

极寒条件下过热多孔甲醇喷雾形态学研究

李晓捷¹, 王兆文¹, 胡 谊¹, 王 亮¹, 张 淼², 沈 源², 宋志辉²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; 2. 宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司, 宁波 315000)

摘要: 甲醇是一种理想的可再生清洁燃料, 但较高的汽化潜热使甲醇难以直接应用于缸内直喷发动机, 尤其在极寒条件(-30 °C)下会导致冷启动困难. 为全面了解极寒条件下甲醇喷雾特性, 本文利用自主设计的低温喷雾可视化试验台架, 对某 6 孔缸内直喷发动机喷油器在常温和低温条件下的甲醇喷雾进行可视化研究. 通过纹影法与马尔文粒度仪分别比较了不同温度对甲醇喷雾的宏观形态参数与索特平均直径的影响, 并利用自主设计的喷嘴加热系统, 研究了燃料预热技术对极寒条件下甲醇喷雾形态参数的影响. 结果表明, 随环境温度降低, 喷雾贯穿距略有增加, 锥角略有减小, 但整体变化不明显; -30 °C 环境下, 喷雾索特平均直径相比 25 °C 增大 2 μm. 喷嘴温度增加到 100 °C 时, 甲醇喷雾达到闪沸. 环境温度为 80 °C 时, 多束喷雾迅速塌陷为单束喷雾, 贯穿距急剧增加; 环境温度为 25 °C 与 -30 °C 时, 喷雾先呈现三束喷雾特征, 随后喷雾头部膨胀为伞形, 贯穿距增加缓慢. 本文总结了低温环境主要从阻碍喷雾塌陷、延缓涡流区出现、减少涡流区蒸发这 3 个因素影响了过热甲醇喷雾的宏观形态, 对预热燃油技术在实际发动机中的应用提供了理论指导.

关键词: 甲醇; 冷启动; 喷雾形态; 索特平均直径; 闪沸喷雾

中图分类号: TK418.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2026)01-0029-13

Spray Morphology of Superheated Porous Methanol Under Extremely Cold Conditions

Li Xiaojie¹, Wang Zhaowen¹, Hu Yi¹, Wang Liang¹, Zhang Miao², Shen Yuan², Song Zhihui²

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Ningbo Geely Luoyou Engine Parts Company Limited, Ningbo 315000, China)

Abstract: Methanol is an ideal clean alternative fuel, but the high latent heat of vaporization makes it difficult for methanol engines to start cold, especially in extremely cold conditions (-30 °C). In order to comprehensively explore the characteristics of methanol spray under extremely cold conditions, this paper uses a self-designed low-temperature spray visualization test bench to study the visualization of methanol spray under normal and low temperature conditions of a 6-hole methanol direct injection injector. The influence of different ambient temperatures on the macroscopic morphology and SMD of methanol spray was compared and analyzed by schlieren method and Malvern particle size analyzer, and the influence of fuel preheating technology on the morphological parameters of methanol spray under extremely cold conditions was explored by using the self-designed nozzle heating system. The results show that with the decrease of ambient temperature, the spray penetration distance increases slightly and the cone angle decreases slightly, but there is little difference between the two under low temperature conditions. At the ambient temperature of -30 °C, compared with the ambient temperature of 25 °C, the spray SMD

收稿日期: 2025-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176136).

作者简介: 李晓捷(1999—), 男, 博士研究生, 1445730697@qq.com.

通信作者: 王兆文, 男, 博士, 教授, wangzhaowen1978@163.com.

increases by 2 μm , and the large particle size boundary is significantly widened. When the nozzle temperature rises to 100 $^{\circ}\text{C}$, the methanol spray at different ambient temperatures reaches flash boiling, and when the ambient temperature is 80 $^{\circ}\text{C}$, the multiple sprays quickly collapse into a single spray, and the penetration distance increases sharply. When the ambient temperature is 25 $^{\circ}\text{C}$ or -30 $^{\circ}\text{C}$, the spray first presents the characteristics of three sprays, then the spray head expands into an “umbrella” shape, and the penetration distance increases slowly. The SMD of flash spray at different ambient temperatures is significantly lower than that under spray at room temperature, and the particle size distribution is narrower in the high temperature environment. This paper innovatively proposes that the low temperature environment mainly affects the macroscopic morphology of superheated methanol spray from three aspects: hindering the collapse of the spray, delaying the emergence of the vortex region, and reducing the evaporation of the vortex region, which provides theoretical guidance for the application of fuel preheating technology in practical engines.

Keywords: methanol; cold start; spray morphology; SMD; flash boiling

内燃机具有高能量转换效率和可靠性的优点,被广泛应用于交通运输和工业生产中^[1]. 由于在内燃机中使用化石燃料带来的环境污染问题,使用再生的清洁替代燃料是一种实现碳达峰和碳中和的可行方法. 甲醇与汽油物理特性接近,并且具有高燃烧速度和低排放等优点,是一种理想的替代燃料^[2]. 相比于汽油,首先甲醇来源广泛,便于储存与运输^[3];其次,甲醇的高含氧量导致其层流火焰速度高于其他碳氢燃料,从而促进燃烧^[4]. 此外,甲醇的辛烷值高于汽油,可以显著提高火花点火发动机的压缩比,从而提高效率^[5].

在内燃机中使用甲醇作为替代燃料引起了大量研究者的关注. Çelik 等^[6]发现在单缸汽油机中以甲醇为燃料可在不发生爆震前提下将压缩比从 6 提升至 10,发动机功率和 BTE (brake thermal efficiency) 分别提升 14% 和 36%,排放物也显著减少. 相比于进气道喷射 (port fuel injection, PFI),缸内直喷 (gasoline direct injection, GDI) 具有控制灵活性和燃油经济性等优势^[7]. 在 GDI 发动机中,喷雾雾化质量的好坏会显著影响发动机的燃烧和排放,而甲醇具有相比汽油三倍的汽化潜热,因此在寒冷条件下,缸内整体温度降低会对甲醇喷雾的雾化和蒸发过程产生负面影响. Gong 等^[8]发现环境温度会显著影响甲醇发动机点火行为,当环境温度低于 16 $^{\circ}\text{C}$ 不采用辅助启动装置时甲醇发动机无法可靠启动. 预热进气或进气口喷入液化石油气同时配合燃油喷射正时优化可明显提高冷启动可靠性,减少未燃 HC 排放. Li 等^[9]在 Gong 等人的研究基础上进一步探究了点火式甲醇发动机冷启动临界点火温度. 结果表明,使用电阻丝预热进气歧管和电热塞预热进气可分别将甲醇临界点火环境温度降低至 5 $^{\circ}\text{C}$ 和 0 $^{\circ}\text{C}$,进气歧管喷入

液化石油气引燃可将临界点火温度降低至 -13 $^{\circ}\text{C}$. Gong 等^[10]还研究了进气温度对缸内直喷点火 DISI (direct injection spark ignition) 甲醇发动机混合气形成与燃烧的影响. 结果表明,冷启动条件下进气温度提高可促进甲醇蒸发,改善甲醇-空气混合气在缸内分布,从而加速燃烧降低排放. 另外,富氢的燃烧策略可以拓展点火式发动机稀燃极限,也有利于改善冷启动困难,降低污染物排放^[11].

已有研究主要通过发动机预热或引入助燃燃料增强冷启动性能. 冷启动问题的关键之一是改善低温环境中燃料混合气的形成,尤其在 DISI 甲醇发动机中,喷射压力较高混合气形成时间短. 但目前对于低温条件下甲醇喷雾特性的研究很有限. Aleiferis 等^[12]研究了超低燃料温度条件下乙醇喷雾特性,并利用相位多普勒测速仪 (phase doppler particle analyzer, PDPA) 分析了喷雾液滴尺寸及速度分布. 研究发现低温抑制了喷雾雾化,乙醇喷雾喷射延迟更长贯穿距更短. 燃料温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 降低至 -15 $^{\circ}\text{C}$,乙醇喷雾液滴尺寸增大 28%. Wang 等^[13]模拟冷启动时柴油机缸内环境,基于 LIEF-PIV (laser induced exciplex fluorescence- particle image velocimetry) 激光测量技术开展了喷雾试验,研究发现环境温度降低显著影响燃料液滴蒸发速率,具体体现在总蒸发量减少以及气相分布更加不均匀. Lee 等^[14]研究了燃油温度和喷射压力对冷启动 GDI 喷雾的影响,研究发现当燃油温度降至 -7 $^{\circ}\text{C}$ 时,由于蒸发和气相夹带减少喷雾贯穿距增加,喷雾羽流变宽.

此外,加热燃料也是一种促进发动机冷启动性能的技术. Brunocilla 等^[15]研究了加热燃料对发动机冷启动性能的影响,结果发现喷射热燃料有助于提高冷态驱动能力,并且减少了 HC 与 CO 排放. 但甲醇燃

料沸点较低(64℃),加热甲醇很容易导致甲醇喷雾发生闪极沸腾。闪极沸腾被认为使一种很有前途的辅助雾化技术,可以产生具有更小 SMD 与更高蒸气浓度的喷雾^[16]。很多学者对闪沸喷雾雾化特性的影响进行了研究,目前认为燃料温度与环境压力改变了燃料的过热度,是影响闪沸喷雾喷嘴内气泡生成与喷嘴外雾化特性的主要因素^[17-19]。但环境温度尤其是低温对闪沸喷雾雾化以及宏观特性的影响研究目前尚无相关报道。

综上所述,目前国内外研究主要分为冷启动技术优化、低温喷雾特性研究与燃料预热技术 3 类。冷启动技术优化包括预热进气^[9]、引入助燃燃料(如液化石油气^[8])等策略,这些研究侧重于改善混合气形成条件,但未深入探究低温喷雾特性。低温喷雾特性研究中,现有的实验结果总结了乙醇^[12]、柴油^[13]等燃料在低温下的雾化规律,但针对甲醇的低温喷雾特性研究仍然存在空白。最后燃料预热技术的现有研究多关注预热对蒸发和排放的影响^[15],但对极寒条件下预热甲醇引发的闪沸喷雾特性缺乏系统性分析。而本文首次结合低温环境(-30℃)与燃料预热(燃料温度 100℃),系统研究了极寒条件下过热甲醇喷雾的宏观形态与微观粒径演化规律,揭示了低温对闪沸喷雾塌陷、涡流区形成以及蒸发的抑制作用,为冷启动技术提供了新的理论依据。

尽管环境温度不会改变喷嘴内以及喷嘴附近的喷雾特性,但闪沸喷雾会增强喷雾的卷吸结构,加速喷雾与环境介质的热质交换,从而导致远场喷雾被环

境冷却,这势必会影响闪沸喷雾整体宏观形态的发展,因此亟需展开低温环境下闪沸喷雾宏观特性的研究。本文利用自主设计的低温可视化定容弹试验台架,通过纹影法和马尔文粒度仪研究了低温环境对多孔甲醇喷雾雾化特性以及粒径分布的影响;并利用喷嘴加热装置实现燃料过热,通过纹影法研究了低温环境对闪沸喷雾宏观形态的影响。本文对 3 种典型环境温度下过热甲醇喷雾形态的分析,提出了低温环境影响过热多孔喷雾的作用机理,对冷启动强化措施的实际使用具有很强的指导意义。

1 试验装置及光学测量技术

1.1 试验装置

本文采用预燃式定容燃烧弹系统进行可视化喷雾试验。该系统主要由定容燃烧弹弹体、高压燃油喷射系统、配气、点火系统和数据采集系统等组成,预燃式定容弹系统如图 1 所示。关于该装置的更多细节在文献[20]中进行了详细介绍。此外,为了模拟发动机在极寒条件下的实际工况,本文使用在定容弹中注入液氮的方式实现零下 30℃的环境温度。并且在定容弹内部布置了多个温度传感器,保证环境温度的均匀和稳定。加热燃油被证明是一种有效的辅助发动机冷启动手段,本文利用在喷油器头部安装陶瓷加热管方法控制燃油温度,喷油器头部布置的多个温度传感器用来保证喷嘴温度的稳定性与均匀性,控制精度为±1℃,具体如图 1 所示。

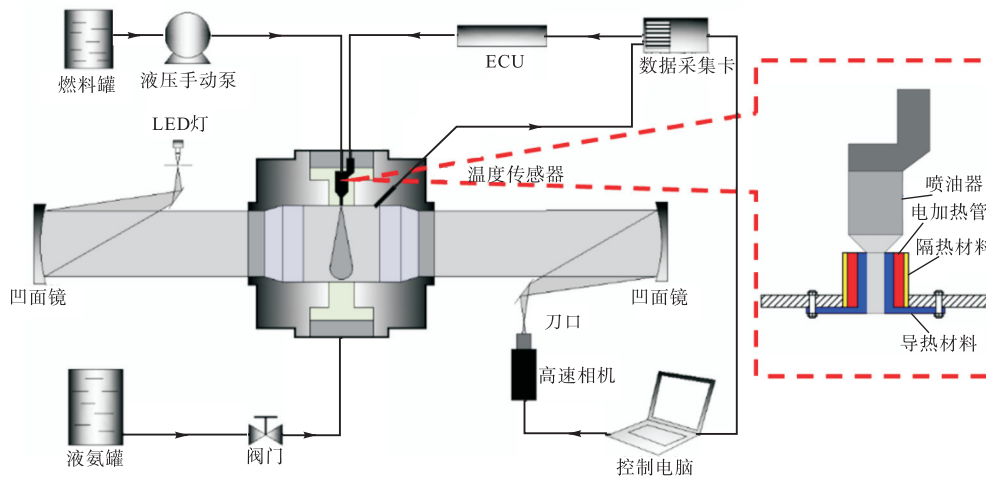


图 1 低温与过热喷雾试验台架

Fig.1 Low temperature and overheat spray test system

1.2 光学测量技术

1.2.1 喷雾特性光学测量技术

本文喷雾测量主要采用纹影法,具体布置如图 2 所示,流明纳斯 PT-121LED 灯发出的白光经过凸透

镜汇聚于小孔所在的平面并经过小孔后形成点光源,点光源经球面镜反射后形成平行光,平行光穿过试验区后由球面镜汇聚,高速摄影机布置在球面镜的焦点位置,汇聚的光进入高速摄像机后形成纹影背景。

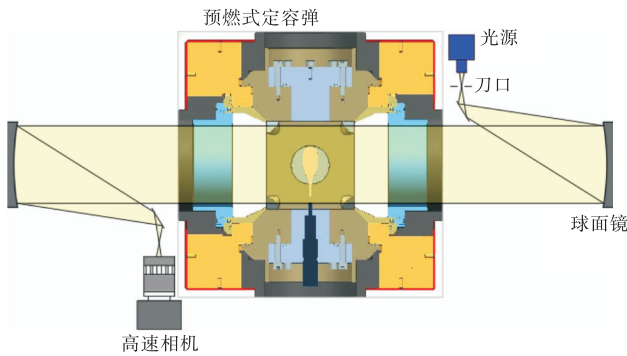


图 2 纹影法光路
Fig.2 Schlieren light path

1.2.2 粒径特性光学测量技术

喷雾的 SMD(索特平均直径)是衡量雾化好坏的重要微观参数. 目前喷雾场粒径分布的测量方法主要有 PDA(相位多普勒分析仪)、SLIPI(平面结构光照明)、光散射、激光全息等技术^[21]. 其中基于光散射原理的激光粒度仪具有能够准确地测量粒径分布比较窄、微小尺寸粒径喷雾以及光路配置简便等特点, 非常适合测量 GDI 喷油器喷雾的 SMD. 因此本文选用英国 Malvern 公司 Spraytec 激光粒度仪. 马尔文粒

度仪主要由发射端,接收端以及安装导轨组成. 发射端包含波长为 635 nm 的高稳定氦氖激光器以及焦距 300 mm 的镜头,激光穿过被测试粒子后发生偏折,而后被接收端上周向布置的 36 个检测器接收,经过背景光强校正后得到各检测器的修正光强数据,最后经过 Spraytec 软件计算得到粒径分布等数据. 接收端中心为 0 号检测器,未照射测试粒子时激光全被 0 号检测器接收,0 号检测器接收光强越强,表示激光遮光率越低. 1 至 35 号检测器,序号越大检测到的粒子直径越小. 发射端和接收端固定于安装导轨两端,可根据需要调整两者间隔. 安装导轨主要保证发射端和接收端镜头对心,内含数据线进行信号传输. 本研究使用的马尔文喷雾粒度仪采样频率为 10 kHz,采样区域直径 18 mm,测量粒径范围为 0.05 ~ 900 μm ,满足测量需求.

1.3 喷雾特性宏观参数与粒径测量的定义

为了定量分析喷雾特性,利用 Matlab 程序对高速摄像机捕获的喷雾图像进行后处理,并对喷雾图像中的宏观特性参数进行计算. 具体图像处理流程如图 3 所示.

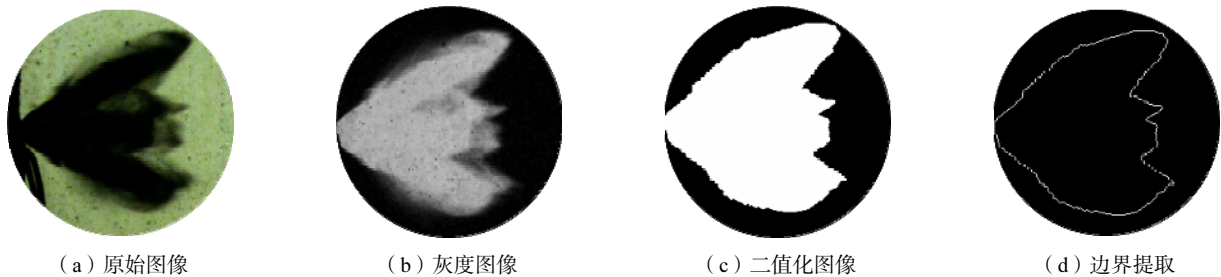


图 3 喷雾图像处理流程
Fig.3 Spray image processing process

喷雾贯穿距和喷雾锥角的定义如图 4 所示. 喷雾贯穿距表征雾束的轴向贯穿能力,在本文中定义为喷嘴到喷油器轴线上喷雾最远端的距离. 喷雾锥角

表征了雾束的横向扩散程度,在本文中定义为贯穿距一半处喷雾面积等效等腰三角形的顶角.

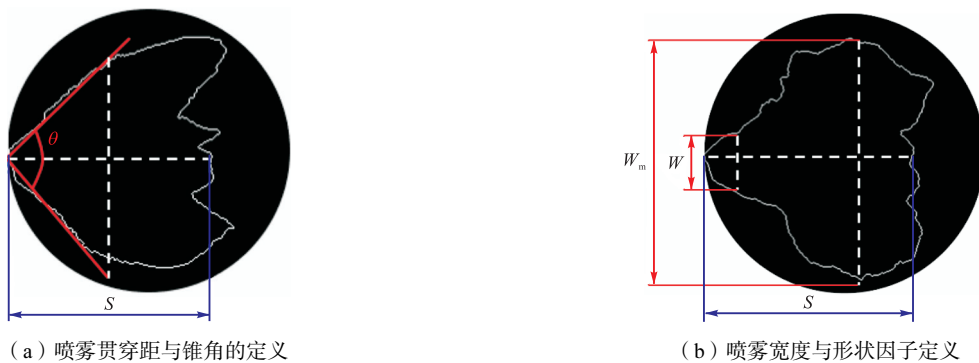


图 4 喷雾参数的定义
Fig.4 Definition of spray parameters

对于过热闪沸喷雾, Li 等^[22]的研究表明,闪极沸腾会导致喷雾显著地径向膨胀,因此喷雾锥角这个概

念在闪沸条件下不再具有实际意义,应当选取其他喷雾形状参数定量表征闪沸喷雾的宏观形态. 喷雾宽

度是研究闪沸喷雾形态的一个重要参数,定义为距离喷嘴特定位置处的喷雾羽流宽度,主要被用来表征闪沸条件下喷雾的径向膨胀程度.通常对于闪沸喷雾形态的研究需要选取多个不同位置处的喷雾宽度,研究喷雾宽度随过热度变化规律.但本文仅着重分析某一燃料温度下不同环境温度对喷雾形态的影响,过热度保持恒定,因此本文的喷雾宽度位置固定于喷嘴下游 5 mm 处.

除此之外,Lacey 等^[23]提出了一种新的喷雾形状因子,即喷雾的最大径向与轴向长度之比,并且利用此参数对异辛烷和丙烷不同过热度的闪沸喷雾进行了研究,结果发现相比喷雾贯穿距,该形状因子能够更好地表征喷雾塌陷.本文参考 Lacey 的研究,定义喷雾形状因子 C 表征闪沸喷雾的宏观特性.关于喷雾宽度 W 与形状因子 C 的定义如图 4 和公式(1)所示:

$$C = \frac{W}{S} \quad (1)$$

2 试验方案

本文结合上一节所述的低温定容弹试验平台,耦合纹影法与马尔文粒度仪等光学测量方法,对低温环境下甲醇喷雾以及过热甲醇喷雾进行了研究.本文

采用的喷油器为某车用六孔 GDI 喷油器,六孔分布位置与拍摄方向如图 5 所示,实际拍摄图像中显示为 3 束雾束.



图 5 喷油器喷孔布置与拍摄方向
Fig.6 Injector nozzle layout and shooting direction

低温甲醇喷雾试验工况如表 1 所示,其中环境温度设置为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别是为了模拟发动机在寒冷与极寒条件下冷启动工况.

过热甲醇喷雾试验工况如表 2 所示,其中环境温度设置为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别是为了模拟发动机在寒冷与极寒条件下冷启动工况,燃油温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是为了模拟预热燃油技术导致的燃油温度上升.

表 1 低温甲醇喷雾试验工况

Tab.1 Operating conditions for low-temperature methanol spray experiment

试验编号	试验类别	光路方法	拍摄速度/(帧/s)	喷油压力/MPa	环境压力/MPa	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	喷油持续期/ μs
S1	喷雾和粒径分布特性实验	高速纹影法(喷雾)、马尔文粒度仪(SMD)	20 000	20	0.1	25	2 000
S2						-10	
S3						-30	

表 2 低温过热甲醇喷雾试验工况

Tab.2 Operating conditions for low-temperature superheated methanol spray experiment

试验编号	试验类别	光路方法	拍摄速度/(帧/s)	喷油压力/MPa	环境压力/MPa	燃油温度/ $^{\circ}\text{C}$	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	喷油持续期/ μs
S4	喷雾和粒径分布特性实验	高速纹影法(喷雾)	20 000	20	0.1	100	25	2 000
S5						-10		
S6						-30		

3 结果与分析

3.1 低温环境对雾化特性的影响

图 6 是喷射压力 20 MPa 、喷射持续 $2\text{ }000\text{ }\mu\text{s}$ 时,不同环境温度条件下甲醇喷雾发展图像.以喷油器开始喷油为时间起点.甲醇喷油器喷出后以一定角度向外扩张,在喷嘴附近各雾束合并,远端呈三束状向下游发展.随时间发展,喷雾贯穿距不断增加,远端 3 个雾束轮廓愈发明显, $1\text{ }200\text{ }\mu\text{s}$ 时喷雾形态基本成型,不再发生较大变化.从图中可知,环境温度 25

$^{\circ}\text{C}$ 时,喷雾 3 个雾束边界分明,且每束喷雾边界处在气动力作用下形成大量小液滴,较为陡峭.随着环境温度降低,3 个雾束之间间隙逐渐减少,仅有多孔喷雾头部可以分辨 3 雾束的顶端.同时,各单束喷雾边界也变得更加平滑.这是因为温度降低使喷雾蒸发量以及气相夹带减少,低温环境下喷雾雾束更浓,多雾束更趋向于合并而不是形成清晰的分隔间隙.从整体上看, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 喷雾行为更相近.

图 7 是不同环境温度下甲醇喷雾贯穿距发展曲线,对于贯穿距的定义已经在 1.3 中提及. $0\text{ } \sim\text{ } 2\text{ }000\text{ }\mu\text{s}$ 喷射持续期内,甲醇喷雾喷出后,各个温度

工况下的甲醇喷雾贯穿距随时间逐渐增加. 同时曲线斜率逐渐减小, 大致可分为两个阶段, 先慢后快, 与喷雾“初次破碎”和“二次雾化”两个阶段相对应. 甲醇喷雾刚从喷雾喷出时进入“初次破碎”阶段, 喷

雾行为主要受初始动量影响, 喷雾由液柱破碎成液带或大液滴, 喷雾速度较快. “二次雾化”阶段, 液带或大液滴在气动力作用下进一步破碎成大量小液滴, 液滴总表面积增加, 所受阻力增加, 喷雾速度迅速降低.

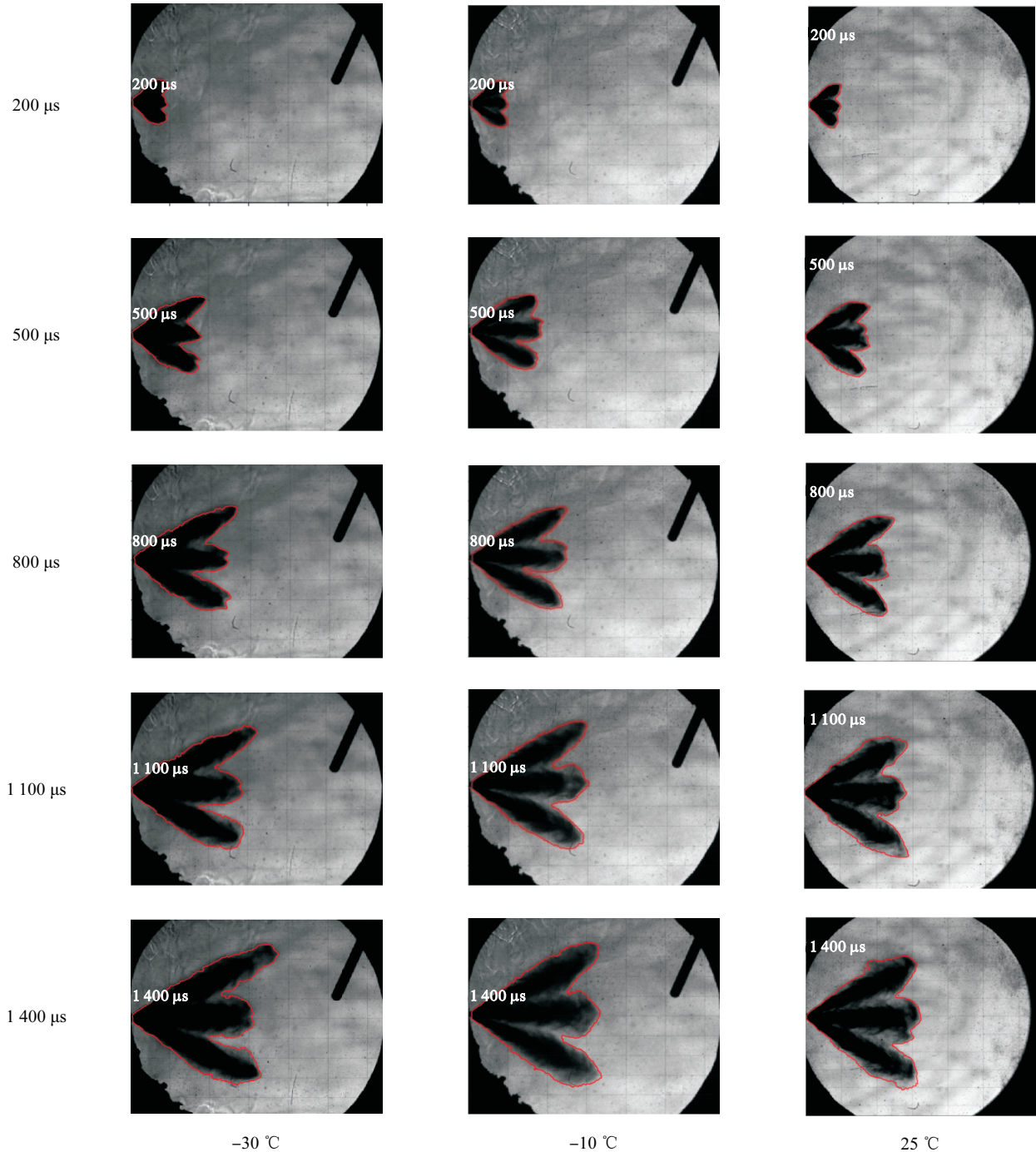


图 6 不同环境温度下喷雾发展图像

Fig.6 Spray under different ambient temperatures

在“初次破碎”阶段喷雾行为由喷雾初始动量主导, 因此喷射压力相同时, 不同环境温度下喷雾贯穿距初期完全重合. 而在喷雾发展末期, 不同温度贯穿距也基本重合, 不同喷射压力下也存在相同现象. 这说明环境温度对喷雾雾化发展的影响并没有很好地

体现在喷雾贯穿距上. 但在各图的局部放大图中, 大致随着环境温度降低, 喷雾贯穿距增加, 这与 Aleiferis 等^[12]观察现象类似. 由于蒸发形成气相, 喷雾所受阻力增加, 故喷雾发展过程中存在喷雾速度显著下降的阶段. 低温环境下喷雾液相蒸发大大减少,

喷雾整体空气夹带量降低从而减小了喷雾发展过程中的气相阻力与动能损失,导致贯穿距增大. 喷雾贯穿距的演化受液滴动量与气相阻力的共同作用. 根据动量守恒定律,液滴的轴向速度 u 可表示为

$$u = u_0 \cdot \exp\left(-\frac{C_d \rho_g A t}{2m}\right)$$

式中: u_0 为初始喷射速度; C_d 为阻力系数; ρ_g 为气相密度; A 为液滴截面积; m 为液滴质量; t 为时间. 在低温条件下,甲醇蒸发速率降低,导致气相燃料生成减少,喷雾卷吸的环境空气量下降 (ρ_g 降低). 因此,液滴所受阻力减小 ($C_d \rho_g A$ 项减弱),动量衰减速率减缓,贯穿距略有增加.

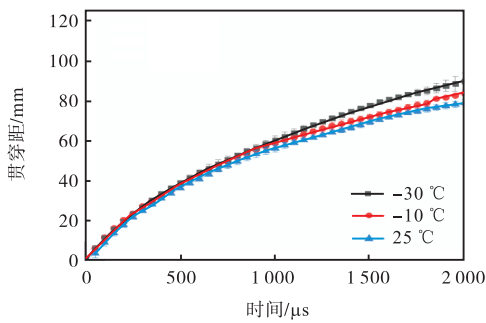


图 7 不同环境温度下喷雾贯穿距发展图像

Fig.7 Spray penetration under different ambient temperatures

图 8 是不同环境温度下甲醇喷雾锥角发展曲线. 甲醇喷雾喷出后,喷雾锥角急剧增大,然后随时间逐渐减小直至趋于平衡. 对于多孔喷雾而言,宏观喷雾锥角主要由喷孔夹角决定,有研究表明环境温度降低,单束喷雾锥角会减小^[12],但难以对整体喷雾锥角产生影响. 因此-10 °C 及以下温度喷雾锥角发展曲线基本重合,说明喷雾锥角并不能很好地表征环境温度对多孔喷雾雾化效果的影响.

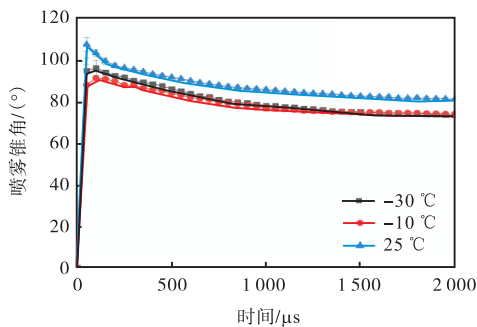


图 8 不同环境温度下喷雾锥角发展曲线

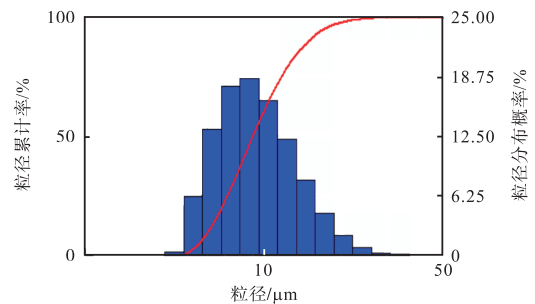
Fig.8 Spray cone under different ambient temperatures

3.2 低温环境对 SMD 特性的影响

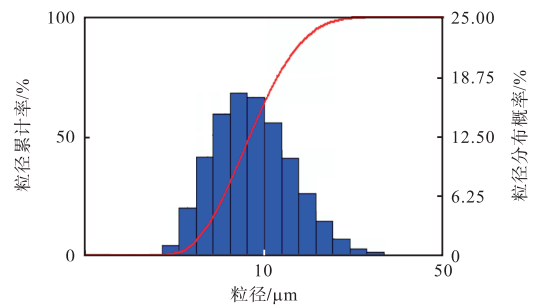
通过图 7 与图 8 可以看出,环境温度降低后,喷

雾的宏观参数并未发生显著变化,但图 6 表明随环境温度降低,喷雾雾束之间间隙消失,液相密度较高的区域增大. 因此仅依据喷雾锥角和贯穿距的变化不足以衡量低温对喷雾雾化的影响.

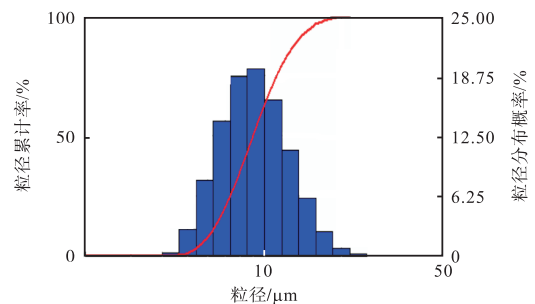
图 9 是不同环境温度下 SMD 分布概率以及累计率分布结果,该结果是在喷射 1 ~ 1.5 ms 过程中对通过粒度仪测量范围粒径的平均,括号中的数字代表该温度条件下的 SMD (μm). 图像横轴表示喷雾粒径,柱状图与右纵轴对应,表示各粒径出现频率,粒径频率越高该粒径数量占比越大. 曲线与左纵轴相对应,表示粒径对应累计率. 累计率从 0 开始,最高为 100%,表示的是小于某粒径所有粒子数量总占比. 累计率从 0 至 100% 对应粒径可以表示喷雾粒径的分布范围. 从图中可以看出,随着环境温度的降



(a) -30 °C (13.04)



(b) -10 °C (12.37)



(c) 25 °C (11.39)

图 9 不同环境温度下喷雾粒径分布概率与累计率

Fig.9 Particle size distribution probability and cumulative rate of spray under different ambient temperatures

低, 喷雾的大粒径区域明显增加, SMD 分布概率右移. 这表明降低环境温度对喷雾雾滴的蒸发有明显的抑制作用, 根据经典 D^2 蒸发率可以得到液滴蒸发速率方程 $(dD/dt) \propto (-K/D)$, 低温环境导致蒸发常数 K 降低, 小液滴难以蒸发, 并在湍流作用下最终聚并成大液滴, 从而导致喷雾的 SMD 增大. 当环境温度从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 喷雾的粒径有显著增加, 当环境温度从 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 喷雾粒径增大不明显. 通过甲醇低温液滴蒸发试验表明, 随环境温度增加, 液滴的蒸发速率呈指数型变化, 环境温度低于 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 蒸发速率很低且基本不随环境温度变化而变化. 因此环境温度 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 与 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 喷雾的各项粒径参数相差不大. 随温度降低, 喷雾的 SMD 增大, 表明环境温度降低对喷雾的雾化有明显的抑制作用, 因此有必要采取各种技术促进低温环境下喷雾雾化.

3.3 低温环境对过热喷雾雾化特性的影响

图 10 是喷射压力 20 MPa 、喷射持续 $2\text{ }000\text{ }\mu\text{s}$ 、燃料温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 不同环境温度下甲醇喷雾发展图像. 在 $200\text{ }\mu\text{s}$ 时, 喷雾刚从喷嘴喷出, 所有环境温度条件下喷雾均变宽. 这是由于闪沸导致过热燃料在喷嘴内部大量成核, 并在喷嘴出口爆炸, 从而导致喷

雾在喷孔出口的径向动量增加, 促进了喷雾的径向扩展, 从而导致喷雾变宽. 这一现象主要由燃料的过热度驱动, 不受环境温度的影响, 因此各环境温度下, 喷雾的宽度基本一致. 但是喷雾头部却呈现不同的行为: 环境温度低于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下喷雾头部仍然呈现三束雾束的特征; 环境温度提高到 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 喷雾头部变平, 不再观察到三束雾束特征. 随着喷雾继续发展到 $500\text{ }\mu\text{s}$, 环境温度 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 六束喷雾完全塌陷为一束, 喷雾两侧出现闪沸喷雾特有的涡旋结构. 而环境温度低于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的喷雾头部三束喷雾特征更明显, 从喷雾中部开始有径向扩展的趋势. 当喷雾发展到 $800\text{ }\mu\text{s}$ 时, 环境温度 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的喷雾呈现单束喷雾特征, 贯穿距显著增加, 闪沸导致的涡旋结构几乎完全蒸发为气态. 环境温度低于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的喷雾头部沿径向急剧扩展, 喷雾整体呈现伞形. 喷雾发展到后期时 ($1\text{ }100\text{ } \sim 1\text{ }400\text{ }\mu\text{s}$), 环境温度低于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的喷雾形状基本稳定, 随环境温度降低, 喷雾气相区域减小, 边缘变得平整. 此时喷雾头部与尾部呈现两种不同形态: 喷雾尾部呈现锥形, 与单束喷雾相似; 喷雾头部呈现伞形, 随环境温度降低, 伞形区域液相区域变浓, 并且轴向长度增加. 喷雾头部与尾部之间出现明显的分界, 即喷雾宽度在此处沿轴向急剧变化.

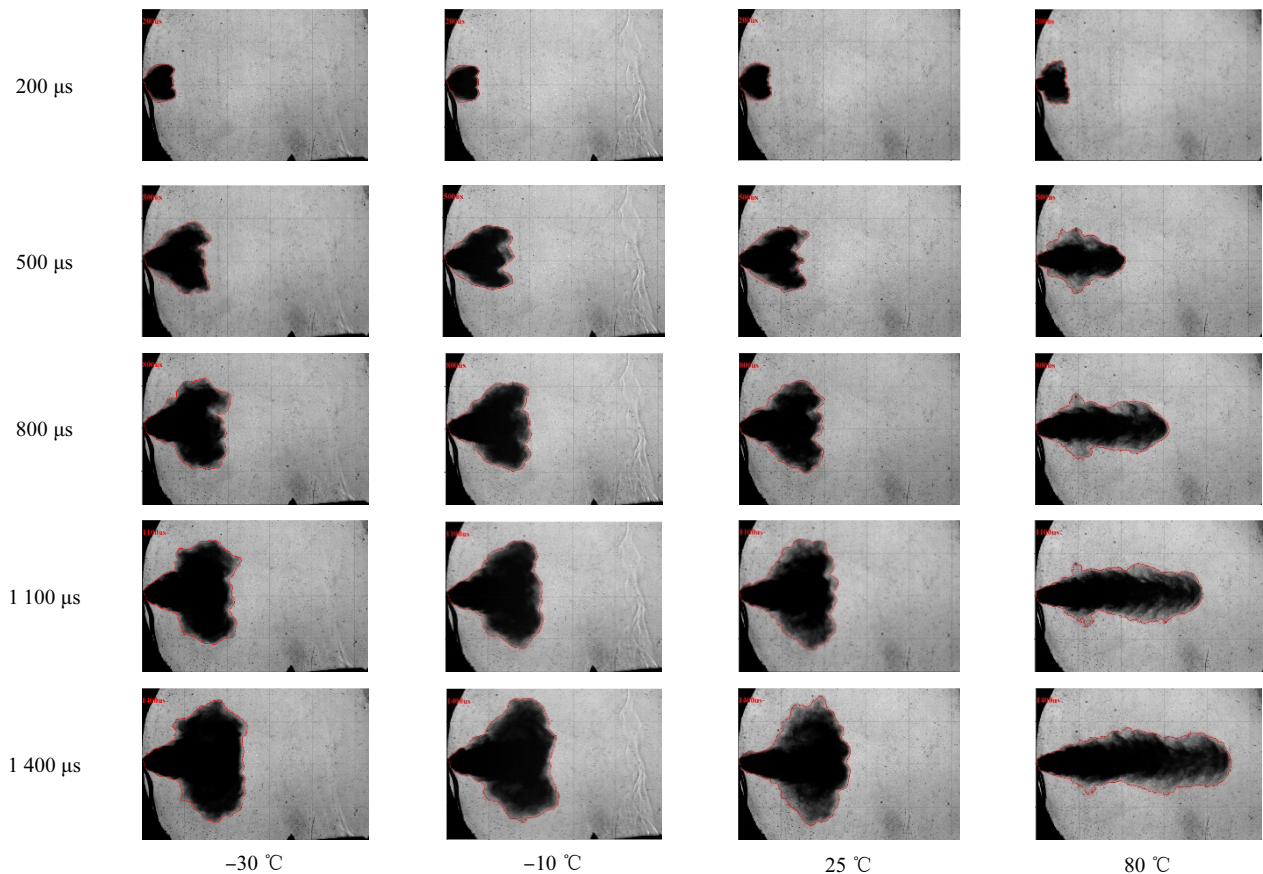


图 10 燃油温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时不同环境温度下喷雾发展图像

Fig.10 Spray under different ambient temperatures with fuel temperature at $100\text{ }^\circ\text{C}$

图 11 是喷射压力 20 MPa、喷射持续 2 000 μs 、燃料温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时,不同环境温度下甲醇喷雾贯穿距发展图像。当喷雾发展时间小于 300 μs 时,各环境温度下喷雾贯穿距基本重合。随后环境温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 的喷雾完全塌陷为单束喷雾,因此贯穿距显著增加。而环境温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 的喷雾贯穿距在 1 000 μs 处才开始缓慢高于低温喷雾,环境温度为 -10 $^{\circ}\text{C}$ 与 -30 $^{\circ}\text{C}$ 的喷雾贯穿距曲线基本重合,这与图 10 中环境温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 以下喷雾相似的结构对应。对于常规喷雾而言,环境温度增加促进了喷雾液相区域的蒸发,从而会导致喷雾贯穿距减小。而过热喷雾除了轴向的贯穿作用,还有强烈的径向膨胀,因此对于过热喷雾这种反常现象需要使用其他喷雾形态参数进行分析。

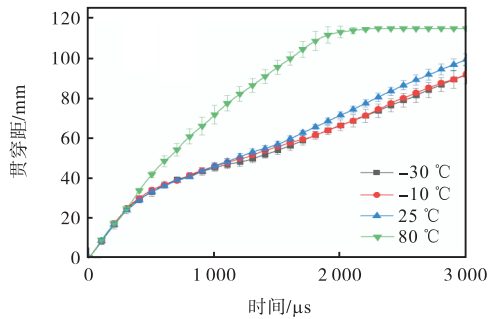


图 11 燃油温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 时不同环境温度下喷雾贯穿距发展图像
Fig.11 Spray penetration under different ambient temperatures with fuel temperature at 100 $^{\circ}\text{C}$

图 12 是喷射压力 20 MPa、喷射持续 2 000 μs 、燃料温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时,不同环境温度下甲醇喷雾宽度。在各环境温度下,喷雾宽度的变化趋势基本一致,即刚喷出时由于闪沸导致喷雾径向膨胀,喷雾宽度急剧增加,随后喷雾宽度降低并趋于稳定。各环境温度下喷雾宽度稳态值差距不大,这表明环境温度对过热度没有影响。80 $^{\circ}\text{C}$ 喷雾宽度低于其他温度喷雾的原因是高温环境导致甲醇喷雾蒸发。

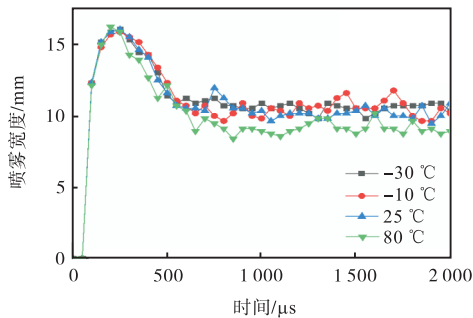


图 12 燃油温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 时不同环境温度下喷雾宽度
Fig.12 Spray width under different ambient temperatures with fuel temperature at 100 $^{\circ}\text{C}$

图 13 是喷射压力 20 MPa、喷射持续 2 000 μs 、燃料温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时,不同环境温度下甲醇形状因子 C 曲线,关于形状因子 C 的定义已经在 1.3 部分提及,特别地,燃料温度与环境温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 的甲醇喷雾形状因子在图中用虚线画出。在 300 μs 之前,各环境温度下喷雾形状因子发展趋势相似,均随时间增加形状因子减少。300 μs 之后,由于环境温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 的喷雾完全塌陷为单束喷雾,喷雾贯穿距迅速增加,其形状因子随喷雾发展持续降低;在 1 300 μs 后,闪沸形成的涡旋结构完全蒸发,因此其形状因子保持稳定。对于环境温度低于 25 $^{\circ}\text{C}$ 的喷雾,300 μs 之后的形状因子发展趋势整体呈现先上升后下降的过程。形状因子增加代表喷雾的径向膨胀效果强于轴向贯穿,对于低温和常温的过热喷雾而言,随时间增加,喷雾头部迅速膨胀为伞形,因此其形状因子先上升;在喷雾发展的后期,喷雾与环境气体发生了充分的热质交换,导致喷嘴内燃料过热对喷雾膨胀的驱动力降低,此时喷雾的轴向贯穿起主导作用,因此形状因子降低。对于常规多孔喷雾而言,喷雾的径向发展主要由喷孔角度(雾束之间的夹角)决定,因此其形状因子在喷雾发展到 500 μs 后基本维持稳定。尽管过热喷雾发生了塌陷,六束喷雾塌陷为一束喷雾,但由于低温和常温环境条件下,喷雾塌陷发生时刻延后,涡旋结构难以蒸发从而导致喷雾径向膨胀增加,环境温度低于 25 $^{\circ}\text{C}$ 的喷雾形状因子仍然大于常规喷雾。

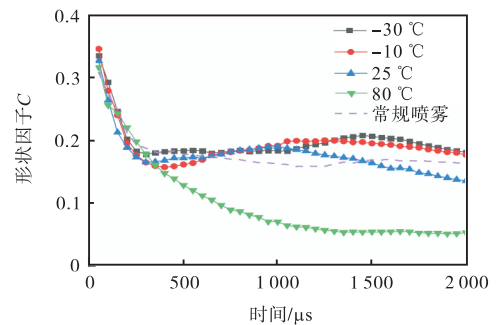


图 13 燃油温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 时不同环境温度下喷雾形状因子 C 曲线
Fig.13 Spray shape factor C under different ambient temperatures with fuel temperature at 100 $^{\circ}\text{C}$

3.4 低温环境对过热喷雾形态的作用机理

目前缺乏对于低温条件对过热喷雾影响机制的研究,为了详细分析环境温度对过热喷雾的影响,以下给出了燃料温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 、环境温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 和 -30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下甲醇喷雾轮廓在不同时刻下的叠加图像。图 14 是环境温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,从 100 ~ 1 600 μs 时刻喷雾轮廓叠加图像。在近喷嘴区域 (<5 mm),各时刻喷雾轮廓基本重合。当喷雾发展到 400 μs 时,在

轴向 5 ~ 20 mm 范围内出现显著的径向膨胀. 随着喷雾的进一步发展, 径向膨胀区由于喷雾主体的轴向贯穿作用向下游移动, 并于 700 ~ 1 000 μs 稳定在 25 mm 处. 从图 10 的喷雾发展图像可以看出, 喷雾两侧突起的径向膨胀区不断蒸发, 并最终消失于 1 300 μs 之后. 喷雾刚喷出 100 μs 时, 由于喷孔结构的原因, 喷雾头部仍能识别出明显的三束喷雾尖端; 但随后由于闪沸导致的雾束之间相互作用, 多束喷雾塌陷为一束, 并且在径向膨胀区的涡流作用下加速中轴喷雾的贯穿, 从而导致 400 μs 后的贯穿距显著增加.

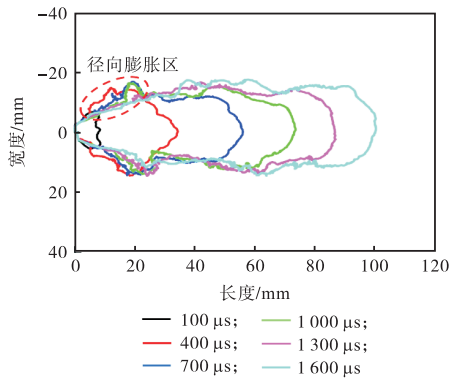


图 14 燃油温度 100 °C、环境温度 80 °C 条件下不同时刻喷雾轮廓发展
Fig.14 Spray profile variation with time under fuel temperature

图 15 是环境温度 25 °C 条件下, 从 100 ~ 1 600 μs 时刻喷雾轮廓叠加图像. 喷雾发展到 100 μs 时, 雾束发生塌陷, 喷雾头部变平, 从喷嘴处开始喷雾沿径向膨胀. 随着喷雾继续发展到 400 μs , 喷雾头部出现三束雾束尖端特征, 与常规多束喷雾相似. 这是因为喷雾刚喷出时, 还未与环境充分换热, 由于喷嘴内气泡成核在喷嘴处爆炸导致雾束变宽, 从而喷雾发生塌陷; 而随着喷雾进一步发展, 一方面喷雾不断卷吸 25 °C 的空气, 使喷雾整体温度降低; 另一方面过热喷雾喷入常压环境发生闪沸, 甲醇具有汽油 3 倍的汽化潜热, 剧烈的相变吸收了热量导致喷雾整体温度降低, 喷雾雾束温度降低塌陷作用减弱, 在喷孔角度的作用下重新回到三束雾束形态. 当喷雾发展到 700 μs 时, 喷嘴附近喷雾宽度降低并向轴线收缩, 喷雾头部开始沿径向膨胀. 这是因为后续喷入的过热燃料对喷雾整体起到了一定的加热作用, 当喷嘴处燃料温度上升到一定程度后, 喷雾的塌陷程度增加, 喷雾边缘偏离喷孔角度的作用向轴线塌陷; 与此同时后续喷入的过热燃料发生闪沸后剧烈相变, 产生的气态甲醇从喷雾头部挤出导致了喷雾的径向膨胀. 在

1 000 μs 后喷雾头部的三束雾束形态基本消失, 并由于径向膨胀呈现伞形; 喷雾尾部也在持续喷入过热燃料的作用下向内收缩.

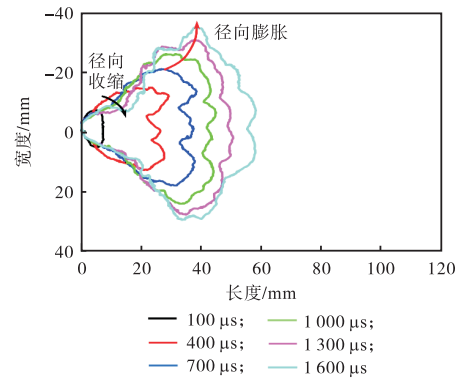


图 15 燃油温度 100 °C、环境温度 25 °C 条件下不同时刻喷雾轮廓发展
Fig.15 Spray profile variation with time under fuel temperature at 100 °C and ambient temperature at 25 °C

图 16 是环境温度 -30 °C 条件下, 从 100 ~ 1 600 μs 时刻喷雾轮廓叠加图像. 400 μs 前喷雾整体发展与 25 °C 喷雾类似, 喷雾头部在 400 μs 处仍然呈现三束雾束尖端特征, 但由于环境温度极低, 导致雾束之间液滴变浓, 三束雾束之间的轮廓间隔变小. 随着喷雾的进一步发展, 在 700 μs 之后, 喷嘴附近喷雾略微沿径向收缩, 变化幅度小于 25 °C 的过热喷雾. 这是因为在 -30 °C 的环境温度下, 喷雾刚喷出时卷吸冷空气导致喷雾整体温度降低更多, 后续喷入的过热燃料难以补充极寒环境下损失的温度, 因此喷雾的塌陷程度随喷雾发展没有明显变化. 这表明环境温度极低时会抑制过热喷雾因为闪沸导致的喷雾塌陷. 此外, -30 °C 条件下喷雾的锥形区与伞形区之间有明显的分隔. 图 17 给出了 1 000 μs 时刻 25 °C 与 -30 °C 喷雾的灰度图像. 对比两图可以看出, -30 °C 条件下喷雾边缘气相区域与不规则部分更少, 喷雾两侧的涡流区液相浓度更高. 闪沸喷雾的涡流是喷雾与环境气体强烈作用的区域, 在 25 °C 条件下, 喷雾在环境中仍会少量蒸发, 因此其涡流区气相燃料含量增加, 导致该区域与环境动量交换增加, 在中轴喷雾的贯穿作用下被拉长, 涡流区边缘呈锥形; 而在 -30 °C 条件下, 涡流区的燃料蒸发很少, 整体喷雾液相燃料占比高, 难以与环境气体进行动量交换, 中轴喷雾的贯穿作用对涡流区边缘几乎不产生影响, 因此边缘呈直角形. 相比 80 °C 环境条件下喷雾, 常温与低温条件下, 持续存在的涡流区增加了喷雾的径向扩展, 使喷雾在轴向贯穿的过程中受到更多阻力, 从而降低

了喷雾的贯穿距。

在环境温度 25 °C 与 -30 °C 条件下, 过热甲醇喷雾发展过程中, 喷雾头部均出现伞形结构. 当甲醇在喷嘴内被加热到 100 °C 后喷入常压环境, 过热甲醇迅速蒸发发生闪沸现象, 喷雾与环境气体发生强烈的动量交换, 在喷雾两侧产生涡流区. 当环境温度为 80 °C 时, 喷雾两侧的涡流区与环境气体作用迅速蒸发完全, 因此喷雾主要呈现单束喷雾特征. 而环境温度低

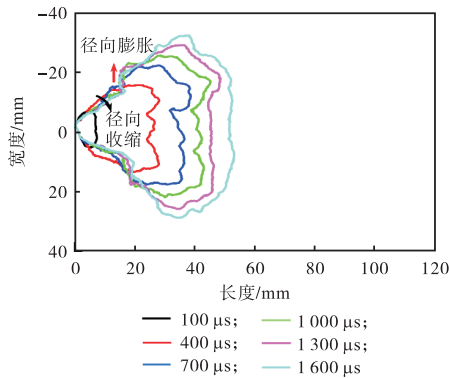
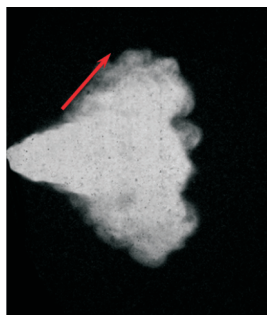
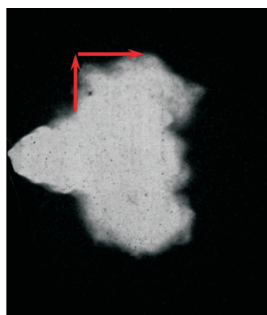


图 16 燃油温度 100 °C、环境温度 -30 °C 条件下不同时刻喷雾轮廓发展

Fig.16 Spray profile variation with time under fuel temperature at 100 °C and ambient temperature at -30 °C



(a) 25 °C



(b) -30 °C

图 17 燃油温度 100 °C、环境温度 25 °C 与 -30 °C 条件下 1 000 μs 时刻喷雾灰度图

Fig.17 Spray gray scale diagram at 1 000 μs under fuel temperature at 100 °C, ambient temperature at 25 °C and -30 °C

于 25 °C 时, 喷雾两侧的涡流区受到环境气体的冷却作用而迅速冷凝, 形成高液相浓度的伞状结构. 此外, 伞形结构的形成大大增加了喷雾贯穿受到的环境阻力, 从而导致喷雾贯穿距增加缓慢, 随温度的降低伞形区域的液相浓度增加使这一现象更加显著, 这也解释了图 11 中贯穿距随温度降低而降低.

综上所述, 低温环境对闪沸喷雾宏观形态的作用机理如下: ①低温阻碍了喷雾发展过程中的喷雾塌陷. 当环境温度较高时, 在后续过热喷雾的加热下, 喷雾塌陷会逐渐恢复; 当环境温度足够低时, 喷雾塌陷程度持续被减小, 多束喷雾变宽. ②低温延缓了闪沸喷雾涡流区的出现时刻. 闪沸喷雾涡流区形成的原因是过热燃料大量蒸发, 气相燃料从喷雾头部被挤出, 导致喷雾与环境产生的强烈湍流. 而低温的环境介质降低了喷射初期喷雾整体温度, 直到后续更多过热燃料喷入, 喷雾才开始大量蒸发. ③低温减少了闪沸喷雾涡流区的蒸发. 闪沸喷雾的涡流是喷雾与环境介质强烈作用的区域, 低环境温度反而冷却了涡流区, 使涡流区液相燃料增多, 蒸发大大减缓, 从而导致喷雾变宽, 贯穿距降低.

4 结 论

本文在低温定容弹试验装置中, 通过高速纹影法和激光粒度仪研究了常温与低温多孔甲醇喷雾的宏观形态和粒径分布特性, 并且利用喷嘴加热装置, 通过高速纹影法研究了低温条件下过热喷雾的宏观形态. 具体结论如下:

(1) 环境温度下降, 由于甲醇喷雾蒸发及气相夹带较少, 喷雾整体变浓变宽, 多孔喷雾各雾束更趋向于合并而不是形成清晰的分隔间隙, 在 -30 °C 时多雾束不存在清晰的边界. 随环境温度降低, 喷雾贯穿距略微增加, 锥角略微降低, 整体喷雾参数变化不大.

(2) 随着环境温度降低, 喷雾索特平均直径显著增加. 环境温度从 25 °C 降低至 -30 °C, 喷雾索特平均直径大致增加了 2 μm. 由于液滴蒸发随温度呈指数变化, 因此 -10 °C 与 -30 °C 条件下喷雾的索特平均直径差距不大.

(3) 在高温环境下, 过热甲醇喷雾迅速塌陷为单束喷雾; 而在常温与低温环境下, 过热甲醇喷雾先呈现三束喷雾特征, 随后喷雾头部膨胀为伞形. 随环境温度降低, 过热甲醇喷雾的贯穿距降低, 形状因子 C 增大. 相比贯穿距, 形状因子 C 对过热喷雾形态的评估更准确.

(4) 低温环境主要从阻碍喷雾塌陷、延缓涡流区

出现、减少涡流区蒸发3个方面影响过热甲醇喷雾的宏观发展,这导致了低温过热甲醇喷雾完全不同的宏观特性,即贯穿距减小、喷雾径向发展增加以及喷雾头部呈现伞形。

(5) 预热燃料作为一种优化发动机冷启动性能的技术,本文的试验结果与理论分析对该技术在实际发动机中的应用提供了指导。

参考文献:

- [1] Huang Y, Lei C, Liu C H, et al. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116971.
- [2] 姚春德, 姚安仁. 甲醇燃料的应用现状及其展望[J]. *汽车安全与节能学报*, 2023, 14(5): 521-535.
Yao Chunde, Yao Anren. Application status and prospect of methanol fuel[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy Conservation*, 2023, 14(5): 521-535 (in Chinese).
- [3] Chen Z, Wang L, Zhang Q, et al. Effects of spark timing and methanol addition on combustion characteristics and emissions of dual-fuel engine fuelled with natural gas and methanol under lean-burn condition[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181: 519-527.
- [4] Wu Y, Panigrahy S, Sahu A B, et al. Understanding the antagonistic effect of methanol as a component in surrogate fuel models: A case study of methanol/n-heptane mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 226: 229-242.
- [5] Chen Z, Wang L, Yuan X, et al. Experimental investigation on performance and combustion characteristics of spark-ignition dual-fuel engine fueled with methanol/natural gas[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150: 164-174.
- [6] Çelik M B, Özdalyan B, Alkan F. The use of pure methanol as fuel at high compression ratio in a single cylinder gasoline engine[J]. *Fuel*, 2011, 90(4): 1591-1598.
- [7] Zhao F, Lai M C, Harrington D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, 25(5): 437-562.
- [8] Gong C, Deng B, Wang S, et al. Combustion of a spark-ignition methanol engine during cold start under cycle-by-cycle control[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(5): 2981-2985.
- [9] Li Z, Gong C, Qu X, et al. Critical firing and misfiring boundary in a spark ignition methanol engine during cold start based on single cycle fuel injection[J]. *Energy*, 2015, 89: 236-243.
- [10] Gong C, Peng L, Chen Y, et al. Computational study of intake temperature effects on mixture formation, combustion and unregulated emissions of a DISI methanol engine during cold start[J]. *Fuel*, 2018, 234: 1269-1277.
- [11] Gong C, Sun J, Chen Y, et al. Numerical study of cold-start performances of a medium compression ratio direct-injection twin-spark plug synchronous ignition engine fueled with methanol[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119235.
- [12] Aleiferis P G, Shukla J, Brewer M, et al. Spray development of iso-octane, ethanol, hydrous ethanol and water from a multi-hole injector under ultra cold fuel temperature conditions[J]. *Fuel*, 2021, 303: 120983.
- [13] Wang X R, Li H M, Li G X, et al. Experimental investigation of atomization characteristics at low temperature environments during diesel engine cold start[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 113: 101544.
- [14] Lee K, Pintor D L, Assanis D, et al. Fuel temperature and injection pressure influence on the cold start GDI sprays[J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, 16: 100206.
- [15] Brunocilla M F, Lepsch F. Influence of hot fuel injection on air/fuel mixture preparation and effects on flex fuel engines[C]//2006 SAE Brasil Congress and Exhibit. 2006: 2006-01-2619.
- [16] Xu M, Zhang Y, Zeng W, et al. Flash boiling: Easy and better way to generate ideal sprays than the high injection pressure[J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2013, 6(1): 137-148.
- [17] Kapusta Ł J. Understanding the collapse of flash-boiling sprays formed by multi-hole injectors operating at low injection pressures[J]. *Energy*, 2022, 247: 123388.

- [18] Colson S, Yamashita H, Oku K, et al. Study on the effect of injection temperature and nozzle geometry on the flashing transition of liquid ammonia spray[J]. *Fuel*, 2023, 348: 128612.
- [19] Liu F, Gao Y, Zhang Z, et al. Study of the spray characteristics of a diesel surrogate for diesel engines under sub/supercritical states injected into atmospheric environment[J]. *Fuel*, 2018, 230: 308-318.
- [20] 马寅杰. 定容弹内正戊醇/柴油/生物柴油混合燃料喷雾燃烧及联合反应机理研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2018.
- Ma Yinjie. Study on Spray Combustion and Combined Reaction Mechanism of n-Pentanol/Diesel/Biodiesel Mixed Fuel in Fixed-Volume Bomb[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018(in Chinese).
- [21] 赵家丰, 聂万胜, 林伟, 等. 喷雾场内液滴粒径光学测试技术进展[J]. *激光技术*, 2019, 43(5): 112-117.
- Zhao Jiafeng, Nie Wansheng, Lin Wei, et al. Progress in optical measurement technology of droplet size in spray field[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(5): 112-117(in Chinese).
- [22] Li X, Xu Q, Qiu S, et al. Investigations on the impact of phase change on single plume flash boiling radial expansion and drop-sizing characteristics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 202: 117911.
- [23] Lacey J, Poursadegh F, Brear M J, et al. Generalizing the behavior of flash-boiling, plume interaction and spray collapse for multi-hole, direct injection[J]. *Fuel*, 2017, 200: 345-356.