

壁面润湿性对附壁油膜铺展和蒸发特性的影响

宣 熔^{1,2}, 郭 亮^{1,2}, 李德刚^{1,2}, 张 浩^{1,2}, 王 会³, 韩家明⁴

(1. 吉林大学 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022;
3. 北京工业职业技术学院 机电工程学院, 北京 100042; 4. 一汽解放商用车开发院, 长春 130001)

摘 要:为深入探究壁面润湿性对附壁油膜铺展行为及蒸发过程的作用机理,进而改善压燃式发动机燃油喷雾湿壁问题,使用表面润湿性改性技术制备了具有不同润湿性的实验表面,利用激光诱导荧光技术拍摄了正丁醇燃料液滴撞击壁面后液膜的铺展行为及蒸发过程。研究结果显示,经激光刻蚀处理的壁面亲油性大幅提升,使得附壁液膜铺展面积增大,铺展厚度减小;而经低表面能修饰的化学刻蚀壁面疏油特性显著增强,削弱了液滴铺展能力,从而缩小了铺展面积,增加了铺展厚度。此外,在相同实验条件下,激光刻蚀壁面的液膜蒸发速率最快,而光滑壁面和低表面能修饰的化学刻蚀壁面的液膜蒸发时间依次递增。本文研究结果可为内燃机燃烧室材料表面优化设计提供关键数据支持。

关键词:车辆工程喷雾湿壁;润湿性;激光诱导荧光;蒸发特性

中图分类号:TK421 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)07-2048-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241367

Effect of wall wettability on spreading and evaporation characteristics of attached fuel film

XUAN Rong^{1,2}, GUO Liang^{1,2}, LI De-gang^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, WANG Hui³, HAN Jia-ming⁴

(1. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China; 4. FAW Jiefang Commercial Vehicle Development Institute, Changchun 130011, China)

Abstract: To understand the mechanism of the different wettability of surfaces on the spreading behavior and evaporation process of attached oil film, which effectively further improves the problem of wet wall of fuel spray in compression-ignition engines, various wettability experimental surfaces were prepared using a surface wettability modification technique, and the spreading behavior and evaporation process of the oil film of n-butanol droplets after impacting the wall were investigated using laser-induced fluorescence. The results showed that the hydrophilicity of the laser-etched surface was substantially increased, resulting in an increase in the spreading area and a decrease in the spreading thickness of the attached oil film. While the chemically etched surface with low surface energy modification significantly enhances the hydrophobicity

收稿日期: 2024-12-27.

基金项目: 吉林省科技发展规划国际合作项目(20240402082GH); 国家自然科学基金项目(52202470).

作者简介: 宣熔(1996-), 男, 博士研究生. 研究方向: 能源多元化与新型动力总成. E-mail: 727074917@qq.com

通信作者: 王会(1978-), 女, 副教授, 硕士. 研究方向: 车用动力系统优化. E-mail: 13811099788@163.com

properties. Which weakens the droplet spreading ability, thus reducing the spreading area and increasing the spreading thickness. In addition, under the same experimental conditions, the oil film evaporation rate was the fastest on the laser-etched surface, while the evaporation time on the smooth surface and the chemically etched surface was increased sequentially. The present study results support critical data for the optimal design of combustion chamber material surfaces for internal combustion engines.

Key words: vehicle engineering spray wall wetting; wettability; laser-induced fluorescence; evaporation characteristic

0 引言

在全球气候变暖的背景下,降低碳排放已成为世界各国竭力奋进的关键方向和核心焦点。鉴于当下新能源技术尚未全面成熟,内燃机在特定工况下仍具有难以替代的优势,加之大量现有基于石化燃料的动力设备难以迅速替换的形势,我国工信部提出“在大力发展新能源汽车的同时,同步推动内燃机技术发展”以加速能源多元化发展的进程^[1-3]。而燃料喷射系统作为内燃机的核心组件,其工作状态直接关系到内燃机的燃烧效率和排放表现。其中,燃料经喷油器喷入燃烧室的过程中,会与上行的活塞及缸壁发生碰撞,进而导致燃油附着在金属壁面,造成燃油湿壁现象^[4,5]。因此,需要针对燃油撞壁现象开展改善措施研究。

燃油湿壁现象对发动机的燃烧和排放均具有重要影响,是均质/预混压燃发动机燃烧边界可控性和燃烧稳定性进一步提升的制约因素之一^[6],同时也是导致发动机HC、CO排放升高的主要原因^[7]。众多学者先后提出了多种改善策略。从燃烧室设计角度依次提出了TRB燃烧系统^[8]、OSKA燃烧系统^[9]、DSCS双卷流燃烧系统^[10]、BUMP燃烧系统^[11]和TR燃烧系统^[12]等。Du等^[13]分析了喷射压力对撞壁柴油喷雾的点火和燃烧特性的影响,发现在高速、大负载条件下,更高的燃油喷射压力是更好的选择。Jubin等^[14]研究表明,燃油多次喷射策略可有效改善燃油湿壁现象,同时延长两次喷射的间隔可以进一步降低撞壁机率。Kim等^[15]也发现,较长的喷射持续时间会增加附壁油膜的厚度与面积。此外,Luo等^[16]探究了壁面温度对液滴撞壁后黏附的影响,结果表明,在室温条件下,燃料附着面积和质量随喷射压力的增大而增加,当提高壁面温度后,附着在壁面上的燃料面积和质量降低。由于内燃机的工作过程是瞬变且复杂的,现有改善措施仅能在

某些特定工况下缓解,但未从根本上解决燃油湿壁问题。

壁面润湿性作为液体与壁面相互作用的关键影响因素,近年来受到了广泛关注。Wang^[17]、Liu^[18]和Xu等^[19]研究成果均证实壁面润湿性的改变可对液滴的铺展和蒸发产生显著影响。然而,上述研究主要集中在水相等常见液体体系,尚未拓展至发动机应用领域。同时,Guo^[20]和Chen^[21]等研究指出,燃油湿壁现象常发生于壁面温度较低的工况(发动机冷启动和怠速工况)。此外,众多研究^[22-24]表明,正丁醇燃料凭借其较高热值、自携氧特性及优异稳定性等特点,有望成为发动理想替代燃料之一。然而,正丁醇参与缸内燃烧时湿壁现象难以避免,而针对正丁醇燃油湿壁现象改善策略的研究却相对匮乏。为此,本研究基于仿生学理念,通过对金属壁面微观结构重构,实现其润湿性的有效改进。采用激光诱导荧光技术,定量化地研究了壁面润湿性对正丁醇附壁液膜厚度和面积的影响规律,并分析了较低壁面温度下液滴撞壁后液膜的铺展及蒸发过程,从而揭示了壁面润湿性对附壁液膜扩散及蒸发特性的内在作用机制,为发动机燃油湿壁问题的解决提供理论基础与技术支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验壁面及试验设备

本研究以铝合金6061(下称铝合金)和黄铜合金H59-1(下称黄铜合金)作为基材,使用激光刻蚀和化学刻蚀方法构建了多种壁面微观结构,并结合表面改性手段制备出了3种具备各异润湿特性的试验壁面。本试验使用的铝合金和黄铜合金成分含量如表1、表2所示。

本研究中金属表面的制备及微观形貌测量和试验测试所用的主要仪器设备如表3所示。

为消除金属壁面的氧化层及金属碎屑的影

表 1 铝合金 6061 的成分

Table 1 Composition of aluminum alloy 6061

	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Si	Fe	Al
	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.25	0.04~0.35	0.15	0.4~0.8	0.7	余量

表 2 铜合金 H59-1 的成分

Table 2 Composition of brass alloy H59-1

	Cu	Pb	B	Al	Fe	Sb	Bi	Zn
	57.0~60.0	0.8~1.9	≤0.02	≤0.2	≤0.5	≤0.01	≤0.003	余量

表 3 主要设备与仪器

Table 3 Main equipments and instruments

仪器	型号	生产厂家
激光刻蚀器	JW-F20GX	经纬激光设备有限公司
接触角测量仪	TL100	Biolin
扫描电子显微镜	EVO-18	Zeiss
冷场发射扫描电子显微镜	JSM-6700F	Japan Electronics Co., Ltd
Nd:YAG 激光器	LS-2137M	LOTIS LH
高速相机	V611	AMETEK

响,在试验壁面制备前对所有壁面依次进行机械研磨及超声波清洗等预处理。随后,使用粗糙度测量仪在壁面不同位置进行多次测量,保证壁面粗糙度小于 0.5 μm。预处理后分别对壁面进行如下处理以实现润湿性改性:①光滑壁面:将预处理过的壁面依次使用丙醇、无水乙醇、去离子水超声波清洗 15 min,吹干备用。②激光刻蚀壁面:采用激光刻蚀仪处理,刻蚀加工完成后,分别使用去离子水、无水乙醇进行超声波清洗。③低表面能修饰的化学刻蚀壁面:化学试剂浸泡刻蚀,并进行低表面能修饰。具体制备方法 & 壁面在试验中的编号如表 4 所示。

表 4 金属壁面制备方法

Table 4 Fabrication methods of the metal surfaces

壁面名称	制备方法	试验中各表面编号
光滑处理	预处理(机械研磨+超声波清洗)	铜:CSS;铝:ASS
激光刻蚀	预处理+激光刻蚀(0.1 mm 扫描间距、100 mm/s 扫描速度)	铜:CLS;铝:ALS
化学刻蚀	预处理+化学刻蚀(盐酸/10 分钟+沸水/40 min+全氟辛酸乙醇溶液/24 h)	铜:CCS;铝:ACS

为获取不同方法制备的金属壁面微观形貌,使用扫描电子显微镜和冷场发射扫描电子显微镜对试验表面进行测量与记录,获取试验表面微观形貌如图 1 所示。从图 1 中可以看到,经过激光刻蚀后的壁面由微米级的凸台和凹槽形成规则的正交网格结构;而经低表面能修饰的化学刻蚀壁面

则由微米级的不规则凸包与凹坑构成,并且在微米级结构上还覆盖一层纳米级针状结构。上述微观结构的差异对壁面的润湿性产生重要影响,为后续深入探究壁面与液体之间的相互作用机制提供了关键结构基础信息。

润湿性作为衡量液体在固体表面铺展能力的关键特性,通常以接触角表征。接触角是指在气液固三相交界处,气液界面切线与固液界面所形成的夹角。本研究中,采用接触角测量仪(TL100, Biolin Scientific Co. Ltd.)在 293 K 温度下对正丁醇液滴在制备的表面上的静态接触角进行测量。正丁醇液滴在两种光滑表面(ASS 和 CSS)上的静态接触角分别为 10.8°和 12.3°,在激光刻蚀表面(ALS 和 CLS)上的静态接触角分别小于 2°和 2.3°,而在低表面能修饰过的化学刻蚀表面(ACS 和 CCS)上的静态接触角分别为 120.4°和 118°。分析获取接触角数据可知,液滴在光滑壁面呈现相对平衡的润湿状态,即液滴既不会完全铺展也不会呈球状聚拢在壁面上;在激光刻蚀壁面,由于特殊的表面微观结构,液滴能够近乎完全铺展,呈现出亲油特性;而在低表面能修饰过的化学刻蚀壁面上,液滴倾向近似球状形态聚集在壁面,呈现出疏油特性。润湿性的差异将影响液体在不同壁面上的行为表现,如铺展行为、蒸发速率以及与壁面的相互作用机制等。

试验所用燃料-正丁醇的理化性质如表 5 所示。为分析壁面润湿性对液膜铺展的影响,试验设置正丁醇液滴以恒定高度撞击不同润湿性但温度保持一致的表面,并记录附壁液膜铺展过程中的面积和厚度变化情况。此外,通过提高壁面温度,进一步研究壁面温度及壁面基材种类对液滴蒸发特性的影响。试验过程中,液滴体积精确控制在 5 μL,误差小于 ±1%。调整微量进样器出口,确保液滴撞击壁面距离维持在 100 mm,此时液滴下落速度为 0.44 m/s,韦伯数约为 10.27。将正丁醇燃料刚刚脱离微量进样器出口定义为 0 时刻,以此作为后续各项数据采集与分析的时间基准。

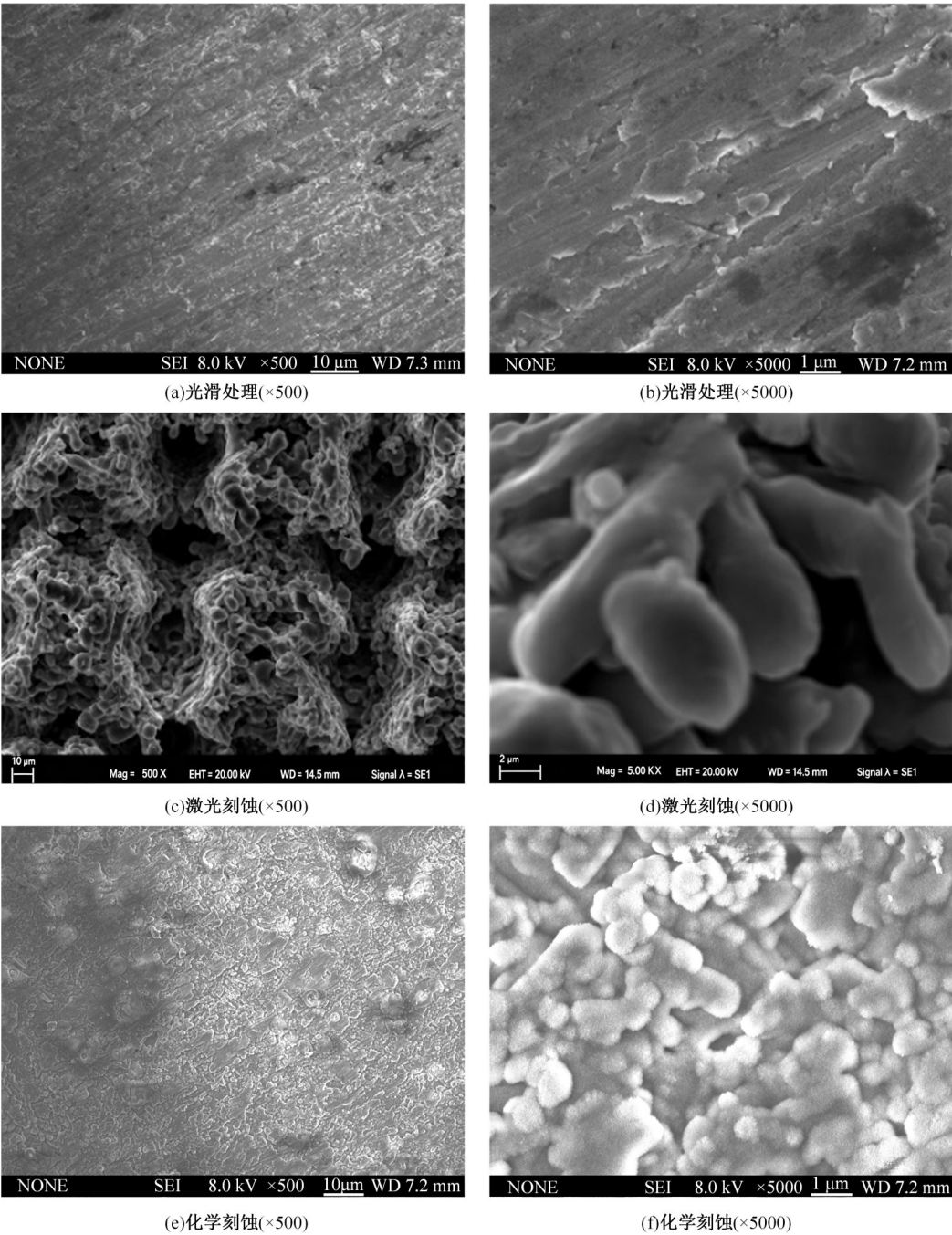


图 1 各基材壁面微观形貌

Fig. 1 Micromorphology of the substrate surfaces

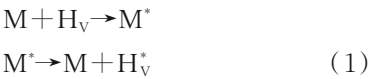
表 5 正丁醇理化特性

Table 5 Physicochemical properties of n-butanol	
参数	正丁醇
密度/(kg·m ⁻¹)	810.9
黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	2.63
表面张力/(mN·m ⁻¹)	25.9
沸点/K	390.4

1.2 激光诱导荧光测试理论

激光诱导荧光法(Laser induced fluorescence,

LIF)的原理是激光光子的能量(表征为波长)符合分子或基团特定 2 个能级之间的能级间隔时,电子从基态跃迁至激发态并在一段时间返回基态。在能量释放路径中,从激发态直接返回基态的自发辐射被称为荧光。上述过程可以使用公式表示:



式中:M为基态物质分子;H_v为吸收的能量;M^{*}为

激发态物质分子; H_v^* 为荧光光子的能量。

荧光光谱与激光光源波长无关, 仅与荧光物质本身的能级结构有关, 因此荧光强度与荧光关系可表示为:

$$I = \varphi I_0 (1 - 10^{-\varepsilon Ch}) \quad (2)$$

式中: I 为荧光信号强度; φ 为荧光量子效率; I_0 为入射光光强; ε 为摩尔吸收系数; C 为所选定荧光剂的浓度; h 为待测定的液膜厚度。

由于荧光剂浓度与液膜厚度的乘积非常小, 式(2)可简化为:

$$I = \varphi I_0 \varepsilon h \quad (3)$$

试验中荧光剂浓度较低, 可将 $\varphi I_0 \varepsilon$ 看作常数 k , 式(3)可以简化为:

$$I = kh \quad (4)$$

荧光强度 I 与液膜厚度 h 成线性关系, k 在试

验条件不变的情况下恒定, 这是激光诱导荧光法测量液膜蒸发特性的理论依据。本研究中燃油撞壁后形成液膜的厚度、质量和面积均基于这一原理进行量化。

1.3 激光诱导荧光测试平台搭建

基于激光诱导荧光技术, 使用片光激光激发液膜中的示踪剂, 从而计算液膜的厚度质量等数值。图2展示了本研究所搭建的激光诱导荧光实验平台示意图, 主要由激光器、液滴滴定系统、温度控制系统和图像采集系统组成。其中, 液滴滴定系统位于被测金属壁面上方, 其核心部件包括微量注射泵和微量进样器。微量注射泵的步进电机步长固定, 以确保每次试验液滴的体积均一性。壁面的温度控制系统由筒式加热器、K型热电偶、继电器和带有PID调节功能的温度控制器组成。

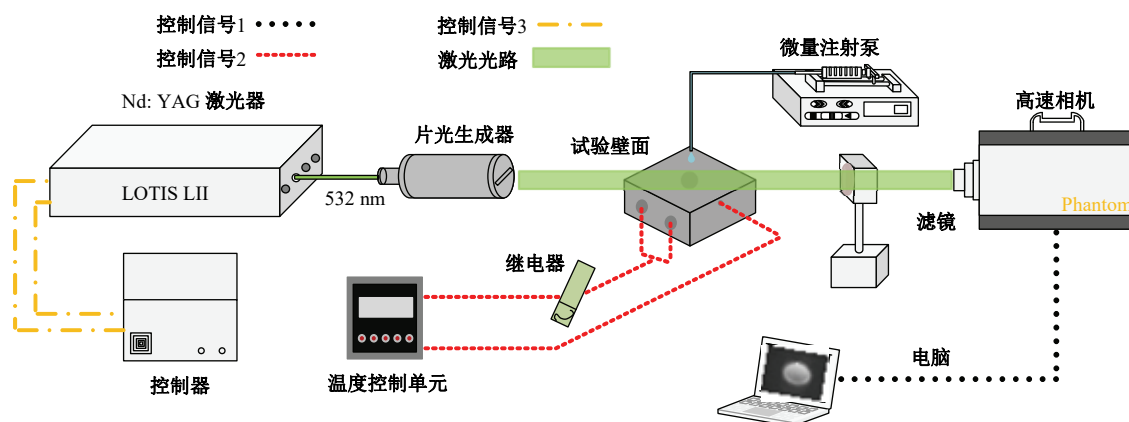


图2 激光诱导荧光测试平台示意图

Fig. 2 Schematic of laser-induced fluorescence platform

在试验中, 通过将被测壁面下方 1 mm 位置的热电偶所测得的实时壁面温度反馈给温度控制器, 进而对基材加热孔内的两根筒式加热器进行调节, 实现对试验壁面温度的精确控制(试验壁面结构如图3所示)。热电偶的采样频率设定为 10 Hz。借助片光生成器将 Nd: YAG 激光器发出的 532 nm 激光均匀扩散到被测量液膜上, 有效消除因激光分布不均造成测量误差。同时, 为滤除杂光干扰并实现对荧光信号的高效捕捉, 在高速相机前端增加一个中心波长为 532 nm 的带通滤波片。

测试过程选择罗丹明 B 作为荧光剂。经混合制备的正丁醇-罗丹明 B 溶液最大吸收波长为 554 nm, 最大荧光波长为 610 nm, 激光峰值波长为 610 nm, 调谐为 578~610 nm。液膜的形态发展过程使用高速相机 Phantom V611 进行记录。

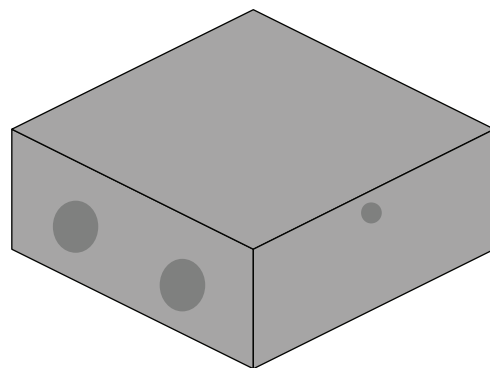


图3 试验壁面结构示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental surface structure

1.4 荧光强度的标定

为了提高附壁液膜厚度测量精度, 针对荧光强度与液膜厚度的相关性进行标定。基于石英玻璃板和塞尺搭建的标定平台, 将添加荧光剂的试

验燃油注入由不同塞尺厚度限定的两层石英玻璃间隙内。在激光照射下使用高速相机采集图像,获得液膜厚度与图像结果灰度值的标定曲线。本研究采用的附壁液膜厚度标定系统和348 K壁面温度下的标定曲线分别如图4和图5所示。

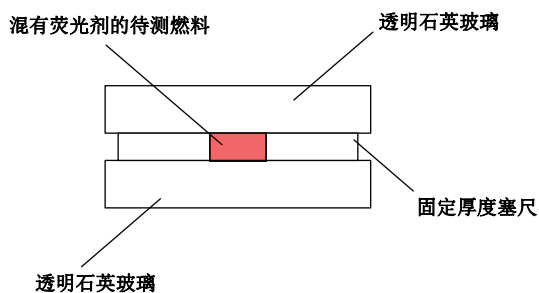


图4 附壁液膜厚度的标定平台示意图

Fig. 4 Schematic of fuel thickness for LIF calibration

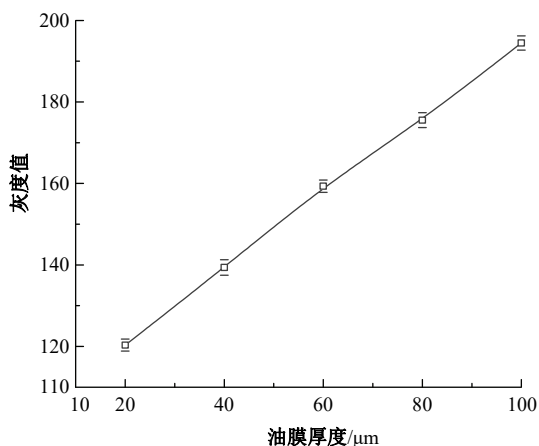


图5 348 K壁面温度下图像灰度值与液膜厚度标定曲线

Fig. 5 Calibration curves of gray value and fuel film thickness under wall temperature of 348 K

对于试验结果的处理,本研究通过自主开发的图像处理代码,分别对所获得的图像进行读取、灰度处理、背景消除、滤波、降噪、边缘检测和云图计算,实现了对附壁液膜厚度量化结果的提取。为确保测量精度,所有试验均在相同条件下重复5次。试验图像处理流程及主要步骤如图6所示。

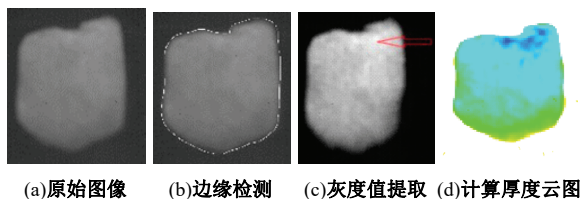


图6 图像处理流程图

Fig. 6 Schematic diagram of the image processing flow

对于附壁液膜面积的计算,本研究通过拍摄一个直径为4 mm的标定球,构建了像素点与面积的映射关系。使用图像处理程序计算标定球像

素点的总量,再除以标定球面积,即得到单个像素点对应的实际面积。

每次试验对每个工况点进行10次以上拍摄,获取至少5张以上清晰、稳定且液膜位置居中的有效试验图像,根据质量计算公式基于处理后的试验图像,提取了液膜质量的量化结果,计算公式为:

$$m = \rho A_{\text{pixel}} = \sum_{i=1}^N h_i \quad (5)$$

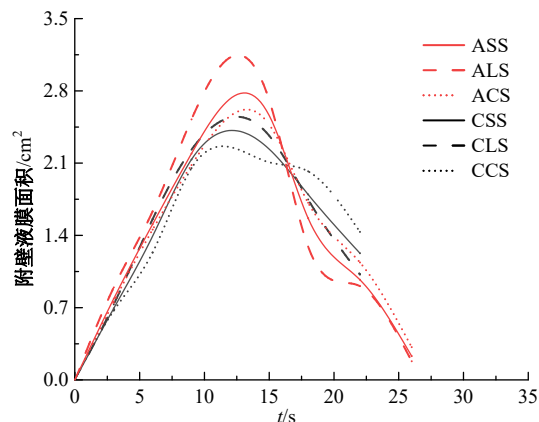
式中: m 为附壁液膜质量; ρ 为燃料密度; A_{pixel} 为单个像素点的面积; h_i 为附壁液膜不同位置处的液膜厚度; N 为像素点数量。

2 结果与讨论

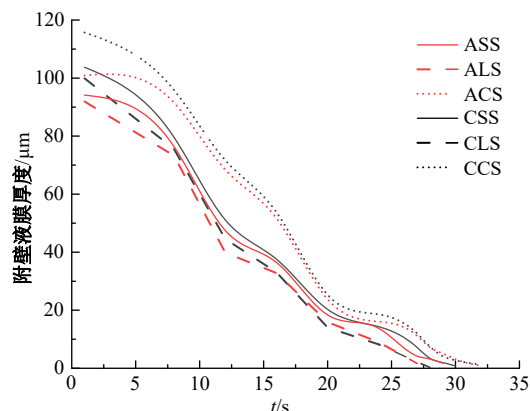
2.1 壁面润湿性对附壁液膜铺展特性的影响

为量化壁面特性对附壁液膜铺展面积和厚度的影响,针对正丁醇液滴撞击不同润湿性壁面后的铺展面积和铺展厚度进行了测量和对比分析,结果如图7所示(彩图见电子版,后图同)。

从图7中可以看出液滴浸润壁面至蒸发完毕



(a)不同润湿性壁面上撞壁后附壁液膜面积变化



(b)不同润湿性壁面上撞壁后附壁液膜厚度变化

图7 壁面润湿性对附壁液膜铺展铺展特性的影响

Fig. 7 Effect of wall wettability on the spreading characteristics of attached fuel films

可划分为两个阶段;第1阶段为液滴撞壁至铺展到最大附壁液膜面积;第2阶段为附壁液膜从最大面积状态蒸发至完全消失。具体而言,从图7(a)中可以发现,液滴在激光刻蚀壁面上的铺展面积最大,在低表面能修饰过的化学刻蚀壁面铺展面积最小,而在光滑壁面铺展面积处于两种壁面中间。这主要归因于,壁面微观结构及表面自由能差异导致壁面润湿性不同。在激光刻蚀过程中,由于激光束能量较高,刻蚀时会引发激光烧蚀现象,使得激光束扫过的地方发生熔融,同时熔融物质溅射到的地方会诱发二次纹理结构和微纳米级团簇状结构的形成。因此,在激光刻蚀过的壁面可以观察到微米级凸包和凹槽级团簇状结构组成有序的矩阵式流道。这种独特的凸包和凹槽的结构显著增强了壁面的亲油性。当液滴撞击经激光刻蚀过的金属壁面时,液滴经流道分流加快液滴铺展速率,使得迅速向四周铺展,在3种试验表面中最先达到最大铺展面积。经过化学刻蚀的表面,可以看到壁面出现凸台和凹坑的结构,同时在微观结构上还覆盖有一层纳米级的针状结构,两者相互交织共同构建成二级复合微观结构,增加了材料表面捕捉空气的能力。此外,使用全氟辛酸乙醇溶液修饰金属表面,能够有效降低表面自由能,进而显著提高壁面的疏油性。当液滴撞击经表面能修饰的化学刻蚀壁面时,壁面的凸台与凹坑显著增强了表面的粗糙度,抑制了液滴铺展,从而获得了最小铺展面积。

从图7(b)中可观察到,液滴在低表面能修饰过的化学刻蚀表面液膜厚度最大,光滑表面次之,而在激光刻蚀壁面液膜厚度最小。这与图7(a)所示情况相对应。在激光刻蚀壁面上,撞击壁面后的正丁醇液滴经微纳米流道分流,液滴向四周铺展,获得了最小的液膜厚度。而液滴撞击经低表面能修饰的化学刻蚀壁面时,由于更多的动能被用于克服表面张力,即减少了液滴在铺展过程中的动能。意味着液滴在低表面能壁面更难铺展,更易于保持近似球形的形状,故在低表面能修饰的化学刻蚀壁面,液膜厚度最大。

值得注意的是,正丁醇液滴撞击相同温度且壁面处理方法一致但基材不同的壁面时,附壁液膜的动态变化存在差异。在6种壁面上,正丁醇液滴撞壁后的最大液膜面积和16 s时刻的液膜厚度如表6所示。

表6 最大液膜面积和第16 s液膜厚度

Table 6 Maximum oil film area and oil film thickness at 16th second

参数	ALS	ASS	ACS	CLS	CSS	CCS
最大面积/cm ²	2.72	2.52	2.43	2.46	2.32	2.08
第16 s液膜厚度/μm	32	38	51	36	40	54

对于光滑壁面和激光刻蚀的亲油壁面,铝合金壁面的静态接触角均小于铜合金壁面,这表明铝合金壁面具有更高程度的亲油性。当液滴撞击壁面后,附壁液膜与铝合金的亲油壁面之间相互作用力相较于铜合金表面更强,更易于在壁面的铺展。因此,液滴在铝合金亲油壁面的铺展系数大于铜合金亲油壁面,导致正丁醇液滴撞击铝合金壁面后,在壁面形成的液膜面积更大、厚度更小。

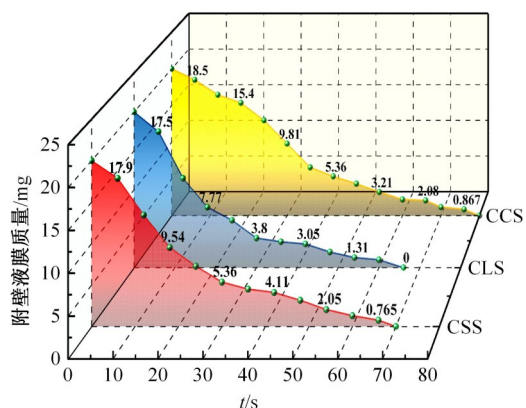
对于化学刻蚀并经低表面能修饰的疏油壁面,一方面,壁面微观结构截留的空气减小了液滴与壁面的接触面积;另一方面,若空气因液滴撞壁而被密封在微观结构中,将会阻止液滴的进一步铺展,从宏观上看,不仅提高了壁面的疏油性,同时也削弱了液滴的铺展能力。然而,需要注意的是,对于疏油壁面而言,由于液滴撞击壁面的过程涉及多种作用力,这些作用力会对液滴的铺展面积产生复杂的影响,所以,在疏油壁面上,液滴的铺展特性与静态接触角的大小之间并不存在严格的一一对应关系。

2.2 壁面润湿性对附壁液膜蒸发特性的影响

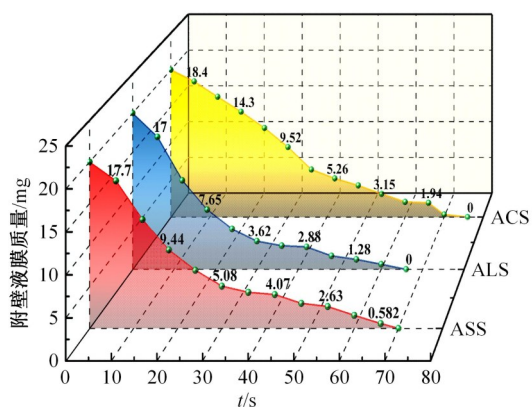
在发动机内部,燃油的蒸发特性会直接影响燃料的气化和燃烧过程。良好的蒸发特性有助于燃料迅速气化、促进混合气的形成,进而提高发动机燃烧的充分性和燃油经济性,降低不完全燃烧产物排放,达到高效清洁燃烧的目标。

为明晰壁面润湿性对附壁液膜蒸发特性的影响,基于激光诱导荧光燃油撞壁试验平台,选取323 K作为基准温度,对正丁醇在3种具有不同润湿性的壁面上的蒸发过程进行了试验研究。图8反映了正丁醇液滴撞击温度为323 K且具有不同润湿性的铜、铝合金壁面后,附壁液膜质量随时间的变化规律。

从图8中可以明显看出,附壁液膜在激光刻蚀壁面最先蒸发完毕,其次是光滑处理壁面,而在低表面能修饰的化学刻蚀壁面上的液膜蒸发耗时最长。上述结果归因于壁面润湿性的差异。微纳



(a) 壁面润湿性对铜合金表面附壁液膜质量变化的影响



(b) 壁面润湿性对铝合金表面附壁液膜质量变化的影响

图 8 壁面润湿性对附壁液膜质量变化的影响

Fig. 8 Effect of wall wettability on variation in the quality of attached fuel films

米流道的导流作用,促使液滴在撞壁后铺展,增大了蒸发面积,进而提高了液膜的蒸发速率。在相同时刻下附壁液膜质量小于其他两种类型的表面,且液膜质量下降速度随时间的延长而更加明

显。与激光刻蚀表面不同,经过低表面能修饰的化学刻蚀表面呈现明显疏油性,在正丁醇液滴撞击壁面后,铺展面积在 3 种不同表面中最小,而厚度最大。在相同的热通量条件下,液滴在疏油壁面铺展面积更小,导致总热交换量减小。同时,液滴在疏油壁面液膜厚度的增加会显著增加液膜导热热阻,从而抑制了蒸发过程,减缓了蒸发速率。

对比图 8(a)(b)可以发现,在相同时刻,铜合金壁面的附壁液膜质量均大于铝合金壁面,表明液滴在铜合金表面的蒸发速度略慢。

2.3 壁面温度对附壁液膜蒸发特性的影响

为进一步了解本研究所用的较低壁面温度对燃料液滴蒸发特性的影响,选取经低表面能修饰的化学刻蚀表面,在维持壁面润湿性不变的前提下探究 348 K、373 K 和 398 K 温度下附壁液膜的蒸发特性。图 9 展示了在壁面温度为 398 K 时,正丁醇燃料液滴撞击 ACS 和 CCS 壁面的液膜厚度及蒸发过程可视化结果。

从图 9 中可以观察到,正丁醇撞击铝合金壁面和铜合金壁面后,其表面均在第 3 s 起生成大量气泡,并持续至蒸发完毕。这是因为,壁面温度 398 K 已超过正丁醇沸点,液滴进入过渡沸腾阶段,固液接触面会迅速且剧烈产生大量微小气泡并快速成长,随后大量气泡浮向液滴顶部并发生破裂。在此过程中,气泡上浮行为及上浮过程中气泡聚合引发液滴内部流动状态改变,促使液滴内部形成复杂流场,导致正丁醇液滴在金属壁面上呈现剧烈波动状态,即附壁液膜厚度分布不均匀。

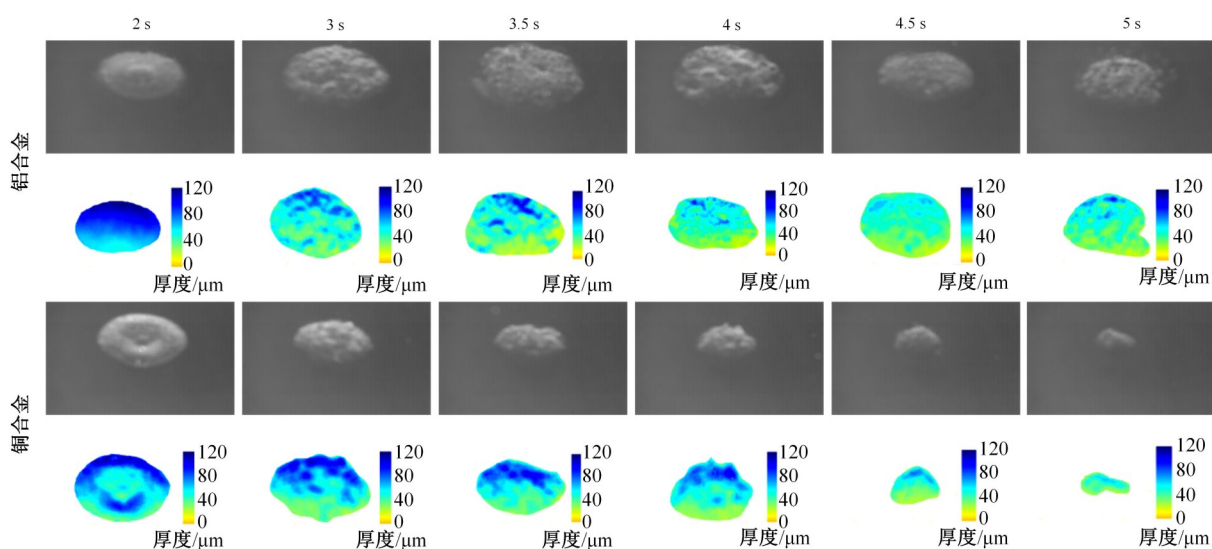


图 9 正丁醇撞击 398 K 壁面的附壁液膜蒸发过程

Fig.9 Evaporation process of attached fuel film on surfaces by n-butanol droplet impingement at temperature of 398 K

图 10 和图 11 分别为不同壁面温度下,在铜合金和铝合金表面经化学刻蚀的壁面上正丁醇附壁液膜质量变化规律。

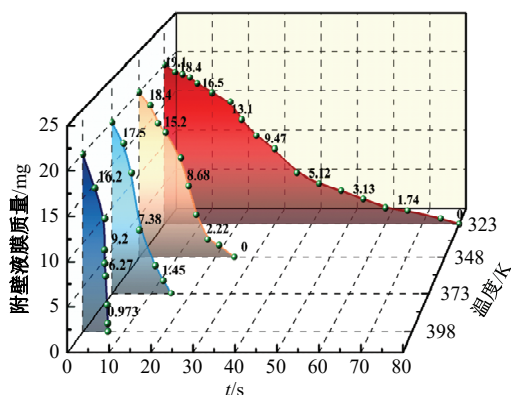


图 10 不同壁面温度下 CCS 附壁液膜质量变化

Fig. 10 Variation in the quality of attached fuel film on CCS at different wall temperatures

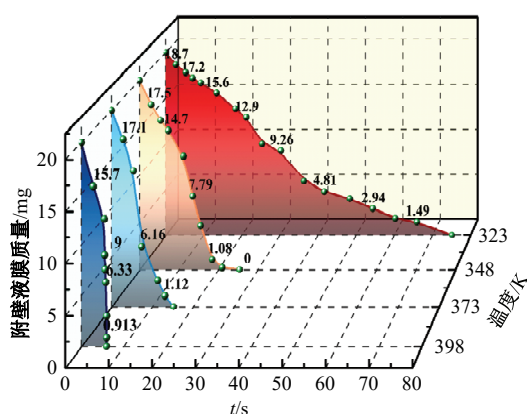


图 11 不同壁面温度下 ACS 附壁液膜质量变化

Fig. 11 Variation in the quality of attached fuel film on ACS at different wall temperatures

随着两种基材壁面温度的逐渐升高,附壁液膜质量减小的速度明显加快。这主要是由于壁面温度的升高增加了液滴与壁面之间的温度差,提高了传热系数,进而增加了单位面积的热通量。

值得注意的是,在壁面温度为 323 K、348 K 和 373 K 时,附壁液膜质量的降低速率随温度的升高而缓慢增加,附壁液膜质量变化曲线呈坡状减小。然而,当壁面温度达到 398 K 时,附壁液膜质量下降速率突然显著提升,附壁液膜质量呈断崖式下降。这主要是因为,液滴内部换热形式不同所致。壁面温度为 323 K、348 K 和 373 K 时,低于正丁醇沸点 390 K,此时正丁醇液滴处于自然对流换热。在自然对流换热状态下,蒸发速率主要依赖于液滴内部温度梯度导致密度变化而引起的流动。当温度梯度较小时,难以形成强烈的对流,限

制了热量传递的速率和传热效率。尽管增加固液之间的温度差,能够提高液滴蒸发速率,但依然无法实现换热状态的转换,故在壁面温度分别为 373 K、348 K 和 323 K 时,其蒸发速率依次递减。当壁面温度提高到 398 K 时,液滴撞壁后进入核态沸腾阶段,即蒸发速率显著提高。一方面,在核态沸腾换热状态下,液滴撞击壁面后会生成大量气泡。气泡的剧烈动态行为(生成、膨胀、脱离等)会显著增强传热效率,导致蒸发速率的骤增。同时,气泡的动态行为会在气泡内部形成微尺度的湍流,从而加速液体分子向表面的迁移。另一方面,在 398 K 时,热流密度可能突破临界热流密度,即从核态沸腾向过度沸腾转变,导致热流密度和蒸发速率同时激增。此外,随着温度的升高,液滴在壁面上的铺展更加充分,增大了固液接触面积,从而进一步提高蒸发速率。因此,在壁面温度 398 K 时,附壁液膜质量大幅下降。

值得注意的是,在相同壁面温度的相同时刻下,液膜在铝表面的蒸发质量略小于铜表面。主要是因为:一方面,铝的热容量更大,约为铜的 2.3 倍,即铝的储热能力更强,在相同加热温度条件下,铝与铜均与周围环境进行热交换,由于铝表面具有较大热容量,可以更高效地将热量传递至液膜;另一方面,虽然铜的导热性更好,但其热扩率也更大,当液滴撞击金属壁面后,铜表面虽能快速将热量传递至液滴,然而因热扩散率较大,热量会与周围环境换热,使得液滴底部温度稳定性低于铝材料壁面。

3 结 论

(1)激光刻蚀在金属壁面上构建的凸台与凹槽组成的微纳米尺度正交流道可有效增加壁面亲油性。在 293 K 温度条件下,正丁醇液滴撞击经激光刻蚀处理的铝合金与铜合金基材表面时,接触角均小于 2.5° ,呈现出为超亲油特性。而正丁醇液滴撞击经表面能修饰的化学刻蚀处理的铝合金与铜合金基材表面,接触角分别为 120.4° 和 118° ,呈现较强的疏油性。

(2)当壁面改性为亲油壁面时,微流道结构展现出显著优势。在其作用下,液膜能够迅速向四周均匀分流,进而实现了铺展面积的最大化与铺展厚度的最小化。较薄的液膜厚度有效缩短了液滴与外界环境的传质距离,极大地加快了蒸发

速率。在实际发动机应用中,这种优异的蒸发特性促使燃料迅速气化,极大地促进了混合气的均匀形成,显著提升了发动机燃烧的充分程度。这不仅提高了燃油经济性,还大幅降低了因不完全燃烧产生的污染物排放。

参考文献:

- [1] 杨华磊, 杨敏. 碳达峰碳中和: 中国式现代化的能源转型之路[J]. 经济问题, 2024(3): 1-7.
Yang Hua-lei, Yang Min. Peak carbon emission and carbon neutrality: China's path to energy transition in modernization[J]. On Economic Problems, 2024(3): 1-7.
- [2] Olabi A G, Elsaid K, Obaideen K, et al. Renewable energy systems: comparisons, challenges and barriers, sustainability indicators, and the contribution to UN sustainable development goals[J]. International Journal of Thermofluids, 2023, 20: 100498.
- [3] WU G, Zeng M, Peng L, et al. China's new energy development: Status, constraints and reforms[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 885-896.
- [4] 王翔翔. 柴油机早喷“湿壁”过程的实验研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2014.
Wang Xiang-xiang. Experimental study of the diesel spray impingement on liquid film[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2014.
- [5] 陈艳玲, 郭亮, 王会, 等. 不同壁面特性下燃料喷雾的撞壁过程[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 55(10): 3089-3099.
Chen Yan-ling, Guo Liang, Wang Hui, et al. Fuel spray-wall impingement processes under different surface properties[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2025, 55(10): 3089-3099.
- [6] 刘军, 王意宝, 许朝阳, 等. 湿壁氛围甲烷预混火焰传播的可视化试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(2): 209-219.
Liu Jun, Wang Yi-bao, Xu Zhao-yang, et al. Visualized experimental research on the propagation of methane premixed flame in wet wall atmosphere[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2023, 29(2): 209-219.
- [7] 梁兴雨, 李畅, 王昆, 等. 壁面油膜对甲烷预混气燃烧特性和排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2021, 27(3): 241-248.
- Liang Xing-yu, Li Chang, Wang Kun, et al. Effects of wall film on combustion characteristics and emissions of premixed methane flame[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2021, 27(3): 241-248.
- [8] Sakata I, Ishisaka K, Yanagihara H, et al. Development of TOYOTA reflex burn (TRB) system in DI diesel[C]//SAE Paper, 900658.
- [9] Kato S, Onishi S. New mixture formation technology of direct fuel injection stratified combustion SI engine (OSKA)[C]//SAE Paper, 871689.
- [10] Li X, Sun Z, Du W, et al. Research and development of double swirl combustion system for a DI diesel engine[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182(8): 1029-1049.
- [11] 余皎. 一种新概念(BUMP)燃烧室内准均质燃油混合气快速形成机理的研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2003.
Yu Jiao. A study on rapid quasi-homogeneous diesel fuel-air mixture forming processing a new conceptual (BUMP) combustion chamber[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2003.
- [12] 何旭. 基于喷雾撞壁的TR燃烧系统机理研究[D]. 大连: 大连理工大学能源与动力学院, 2006.
He Xu. Investigation on the mechanism of diesel TR combustion system based spray impingement[D]. Dalian: School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, 2006.
- [13] Du W, Zhang Q, Zhang Z, et al. Effects of injection pressure on ignition and combustion characteristics of impinging diesel spray[J]. Applied Energy, 2018, 226: 1163-1168.
- [14] Jubin V J, Ramesh A. Effect of multiple injections on spray wall impingement in a small gasoline direct-injection engine—a CFD Analysis[C]//12th Asia-Pacific Conference on Combustion, Fukuoka, Japan, 2019: No. 1.
- [15] Kim N, Vuilleumier D, Sjöberg M. Effects of injection timing and duration on fuel-spray collapse and wall-wetting in a stratified charge SI engine[C]//SAE Paper, 2021-01-0544.
- [16] Luo H, Nishida K, Uchitomi S, et al. Effect of temperature on fuel adhesion under spray-wall impingement condition[J]. Fuel, 2018, 234: 56-65.
- [17] Wang K, Ma X, Chen F, et al. Effect of a superhy-

- drophobic surface structure on droplet jumping velocity[J]. *Langmuir*, 2021, 37(5): 1779–1787.
- [18] Liu C, Zhao M, Zheng Y, et al. Enhancement and guidance of coalescence-induced jumping of droplets on superhydrophobic surfaces with a U-groove[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(27): 32542–32554.
- [19] Xu N, Ji T, Liu Z, et al. Numerical simulation of single droplet, double droplets and hollow droplet impact behaviors on walls with different temperatures and roughness levels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 210: No. 109612.
- [20] Guo L, Chen Y, Cai N, et al. Dynamic behaviors of fuel droplets impacting on the wall surfaces with different wettability and temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 212: No. 118536.
- [21] Chen Y, Guo L, SuN W, et al. Molecular dynamics simulations of wetting behaviors of droplets on surfaces with different rough structures[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2023, 169: No. 104613.
- [22] Lennox S, Lukacs K, Torok A, et al. Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine [J]. *Fuel*, 2013, 107: 409–418.
- [23] Chen Z, Wu Z, Liu J, et al. Combustion and emissions characteristics of high n-butanol/diesel ratio blend in a heavy-duty diesel engine and EGR impact [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78: 787–795.
- [24] Mack J H, Schuler D, Butt R H, et al. Experimental investigation of butanol isomer combustion in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines [J]. *Applied Energy*, 2016, 165: 612–626.