

环境压力对液滴流瞬态蒸发影响的实验测量

吕绮梦, 吴迎春, 曾磊, 李灿, 徐东炎, 吴学成
(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 为了研究压力条件下液滴间相互作用对其蒸发速率的影响, 采用相位粒子干涉成像 (PHIPI) 技术对无水乙醇的单分散液滴流在定压腔内的蒸发进行了研究. 将射流破碎产生的单分散液滴流注入定压腔中, 利用高速显微阴影法对液滴流的尺寸和间距进行了标定. 采用粒子测速成像技术对液滴流附近气体运动进行表征. 随后, 在环境压力 0.1 ~ 0.8 MPa 下, 对粒径范围 100 ~ 200 μm 的液滴在无量纲间距参数 2 ~ 4、液滴速度 4.1 ~ 7.3 m/s 等工况下的蒸发速率进行了测量. 实验结果表明, 液滴相对间距越小, 液滴蒸发速率越慢; 在室温下, 环境压力对液滴的蒸发起抑制作用; 液滴流速越小, 压力对其蒸发的影响越明显.

关键词: 液滴蒸发; 液滴流; 环境压力; 相位粒子干涉成像

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2022)04-0403-07

Characterization of Effect of Ambient Pressure on Transient Evaporation of Droplet Stream

Lü Qimeng, Wu Yingchun, Zeng Lei, Li Can, Xu Dongyan, Wu Xuecheng
(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To investigate the effect of droplets interactions on their evaporation rates under high pressure conditions, the present study examines the use of phase interferometric particle imaging (PHIPI) technique to characterize the evaporation of a monodisperse ethanol droplet stream under pressure conditions. The monodisperse droplet stream, generated from jet disintegration, was injected into the constant pressure chamber. The droplet size and spacing were calibrated by high-speed microscopic shadowgraphy. Besides, the gas motion in the vicinity of the droplet stream was characterized by particle velocimetry imaging. Under different ambient pressures (ranging from 0.1 to 0.8 MPa), the evaporation rates of droplets (with the diameter ranging from 100 to 200 μm) were measured using PHIPI. The dimensionless spacing parameter in this study was limited between 2 to 4, and the velocity of the droplet stream ranged from 4.1 to 7.3 m/s. The experimental results demonstrate a great influence on droplet evaporation due to droplet interactions. Furthermore, ambient pressure decreases the droplet evaporation rate at room temperature and such influence is more significant for the droplet stream with smaller velocity.

Keywords: droplet evaporation; droplet stream; ambient pressure; phase interferometric particle imaging

收稿日期: 2021-02-21.

基金项目: 国家重大科技专项资助项目 (J2019-III-0006-0049).

作者简介: 吕绮梦 (1996—), 女, 博士研究生, lvqm@zju.edu.cn.

通信作者: 吴迎春, 男, 博士, 研究员, wycgsp@zju.edu.cn.

液体燃料在内燃机、航空发动机及燃汽轮机等场合具有广泛应用. 为了优化发动机燃烧室的设计和燃烧组织, 需要对液滴的传热传质进行可靠的描述. 作为液滴蒸发的最小单元, 单液滴的蒸发过程已得到较为完善的研究, 相关的实验和模型研究总结了液滴初始粒径、温度及环境温度、气流速度等对液滴蒸发的影响规律^[1-4]. 在工程应用中, 为了提高热效率, 实际运行压力通常在燃料的临界压力或超临界压力下. 因而, 理解和量化环境压力对液滴蒸发的影响具有重要意义. 对高压条件下单液滴蒸发的模拟研究发现, 液滴寿命受环境温度和压力的耦合影响^[5]; 经典的 D^2 定律在亚临界条件下仍然成立, 而在超临界条件下偏离较大^[4, 6].

对于喷雾燃烧发动机, 燃油的蒸发过程实际上是离散液滴群的蒸发. 由于液滴间的相互作用, 与孤立液滴相比, 液滴群的传热传质过程显著降低. 液滴的相互作用与液滴初始尺寸、间距及液滴阵列的排列方式有关. Chiang 和 Imaoka 等^[7-9]研究了不同相对间距的多个液滴矩阵的蒸发速率及发展规律, 拟合得到液滴尺寸、相对间距对液滴蒸发的影响关系式. 法国 Lemoine 团队^[10-11]对单分散液滴流的蒸发进行了大量实验研究, 主要利用双色激光诱导荧光法、粒子干涉成像和高速阴影等方法对液滴蒸发过程液相及气相参数的变化进行研究. 国内对密集液滴簇的蒸发研究还处于起步阶段. 于磊^[12]利用高速阴影法对乙醇单分散液滴的蒸发进行了研究. 段小龙等^[13]采用悬挂液滴法, 对高温下单、双液滴的蒸发进行了研究. 结果表明, 双液滴间的相互作用导致液滴与周围环境的传质速度降低, 蒸发减缓. 诸如此类研究, 对蒸发液滴粒径变化检测大都基于直接成像, 其精度为微米级, 难以检测到瞬态下更为细小的粒径变化. Wu^[14-15]和 Li 等^[16]基于相位彩虹技术研究了单分散液滴流的蒸发, 该技术可以同时测量液滴的温度、微米级粒径和纳米级粒径变化. 针对高压条件下、运

动多液滴蒸发的实验研究还未见报道, 实验数据的缺乏导致相关数值模型的建立和验证困难.

本文基于相位粒子干涉成像 (phase interferometric particle imaging, PHIPI) 技术^[17], 对环境压力 0.1 ~ 0.8 MPa 下的无水乙醇单分散液滴流的瞬态蒸发进行了实验研究. 下文将简要介绍实验系统及测量原理, 并对液滴相对间距、速度及环境压力对液滴流蒸发的影响进行分析.

1 实验系统及测量技术

1.1 实验系统

单分散液滴蒸发实验装置如图 1 所示, 主要由高压腔体、单分散液滴流发生器、注射泵、压电驱动器和激光测试单元组成. 单分散乙醇液滴流由压电陶瓷振动的液体射流解体产生. 通过调整高压注射器的注射流量 Q_j , 可控制液滴流的速度. 在一定流量下, 通过改变压电驱动器的频率 f , 可以改变液滴大小及间距. 液滴流发生器安装于高压腔体中, 腔体内径 120 mm, 高度 200 mm. 腔体外壁不同方向嵌有厚度为 20 mm 的紫外熔融石英玻璃, 作为激光入射和测量窗口. 腔底部安装有锥形空间, 用于收集和排出实验过程中的燃料液体. 腔内的高压惰性环境由高压氮气提供, 采用压力传感器实时测量腔内压力. 为减少供压时空气扰动对液滴流的影响, 在腔体上部的空气入口处安装有泡沫铜整流板, 可将腔内空气流速控制在 0.1 m/s 以下, 并有效减少气流的涡结构. 此外, 在腔体外壁不同高度处还安装有若干 K 型热电偶, 用于检测壁面及腔内不同位置的空气温度. 在本实验中, 腔体内部及液体的温度为 (298.2 ± 1.0) K.

在实验开始前, 利用高速显微阴影技术对白光 LED 灯水平照射下的液滴流阴影图像进行记录, 以标定液滴流的速度 v_d 、粒径 D 和间距 S . 高速相机曝光时间设为 1.5 μ s, 帧数为 60 000 帧/s, 显微物镜的

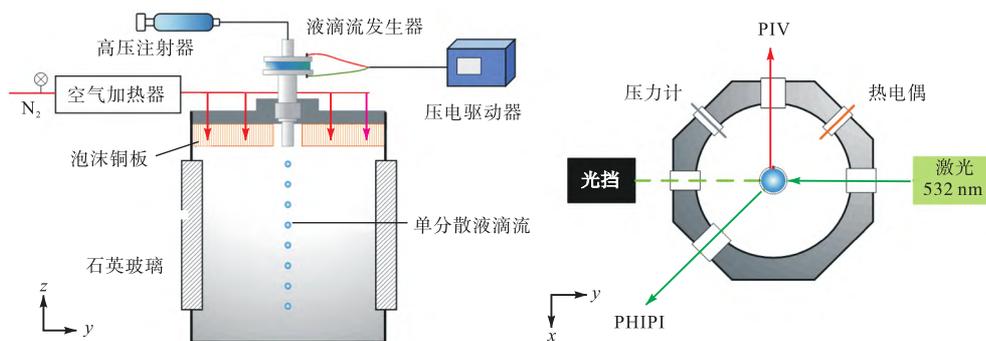


图 1 实验系统示意

Fig.1 Schematic of experimental setup

放大倍率为 23 倍. 采用粒子图像测速技术(PIV)对液滴流附近的气流进行表征. 实验过程中, 液滴的粒径及蒸发率由 PHIPI 技术测量. 由于腔内空间有限, 需要考虑蒸气饱和问题. 蒸气的扩散长度可由 $L = \sqrt{\alpha t}$ 估计. 其中, 扩散系数 $\alpha = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 扩散持续时间 $t = 1 \text{ s}$, 从而得到蒸气扩散长度 L 约为 3 mm, 相比于腔体内径可忽略不计, 保证了腔内非饱和的条件.

1.2 液滴粒径及蒸发率测量

如图 2 所示, 根据几何光学原理, 粒子干涉成像中的条纹结构是由液滴外表面反射光 ($p = 0$) 与直接透射光 ($p = 1$) 之间的干涉产生的. 干涉条纹的频率 f_i 与液滴直径 D 有关, 其关系可以表示为^[17]:

$$D = 2\lambda f_i \left[\cos \frac{\theta_f}{2} + \frac{n \sin \frac{\theta_f}{2}}{\sqrt{n^2 - 2n \cos \frac{\theta_f}{2} + 1}} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: λ 为入射光波长; θ_f 为散射角. 液滴粒径发生微小变化时, 其干涉条纹会产生相移. 粒径变化量 ΔD 与条纹结构的相移 $\Delta \varphi_\delta$ 间的关系可表示为

$$\Delta D = c_\delta \Delta \varphi_\delta \quad (2)$$

系数 c_δ 是液滴折射率 n 的函数:

$$c_\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\sin \frac{\theta_f}{2} + \sqrt{1 + n^2 - 2n \cos \frac{\theta_f}{2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

c_δ 随折射率的相对变化非常小, 在本实验中近似处理为常数. 由式 (2) 可以看出, 液滴干涉条纹的相移线性地依赖于其尺寸变化, 但与液滴尺寸无关. 这表明, 该技术可以在相同灵敏度的情况下, 对相当大范围的液滴尺寸变化进行测量, 且测量精度与液滴尺寸无关.

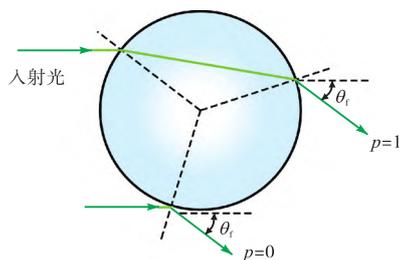


图 2 光线经过液滴的折射与反射光路

Fig.2 Illustration of optical path of the transmission and reflection

实验中采用高曝光时间, 从而同时记录液滴流轨迹上不同高度液滴的彩虹信号. 经标定, PHIPI 系统的测量高度为 $h = 7.5 \text{ mm}$. 由于液滴流良好的单分散性, 通过高速相机标定的液滴速度, 可由式 $t = h/v_d$ 将液滴位置信息转换为时间信息, 从而得到液滴的蒸发常数.

2 实验结果与讨论

2.1 液滴速度及间距测量结果

在一定流量下, 调整压电驱动器的激励频率 f , 以得到不同粒径、间距的单分散液滴流. 图 3 为 $Q_1 = 1.4 \text{ mL/min}$ 时, 不同激励频率下液滴流的阴影图像.

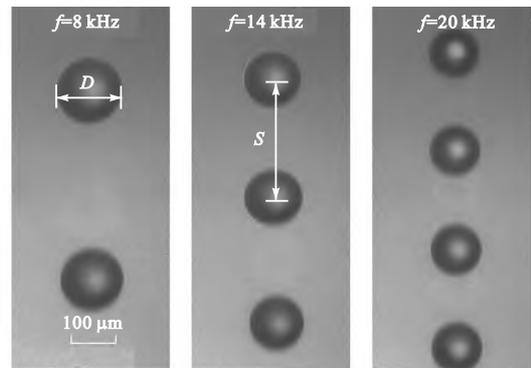
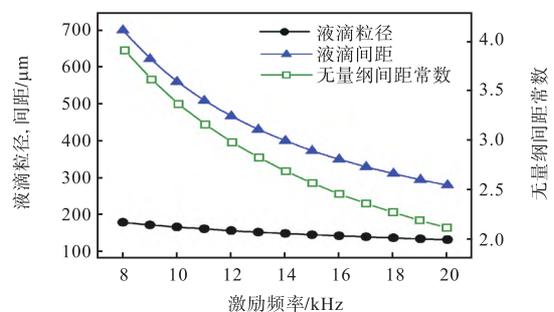


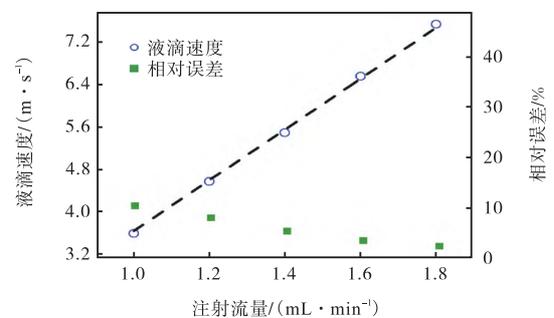
图 3 不同激励频率下的液滴流显微阴影图像

Fig.3 Micro-shadow graph of droplet stream at different excitation frequencies

引入液滴流的无量纲间距参数 $C = S/D$ 以量化液滴间的相互作用. 图 4(a) 中给出了高速显微阴影法测量得到的液滴平均粒径、间距及无量纲间距参数 C 随压电驱动器激励频率的变化. 在一定范围内, 随



(a) 液滴尺寸和间距



(b) 不同注射流量下的液滴速度

图 4 高速显微阴影法测得的液滴尺寸、间距及不同注射流量下的液滴速度

Fig.4 Measured droplet size, spacing, and velocity of droplet streams

着激励频率增加,液滴的粒径、间距和无量纲间距参数均减小.在流量 1.4 mL/min 工况下,可以得到液滴的粒径范围为 131 ~ 179 μm ,无量纲间距参数 C 的范围为 2.1 ~ 3.9.

液滴的速度可通过对相邻两帧图像液滴位置的处理得到.理想情况下,液滴速度可通过 $v_d = Q_j/A_{\text{pinhole}}$ 进行估算,其中 A_{pinhole} 为液滴流发生器的喷嘴面积.但由于液滴下落过程中还受到曳力等影响,速度会偏离理论值.图 4(b) 给出了不同流量下测量得到的液滴速度数据.可以看到,液滴速度随注射流量近似呈线性变化.且随着注射流量增大,液滴实际速度与理论速度的相对误差减小.

2.2 腔内气流场标定结果

在实验开始前,向腔内加入示踪粒子,并用片激光照流场.在腔内被照亮区域的垂直方向,利用高速相机记录示踪粒子的运动图像,利用互相关算法进行处理得到流场的速度矢量分布^[18].如图 5(a) 是注射流量 1.2 mL/min 工况下(对应液滴流速度 4.1 m/s),腔内气流场的速度矢量分布.由于液滴流与其附近示踪粒子的光强差较大,对液滴流部分进行了 Mask 处理.沿 y 方向选中一条直线,绘制其上的速度分布,如图 5(b).可以看出,越靠近液滴流,气

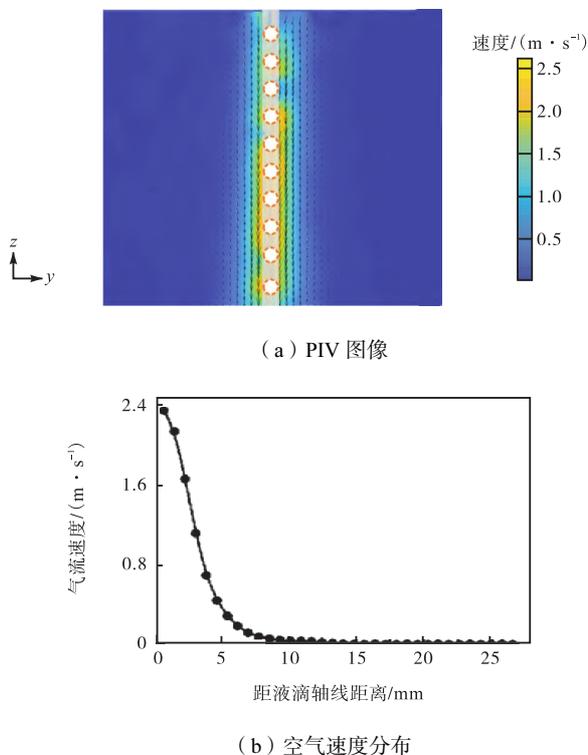


图 5 液滴流周围空气流动的 PIV 图像和距液滴轴线不同位置的空气速度分布

Fig.5 PIV image of the air flow around droplet stream, and air velocity distribution at different positions from droplet stream axis

流速度越大.在距离液滴约 15 mm(100 倍液滴粒径)处,气流速度衰减到 0.1 m/s 以下.因而,在本实验中,将液滴的绝对速度视为其与气流的相对速度.

2.3 PHIPI 测量结果

利用粒子干涉成像技术测量液滴粒径,首先需要相机进行散射角标定,即确定测量点处液滴的散射光绝对角度与相机像素的函数关系.本实验通过记录一系列已知折射率、粒径液滴的前向散射图像,利用 Mie 散射理论计算相应的散射信号,比较若干个条纹峰值对应的散射角/像素点位置,经过线性拟合可以得到相机靶面上的散射角分布.

图 6 为大气压力下,注射流量 1.4 mL/min 时不同激励频率下的 PHIPI 图像及其归一化光强分布.从图 6(b) 中可以看出,随着激励频率增加,液滴粒径变小,条纹频率减小.利用式(1),对液滴粒径进行反演,并将结果与高速显微阴影法得到的液滴粒径进行对比,其相对误差在 1.5% 内,证明了液滴发生系统运行的稳定性.

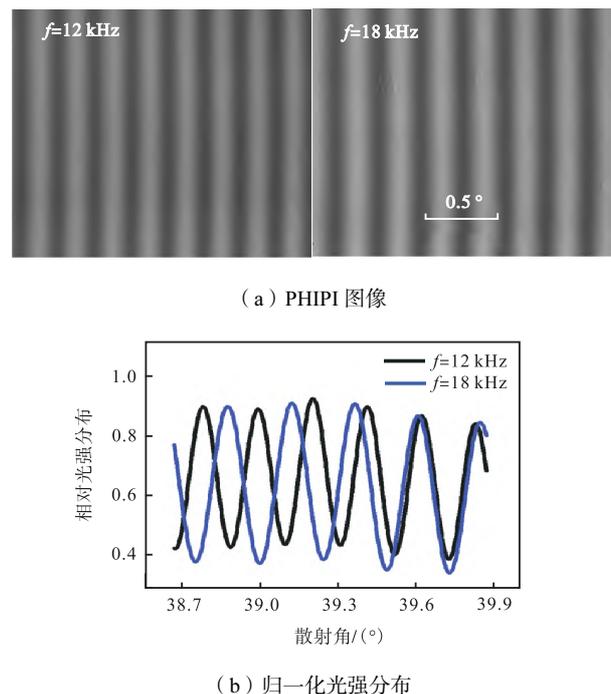


图 6 不同激励频率下的 PHIPI 图像及其归一化光强分布

Fig.6 PHIPI images of droplet stream and their normalized intensity distributions under at different excitation frequencies

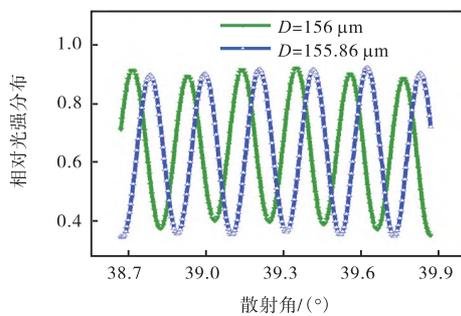
液滴在腔体中自上而下运动,伴随着蒸发,导致微小的粒径变化.在同一张图像中(图 7(a)),绘制其不同像素行的条纹相对光强分布,如图 7(b).可以观察到,随着像素行(时间)数值增大,液滴散射的条纹相对光强分布的频率一致,即无法通过频率分辨液滴

粒径的变化. 然而, 其条纹结构向更大的散射角方向产生了明显的相移. 将图 7(a) 中绿线标示像素行 ($t = 0$ ms) 的光强分布作为参考 I_r , 并计算其与红线标示像素行 ($t = 1.5$ ms) 光强分布 I_t 的交叉功率谱密度 $\Gamma_{rr}(f_c)$:

$$\Gamma_{rr}(f_c)\{I_r, I_t\} = A_{rr}(f_c) \exp[i\phi_{rr}(f_c)] \quad (4)$$



(a) PHIPI 图像



(b) 归一化光强分布

图 7 PHIPI 图像及其不同高度归一化光强分布

Fig.7 PHIPI images and their normalized intensity distributions of droplet stream at different heights

A_{rr} 在相干频率 f_c 处存在全局最大值. 从 $t = 0$ ms 到 1.5 ms, 干涉条纹的相移为 0.5π , 通过式 (2)、(3) 得出液滴的粒径变化量约为 140 nm.

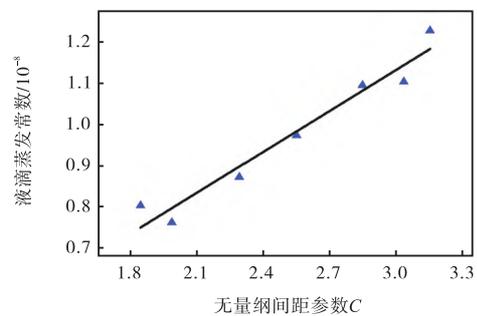
由液滴蒸发的经典理论—— D^2 定律, 液滴的蒸发常数可以表示为

$$k_e = \frac{[(D + \Delta D)^2 - D^2]}{\Delta t} \quad (5)$$

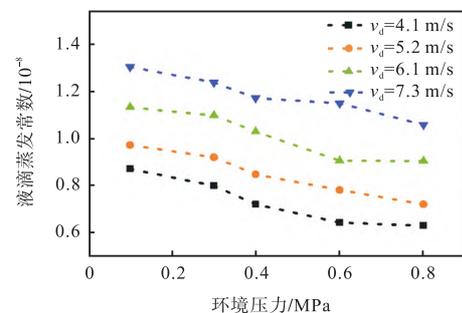
基于此, 计算不同工况下液滴流的蒸发常数数值. 图 8(a) 为 1.6 mL/min 下, 不同液滴流无量纲间距参数时的蒸发常数. 在实验运行范围内, 液滴蒸发常数几乎线性依赖于无量纲间距参数. 随着 C 由 1.81 增加至 3.22 , 液滴蒸发常数 k_e 由 0.8×10^{-8} 升至 1.2×10^{-8} . 由于实验温度远低于液体沸点, 液滴的蒸发主要由传质主导. 随着液滴的相对间距减小, 液滴附近蒸气浓度梯度减小, 传质推动力减小, 导致蒸发常数变小.

为了对比液滴速度和环境压力对液滴流蒸发的影响, 在不同流量下, 挑选液滴无量纲间距参数 C 较相近的工况. 如图 8(b) 为 $C \approx 2.9$ 时, 不同液滴速度

和环境压力下液滴流的蒸发常数. 可以看出, 液滴蒸发常数和液滴速度呈正相关, 而与环境压力呈负相关. 环境压力与温度对液滴蒸发速率存在耦合影响: 一方面, 环境压力升高会导致液滴的扩散系数降低, 蒸气传质动力减小, 蒸发变慢; 而另一方面, 会使汽化潜热减少, 增强液滴表面与气体的传热, 使蒸发加快. 在常温时, 前者的影响占据了主导, 因而表现为蒸发常数随环境压力升高而减小. 实验过程中, 在环境压力从 0.1 MPa 增至 0.8 MPa 时, 对于流速 7.3 m/s、 6.1 m/s、 5.2 m/s、 4.1 m/s 的液滴流, 其蒸发常数的相对变化分别为 19.3% 、 20.4% 、 25.7% 、 27.6% . 这一结果表明, 环境压力的变化对较低流速液滴蒸发的影响更为明显.



(a) 液滴无量纲间距参数



(b) 环境压力

图 8 液滴无量纲间距参数和环境压力对蒸发常数的影响

Fig.8 Effects of spacing parameter C , and ambient pressure on the measured evaporation rate k_e of droplet stream

3 结论

采用相位粒子干涉成像 (PHIPI) 技术, 并结合 PIV、高速显微阴影法对不同流量、激励频率下的单分散液滴流在不同环境压力下的蒸发进行了测量. 根据 PHIPI 图像的相移, 计算了液滴的瞬态蒸发量. 基于实验数据, 得出以下结论:

(1) 液滴流无量纲间距参数越小, 液滴间相互作用越明显, 液滴表面传质驱动力越小, 导致液滴蒸发

速率减小。

(2) 随着液滴速度增加,其与周围气体的传热、传质强度均增加,蒸发速率显著增大。

(3) 在实验所处的室温条件下,压力升高对传质的抑制作用占主导低位,因而蒸发速率随环境压力增大而减小。

(4) 液滴流速越低,环境压力对液滴蒸发的影响更明显。

在下一步工作中,将对腔内进一步加压,并对空气和腔体升温,综合考虑环境温度与压力对液滴蒸发的耦合作用;结合其他光学测量技术,对液滴流温度及其附近的蒸气浓度等进行测量。

参考文献:

- [1] 孙慧娟, 张海滨, 白博峰. 高温燃气中单个液滴的蒸发特性[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 833-837.
Sun Huijuan, Zhang Haibin, Bai Bofeng. Evaporation investigation of single droplet in high temperature fuel gas[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(7): 833-837 (in Chinese).
- [2] Cooney A Y, Singer S L. Modeling multicomponent fuel droplet vaporization with finite liquid diffusivity using Coupled Algebraic-DQMoM with delumping[J]. *Fuel*, 2018, 212: 554-565.
- [3] Al Qubeissi M, Sazhin S, Elwardany A. Modelling of blended diesel and biodiesel fuel droplet heating and evaporation[J]. *Fuel*, 2017, 187: 349-355.
- [4] 周舟, 范玮, 靳乐, 等. 单个 RP-3 航空煤油液滴的超临界蒸发实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(8): 1422-1430.
Zhou Zhou, Fan Wei, Jin Le, et al. Experimental investigation on supercritical evaporation of RP-3 aviation kerosene droplet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(8): 1422-1430 (in Chinese).
- [5] 费舒波, 齐运亮, 李雁飞, 等. 高温高压下机油液滴蒸发特性的数值模拟[J]. 内燃机学报, 2019, 37(2): 114-122.
Fei Shubo, Qi Yunliang, Li Yanfei, et al. Simulation for oil droplet evaporation under high-temperature and high-pressure conditions[J]. *Transactions of CSICE*, 2019, 37(2): 114-122 (in Chinese).
- [6] Nomura H, Murakoshi T, Suganuma Y, et al. Microgravity experiments of fuel droplet evaporation in sub-and supercritical environments[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2425-2432.
- [7] Chiang C, Sirignano W. Interacting, convecting, vaporizing fuel droplets with variable properties[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36(4): 875-886.
- [8] Chiang C, Sirignano W A. Axisymmetric calculations of three-droplet interactions[J]. *Atomization and Sprays*, 1993, 3(1): 91-107.
- [9] Imaoka R T, Sirignano W A. Vaporization and combustion in three-dimensional droplet arrays[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 1981-1989.
- [10] Lavieille P, Lemoine F, Lavergne G, et al. Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser-induced fluorescence[J]. *Experiments in Fluids*, 2001, 31(1): 45-55.
- [11] Castanet G, Lebouché M, Lemoine F. Heat and mass transfer of combusting monodisperse droplets in a linear stream[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(16): 3261-3275.
- [12] 于磊. 高温对流环境下单分散液滴流蒸发特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
Yu Lei. Research on Mono-disperse Droplets Evaporation with the High Temperature Convective Environment [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015 (in Chinese).
- [13] 段小龙, 仇性启, 马力, 等. 高温气流中双液滴蒸发过程实验研究[J]. 工业加热, 2014, 43(1): 1-3, 9.
Duan Xiaolong, Qiu Xingqi, Ma Li, et al. Experimental study on double-droplets evaporation in high temperature gas flow[J]. *Industrial Heating*, 2014, 43(1): 1-3, 9 (in Chinese).
- [14] Wu Y, Promvongsa J, Saengkaew S, et al. Phase rainbow refractometry for accurate droplet variation characterization[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4672-4675.
- [15] Wu Y, Crua C, Li H, et al. Simultaneous measurement of monocomponent droplet temperature/refractive

- index, size and evaporation rate with phase rainbow refractometry[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 214: 146-157.
- [16] Li C, Lü Q, Wu Y, et al. Measurement of transient evaporation of an ethanol droplet stream with phase rainbow refractometry and high-speed microscopic shadowgraphy[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118843.
- [17] Wu Y, Li H, Brunel M, et al. Phase interferometric particle imaging for simultaneous measurements of evaporating micron-sized droplet and nanoscale size changes[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(4): 1324-1347.
- [18] William Thielicke. PIVlab-Particle Image Velocimetry (PIV) Tool with GUI[EB/OL]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-particle-image-velocimetry-piv-tool>, 2020.
- (责任编辑：梁霞)