燃料的着火延迟时间与乙醇的含量有关，混合燃料的微爆强度与液滴的膨胀比例成正比与膨胀时间成反比（*Journal of the Energy Institute* 93（2020）152-164）；阐述了微爆的发生过程及机制（*Combustion Theory and Modelling* 24（2020）810-828）；建立了修正后的微爆强度模型，对微爆强度进行了定义、划分和验证（*Fuel*, 256 (2019) 115942）；优化了微爆强度计算等式（*Applied Thermal Engineering*, 178 (2020) 115649）并调查了氧浓度对微爆强度的影响（*Physics of Fluids*, 33 (2021) 052003）；确立了微爆强度和体积燃烧速率之间的关系；（*Journal of the Energy Institute*, 97 (2021)169-179）；研究了液滴群在加热时的相互作用规律，建立了三阶段蒸发速率模型并进行了验证和计算（*Physics of Fluids*, 34 (2022) 032113）。内容简要概述如下：

A、开展了生物柴油和乙醇二元混合燃料在不同温度及氧浓度条件下混合燃料液滴的燃烧实验，分析不同比例的二元混合液滴着火延迟时间不同的原因，发现温度和气体流量是导致混合液滴的膨胀次数和微爆强度不同的因素，相关研究成果发表在 *Journal of the Energy Institute* 92（2019）1527-1536上，如图4所示。

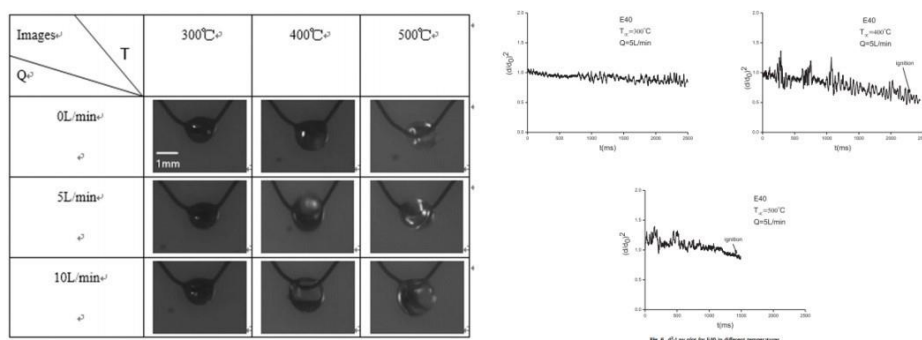


Fig. 4. HRR plot for E40 at different temperatures.

图4.不同温度及气体流量条件下生物柴油和乙醇燃料的着火和微爆特性

B、完成了乙醇和生物柴油在不同配比条件下的微爆特性研究，发现生物柴油和乙醇的比例BD60E40液滴有更高的微爆强度，申请人研究了不同比例生物柴油和乙醇液滴的着火和燃烧特性，阐述了微爆的发生过程及机制。相关研究成果发表在 *Combustion Theory and Modelling* 24 (2020) 810-828上，如图5所示。

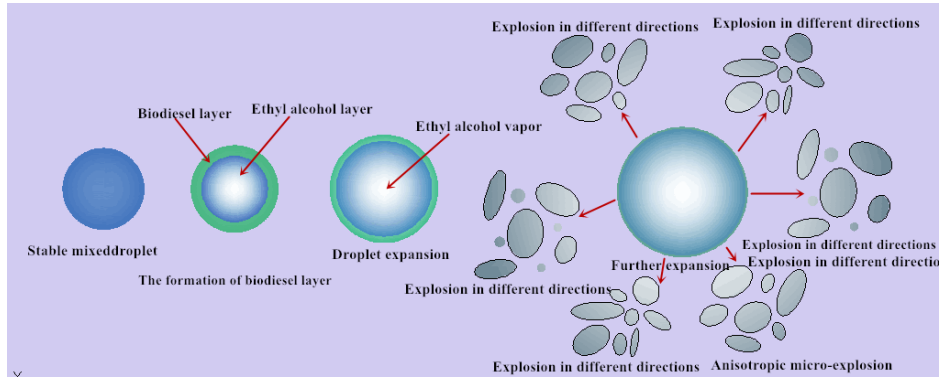


图5混合燃料液滴的微爆发生过程

C、通过对生物柴油、航空燃油和乙醇的二元及三元混合燃料液滴的加热实验，对混合燃料液滴的微爆强度特性进行了详细的研究，重新优化了微爆强度模型，用该模型进行了计算和预测，并对混合液滴发生的不同强度微爆进行了定义和划分，同时验证了划分的合理性，该研究成果发表在 *Fuel*, 256 (2019) 115942上，如图6所示。

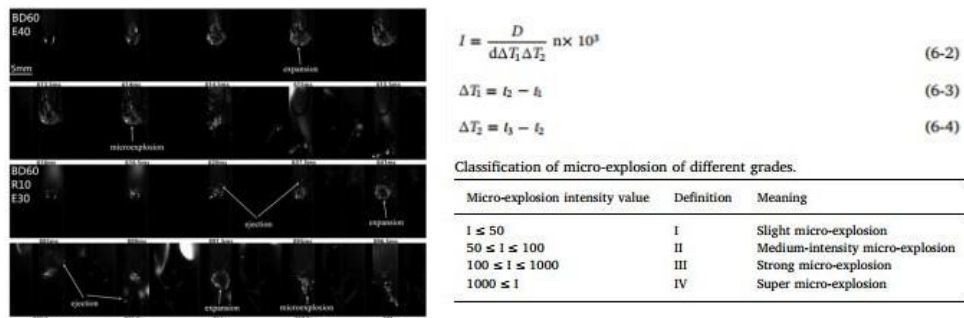
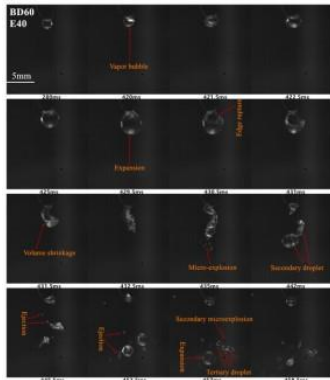


图6生物柴油、航空燃油和乙醇二元及三元燃料实验序列图及微爆强度的定义和划分

D、依靠多气路管式炉实验系统初步研究了混合燃料微爆强度与液滴体积燃烧速率的关系，相关研究成果发表在 *Journal of the Energy Institute*, 97 (2021)169-179上，如图7所示。



在混合液滴的加热过程中，为了表示液滴在燃烧过程中的快慢程度。我们定义混合液滴的瞬时体积燃烧速率公式如下：

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_1^3 - \frac{4}{3}\pi r_2^3}{t_2 - t_1} = \frac{4\pi I(r_1^3 - r_2^3)}{3000\Delta Dn} \times 10^3 = \frac{4\pi I(r_1^3 - r_2^3)}{3\Delta Dn}$$

当 $r_2=0$ 时，液滴的体积平均燃烧速率可以表示为：

$$\bar{S} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_1^3}{t_2 - t_1} = \frac{4\pi r_1^3}{3(t_2 - t_1)}$$

图7生物柴油与乙醇混合燃料的燃烧序列图及微爆强度和体积燃烧速率的关系

E、研究了不同氮气流量下单液滴的蒸发及微爆特性，阐述了微爆分布情况以及氮气流量对微爆强度的影响，相关研究成果发表在Physics of Fluids, 34 (2022) 033609，如图8-9所示。

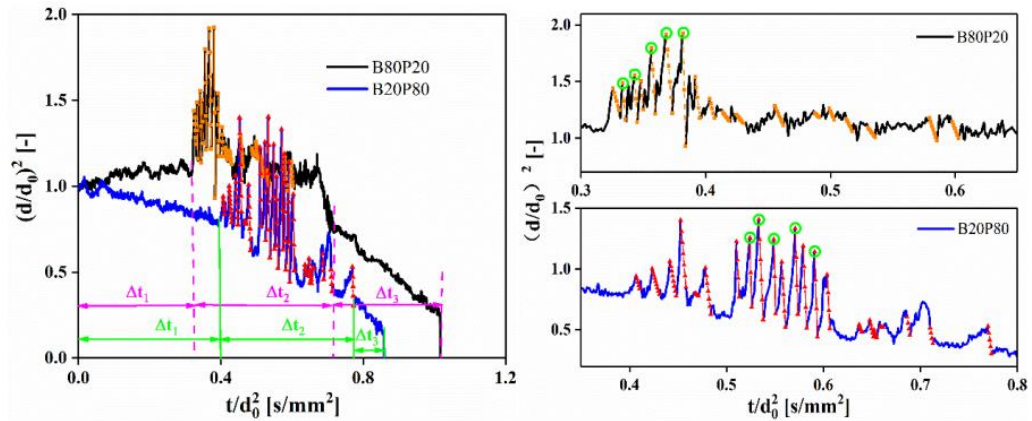


图8生物柴油与正戊醇液滴蒸发及微爆特性

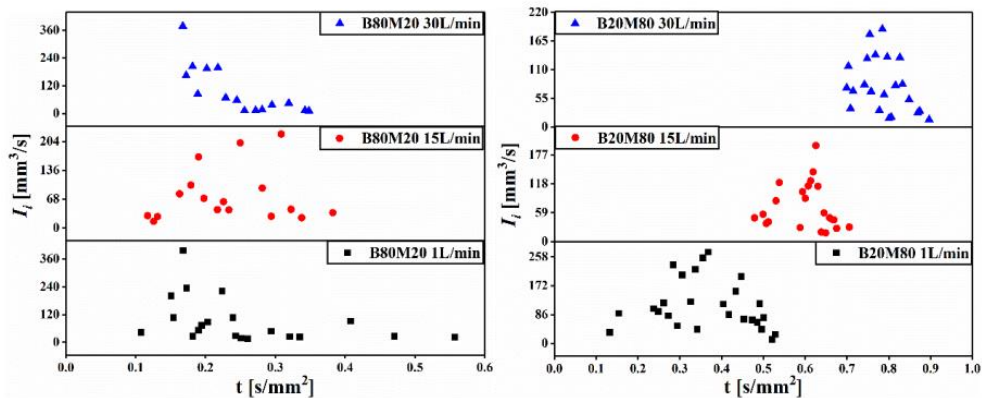


图9生物柴油与正戊醇液滴微爆分布特性

F、研究了液滴群之间的相互作用规律，调查了氧浓度对微爆强度的影响，定义了三阶段液滴蒸发模型，并对结构进行了计算和验证，相关研究成果发表在Physics of Fluids, 33 (2021) 052003和Physics of Fluids, 34 (2022) 032113，如图10所示。

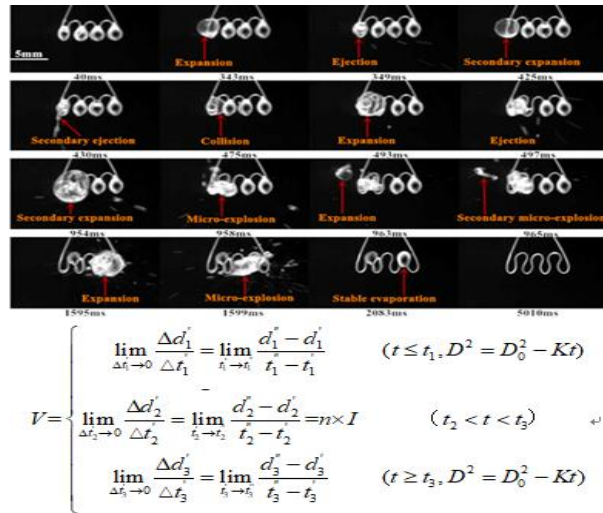


图10生物柴油与乙醇液滴群的燃烧序列图及液滴三阶段蒸发模型

G、研究了混合液滴的燃烧微爆强度，建立了燃烧微爆强度模型，并进行了相关计算和分析。文章发表在Physics of Fluids 35, 102024 (2023)，如图11所示。

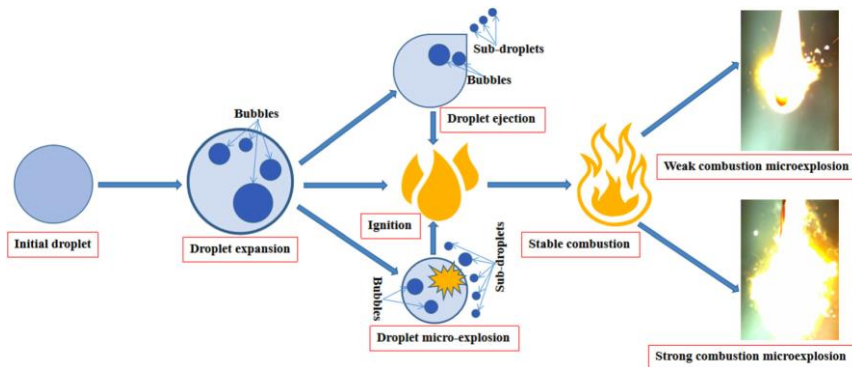


图11混合燃料液滴不同的燃烧方式

5、揭示多组分燃料发生不同强度微爆现象的机理，比较系统的阐释了微爆发生发展过程并运用模型对不同强度的微爆进行预测，阐明了微爆对燃烧速率和排放的影响机制，为加强对燃烧过程控制、降低污染排放提供理论指导。同时对液体燃料微爆特性进行科学、准确、有效的评价，帮助开发替代燃料和燃烧装置，进而提升燃烧装置和设备的制造水平，为燃料节能减排做贡献。

《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》标准的建立更有利于测试流程的标准化发展，规范并评估数据可信度，对试验结果进行对比，便于研究人员之间的相互交流和对比验证，节约了人工与时间成本，具有重要的社会和经济效益。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外

样品、样机的有关数据对比情况

目前国内外均没有关于适用于液体混合燃料微爆特性测试的相应专业标准。

本标准体现了民航领域混合燃料微爆的特点和测试方法，有望填补液体混合燃料微爆特性测试方法标准的空白。

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

本标准无采标情况，没有引用或采用国际国外标准，因为国内外尚无此类标准。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本标准与现行法律、行政法规及相关标准不存在任何冲突、矛盾或重复；

七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在制定过程中未出现过重大分歧意见。

八、涉及专利的有关说明

本标准不涉及专利。

九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

本标准发布后，应组织相关教育、科技、文化、设计、制造和用户对标准进行宣贯，统一基本概念的表述，消除或减少歧义，规范运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性进行测试所需要的试验条件、测试步骤、数据处理等相关流程，更好的构建低碳型和谐社会，支持节能减排国家战略的实施。

十、其他应当说明的事项。

无。

全国燃烧节能净化标准化技术委员会（SAC/TC441）
《基于运动图像跟踪技术的液体混合燃料微爆特性测试方法》
国家标准编写工作组
2024年3月18日