

体相微纳米尺度泡状流预混合燃料的喷雾特性研究

宣熔^{1,2} 郭亮^{2,1,2} 李德刚^{3,1,2} 蔡宁宁^{4,3} 程鹏^{5,1,2} 孙万臣^{6,1,2} 陈艳玲^{7,1,2} 王涵^{8,1,2} 张峻峰^{9,1,2}

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025;
3. 吉林大学商学院与管理学院, 长春 130025)

Study on spray characteristics of bulk micro-nano bubble flow premixed fuel

XUAN Rong^{1,2} GUO Liang^{1,2} LI Degang^{1,2} CAI Ningning³ CHENG Peng^{1,2} SUN Wanchen^{1,2}
CHEN Yanling^{1,2} WANG Han^{1,2} ZHANG Junfeng^{1,2}

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, 130025, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Changchun 130025, China; 3. School of Business and Management, Jilin University, 130025, China)

Abstract: For the requirement of high-quality oil-air mixing in limited time and space during the spray process of engine combustion, a preparation method of premixed micro-nano bubble flow mixed fuel (target fuel) is proposed. And the spray characteristics of the target fuel are investigated and compared with traditional diesel. The results showed that the incorporation of bulk phase micro-nano bubbles reduces the tip penetration of fuel spray and promotes the spray radial diffusion, resulting in an increase in spray cone angle, maximum spray width and spray area. And the effects of the target fuel on the spray process enhance with increasing bubble concentration. When the ambient back pressure and injection pressure increase, the optimization effect caused by the bulk phase micro-nano bubbles gradually diminishes, which leads to a decrease in the spray difference between bubble flow premixed fuel and traditional diesel, but the spray atomization quality of micro-nano bubble premixed fuel is still better than traditional diesel. The target fuel is expected to achieve superior atomization at low injection pressures, which is significant for reducing the cost of fuel injection systems and improving engine thermal efficiency. Therefore it is suitable for low injection pressure or low compression ratio engines with lower technology costs.

摘要: 针对发动机燃用石化燃料喷雾过程中在有限时间和空间内实现高质量油-气混合的要求, 提出了基于液相空间制备预混的纳米尺度泡状流预混合燃料(目标燃料)的方法, 研究了其喷雾特性并与常规柴油进行了对比。体相微纳米气泡的加入减小了喷雾贯穿距离, 但对喷雾径向扩散具有促进作用, 从而使燃料的喷雾锥角、最大喷雾宽度和喷雾面积均有所增加并随气泡浓度的增加增益效果进一步增强。当环境背压和喷射压力增大时, 体相微纳米气泡带来的优化效果逐渐减弱, 使得泡状流预混合燃料与常规柴油之间的喷雾差异减少, 但微纳米气泡预混合燃料的喷雾雾化质量仍优于常规柴油。目标燃料有望在低喷射压力下实现更好的雾化质量, 对降低燃料喷射系统的成本和提高发动机热效率具有重要意义。因此, 适用于技术成本更低的低喷油压力或低压缩比发动机。

收稿日期: 2023-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52202470); 吉林省自然科学基金项目 (20220101205JC, 20220101212JC); 吉林大学长沙汽车创新研究院自由探索项目 (CAIRIZT20220202); 吉林大学研究生创新研究计划项目 (2023CX071)

作者简介: 宣熔 (1996-), 男, 博士生, 主要研究方向为内燃机燃料与燃烧优化, E-mail:727074917@qq.com;

郭亮 (联系人), E-mail: liangguo@jlu.edu.cn。

关键词: 微纳米气泡; 泡状流燃料; 喷雾特性

Key words: micro-nano bubbles; bubble flow fuel; spray characteristics

中图分类号: TK427

文献标识码: A

0 概述

近年来,随着两相流领域中以液相组分为载体的体相纳米气泡制备技术的开展,具有高气相密度的体相纳米气泡溶液在水处理^[1]、矿物浮选^[2]、渔业^[3]、生物医学^[4]及动力机械^[5]领域的应用越来越广泛。体相纳米气泡研究的日渐深入,发现其展现出不同于宏观气泡的特有性质,如更大的比表面积、更高的气相稳定性、更高的气-液传质效率、自增压溶解性、高 ζ 电位、携带大量自由基和更大的气相溶解率等^[6-13]。纳米气泡这些异于宏观大气泡的特殊性质或许可以在压燃式发动机在异常短促的工作循环内,实现燃烧前更为充分的油-气预混合提供优化解决方案。

Seung Hoon Oh^[14]等人对汽油中氢纳米气泡(HNB)的性质及稳定性展开了研究,结果表明,HNB可以稳定存在汽油中,气泡平均直径分布在 $150\pm 31.39\text{nm}$ 区间,气泡浓度为 $(11.25\pm 2.77)\times 10^8$ 个/mL。HNB燃料在298.15K温度下经过121天保存后,氢纳米气泡/汽油混合物中的HNB保持基本不变的平均直径和浓度。同时氢纳米气泡/汽油混合物的 ζ 电位的测量结果为-30mv,低于纯汽油的+17mv,间接证明了HNB在汽油可长期存在的稳定性。随后S. Gobinath^[15]等人在生物柴油中混入微米级空气气泡制备泡状流预混燃料并对其热物理性质进行测试。测试发现纳米气泡的添加使得B90(90%纳米气泡生物柴油+10%柴油)和B100(100%生物柴油)的热值分别增加了2.5%和3.89%,B90和B100的闪点分别降低了3%和3.48%。此外B90和B100燃点分别降低了1.69%和5.86%。Nakatate^[16]等人成功在柴油中掺混纳米尺度气泡并研究了空气纳米气泡/柴油混合物的性质及其燃烧排放特性。研究发现,在高压共轨柴油机测试平台燃用预混有气泡的柴油,燃油消耗率在平均负载和低负载下分别下降了3.2%和6.2%,排气温度和发动机噪音均上升1%。而Seung Hoon Oh^[17]等人改变纳米气泡内气相,探究了氢纳米气泡汽油燃料燃烧排放特性。结果表明,相较于常规汽油,40%

负荷下燃用HNB汽油的发动机功率有所提高,有效燃油消耗率由汽油的291.10kg/KWh降低至269.48kg/KWh。此外他们还发现在40%负荷至80%负荷内HNB燃油消耗率均低于普通汽油。

尽管众多学者先后对不同气相密度、不同气液相种类和不同尺度气泡的预混合燃料的应用及燃烧特性进行了研究,但是对于泡状流混合燃料的喷雾特性及形成原因尚未被详细探明。因此有必要对纳米尺度泡状流预混合燃料喷雾发展及其对燃烧的影响进行研究,以明晰微纳米泡状流预混合燃料喷雾与常规柴油的差异及其对燃烧影响的内在机理。

1 实验装置及实验办法

1.1 实验平台

为了对微纳米泡状流预混合燃料喷雾特性进行研究,搭建了一套基于“Z型”光路布置的燃料喷雾纹影光学平台,结构示意图如图1所示。实验平台主要由定容弹、燃油供给系统、高压氮气供给系统、图像采集系统等部分组成。通过燃油供给系统可以实现目标燃料喷射进入定容弹中,通过高压氮气供给系统可实现定容弹内环境压力控制及高效扫气。本研究使用美国AMETEK公司生产的Phantom V611高速相机对喷雾发展过程拍摄采集,采用开放式的ECU(NI2106)对高压共轨燃油系统和喷油器进行控制,以实现精确控制目标轨压和喷射压力的目的。

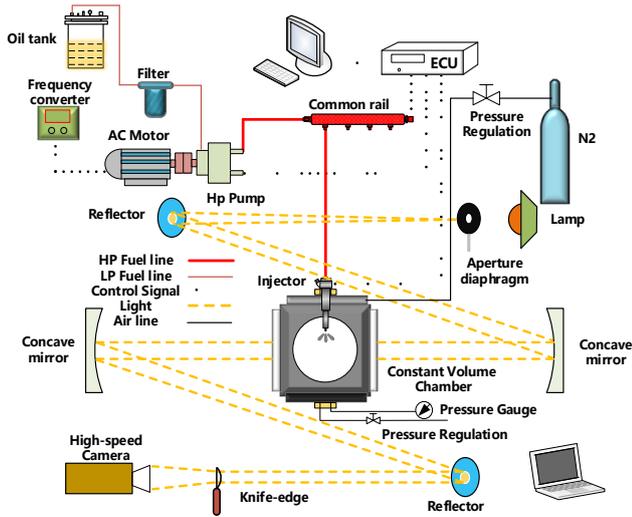


图1 纹影光学平台示意图

1.2 实验燃料

针对目标燃料的制备,自行设计开发了带有多孔膜管气泡发生器的体相微纳米泡状流预混合燃料制备系统,制备系统及气泡发生原理示意图如图1所示。

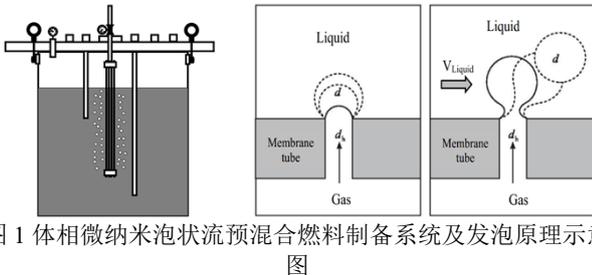


图1 体相微纳米泡状流预混合燃料制备系统及发泡原理示意图

为探究预混合燃料中气泡浓度对燃料喷雾特性的影响,通过改变预混时间进而制备不同气泡浓度的微纳米泡状流预混合燃料。其中预混10分钟、20分钟和30分钟的混合燃料分别记为PM10、PM20、PM30,四种燃油特性如表一所示。

表1 实验燃油特性

Properties	Diesel	PM10	PM20	PM30
Viscosity at 293K($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	3.455	3.393	3.368	3.372
Density/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	825.7	822.4	816.3	816.8
Surface tension (mN/m)	33.19	33.20	33.32	33.29

使用纳米颗粒跟踪分析 (Nanoparticle tracking analysis, NTA)技术对纳米尺度气泡两相流体内的气泡尺寸和浓度分布数据进行了测量,如图2所示。此外,通过纳米颗粒跟踪分析仪 Nanosight NS300 拍摄测量的常规柴油与泡状流预混合燃油微观图像,如图3所示。

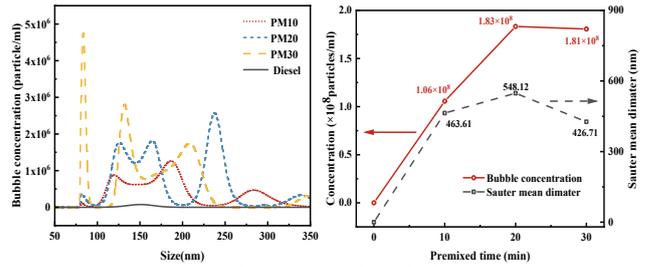


图2 混合燃料气泡粒径、浓度及索特平均直径分布

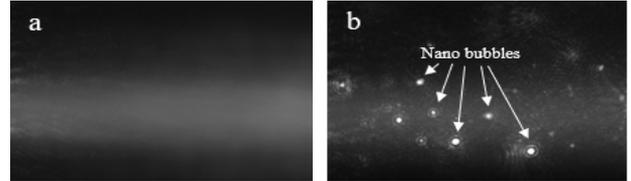


图3 燃油微观图像 (a. 常规柴油 b.泡状流预混合燃油)

1.3 实验数据分析方法

为便于对比目标燃料与常规柴油喷射过程差异,对喷雾特征参数进行了定义,如图4所示。图中S为喷雾贯穿距,定义为沿喷嘴中心线,从喷嘴出口中心点到最右端喷雾前沿的距离;图中白色像素点区域为喷雾面积,是纹影系统中平行光在垂直平面上的投影;最大喷雾宽度B定义为在贯穿距长度范围内,喷雾边界最上侧点到最下侧点垂直距离的最大值;使用 Jeffrey D. Naber 等人^[18]理论对喷雾锥角 θ 定义,即喷嘴出口中心点与喷雾贯穿距t倍长度处的喷雾边缘像素点连线所形成的夹角 θ ,其中t的取值在0到1之间。

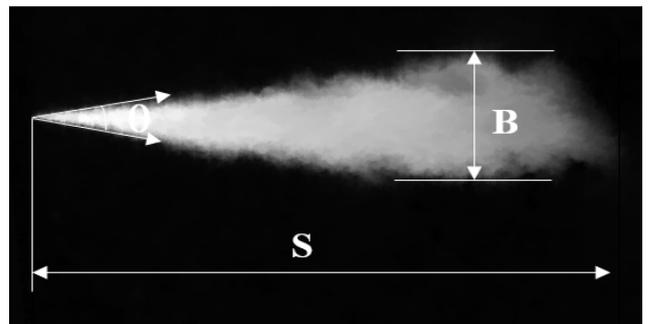


图4 喷雾特征参数示意图

基于自主开发的图像处理和计算代码,分别对图像进行读取、灰度处理、背景消除、滤波、降噪、二值化处理和边缘检测等处理,如图5所示。从而实现贯穿距离、喷雾面积、最大宽度及喷雾锥角等参数的提取。

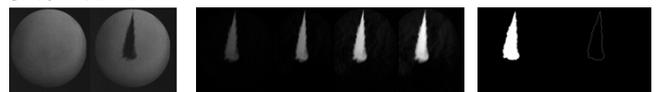


图5 图像处理过程示意图

2 实验结果及分析

2.1 微纳米气泡对喷雾特性的影响

图 5 不同气泡浓度燃料的喷雾发展历程图像

图 5 展示了在喷射压力 100MPa，环境压力 1.5Mpa 条件下常规柴油与泡状流预混燃油的喷雾发展历程图像比对。如图所示，在喷雾初期如 0.3ms、0.6ms 时刻，常规柴油喷雾形态呈细长型宽度较小，而微纳米泡状流预混合燃料离开喷嘴时由于压力瞬变导致纳米气泡析出，喷射到环境中后发生破碎和坍塌（图中 0.6ms 列白色箭头所指处）产生细小的燃油颗粒，使得泡状流燃料喷雾更为粗壮且在远离喷嘴的喷雾头部处面积较大。在喷雾发展过程中，气泡破碎和坍塌产生的小粒径燃油颗粒在环境气体阻力作用下进一步分裂细化。在喷射期(1.2ms 和 1.5ms)，微纳米泡状流燃料喷雾外围周边可见明显的颜色较淡的白色区域，如图 6 所示，说明微纳米尺度泡状流预混燃料更易于气化进而可以与周围空气快速混合，有利于提高燃油喷雾的均匀性。

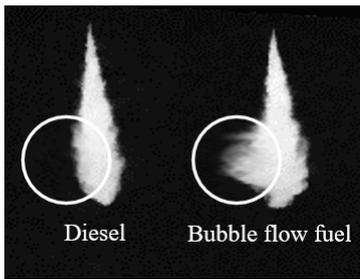


图 6 喷雾局部放大图像

图 7 为两种喷射条件下的喷雾贯穿距实验结果。从图中可以发现在燃料离开喷嘴 0.2ms 内，四种燃料的喷雾贯穿距基本相等。这主要是由于燃料在刚离开喷嘴，在油束特别集中且具有很高的动能的情况下，微纳米尺度的小气泡破碎对喷雾轴向发展的影响相对较小。随着喷雾的不断发展，常规柴油和微纳米泡状流预混合燃料之间的差距缓慢增大，在两种喷射条件下，四种燃料的喷雾贯穿距的大小均为 $P_{\text{Diesel}} > P_{\text{PM10}} > P_{\text{PM30}} > P_{\text{PM20}}$ 。当喷雾发展到 1.5ms 时，PM20 燃料相较于常规柴油，贯穿距在喷射压力 80MPa 和 100MPa 下分别减少了 2.9% 和 2.4%。可以推测四种燃料的喷雾远场燃油液滴速度与喷雾贯穿距应具有相同的排序，也说明了微纳米泡状流预混合燃料更早地发生了破碎，并且发展过程中由于气泡破碎后产生的油滴具有更小的体积，降低了燃料轴向贯穿的距离，使得微纳米泡状流预混合燃料在贯穿长度上总体比常规柴油要小，可见纳米气泡的加入一定程度上抑制了喷雾的轴向发展，并且气泡浓度越大抑制效果越明显。

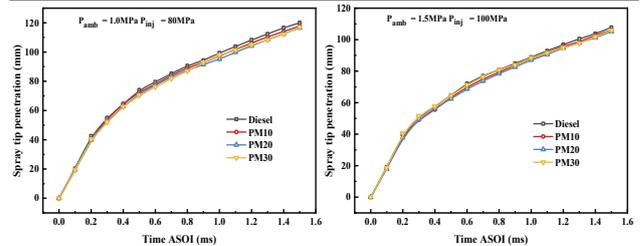
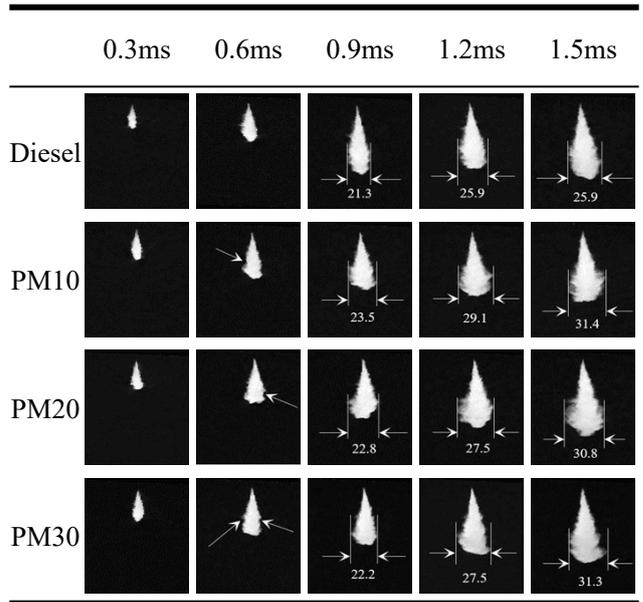


图 7 不同工况下泡状流燃料喷雾贯穿距变化图

图 8 展示了两种喷射条件下常规柴油、PM10、PM20 和 PM30 四种燃料的喷雾锥角随时间变化曲线。在喷雾发展初期，PM10、PM20 和 PM30 的喷雾锥角均大于常规柴油且差距随着气泡浓度的增大而增大。两种喷射条件下，PM20 相较于常规柴油的平均喷雾锥角均有所扩大，分别增加了 4.6% 和 3.4%，可见大量纳米气泡能够在燃料喷射时迅速膨胀破碎，加快扩散和蒸发速率，形成大量的微小油滴，加大喷雾径向发展的同时强化了气流对于液体的剪切作用，对喷雾锥角的增大有一定的促进作用。此外，从燃料性质上来看，相较于常规柴油而言，微纳米泡状流预混合燃料有着更小的粘度，燃料进入定容弹后雾化破碎成液滴更加容易，燃油与气体的混合作用增强。

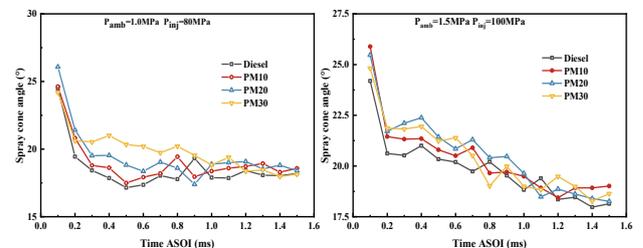


图 8 不同工况下泡状流燃料喷雾锥角变化图

微纳米泡状流预混合燃料内部由于气泡膨胀破碎导致喷雾油束发生形态上的改变，喷雾宽度将会进一步增大，尤其是远离喷嘴的头部区域，此时仅

使用喷雾锥角或喷雾贯穿距参数不能准确的描述喷雾。因此引入最大喷雾宽度这一宏观特征参数，可以有效反应燃料喷雾的最大径向膨胀能力。

图 9 展示了在两种喷射条件下，最大喷雾宽度发展趋势图，从图中可以看到四种燃料最大喷雾宽度发展趋势一致均随时间增长而增大，随着时间推移变化速度逐渐变缓。比较微纳米泡状流预混合燃料和常规柴油的最大喷雾宽度发现，微纳米泡状流预混合燃料的最大喷雾宽度大于常规柴油，且气泡浓度越高最大喷雾宽度越大。燃料的最大喷雾宽度取决于燃料的理化性质和燃油喷出后破碎雾化程度，微纳米泡状流预混合燃料的密度和粘度均低于常规柴油并且内部气泡由于喷嘴出口处的压力急剧变化而发生气泡析出破碎会进一步细化燃油液滴粒径并促进燃料的径向扩散。

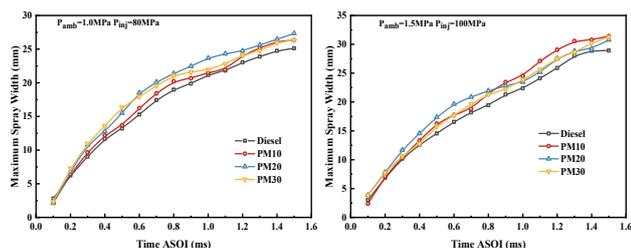


图 9 不同工况下泡状流燃料最大喷雾宽度变化图

喷雾面积是喷雾轴向和径向发展的综合结果，是衡量燃料及与环境气体混合质量的关键参数^[19]。一般而言，较大的喷雾面积表明在被喷射出后，燃料与缸内环境气体混合的更加充分，有利于缸内更均匀混合气的形成，进而达到优化燃烧的目的，降低柴油机的燃油消耗。两种喷射条件下，喷雾面积随时间变化趋势如图 10 所示。

由图 10 可知，在不同的喷射条件下，四种燃料的喷雾面积大小依次为 $A_{PM20} > A_{PM30} > A_{PM10} > A_{Diesel}$ 。随着微纳米泡状流预混合燃料内气相浓度的增加，两种喷射条件下混合燃料的喷雾面积均将呈现增大趋势，但三种微纳米泡状流燃料之间的面积差距并不明显。基于上述结果分析可知，随喷雾的发展，气泡浓度的增加会促进喷雾的径向发展，使燃料喷雾锥角和最大喷雾宽度增加，同时又会一定程度上降低燃料喷雾贯穿距，导致的综合作用是喷雾面积随气泡浓度的增大而缓慢增大。此外，由于微纳米气泡的混入，在气泡破碎的瞬间所产生局部高温高压和冲击波^[20]会使气泡周围的柴油分子变得更加活跃从而加速燃油液滴的破碎，破碎后的燃油液滴更为细小进而增大了喷雾面积。

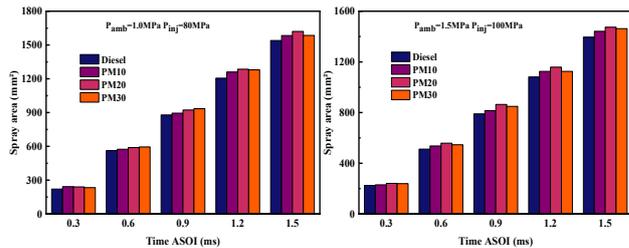


图 10 不同工况下泡状流燃料喷雾面积变化图

2.2 喷射压力对喷雾特性的影响

喷射压力在喷雾破碎和雾化中起着至关重要的作用，因此通常采用高喷射压力来优化燃料喷雾效果以提高混合气质量，然而较高的喷射压力会导致与壁面润湿相关的发动机性能及排放问题。本小节研究对比了常规柴油和微纳米泡状流预混合燃料 PM10、PM20 在不同喷射压力下喷雾特性的差异。

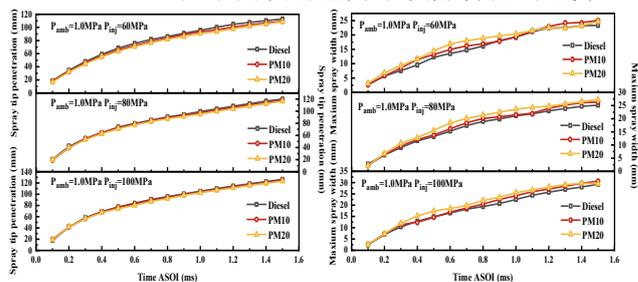


图 11 喷雾贯穿距、喷雾最大宽度变化图

图 11 展示了不同气泡浓度燃料在三种不同喷射压力下的喷雾贯穿距、最大喷雾宽度随时间变化曲线。从左图可以观察到，在三种喷射压力下，柴油贯穿距均大于泡状流燃料，且 PM20 燃料相较于常规柴油，在喷射压力为 60、80 和 100MP 下的 1.5ms 处，喷雾贯穿距分别减小了 4.19mm、3.49mm 和 3.13mm。这是因为在恒定背压环境下，气泡的加入会导致液体射流速度的波动，削弱了喷雾油束轴向上的动量，导致提前发生破碎缩短射流破裂长度。且气泡浓度越高波动越剧烈，破碎越早。在宏观的表现表现为喷雾贯穿距小于常规柴油。当喷油压力提高当喷油压力提高导致喷油压力对燃料的细化作用增强时，一方面高喷油压力弱化了气泡引发的射流速度波动，另一方面造成气泡对燃油喷雾贯穿距离缩短的影响作用被弱化。因此可以观察到随着喷油压力的提高，泡状流燃料与常规柴油贯穿距差值逐渐减小的变化趋势。

图 11 右侧为微纳米泡状流预混合燃料 PM10、PM20 和常规柴油三种燃料在不同喷射压力下的最大喷雾宽度曲线变化图。在三种喷射压力下，三种燃料的最大喷雾宽度的大小关系均为 $W_{PM20} > W_{PM10} > W_{Diesel}$ 。一方面气泡的混入降低了气液两相流体的射流密度，轻重流体相互混合渗入缩

短了射流表面瑞利-泰勒 (Rayleigh-Taylor, R-T) 不稳定波长, 并在发展过程中演化, 进一步引发开尔文-亥姆霍兹 (Kelvin-Helmholtz, K-H) 不稳定性, 两者的结合加剧了液滴破碎。另一方面纳米气泡在喷嘴出口处的析出和破碎促进喷雾的径向发展。但随喷油压力的提高, 常规柴油的喷雾液滴细化程度提高, 使得油束径向发展的能力逐渐接近泡状流燃料, 微纳米气泡的促进作用逐渐被压力升高而弱化。因此, 微纳米泡状流预混合燃料更适用在燃油喷射压力小的场合, 或为降低技术成本而采用发动机低压燃油喷射系统。

2.3 环境背压对喷雾特性的影响

环境压力对燃油喷雾雾化、蒸发、卷吸、扩散具有显著的影响。为探究环境压力对泡状流燃料喷雾的影响, 图 12 展示了 100MPa 喷射压力下, 常规柴油、PM10 和 PM20 三种燃料在 0.5MPa、1.0MPa 和 1.5MPa 三种环境背压下喷雾锥角以及喷雾面积变化曲线图。

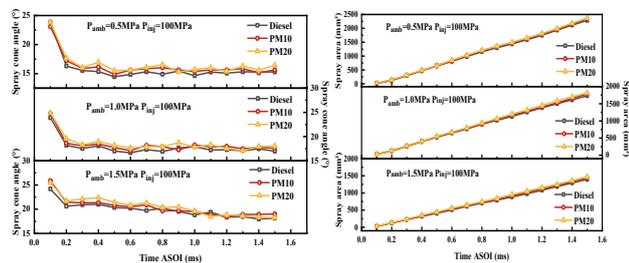


图 12 喷雾锥角、喷雾面积变化图

如左图所示, 燃料喷雾锥角随环境背压的增大而增大。当环境背压升高时, 定容弹内气体密度增加使得喷雾射流的轴向发展的空气阻力更大, 促使射流动量向径向转变增强了径向扩散。此外, 气泡数量密度越大, 喷雾形态的连续性则越好^[20], 同时气泡破碎时加剧了对燃料液滴的扰动, 强化了射流在径向扩散程度。因此微纳米泡状流预混合燃料的喷雾锥角在 0.5、1.0 和 1.5MPa 三种不同的背压下均大于常规柴油。PM20 燃料的平均喷雾锥角相较于常规柴油在三种背压下分别增大了 0.87°、0.78° 和 0.66°, 可见较高的背压也会抑制气泡破碎对喷雾径向扩散带来的影响, 且背压越高, 抑制的效果越强。

图 12 右侧展示了三种燃料喷雾面积随时间变化, 从图中可以观察到在三种背压条件下微纳米泡状流预混合燃料的喷雾面积均大于常规柴油, 且气泡浓度越高喷雾面积越大。在 1.5ms 时刻, 随着背压的增大泡状流混合燃料 PM20 相较于常规柴油喷雾面积分别增大了 90.57mm²、83.93mm² 和 77.91mm²。据此推测, 由于环境背压的增大, 一方面增大了常

规柴油喷雾破碎程度, 缩小了与泡状流预混合燃料的差距, 另一方面环境空气阻力对常规燃油贯穿距的抑制作用和喷雾锥角的增大效应增强, 气泡的优势相对减弱。但总体而言, 微纳米泡状流预混合燃料的面积仍大于常规柴油。

3 结论

(1) 柴油中预混入微纳米气泡对喷雾雾化质量具有一定的改善作用, 能够增大燃料喷雾锥角和最大喷雾宽度, 减小喷雾贯穿距, 增大喷雾面积; 随着燃料内混入气相纳米气泡浓度的增大, 燃料喷雾贯穿距抑制效果加强, 喷雾锥角、最大喷雾宽度和喷雾面积进一步增大。

(2) 随着喷射压力的增大, 微纳米泡状流预混合燃料和常规柴油之间喷雾贯穿距的差异逐渐减小可以在更低的喷射压力下实现常规柴油的喷射效果, 微纳米泡状流预混合燃料的应用有利于降低发动机的技术成本, 适用于喷油压力或压缩比低的发动机。

(3) 随着环境背压的增大, 微纳米泡状流预混合燃料喷雾面积逐渐减小、喷雾锥角逐渐增大。随着环境背压的增大, 微纳米泡状流预混合燃料和常规柴油之间喷雾贯穿距和喷雾锥角之间的差异逐渐缩小, 背压的增大一定程度上削弱了预混入纳米气泡对于燃料喷雾特性的影响。

参考文献:

- [1] Oturan M A, Aaron J J. Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014, 44(23): 2577-2641. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
- [2] Lei W, Zhang M, Zhang Z X, et al. Effect of bulk nanobubbles on the entrainment of kaolinite particles in flotation[J]. Powder Technology, 2020, 362: 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.015>
- [3] Ebina K, Shi K, Hirao M, et al. Oxygen and Air Nanobubble Water Solution Promote the Growth of Plants, Fishes, and Mice[J]. Plos One, 2013, 8(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065339>
- [4] Bhandari P, Novikova G, Goergen C J, et al. Ultrasound beam steering of oxygen nanobubbles for enhanced bladder cancer therapy[J]. Scientific Reports, 2018, 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20363-8>
- [5] Nakatake Y, Kisu S, Shigyo K, et al. Effect of nano

- air-bubbles mixed into gas oil on common-rail diesel engine[J]. *Energy*, 2013, 59: 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.065>
- [6] Kazakis N A, Mouza A A, Paras S V. Experimental study of bubble formation at metal porous spargers: Effect of liquid properties and sparger characteristics on the initial bubble size distribution[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 137(2): 265-281. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.040>
- [7] Tan B H, An H, Ohl C D. How bulk nanobubbles might survive[J]. *Physical review letters*, 2020, 124(13): 134503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.134503>
- [8] A. J. Jadhav and M. Barigou, "Bulk Nanobubbles or Not Nanobubbles: That is the Question," *Langmuir*, 2020, vol. 36, no. 7, pp. 1699-1708. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03532>
- [9] J. Jin, W. Ru, J. Tang, et al., "Dynamic tracking of bulk nanobubbles from microbubbles shrinkage to collapse," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 589. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124430>
- [10] K. Yasui, T. Tuziuti, and W. Kanematsu, "High temperature and pressure inside a dissolving oxygen nanobubble," *Ultrason Sonochem*, 2019, vol. 55, pp. 308-312. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.013>
- [11] P. A. Satpute and J. C. Earthman, "Hydroxyl ion stabilization of bulk nanobubbles resulting from microbubble shrinkage," *Journal of Colloid Interface Science*, 2021, vol. 584, pp.449-455. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.09.100>
- [12] Karim G A, Ward G. The examination of the combustion processes in a compression-ignition engine by changing the partial pressure of oxygen in the intake charge[J]. *SAE Transactions*, 1968: 3008-3016. <https://www.jstor.org/stable/44580850>
- [13] Parker J L, Claesson P M, Attard P. Bubbles, cavities, and the long-ranged attraction between hydrophobic surfaces[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1994, 98(34): 8468-8480. <https://doi.org/10.1021/j100085a029>
- [14] Oh S H, Han J G, Kim J-M. Long-term stability of hydrogen nanobubble fuel[J]. *Fuel*, 2015, 158: 399-404. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.072>
- [15] S. Gobinath, G. Senthilkumar & Nagappan Beemkumar (2018): Air nanobubble-enhanced combustion study using mustard biodiesel in a common rail direct injection engine, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549159>
- [16] Nakatake Y, Yamashita H, Tanaka H, et al. Reduction of fuel consumption of a small-scale gas turbine engine with fine bubble fuel[J]. *Energy*, 2020, 194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116822>
- [17] Oh S H, Yoon S H, Song H, et al. Effect of hydrogen nanobubble addition on combustion characteristics of gasoline engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(34): 14849-14853. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.063>
- [18] Naber J D, Siebers D L. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays[J]. *SAE Technical Papers*, 1996, 105(3): 82-111. <https://www.jstor.org/stable/44736259>
- [19] Zhang Q, Xia J, Wang J, et al. Experimental investigation on spray and combustion characteristics of dual-fuel collision of biodiesel and n-butanol[J]. *Fuel*, 2023, 340: 127613. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127613>
- [20] Zhou L, Wang S, Zhang L, et al. Generation and stability of bulk nanobubbles: A review and perspective[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2021, 53: 101439. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101439>
- [21] Wu Z W, Shi Z H, Zhao H, et al. Effects of bubbles in the liquid jet on the air-blast atomization[J]. *Fuel*, 2020, 266: 117117. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117117>