

不同壁面特性下燃料喷雾的撞壁过程

陈艳玲¹, 郭 亮¹, 王 会², 孙万臣¹, 李德刚¹, 宣 熔¹

(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. 北京工业职业技术学院 机电工程学院, 北京 100042)

摘 要: 为了对撞壁喷雾的发展及蒸发过程进行主动控制, 采用不同方法制备了具有不同微观结构和润湿性的金属壁面。基于高速摄影平台对不同壁面润湿性、壁面温度和环境背压下柴油和正丁醇喷雾撞壁后的形态发展过程进行了研究。结果表明: 增加亲油表面的粗糙度可增强表面的亲油性。采用表面能修饰方法可显著减弱表面亲油性。随着表面亲油性的减弱, 燃料喷雾撞壁后的铺展半径和卷吸高度均升高。与柴油液滴相比, 正丁醇液滴对表面的浸润性更强, 导致正丁醇喷雾撞击不同表面后的铺展范围均较小。与正丁醇相比, 壁面温度对柴油喷雾的铺展半径影响较小, 柴油喷雾撞击不同温度壁面后期的铺展半径均高于 40 mm。环境背压的升高对喷雾的扩散有抑制作用。

关键词: 动力机械工程; 喷雾撞壁; 润湿性; 壁面温度; 环境背压; 形态发展

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)10-3089-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231393

Fuel spray-wall impingement processes under different surface properties

CHEN Yan-ling¹, GUO Liang¹, WANG Hui², SUN Wan-chen¹, LI De-gang¹, XUAN Rong¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: To actively control the development and evaporation processes of the wall-impinging sprays, the metal surfaces with different microstructures and wettability were prepared with various methods. The morphological development processes of diesel and n-butanol sprays after hitting the surfaces under different surface wettability, wall temperatures and ambient back pressures were investigated based on a high-speed photography platform. The results show that increasing the roughness of the oleophilic surfaces can enhance the oleophilicity of the surfaces. The oleophilicity of the surfaces can be significantly reduced with the method of surface free energy modification. As the oleophilicity of the surfaces decreases, the spreading radius and the entrainment height of the fuel sprays after hitting the surfaces increase. Compared with diesel droplets, n-butanol droplets have a stronger wetting ability to surfaces, resulting in a smaller

收稿日期: 2023-12-13.

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20220101212JC, 20220101205JC); 吉林大学长沙汽车创新研究院自由探索项目(CAIRIZT20220202).

作者简介: 陈艳玲(1993-), 女, 博士研究生. 研究方向: 内燃机燃料与燃烧优化. E-mail: 1432835155@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

spreading range of n-butanol sprays after hitting different surfaces. Compared to n-butanol, the surface temperature has less influence on the spreading radius of the diesel sprays. The spreading radii of the diesel sprays are higher than 40 mm at the later stage after hitting the walls with different temperatures. The increasing ambient back pressure has an inhibitory effect on the diffusion of the sprays.

Key words: power machinery and engineering; spray-wall impingement; wettability; surface temperature; ambient back pressure; morphological development

0 引言

随着环境和能源问题日益突出,针对内燃机的油耗法规和排放法规越发严格,内燃机的燃烧和排放控制技术得到快速发展。均质压燃、预混压燃、反应可控压燃和低温燃烧等新型燃烧模式可提高内燃机效率及降低排放。均质压燃、预混压燃等预混合压燃燃烧模式常常采用提前喷射、多段喷射、高压喷射等技术来提高雾化质量,易造成喷雾湿壁现象^[1,2]。然而,喷雾湿壁是影响燃烧边界稳定性、燃烧可控性及造成 HC、CO 排放的重要因素。因此,有必要对喷雾湿壁进行有效控制。

许多学者针对喷雾撞壁过程进行了大量的研究。Zhu 等^[3]将激光诱导荧光和粒子成像测速技术联用,指出由于撞壁燃油会产生壁喷旋涡,从而提高了喷雾下游空气卷吸速度,改善喷雾的混合过程。颜杰等^[4]采用背光法研究了柴油喷雾撞击高温壁面的形态特征,分析了喷油压力、背景压力和壁面温度对喷雾铺展半径和卷吸高度的影响。Du 等^[5]使用高速摄影机和纹影测试系统记录了柴油喷雾撞壁前后的液相和气相行为,发现随着喷射压力的升高,喷雾撞壁后液相和气相的扩散速率均加快。Allocca 等^[6]通过纹影法研究了汽油喷雾撞击到不同温度铝平板上的过程,分析了在不同壁面温度条件下气相和液相的形态变化历程。Yeom 等^[7]采用复合激光诱导荧光方法研究了在不同环境气体密度条件下柴油喷雾气相和液相的变化历程,结果表明随着环境气体密度的降低,喷雾径向铺展范围更大。毛立伟等^[8]基于复合激光诱导荧光技术研究了撞壁距离对柴油喷雾撞壁后燃油分布的影响,发现撞壁距离对燃油分布有重要影响。周致富等^[9]通过实验研究了正戊烷、甲醇、甲醇-汽油混合燃料喷雾撞击壁面的瞬态传热过程,发现提高喷油温度可提高蒸发速率,促进燃油雾化,增加喷油压力或缩短喷油距离可

提高液滴撞壁强度,缩短液膜存在时间。撞壁瞬态温度和热流密度的动态变化特征受燃油蒸发性和喷雾条件的影响。正丁醇作为一种有前途的传统燃料的替代燃料,和掺混燃料常用于均质压燃、预混压燃等先进燃烧模式。Yu 等^[10]通过实验研究了在不同环境条件和喷射策略下正丁醇/柴油混合燃料的喷雾撞壁特性,发现撞壁喷雾的半径和高度的变化与撞壁喷雾的质量和动量、喷雾铺展或飞溅阻力以及空气卷吸强度有关。丰雷等^[11]利用高速摄像技术并结合数值模拟方法研究了在不同撞壁距离、喷射压力、环境温度和环压力条件下,燃油喷射和喷雾撞壁后近壁面区域油束形态和发展历程,发现在上述 4 种边界参数中,撞壁距离对撞壁油束发展特征的影响最大。解方喜等^[12]采用数值模拟方法研究了喷射压力对燃油喷雾特性和缸内油气混合过程的影响,发现随着喷射压力的升高,燃油的贯穿距离增加,雾化质量得到改善,且燃油的扩散能力提高,使得燃油的空间分布体积增加。除此之外,也有诸多研究将喷雾撞击壁面后沉积形成的油膜作为研究对象,围绕油膜形成过程的影响因素及油膜的特性进行分析。Liu 等^[13]采用激光诱导荧光方法研究了汽油喷雾撞击加热壁面的油膜特性,发现在不同的表面温度条件下,油膜的形态是不同的。

为了进一步提高内燃机性能,有必要结合仿生学和材料学相关理论实现壁面微结构和润湿性的改变,对喷雾湿壁后燃料与燃烧室壁面之间流固耦合的发展过程进行深入研究,进而对燃料撞壁后的铺展和汽化过程进行主动控制。在自然界中,许多植物叶片表面具有不同的结构,如,凸包、凹坑、网格及条纹等。韩志武等^[14]发现植物叶片表面非光滑单元体的形状和分布规律影响植物表面的润湿性。房岩等^[15]发现蝴蝶翅膀表面具有微米级和纳米级的鳞片结构,具有较强的疏水性,且其润湿性受鳞片结构的影响。弯艳玲等^[16]发现蜻蜓翅膀表面具有疏水性,其疏水性能与体表纳米级的柱状结

构和体表成分有关。随着仿生学及材料学相关理论的发展,不同润湿性表面的制备方法引起了广泛关注。研究发现,改变表面的微结构和化学组成可以制备具有不同润湿性的表面^[17,18]。许多学者通过试验和模拟方法对液滴撞击不同润湿性表面后的形态发展过程及蒸发过程进行了深入研究^[19-21]。然而,关于喷雾撞击不同润湿性表面后的形态发展过程的研究很少。针对内燃机中喷雾湿壁问题,本文采用不同方法实现金属表面结构和润湿性的改变,采用接触角表征表面的润湿性。基于自行开发的高速摄影平台研究了壁面润湿性、壁面温度和环境背压对柴油与正丁醇两种燃料喷雾形态发展过程的影响,为实现撞壁燃料喷雾蒸发过程的主动控制提供理论基础。

1 试验材料及方法

1.1 试验平台及燃料

为了探究刻蚀方法对微观形貌的影响,利用扫描电子显微镜记录采用不同方法制备的金属表

面的微观形貌。燃料液滴在金属表面的接触角的变化过程由 Theta Lite 接触角测量仪记录。试验过程中,采用旋钮式金属滴定管单次滴定 5 μL 的燃料液滴至金属表面。基于自行开发的高速摄影平台记录燃料喷雾形态发展过程,高速摄影平台如图 1 所示。

高速摄影平台主要由燃油供给系统、定容弹、压力控制系统、温度控制系统、高速摄像系统组成。燃油供给系统主要包括高压共轨喷射系统、ECU、电机、油泵、滤清器和油箱。通过单孔喷油器进行燃料喷射。ECU 用于控制共轨喷射系统。试验中,设置轨压为 100 MPa,喷油脉宽为 1.5 ms,撞壁距离为 92 mm。压力控制系统用来控制定容弹内的压力,主要包括进气装置和排气装置。金属表面温度通过自行开发的温度反馈测控系统进行调节控制。经标定,最大表面温度控制误差不超过 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用高速摄像机 Phantom V611 对燃料喷雾形态发展过程进行拍摄。分辨率设定为 800×600 像素,拍摄频率设定为 1 000 帧/s。

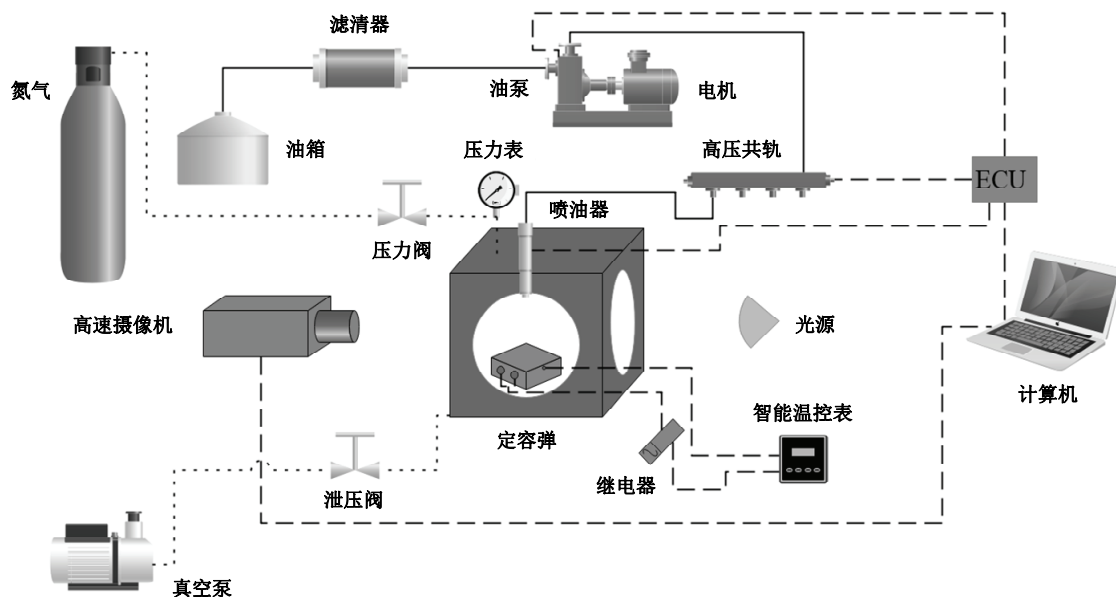


图 1 试验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test platform

本文所用燃料为柴油和正丁醇,其中,柴油是由多种碳氢化合物组成的混合物,正丁醇是单一组分的醇类,被广泛用于传统燃料的替代燃料和掺混燃料。柴油和正丁醇的理化特性见表 1。

1.2 试验材料表面的制备

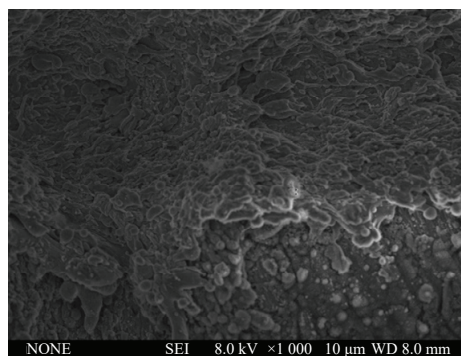
铝合金为动力机械关键零部件(如活塞等)的常用金属材料,因此,本文选用铝合金 6061 作为试验表面材料。金属基材尺寸为 $100\text{ mm}\times$

表 1 试验燃料特性

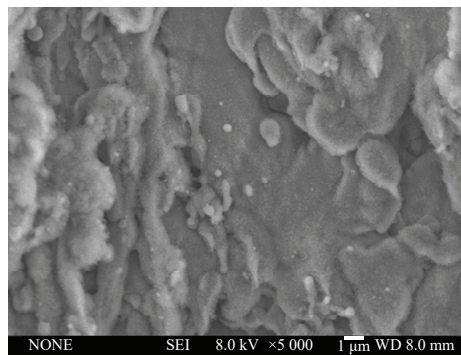
Table 1 Test fuel properties

项 目	柴油	正丁醇
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	821.9	810.9
沸点/K	453~623	390.5
汽化潜热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	251.2	430
293 K 黏度/ $(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	4.07	4.02
293 K 表面张力/ $(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	29.3	26.63

100 mm×15 mm。为避免表面氧化层的影响,首先对金属表面进行预处理,包括磨削和化学清洗,经磨削后,所有金属表面粗糙度均达到 0.5 μm 。金属表面粗糙度使用轮廓算术平均偏差 R_a 进行评估。 R_a 指在取样长度内,被测的实际轮廓上各点与轮廓中线距离的平均值。采用 Duomone TR200 表面粗糙度测量仪测量表面的粗糙度,最大显示分辨率为 0.001 μm ,最大示值误差为 $\pm 10\%$ 。化学清洗指依次采用无水乙醇、丙酮和去离子水对试验基材进行清洗。预处理完成后,通过不同刻蚀方法对金属表面微观形貌进行了重建。采用激光刻蚀方法制备了 3 种具有不同粗糙度的表面,表面粗糙度分别为 1.5、2.8 和 3.7 μm ,并用去离子水和无水乙醇再次清洗。图 2 为通过扫描电子显微镜记录的采用激光刻蚀方法制备的粗糙度为 2.8 μm 的金属表面微观形貌。从图 2 中可以看出,经激光刻蚀后,表面形成了微米级的凸包和凹槽及纳米级的乳突状结



(a) 放大倍数为1 000

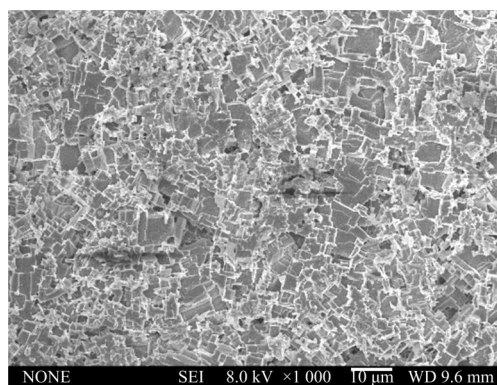


(b) 放大倍数为5 000

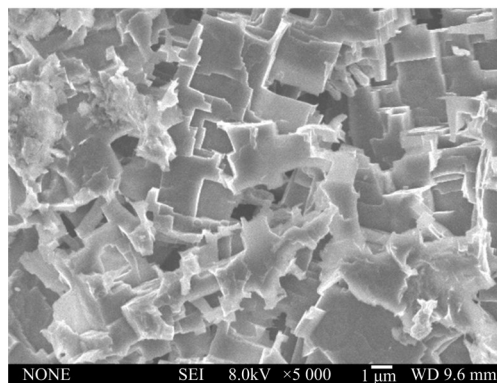
图 2 激光刻蚀的粗糙度为 2.8 μm 的表面 SEM 照片Fig. 2 SEM Photos of laser-etched surface with a roughness of 2.8 μm

构。凸包的长度约为 100 μm ,宽度约为 80 μm 。经测试,上述 3 种具有不同粗糙度的表面对柴油和正丁醇液滴均表现出很强的亲油性,柴油和正

丁醇液滴在接触上述 3 种表面后的接触角均迅速减小 2° 以下。此外,粗糙度为 3.7 μm 的表面亲油性最强,粗糙度为 2.8 μm 的表面亲油性次之,粗糙度为 1.5 μm 的表面亲油性在三者中最弱。除激光刻蚀外,本研究还对金属表面进行了化学刻蚀。将预处理后粗糙度为 0.5 μm 的金属基材放入浓度为 2.5 mol/L 的盐酸溶液中刻蚀 10 min,再用去离子水和无水乙醇清洗。随后,将金属基材浸在浓度为 0.03 mol/L 的全氟辛酸($\text{CF}_3(\text{CF}_2)_6\text{COOH}$)乙醇溶液中进行低表面能修饰。扫描电子显微镜记录的采用化学刻蚀方法制备的金属表面微观形貌如图 3 所示。从图 3 中可以看出,经盐酸溶液刻蚀后,金属表面形成了凸台和凹坑结构。凸台和凹坑的长度和宽度在 1~3 μm 范围内。柴油和正丁醇液滴在经低表面能修饰的化学刻蚀表面上的接触角分别为 83.50° 和 60.64° ,这表明表面的亲油性明显减弱。



(a) 放大倍数为1000



(b) 放大倍数为5000

图 3 化学刻蚀表面的 SEM 照片

Fig. 3 SEM Photos of the chemically etched surface

1.3 数据处理

本研究采用铺展半径(R)和卷吸高度(H)来评价撞壁燃料喷雾的形态发展特征。铺展半径为燃料喷雾达到壁面后沿喷嘴中心线向外扩散的最

远距离,卷吸高度为燃料喷雾撞壁后其轮廓最高点与壁面之间的垂直距离,两参数的取值如图 4 所示。

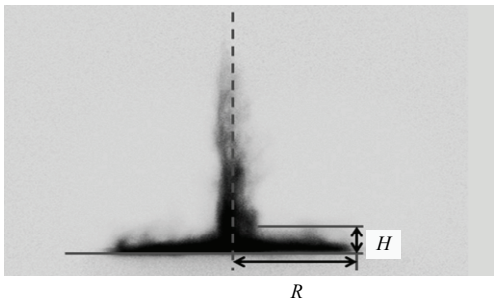


图 4 铺展半径和卷吸高度示意图
Fig. 4 Schematic diagram of spreading radius and entrainment height

2 试验结果及分析

2.1 壁面润湿性对不同燃料喷雾撞壁特性的影响

壁面润湿性是影响燃料液滴铺展和反弹的重要因素,而燃料液滴的铺展和反弹是影响燃料喷雾雾化和蒸发的重要因素。为了探究壁面润湿性对燃料喷雾撞壁后发展过程的影响,在环境背压为 0.1 MPa 的条件下,对柴油和正丁醇喷雾撞击表面温度为 323 K 的不同壁面后的形态发展过程进行了研究。选取激光刻蚀的粗糙度为 1.5、2.8、3.7 μm 的表面和经低表面能修饰的化学刻蚀壁面作为试验壁面。柴油和正丁醇两种燃料喷雾撞击不同润湿性壁面后的形态发展过程如图 5 所示。

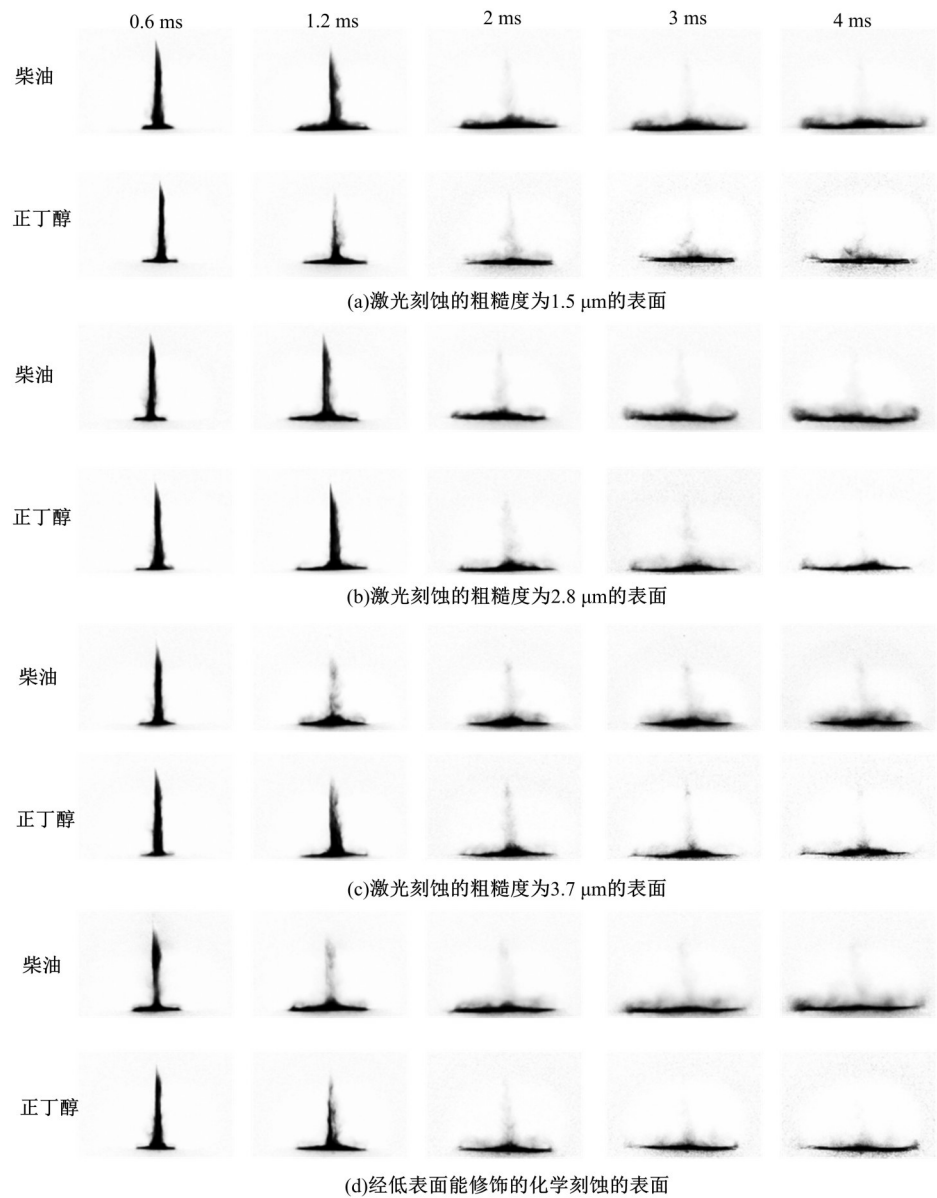


图 5 燃料喷雾撞击不同润湿性壁面后的形态发展过程
Fig.5 Morphological development processes of fuel sprays after hitting surfaces with different wettability

由图5可以看出,喷雾撞壁后先沿径向铺展,随后在边缘处向上卷曲,在远离喷油器中心线的壁面附近产生涡流。这是由于燃料以油束液滴形式被喷出后,高速运动的同时受到来自环境气体的剪切应力,大液滴逐渐破碎为小液滴并向喷雾中心线外围运动。大量高速运动的喷雾液滴夹带环境气体冲向壁面,在喷雾的轴线与壁面交汇区域产生高压,迫使撞壁后的油气混合物沿壁面迅速径向扩散,随着扩散半径的增加,速度下降。在速度降至滞止的过程中,油气混合物也在不断向上方扩散。此外,除部分燃料沉积于壁面外,由于涡流的存在,滞空的液滴会沿壁面径向扩散,当径向扩散速度接近0时,可见铺展的油束向上发生卷曲。由图5(a)(b)和(c)可见,当柴油喷雾撞击激光刻蚀的不同粗糙度的壁面时,随着表面粗糙度的增加,柴油喷雾撞壁后沿径向和轴向的扩散程度均减小。这主要是因为随着表面粗糙度的增加,亲油表面的亲油性增强,粗糙度较大的亲油表面对燃油液滴的吸附作用更强,导致壁面对喷雾的径向扩散和沿轴线向上的卷吸的抑制作用更强。与激光刻蚀的3种表面相比,经低表面能修饰的化学刻蚀表面亲油性明显减弱,柴油与正丁醇两种燃料喷雾撞击该表面后黏附在壁面的液滴数量均有所减少,喷雾向四周扩散的阻力较小,与激光刻蚀表面相比更有利于两种燃料喷雾的扩散。相同壁面条件下,正丁醇喷雾撞击不同表面后的扩散半径明显小于柴油。这主要是由于与柴油液滴相比,正丁醇液滴对表面的浸润性更强,导致正丁醇喷雾撞击壁面后黏附在表面的燃料更多。

为了量化壁面润湿性对燃料喷雾撞壁后形态发展过程的影响,对柴油和正丁醇两种燃料喷雾撞击不同润湿性壁面后的铺展半径和卷吸高度进行对比分析,结果如图6所示。

由图6(a)可以看出,柴油和正丁醇两种燃料喷雾均在亲油性最弱的经低表面能修饰的化学刻蚀表面上的铺展半径最大。这是由于随着表面亲油性的增强,壁面对燃料液滴的钉扎作用增强,燃料液滴在运动过程中受到的阻力增加,喷雾液滴的径向运动速度下降快,沉积于壁面的喷雾液滴数量增加。在这种情况下,能铺展至远端的喷雾液滴数量减少,且喷雾的铺展半径减小。由此得出,表面亲油性越强,喷雾的铺展半径越小。

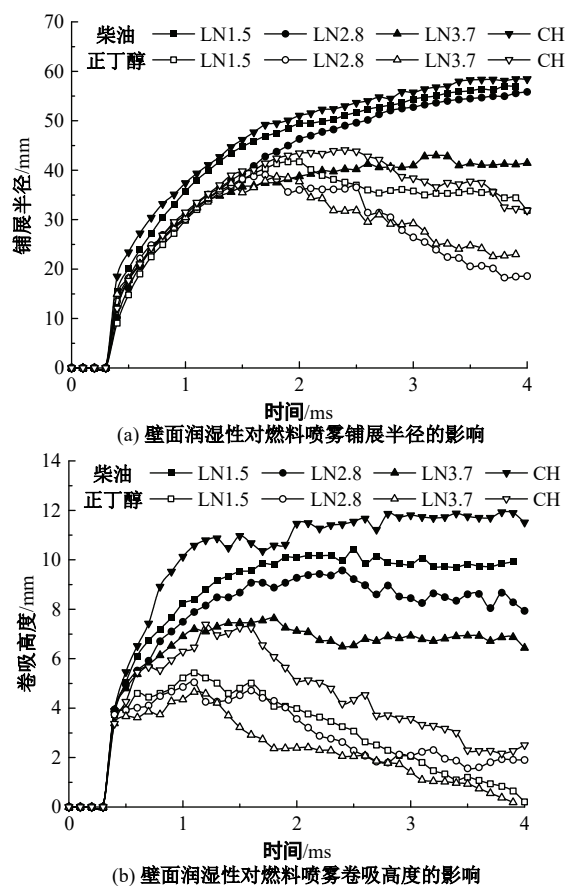


图6 壁面润湿性对燃料喷雾铺展半径和卷吸高度的影响

Fig. 6 Effects of surface wettability on spreading radius and entrainment height of fuel sprays

由图6(b)可以看出,两种燃料喷雾的卷吸高度均在亲油性最弱的经低表面能修饰的化学刻蚀表面上最高,表明随着表面亲油性减弱,燃料喷雾的卷吸高度增加。这主要是因为随着表面亲油性的减弱,燃料液滴反弹和卷吸的程度会有所提高。与亲油性更强的表面相比,黏附在经低表面能修饰的壁面上的液滴数量减少。此外,壁面上因喷雾所形成的油膜会导致后续喷雾液滴撞击在湿壁面上,使得在近壁区反弹的液滴数量有所减少。

从图6还可以看出,随着时间的增加,柴油喷雾撞击不同表面后铺展半径和卷吸高度均呈先升高后趋于平缓的趋势,而正丁醇喷雾撞击不同表面后的铺展半径和卷吸高度均先升高后下降。这是因为一方面,正丁醇的沸点低于柴油的沸点。与柴油相比,在壁面温度相同的情况下,正丁醇的蒸发速率较快。另一方面,正丁醇的黏度和表面张力均略低于柴油,导致燃料喷雾的液滴粒径更小,可以在更短的时间内完全蒸发。上述两方面

原因使得后喷出的正丁醇燃料在尚未到达前期喷雾的铺展半径和卷吸高度的峰值位置时即蒸发完毕,最终导致正丁醇喷雾的铺展半径和卷吸高度在达到峰值后下降。因此,基本理化性质的差异是造成两种燃料喷雾的铺展半径和卷吸高度的变化趋势不同的主要原因。

2.2 壁面温度对不同燃料喷雾撞壁特性的影响

在发动机实际工作过程中,燃烧室的壁面温度随工况不同变化较大。为了探究壁面温度对燃料喷雾撞壁后发展过程的影响,本研究选用激光

刻蚀粗糙度为 $2.8\ \mu\text{m}$ 的壁面在 $0.1\ \text{MPa}$ 的环境背压和不同壁面温度下对柴油和正丁醇喷雾撞壁后的形态发展过程进行了研究。所采用的壁面温度包括 323 、 373 、 473 和 $573\ \text{K}$ 。柴油和正丁醇两种燃料喷雾撞击不同温度壁面后的形态发展过程如图 7 所示。

由图 7 可以看出,在相同的壁面温度条件下,正丁醇喷雾撞壁后沿径向和轴向的扩散范围均较柴油喷雾小,特别是 $2\ \text{ms}$ 以后,差别更为明显。这主要是因为当壁面温度较低时,在相同的壁面

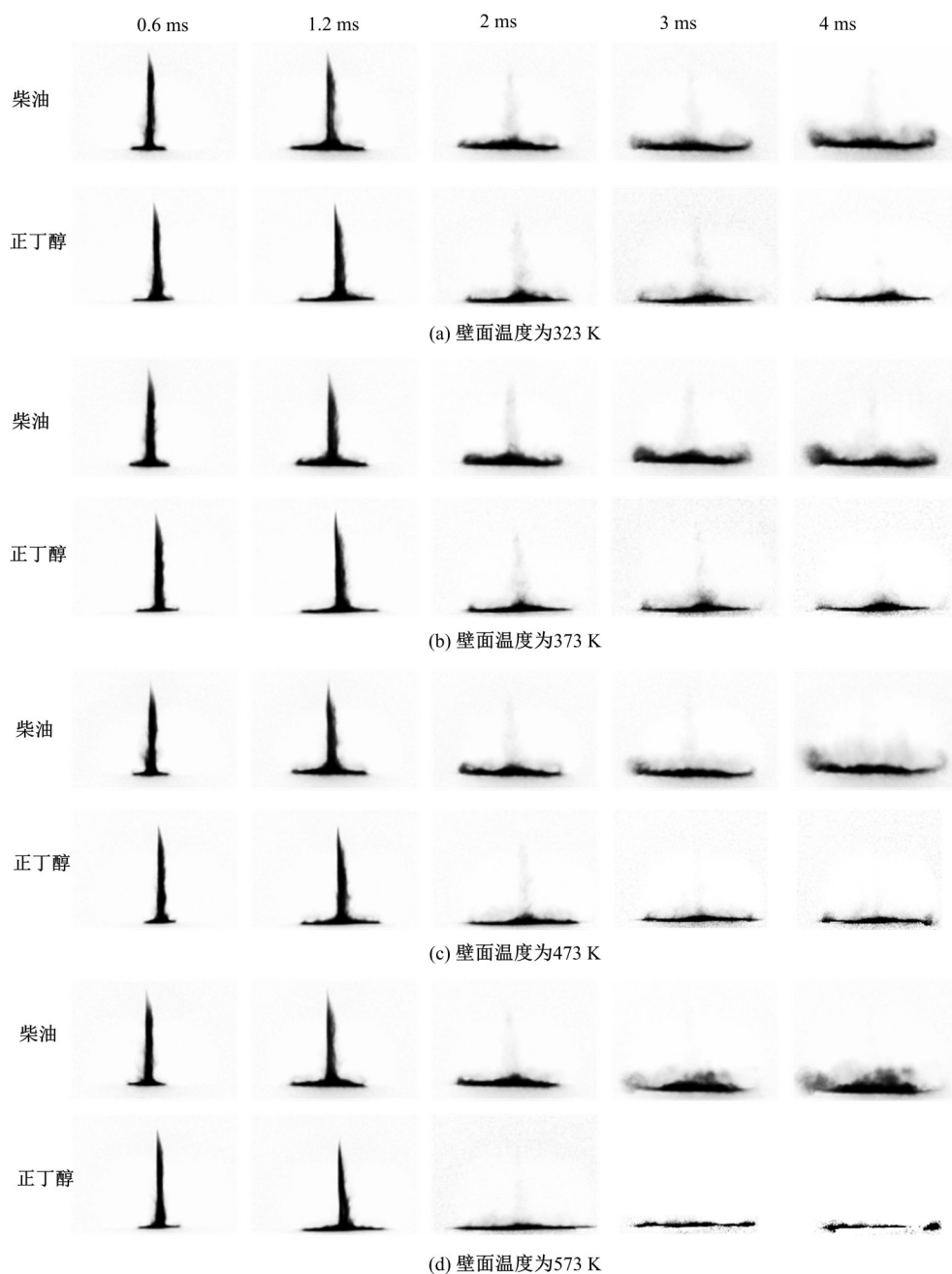


图 7 燃料喷雾撞击不同温度壁面后的形态发展过程

Fig. 7 Morphological development processes of fuel sprays after hitting surfaces with different temperatures

条件下,正丁醇的浸润性较柴油强,撞壁后在壁面上的黏附量更多,导致喷雾径向铺展程度较小。在高温阶段,由于正丁醇的沸点低于柴油,随着壁面温度的升高,正丁醇的蒸发速率较柴油快,因液滴质量的快速降低,正丁醇液滴的动能在铺展过程中也迅速衰减,后喷出的喷雾往往在没有到达前期喷雾的铺展半径峰值位置就已完全蒸发,使得正丁醇喷雾扩散程度较小。

在环境背压为 0.1 MPa 的条件下,柴油和正丁醇两种燃料喷雾撞壁温度为 323、373、473 和 573 K 的壁面后的铺展半径和卷吸高度随时间的变化规律如图 8 所示。

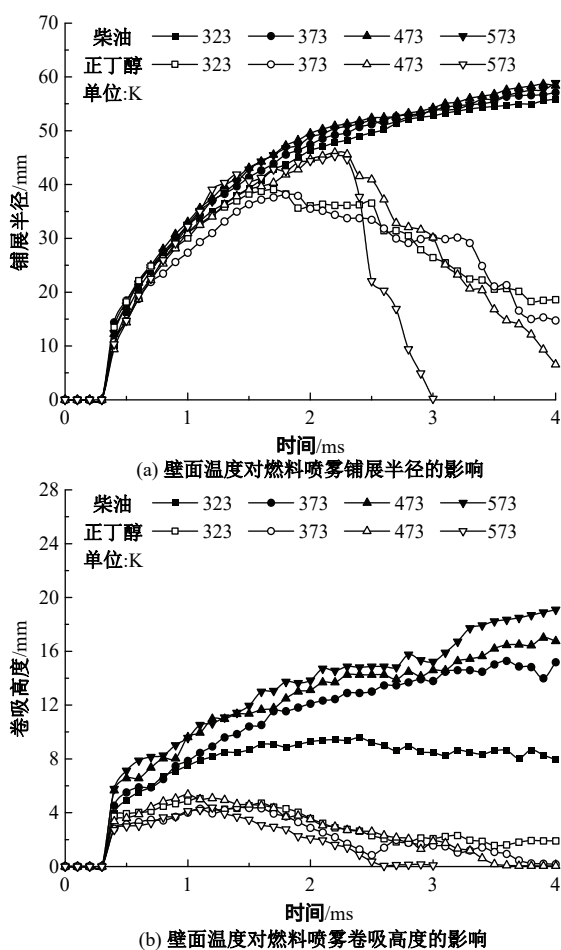


图 8 壁面温度对燃料喷雾铺展半径和卷吸高度的影响
Fig. 8 Effects of surface temperature on spreading radius and entrainment height of fuel sprays

由图 8(a)可以看出,柴油喷雾在前 2 ms 内径向铺展的速率明显高于 2 ms 后径向铺展的速率。对于正丁醇喷雾,在 2 ms 左右后,随着时间的增加,铺展半径减小。造成上述现象的主要原因是:在喷雾撞壁后期,喷雾液滴撞壁后的反弹和环境气体的阻力均使得液滴的铺展速率降低。同时,

涡流的卷吸作用使得液滴逐渐向上运动,液滴速度的水平分量不断减小。此外,在喷雾铺展的过程中,喷雾液滴在近壁区不断受热后蒸发,使得液滴的质量和动能均降低,喷雾径向铺展速率下降。综合以上原因,燃料喷雾 2 ms 后的铺展速率较前 2 ms 内的铺展速率慢,铺展半径减小。在 0.1 MPa 下,壁面温度对柴油喷雾铺展半径的影响较小,柴油喷雾撞击不同温度壁面后期的铺展半径均大于 40 mm。这是由于在该环境背压下,液滴受环境空气的阻力较小,喷雾撞壁速度较快,与柴油相比,壁面温度对正丁醇喷雾的铺展半径的影响更大。与壁面温度为 323 K 和 373 K 时相比,当壁面温度升高至 473 K 和 573 K 时,在 2 ms 后,正丁醇喷雾铺展半径明显下降。

由图 8(b)可以看出,壁面温度对喷雾卷吸高度的影响较复杂。随着壁面温度的升高,受附近空气对流强度增加的影响,近壁区涡流强度有所提升,使得喷雾的卷吸高度更高。同时,壁面温度的升高使得油气混合物在近壁区膨胀扩散的同时,也在不断受热,若燃料汽化速率足够大时,会导致喷雾卷吸高度降低。此外,当壁面温度达到燃料液滴的 Leidenfrost 温度时,液滴处于膜态沸腾状态,近壁面区域形成一层稳定的蒸汽膜,喷雾液滴一旦触及壁面便会快速反弹。

2.3 环境背压对不同燃料喷雾撞壁特性的影响

在发动机中,环境背压是影响燃料喷雾蒸发过程的重要因素。为了探究环境背压对燃料喷雾撞壁后发展过程的影响,在环境背压为 0.1、0.3、0.6 和 1 MPa 的条件下,研究了柴油和正丁醇喷雾撞壁温度为 323 K、激光刻蚀的粗糙度为 $2.8 \mu\text{m}$ 的壁面后的形态发展过程。在不同环境背压条件下,撞壁燃料喷雾在不同时刻的形态如图 9 所示。

由图 9 可以看出,环境背压的升高对喷雾油束的发展有抑制作用。随着环境背压的升高,相同时间内两种燃料喷雾撞壁后径向铺展范围缩小,速率均降低。造成上述现象的原因是,环境背压的升高使得定容弹内气体密度增加,喷雾液滴运动需要克服的阻力增加。在低环境背压下,喷雾液滴撞壁瞬间的速度更快,使得壁面附近涡流强度较高。当环境背压较低时,喷雾液滴粒径较小,更容易悬浮,受较强涡流的驱使上升得更高。与此相反,较高的环境背压使得液滴速度降低得

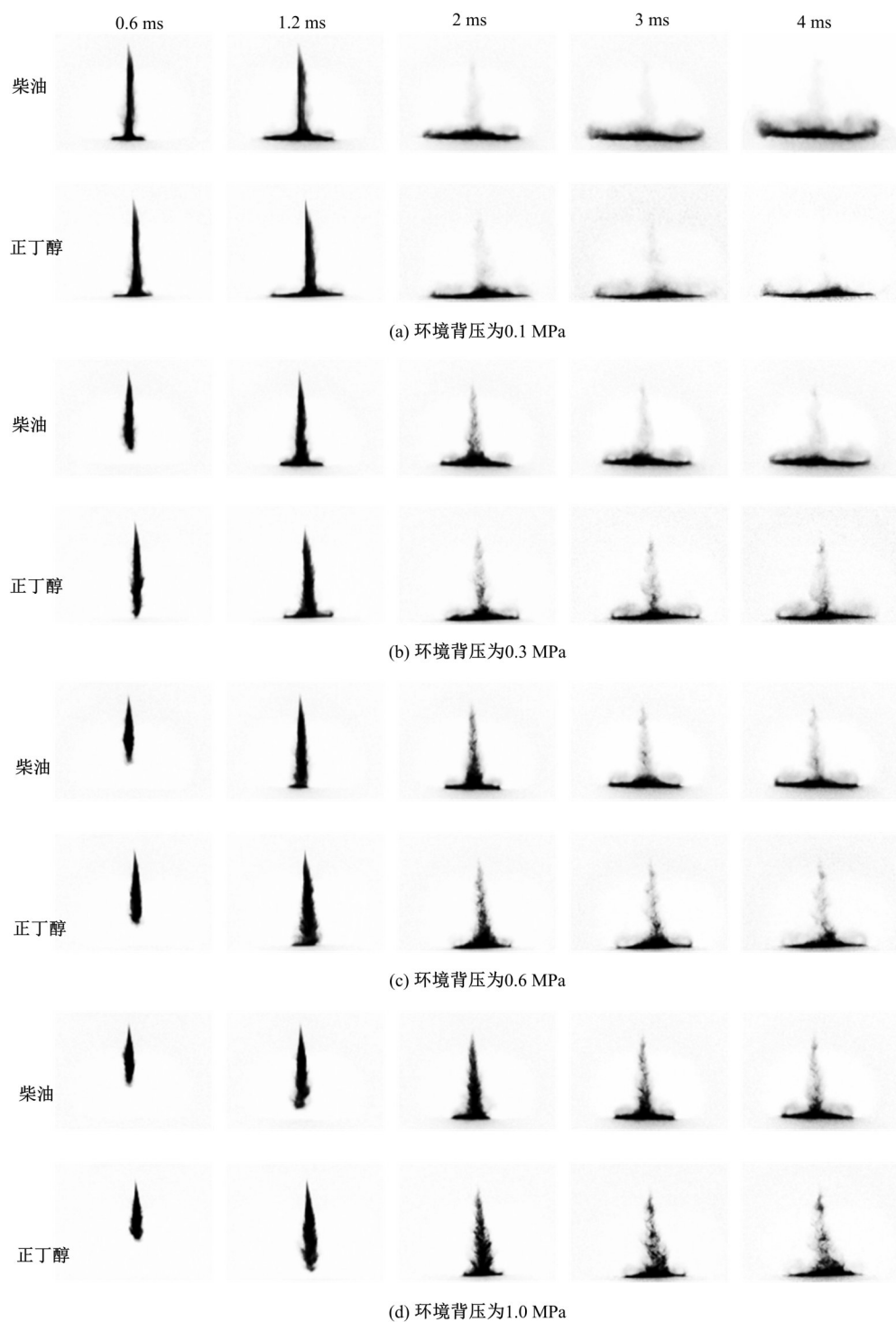


图9 环境背压对撞壁燃料喷雾形态发展过程的影响

Fig. 9 Effects of ambient pressure on morphological development processes of wall-impinging fuel sprays

更快,对其上升有抑制作用。

在环境背压为 0.1、0.3、0.6 和 1 MPa 的条件下,柴油和正丁醇两种燃料喷雾撞击温度为 323 K 的壁面后的铺展半径和卷吸高度随时间的变化规律如图 10 所示。

由图 10(a)可以看出,随着环境背压的升高,

柴油喷雾的铺展半径随时间变化较小。然而,正丁醇喷雾在低环境背压条件下的铺展半径出现减小趋势,在高环境背压条件下则未出现减小趋势,这可归结为以下原因:与环境背压为 0.6 MPa 和 1 MPa 时相比,当环境背压为 0.1 MPa 和 0.3 MPa 时,喷雾运动速率较高,且蒸发速率较

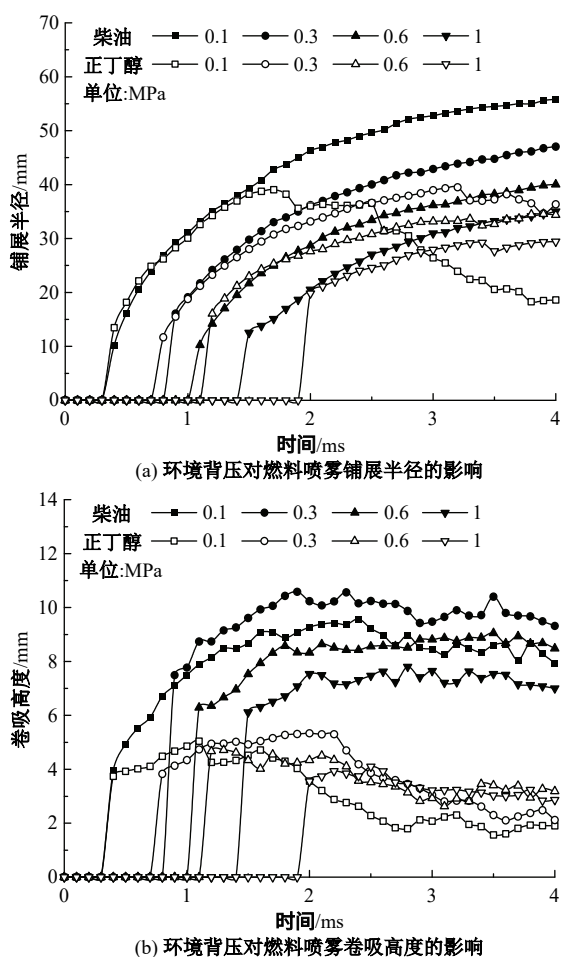


图 10 环境背压对燃料喷雾铺展半径和卷吸高度的影响
Fig. 10 Effects of ambient pressure on spreading radius and entrainment height of fuel sprays

快,使得铺展速率降低较快。因此,当环境背压较低时,铺展半径呈减小趋势。与柴油相比,正丁醇的沸点较低,更易蒸发,这使得环境背压对正丁醇喷雾的影响程度大于对柴油喷雾的影响程度。此外,正丁醇的黏度低于柴油,故在相同环境背压条件下,正丁醇液滴的蒸发速率高于柴油液滴,使得两种燃料喷雾铺展半径的变化趋势差异较大。在高环境背压的条件下,柴油和正丁醇液滴蒸发较慢,使得两种燃料喷雾铺展半径的变化趋势差异较小。

由图 10(b)可以看出,在相同的环境背压条件下,随着时间的增加,柴油喷雾撞壁后的卷吸高度呈先增加后趋于稳定的趋势。对于正丁醇喷雾撞壁后期,由于正丁醇沸点较低,当环境背压较低时,正丁醇液滴蒸发较快,喷雾卷吸高度较低。然而,当环境背压较高时,由于正丁醇液滴蒸发受到抑制,故喷雾卷吸高度较高。因此,由于柴油与正

丁醇的沸点差异较大,两种燃料喷雾的卷吸高度的变化趋势不同。

3 结 论

(1)随着亲油表面粗糙度的增加,壁面的亲油性增强,柴油和正丁醇液滴在接触激光刻蚀的具有不同粗糙度的表面后的接触角均迅速减小至 2° 以下。表面能修饰方法可显著减弱表面的亲油性,柴油和正丁醇液滴在接触经低表面能修饰的化学刻蚀表面后的接触角分别为 83.50° 和 60.64° 。

(2)随着亲油性表面粗糙度的增加,燃料喷雾撞壁后的铺展半径减小,卷吸高度降低。对比不同润湿性表面,两种燃料喷雾在撞击亲油性最弱的经低表面能修饰的化学刻蚀表面后的铺展半径和卷吸高度均达到最大。与柴油液滴相比,正丁醇液滴对表面的浸润性较强,导致正丁醇喷雾撞壁不同表面后的铺展半径较小,卷吸高度较低。

(3)随着壁面温度的升高,柴油喷雾铺展半径变化不大,撞击不同温度壁面后期的铺展半径均高于 40 mm 。与柴油相比,壁面温度对正丁醇喷雾铺展半径的影响较大,这与正丁醇的沸点较低有关。柴油喷雾卷吸高度随壁面温度的升高而增加。

(4)随着环境背压的升高,定容弹内环境密度增加,使得喷雾液滴运动需要克服的阻力增加。两种燃料喷雾撞壁后的铺展半径均随着环境背压的升高而减小。对比不同环境背压条件下两种燃料喷雾的最大卷吸高度,当环境背压为 0.1 MPa 时,两种燃料喷雾的最大卷吸高度均最高。

参考文献:

- [1] Kook S, Park S, Bae C. Influence of early fuel injection timings on premixing and combustion in a diesel engine[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(1): 331-337.
- [2] Bendu H, Murugan S. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion: mixture preparation and control strategies in diesel engines[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 732-746.
- [3] Zhu J Y, Nishida K, Uemura T. Experimental study on flow fields of fuel droplets and ambient gas of diesel spray-free spray and flat-wall impinging spray[J]. Atomization and Sprays, 2014, 24(7): 599-623.
- [4] 颜杰, 张卫正, 殷勇, 等. 燃油喷雾撞击高温壁面的

- 形态特征研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(7): 702-711.
- Yan Jie, Zhang Wei-zheng, Yin Yong, et al. Research on morphology characteristics of fuel spray impingement under high temperature wall surface[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(7): 702-711.
- [5] Du W, Zhang Q K, Bao W H, et al. Effects of injection pressure on spray structure after wall impingement[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 1212-1218.
- [6] Allocca L, Lazzaro M, Meccariello G, et al. Schlieren visualization of a GDI spray impacting on a heated wall: non-vaporizing and vaporizing evolutions[J]. Energy, 2016, 108: 93-98.
- [7] Yeom J K, Park J S, Chung S S. A study on the mixture formation process of diesel fuel spray in unsteady and evaporative field[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2005, 19(12): 2253-2262.
- [8] 毛立伟, 苏万华, 裴毅强. 撞壁距离对柴油喷雾特性的影响[J]. 内燃机学报, 2019, 37(4): 289-296.
- Mao Li-wei, Su Wan-hua, Pei Yi-qiang. Impact of impinging distance on diesel spray characteristics[J]. Transactions of CSICE, 2019, 37(4): 289-296.
- [9] 周致富, 张璐, 游典, 等. 蒸发对燃油瞬态喷雾撞击壁面的动态传热影响[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(1): 232-238.
- Zhou Zhi-fu, Zhang Lu, You Dian, et al. Effect of fuel volatility on heat transfer of spray impingement on piston surface[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 232-238.
- [10] Yu H Z N, Liang X Y, Shu G Q, et al. Experimental investigation on spray-wall impingement characteristics of *n*-butanol/diesel blended fuels[J]. Fuel, 2016, 182: 248-258.
- [11] 丰雷, 陈贝凌, 马天宇, 等. 柴油喷雾撞壁形态和油束发展特征[J]. 内燃机学报, 2018, 36(1): 68-75.
- Feng Lei, Chen Bei-ling, Ma Tian-yu, et al. Shape and development characteristics of a wall-impinging diesel spray[J]. Transactions of CSICE, 2018, 36(1): 68-75.
- [12] 解方喜, 于泽洋, 刘思楠, 等. 喷射压力对燃油喷雾和油气混合特性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(6): 1504-1509.
- Xie Fang-xi, Yu Ze-yang, Liu Si-nan, et al. Effects of injection pressure on fuel spray and air-fuel mixing process of diesel engine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(6): 1504-1509.
- [13] Liu Y, Pei Y Q, Guo R T, et al. Investigation of the liquid fuel film from GDI spray impingement on a heated surface with the laser induced fluorescence technique[J]. Fuel, 2019, 250: 211-217.
- [14] 韩志武, 邱兆美, 王淑杰, 等. 植物表面非光滑形态与润湿性的关系[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(1): 110-115.
- Han Zhi-wu, Qiu Zhao-mei, Wang Shu-jie, et al. Relationship between non-smooth appearance and wettability of plant leaf surface[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2008, 38(1): 110-115.
- [15] 房岩, 孙刚, 王同庆, 等. 蝴蝶翅膀表面非光滑鳞片对润湿性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(3): 582-586.
- Fang Yan, Sun Gang, Wang Tong-qing, et al. Effect of non-smooth scale on surface wettability of butterfly wings[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(3): 582-586.
- [16] 弯艳玲, 丛茜, 金敬福, 等. 蜻蜓翅膀微观结构及其润湿性[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(3): 732-736.
- Wan Yan-ling, Cong Qian, Jin Jing-fu, et al. Microstructure and wettability of dragonfly wings[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39(3): 732-736.
- [17] Misyura S Y, Kuznetsov G V, Feoktistov D V, et al. The influence of the surface microtexture on wettability properties and drop evaporation[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 375: 458-467.
- [18] Kim J H, Mirzaei A, Kim H W, et al. Facile fabrication of superhydrophobic surfaces from austenitic stainless steel(AISI 304) by chemical etching[J]. Applied Surface Science, 2018, 439: 598-604.
- [19] Guo L, Chen Y L, Cai N 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.
- [20] Chen Y L, Guo L, Cai N N, et al. Evaporation characteristics and morphological evolutions of fuel droplets after hitting different wettability surfaces[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(2): 734-747.
- [21] Kwon T W, Lee K H, Seo Y M, et al. Dynamic wetting behaviors of water droplets on surfaces with dual structures at the nanoscale[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 129: No. 103352.