

环境温度与压力对 HFE7100 制冷剂单液滴蒸发特性的影响机制研究

印晶, 刘艺, Leslie K. NORVIHOHO, 陈斌, 周致富
(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为系统研究环境温度与压力对环保型制冷剂 HFE7100 单液滴蒸发特性的影响机制, 基于挂滴法, 结合高速摄像与热电偶测温技术, 同步观测液滴形态与内部温度变化。试验结果表明, HFE7100 单液滴蒸发特性受环境温度(50、100、150、200、250 °C)与压力(1、10、20 bar)的显著影响。在高温(>100 °C)下, 液滴蒸发呈双阶段特征, 即初始加热阶段和平衡蒸发阶段, 而 50 °C 低温下仅表现为单阶段平衡蒸发。在 250 °C 时, 因组分沸点差异较小可观察到气泡形成与破裂, 但对蒸发的促进作用有限, 且高压(10、20 bar)会显著减小气泡尺寸。高温通过提高气液相传热强度、饱和蒸气压及气相扩散系数, 显著加速液滴升温与蒸发, 导致初始加热阶段占比增加。此外, 环境压力对蒸发特性的影响取决于环境温度。在 50 °C 低温下, 压力升高因抑制蒸汽扩散而降低蒸发速率常数; 而在 150、200、250 °C 高温下, 压力通过降低气化潜热和增强对流传热加速液滴升温, 反而提升蒸发速率常数。这些效应(促进液滴升温与抑制蒸汽扩散)相互竞争, 最终决定了环境压力对液滴蒸发的影响。该发现为喷雾冷却技术的优化提供了重要的理论依据。

关键词: HFE7100 制冷剂; 液滴蒸发; 喷雾冷却; 环境温度; 环境压力

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202601011 **文章编号:** 0253-987X(2026)01-0107-10

Study on the Influence Mechanism of Ambient Temperature and Pressure on Single Droplet Evaporation Characteristics of HFE7100 Refrigerant

YIN Jing, LIU Yi, Leslie K. NORVIHOHO, CHEN Bin, ZHOU Zhifu

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To systematically investigate the influence mechanism of ambient temperature and pressure on the single-droplet evaporation characteristics of the environmentally friendly refrigerant HFE7100, the suspended droplet method is employed, combined with high-speed imaging and thermocouple temperature measurement techniques to simultaneously observe droplet morphology and internal temperature changes. Experimental results indicate that the single-droplet evaporation characteristics of HFE7100 are significantly affected by ambient temperature (50, 100, 150, 200, 250 °C) and pressure (1, 10, 20 bar). At high temperatures (>100 °C), evaporation exhibits a two-stage characteristic: an initial heating stage and an equilibrium evaporation stage; whereas at a low temperature of 50 °C, it only shows a single-stage equilibrium evaporation. At 250 °C, due to the

收稿日期: 2025-03-22。 作者简介: 印晶(1997—), 女, 博士生; 周致富(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176163); 陕西省杰出青年基金资助项目(2024JC-JCQN-58); 陕西省高校联合资助项目(2023GXLH-003)。

网络出版时间: 2025-08-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250804.1628.004>

small difference in component boiling points, bubble formation and rupture can be observed, but their promoting effect on evaporation is limited, and high pressure (10 and 20 bar) significantly reduces bubble size. High temperature significantly accelerates droplet heating and evaporation by enhancing gas-liquid heat transfer intensity, saturated vapor pressure, and gas-phase diffusion coefficient, but it increases the proportion of the initial heating stage. Furthermore, the influence of ambient pressure on evaporation characteristics depends on the ambient temperature. At a low temperature of 50 °C, increased pressure reduces the evaporation rate constant by suppressing vapor diffusion. However, at high temperatures (150, 200, 250 °C), pressure accelerates droplet heating by reducing latent heat of vaporization and enhancing convective heat transfer, thereby increasing the evaporation rate constant. These effects (promoting droplet heating vs. suppressing vapor diffusion) compete with each other, ultimately determining the impact of ambient pressure on droplet evaporation. The findings provide an important theoretical basis for the optimization of spray cooling technology.

Keywords: HFE7100 refrigerant; droplet evaporation; spray cooling; ambient temperature; ambient pressure

随着高功率电子芯片、航空航天及能源转换设备的快速迭代,热管理技术面临着前所未有的挑战。喷雾冷却技术因其高热通量(可达 $1\,200\text{ W/cm}^2$ ^[1])、低过热和快速响应特性,成为高功率散热的突破性方案^[2]。其中,环保型氢氟醚工质 HFE7100 因其优异的热物理特性^[3](低全球变暖值(GWP)/零臭氧破坏潜值(ODP)、宽温域适应性),在喷雾冷却中展现出巨大潜力^[4]。

近年来,国内外学者对 HFE7100 喷雾冷却技术进行了广泛研究。文献[5-6]通过对比不同强化表面结构,发现 75° 倾角时传热性能最佳。文献[7-8]采用静电喷雾技术,证实外加电场可使临界热流密度(CHF)从 55 W/cm^2 提升至 120 W/cm^2 。Chen 等^[9]设计并搭建了机载闭环 HFE7100 喷雾冷却系统,揭示了喷嘴压差、过冷度和腔室压力通过调控液滴特性(尺寸、速度、密度)和相变过程(蒸发与沸腾)对 CHF、传热系数(HTC)及蒸发效率的协同影响,并提出了高效工质利用与高热流密度的差异化策略。此外,Chen 等^[10]受叶片脉络启发,设计并制造了结合宏观叶脉与微观涂层的多尺度结构表面,其 CHF 较光滑表面提升了 116%。Sadaghiani 等^[11]通过试验研究了 HFE7100 两相喷雾冷却中主要参数的影响,发现较高的上游压力和较低的喷雾温度在单相和两相区域均能提升冷却性能,而较小喷雾角度可集中冷却加热表面,且其影响随喷雾压力和温度的增加而减弱。

上述研究为 HFE7100 喷雾冷却技术的优化提供了重要参考。然而,喷雾冷却的传热性能本质上

受控于液滴群与热表面的动态交互过程,这一过程涉及液膜铺展、相变蒸发及 CHF 等复杂机制。其中,液滴蒸发行为直接决定了液滴撞击冷却表面前的温度、直径和速度^[12],这些参数直接影响喷雾冷却性能。因此,从解析单个 HFE7100 液滴的蒸发过程入手开展研究尤为必要。

液滴蒸发是一个非常复杂的过程,涉及液相和气相中以及通过液气界面的热、质量和动量的传递。单液滴蒸发试验是最可靠的研究手段,其中液滴悬挂法因其操作简便、结果可靠而被广泛应用^[13]。该方法通过石英丝、玻璃毛细管或热电偶丝等固定液滴,利用表面张力维持液滴形态稳定,并结合高速摄影等技术实时观测蒸发过程。早期研究主要聚焦于醇类、烷烃等单组分燃料^[14-15],随后逐渐转向多组分复杂燃料体系,包括煤油^[16-17]、生物柴油^[18-19]、纳米燃油^[20]和乳化燃料^[21-22]。对于单组分燃料液滴,其蒸发过程主要分为初始加热和平衡蒸发两个阶段,平衡蒸发阶段液滴蒸发基本遵循 d^2 定律,即液滴直径 d 平方随时间线性减小^[23]。对于可混溶的多组分燃料,其蒸发模式主要分为 3 种:①组分间挥发性差异不显著的多组分燃料,其蒸发特性与单组分液滴相似,仍表现为双阶段蒸发特性,如柴油、煤油等^[24-25]。②高挥发性差异的多组分燃料且环境温度低于高沸点组分过热极限时,其蒸发过程包括低沸点组分的初始加热和平衡蒸发,随后是高沸点组分的初始加热和平衡蒸发^[26]。③高挥发性差异的多组分燃料且环境温度高于高沸点组分过热极限时,低沸点组分在液滴内部蒸发并产生气泡,可能导

致液滴破裂,如膨胀和微爆;其蒸发过程包括初始加热、波动蒸发和平衡蒸发,波动蒸发阶段的液滴直径波动频繁,直至低沸点组分几乎完全蒸发^[27-28]。

由于低沸点制冷剂快速挥发难以稳定悬挂,试验难度较高,上述研究多集中于高沸点燃料。目前,本课题组^[29]通过试验获得了制冷剂 R1336mzz(Z) 在 10 bar 下的蒸发特性,为低沸点制冷剂的研究提供了重要参考。通常,喷雾冷却发生在高压室中^[30-31],尽管已有大量研究探讨了液滴蒸发行为,但关于复杂环境条件下(特别是压力与温度协同作用环境)液滴蒸发动力学机制的系统研究仍显不足,尤其是针对低沸点制冷剂工质在不同工况下的蒸发特性及其内在机理尚未得到充分揭示。

因此,本文将 HFE7100 单液滴悬挂在直径为 50 μm 的热电偶丝结点处,依托高速背光成像技术的高时空分辨率,实现了液滴形态演变、界面波动及内部气泡生成等瞬态行为的 ms 级动态捕捉,从而系统探究了不同环境温度和压力条件下 HFE7100 单液滴蒸发过程的传热传质行为。通过对 HFE7100 单液滴蒸发特性的深入剖析,为全面理解其蒸发过程的内在机理提供了坚实的理论支撑,而且有望为解决制冷剂喷雾冷却技术中面临的诸多问题提供新的思路和方法。

1 试验方法及研究方案

1.1 HFE7100 主要热物性

本试验采用的工质 HFE7100,化学名称为甲基九氟丁醚^[32],分子式是 C₄F₉OCH₃,由美国 3M 公司生产,纯度大于 99.5%(质量分数),无需进一步纯化即可直接使用。HFE7100 作为氢氟醚类(HFEs)化合物的典型代表,具有无色透明、无刺激性气味、不燃、无毒、无腐蚀性等特性,同时具备高挥发性、高密度、低表面张力、低黏度和低介电常数等优良物理化学性质。此外,HFE7100 还拥有低 GWP 和零 ODP,这些特性使其成为电子冷却领域的理想介质。表 1 列出了 HFE7100 的基本物理性质^[3, 7, 33-34]。

值得注意的是,HFE7100 并非单一化合物,而是由两种性质相近且不可分离的同分异构体组成的二元混合物,分别为九氟正丁基甲基醚(nonafluoro-n-butylmethylether,CAS No. 163702-07-6)和九氟异丁基甲基醚(nonafluoro-iso-butylmethylether,CAS No. 163702-08-7),两种异构体的质量比为 0.452 : 0.548^[35]。

表 1 HFE7100 的基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of HFE7100

物理性质	数值和分子式
分子式	C ₄ F ₉ OCH ₃
分子质量/(g·mol ⁻¹)	250
沸点/℃	59~61
临界温度/℃	195.35
临界压力/bar	22.28
饱和蒸气压(25℃)/bar	0.27
液相密度/(kg·m ⁻³)	1 510
表面张力/(mN·m ⁻¹)	13.6
气化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	111.6
液相比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	1.183
液相热导率/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	0.069
偏心因子	0.421 5
全球变暖潜能值	297
臭氧破坏潜值	0
大气寿命/a	4.1

1.2 可视化试验台的搭建

图 1 展示了密闭环境单液滴蒸发可视化试验系统的整体结构示意图。该系统主要由压力控制系统、加热系统、液滴生成及传送系统以及温度和图像数据采集系统 4 部分组成。

压力控制系统采用双层结构设计,压力容器的内部空间分为常温区和高温区,腔体可承受高达 50 bar 的高压。压力控制系统用以产生和维持从大气压到 50 bar 的高压环境。加热炉最高温度可达 700℃,温度控制精度为±1℃。承压腔体侧壁上部沿径向对称开设两个石英玻璃视窗,分别用于高速摄像机拍摄和背光照明,下部开设的视窗用于观察液滴的生成和转移过程。

液滴生成及传送系统主要由耐压注液泵、针头、氧化铝陶瓷支架、K 型热电偶丝(CHAL-002-24)以及两套步进电机装置组成。通过耐压注液泵将少量试验工质挤压出来并粘附在注射针头上,控制步进电机将液滴转移并悬挂在直径为 50 μm 的热电偶丝上,随后将液滴转移至加热炉内。信号发生器输出的高电平信号同时触发高速摄像机和数据采集系统。液滴的上升距离约为 64.5 mm,最大传送速度为 200 mm/s,液滴上升到达最终位置所用的时间小于 0.5 s。

数据采集系统由计算机、NI DAQ 系统、无频闪

LED 强光源和 CMOS 高速摄像机组成。采用高速摄像机 (Photron FSATCAM SA-Z) 加装微距镜头 (Navitar Zoom 6000), 配合背景光源, 实时采集并记录液滴蒸发过程。图像采样频率设定为 $1\,000\text{ s}^{-1}$, 分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 像素, 曝光时间为 $1/100\,2\text{ s}$ 。通过 K 型热电偶直接测量液滴内部温度的瞬态变

化, 采样率为 500 Hz , 温度测量精度为 $\pm 0.75\% t$ (t 为被测温度)。由于热电偶丝直径远小于液滴初始直径的 $1/10$, 可忽略热电偶丝对液滴蒸发的影响^[36]。每种测试条件下的试验至少重复 5 次, 以最大限度减少试验误差, 确保试验结果的准确性和可靠性。

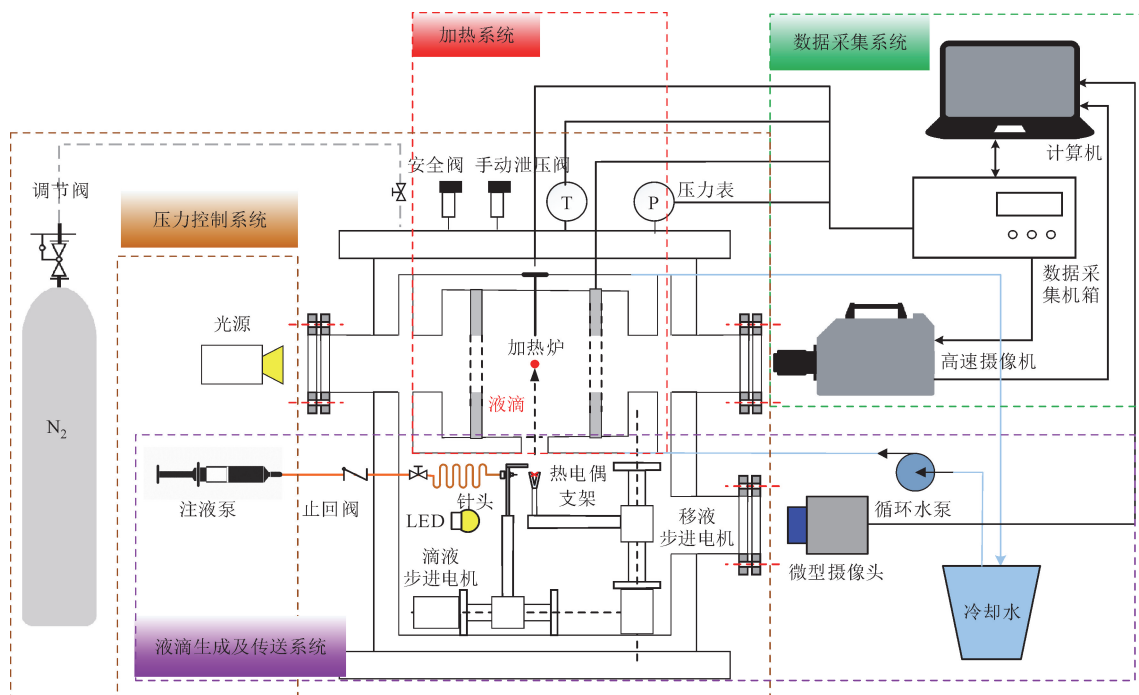


图 1 高温高压密闭环境单液滴蒸发可视化试验系统

Fig. 1 Experimental equipment for single-droplet evaporation in high temperature and high pressure closed environment

1.3 图像处理方法

瞬态液滴直径是研究液滴蒸发特性的关键参数。在重力、悬挂丝和表面张力的作用下, 液滴呈现椭球形而不是规则球体。本研究基于切片积分法和等效体积法, 不要求液滴整体对称, 利用 MATLAB 代码编写图像处理程序, 从液滴蒸发图像中提取液滴直径随时间的变化数据。图像处理过程主要包括以下步骤: 为降低处理成本并提高效率, 首先对原始图像进行剪裁, 提取感兴趣区域 (ROI), 截取的区域需完整覆盖液滴。其次, 将 ROI 区域转换为灰度图像, 并通过阈值分割进行二值化处理, 以区分液滴与背景, 并对二值图像进行孔洞填充, 确保液滴轮廓的完整性。再次, 如图 2 所示, 采用切片积分法, 通过三维体积重构, 将液滴沿 x 轴方向分割成一系列以单个像素点 (Δx) 为高度的圆柱形切片, 根据下式计算每个切片 i 的体积 (v_i)

$$v_i = \frac{\pi}{4} (y_i)^2 \Delta x = \frac{\pi}{4} (N \Delta y)^2 \Delta y = \frac{\pi}{4} N^2 \Delta y^3 \quad (1)$$

式中: y_i 为圆柱形切片的底面直径; Δx 和 Δy 为单个像素点对应的实际尺寸; N 为圆柱形切片底面直径对应的像素点个数。

去除热电偶丝所占体积后, 对所有切片的体积进行求和, 得到液滴的总体积

$$v = \sum v_i \quad (2)$$

最后, 假设液滴为标准球体, 折算其等效球体直径, 以此表征液滴直径, 计算式如下

$$d = \sqrt[3]{6v/\pi} \quad (3)$$

原始图像中拍摄的已知直径尺寸的温度传感器可用于标定单个像素点对应的实际尺寸。单个圆柱薄片体积和液滴总体积的绝对不确定度由下式确定

$$\Delta_{v_i} = v_i \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta_{y_i}}{y_i}\right)^2} \quad (4)$$

$$\Delta_v = \sum \Delta_{v_i} \quad (5)$$

式中: $\Delta_{\Delta x}$ 是单个像素点对应的实际尺寸 (Δx) 的测量不确定度; Δ_{y_i} 是切片 i 直径 y_i 的测量不确定度。

根据

$$\frac{\Delta d^2}{d^2} = \frac{2}{3} \frac{\Delta v}{v} \quad (6)$$

计算图像处理获得的液滴当量直径平方的不确定度 ($\Delta d^2/d^2$) 为 2.91%。

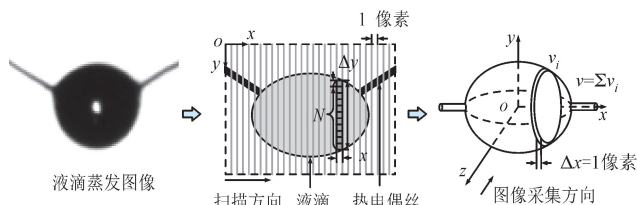


图 2 液滴当量直径计算原理图

Fig. 2 Determination principle of droplet equivalent diameter

2 结果与讨论

2.1 HFE7100 液滴蒸发过程

基于上述试验系统和研究方法,本文通过精确调控环境压力和温度等关键参数,开展了 HFE7100 单液滴蒸发试验。试验中,环境温度设定为 50、100、150、200、250 °C,环境压力选择为 1、10 和 20 bar。为减少液滴初始直径 d_0 对蒸发过程的影响,试验中将液滴初始直径控制在 (0.7 ± 0.1) mm,并采用液滴初始直径对液滴直径和蒸发时间进行归一化处理。为深入探究 HFE7100 单液滴蒸发过程中的形态变化细节,图 3 展示了不同试验工况下高速摄像机记录的液滴蒸发图像序列。第 1 张图像为液滴首次到达观察焦点时记录的图像。从图中可以观察到,在所研究的环境压力范围内,HFE7100 液滴在 50 °C 下蒸发过程较为平稳,液滴体积随着时间推移平缓减小直至完全蒸发。在 250 °C 下,液滴内部出现气泡的成核、膨胀和破裂现象。值得注意的是,气泡破裂后未产生子液滴喷出,且液滴整体变形较小。此外,随着环境压力的升高,液滴内部生成的气泡尺寸显著减小。

造成上述现象的主要原因如下:在高温下,由于 HFE7100 组分沸点的差异,液滴内部低沸点组分过热并汽化,形成微气泡,环境温度的升高促进了气泡的形核和生长。在浮力效应和液滴内部马兰哥尼对流的作用下,微气泡向液滴顶部移动。同时,气泡中的蒸汽含量和压力随着气泡聚集及低沸点组分的连续蒸发而不断增加。一旦气泡内的蒸汽压力超过液滴表面张力和环境压力之和,气泡发生破裂。然而,由于 HFE7100 组分沸点差异较小,气泡内压积累有限,仅产生了相对较弱的气泡破裂现象,未导致明显的液滴喷出或剧烈变形。根据 Young-

Laplace 方程,气泡内外的压力差 ($\Delta p = 2\sigma/R_{\text{bubble}} + 2\sigma/R_{\text{droplet}}$, σ 为液滴表面张力, R 为半径,下标 bubble 和 droplet 分别代表气泡和液滴)与气泡半径成反比^[37]。当环境压力升高时,维持气泡平衡所需的内部压力随之增加,导致气泡半径减小以平衡更高的外部压力。这一机制解释了在 250 °C 下,随着环境压力的升高,液滴内部气泡尺寸减小的现象。

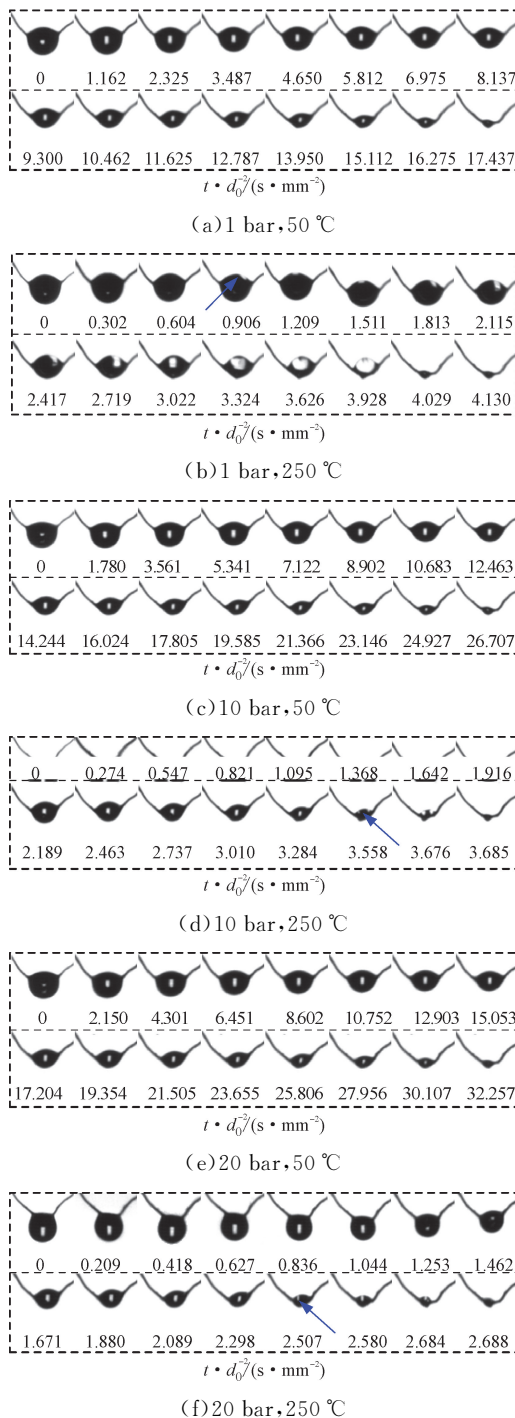
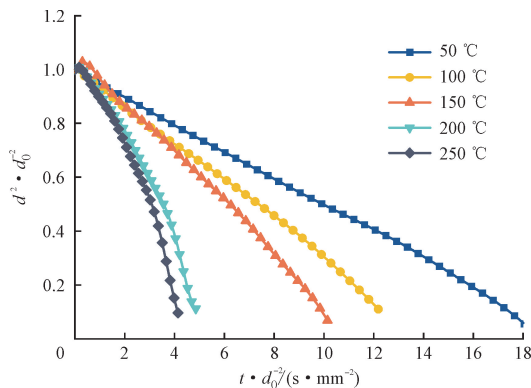


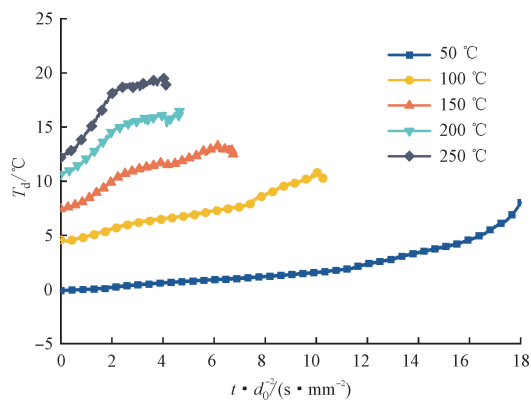
图 3 不同环境压力和温度条件下 HFE7100 单液滴蒸发历程
Fig. 3 Sequential images of the evaporation process for HFE7100 droplet under different ambient temperatures and pressures

2.2 不同环境压力下环境温度对 HFE7100 液滴蒸发特性的影响

图4展示了1 bar高温环境下HFE7100单液滴的归一化直径平方(d^2/d_0^2)和内部温度(T_d)随标准化时间(t/d_0^2)的变化曲线。试验数据表明,环境温度对液滴蒸发行为有显著影响。在50℃和100℃下,液滴蒸发过程中未观察到液滴膨胀现象,直接经历归一化直径平方减小的过程;而在150、200、250℃下,液滴归一化直径平方的变化趋势大致相同, d^2/d_0^2 曲线均呈现先增后减的特征。这种差异源于液滴内部热膨胀与蒸发速率的动态竞争机制。当HFE7100液滴进入加热炉时,液滴温度升高引发热膨胀效应,由于热膨胀率高于表面蒸发率,液滴直径最初会增大。当液滴蒸发率等于液滴热膨胀率时,液滴直径达到最大值。随后,液滴蒸发率随液滴温度升高而增大并超过液滴热膨胀率,液滴直径开始单调减小。尽管在50℃下液滴也存在热膨胀,但由于HFE7100的低沸点及其快速蒸发特性,膨胀效应难以被高速摄像机捕捉。



(a) 归一化液滴直径平方



(b) 液滴内部温度

图4 1 bar高温环境下HFE7100单液滴的归一化直径平方和内部温度随标准化时间的变化

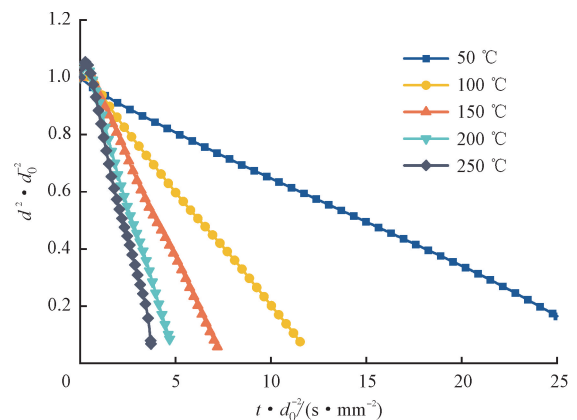
Fig. 4 Evolution of the normalized squared diameter and internal temperature for HFE7100 droplet versus normalized time at 1 bar

HFE7100液滴在100、150、200℃下的蒸发图像中,蒸发后期可观察到气泡破裂现象,归一化平方直径曲线出现骤降部分,但由于气泡破碎程度较弱,对液滴直径减少的贡献有限。

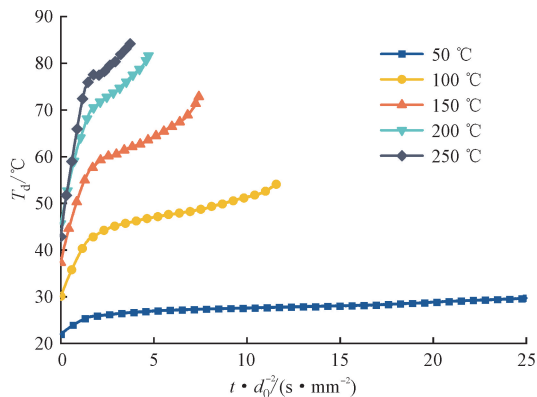
在研究的环境温度下,HFE7100液滴内部温度整体呈上升趋势,始终未达到平衡状态。这是由于,液滴表面与其周围气体之间存在较大温差,且蒸发全过程中由环境气体向液滴传递的热量始终超过蒸发消耗的潜热,导致液滴内部温度呈现单调递增趋势;在100、150、200、250℃下,蒸发后期温度曲线出现短暂下降,这与气泡破裂引发的局部相变吸热密切相关。

此外,HFE7100液滴升温速率和平衡蒸发阶段的蒸发速率随环境温度的升高而增大。这是因为,蒸发速率由液滴表面饱和蒸气压、制冷剂蒸汽的质量扩散系数和气液相传热强度共同控制,这些因素均与环境温度呈正相关。

图5和图6展示了高温高压环境下HFE7100单液滴的 d^2/d_0^2 和 T_d 的变化曲线。结果表明,在10 bar和20 bar下,HFE7100液滴的 d^2/d_0^2 和 T_d 变化趋势大致相同,除50℃,HFE7100液滴都经历了初始加热阶段和平衡蒸发阶段。在整个蒸发过程中, T_d 呈现单调上升趋势,但其斜率随着时间的推移逐渐变得平缓。这主要归因于,气相到液滴表面的热传递速率在初始阶段较高,但随着液滴表面与周围气体温差的减小而逐渐降低。与此同时,HFE7100的蒸发速率在初始阶段较小,但随着液滴表面温度的升高,表面饱和蒸气压迅速增加,蒸发速率也随之显著增加。因此,在蒸发初期,液滴接收到的大部分能量主要用于增加液滴的显热,导致液滴内部温度快速上升;然而,随着时间推移,大量能量被用于液滴蒸发,从而减缓了液滴内部温度的上升速率。



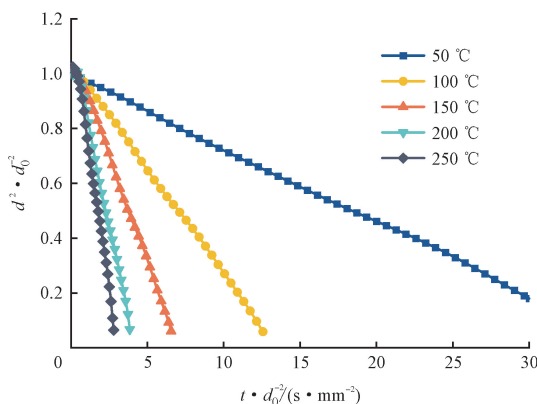
(a) 归一化液滴直径平方



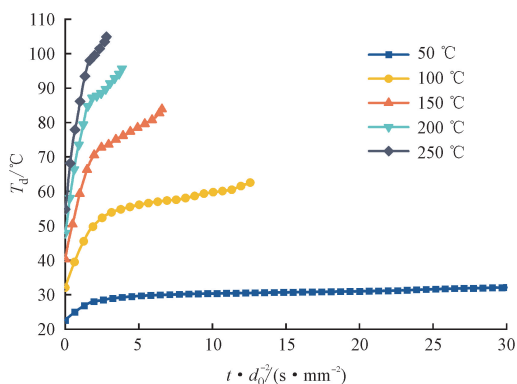
(b)液滴内部温度

图 5 10 bar 高温环境下 HFE7100 单液滴的归一化直径平方和内部温度随标准化时间的变化

Fig. 5 Evolution of the normalized squared diameter and internal temperature for HFE7100 droplet versus normalized time at 10 bar



(a)归一化液滴直径平方



(b)液滴内部温度

图 6 20 bar 高温环境下 HFE7100 单液滴的归一化直径平方和内部温度随标准化时间的变化

Fig. 6 Evolution of the normalized squared diameter and internal temperature for HFE7100 droplet versus normalized time at 20 bar

2.3 归一化蒸发寿命和平均蒸发速率

为了评估 HFE7100 的蒸发特性,本研究进一步分析了不同工况下 HFE7100 单液滴的总蒸发时

间,即液滴寿命。根据归一化直径变化曲线,将 HFE7100 液滴蒸发过程划分为两个主要阶段:初始加热阶段和平衡蒸发阶段。在平衡蒸发阶段,归一化直径变化曲线近似线性减小,符合 d^2 定律。在 10 bar、150 °C 条件下, HFE7100 液滴归一化寿命 t_L 、初始加热阶段持续时间 t_H 和平衡阶段蒸发速率常数 K_{eq} 的定义如图 7 所示。具体而言,采用最小二乘法对初始液滴直径的 80%~10% 范围内(对应于 $0.862d_0^2 \sim 0.215d_0^2$)的数据点进行拟合,拟合线的斜率定义为平衡阶段的蒸发速率常数 K_{eq} ,拟合线与直线 $d^2/d_0^2 = 1$ 的交点对应的归一化时间定义为初始加热阶段的持续时间 t_H ,而拟合线与横坐标的交点对应的归一化时间则定义为液滴归一化蒸发寿命 t_L 。

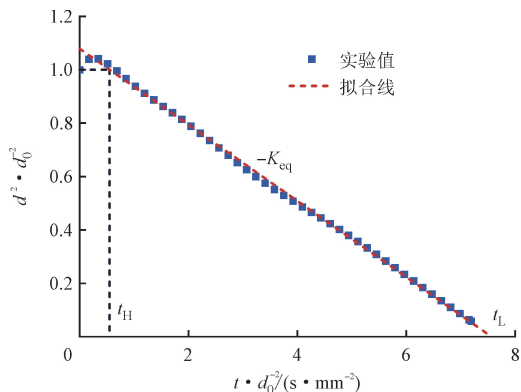


图 7 液滴归一化蒸发寿命、初始加热阶段的持续时间和平衡阶段的蒸发速率常数的定义

Fig. 7 Definition of droplet normalized lifetime, duration of initial heating stage, and evaporation rate constant of equilibrium stage

图 8 和图 9 展示了不同环境压力下 HFE7100 液滴的归一化蒸发寿命 t_L 和蒸发速率常数 K_{eq} 的比较,其中 T_g 为环境温度。结果表明,在所研究的环境压力范围内,随着环境温度升高, t_L 显著降低,而 K_{eq} 则相应增加。这主要归因于环境温度升高后,液滴与周围环境的温差增大,热量传递速率加快,液滴表面温度迅速上升,进而导致液滴表面饱和蒸汽压和蒸汽质量扩散系数显著增加,最终加速了液滴蒸发。

通过比较不同环境压力下的 t_L ,发现 t_L 的差异随着环境温度的升高呈现先减小后增大的趋势,其中 3 种环境压力下 t_L 的差异在 50 °C 下最为显著,而在 100 °C 下最为微弱。在 50 °C 的低温条件下,环境压力的增加会降低 K_{eq} ;在 100 °C 时,环境压力对 HFE7100 液滴的 K_{eq} 的影响不明显;随着环境温度的进一步提高,环境压力的增加会显著提升 K_{eq} 。这表明,随着环境温度的升高,环境压力的升高对 HFE7100 蒸发的影响由抑制作用转变为促进作用。

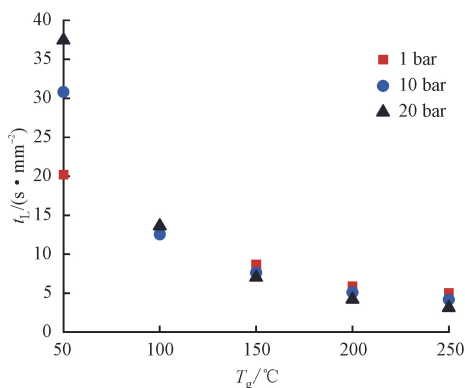


图 8 不同环境压力下 HFE7100 液滴的归一化蒸发寿命
Fig. 8 Normalized lifetime (t_L) of HFE7100 droplet under different ambient pressures

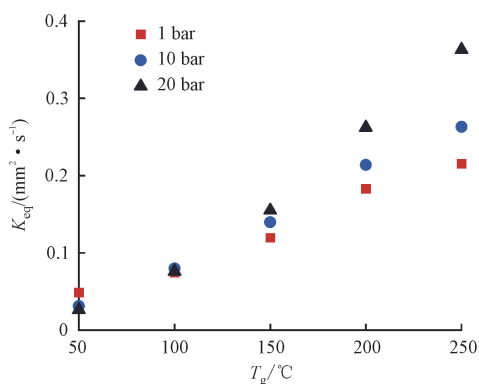


图 9 不同环境压力下 HFE7100 液滴的蒸发速率常数
Fig. 9 Evaporation rate constant of HFE7100 droplet under different ambient pressures

环境压力对 HFE7100 液滴蒸发特性的影响表现为双重作用机制:一方面,较高的环境压力会降低相变所需的气化潜热,同时环境气体导热系数的增加提高了液滴表面与热环境之间的对流传热强度,双重作用显著加快了液滴的升温速率,从而促进蒸发;另一方面,环境压力的增加会导致 HFE7100 的饱和温度升高,气液平衡时液滴表面蒸气的质量分数和气相扩散系数都会减小,从而抑制蒸发。这两种相反效应的竞争关系决定了最终的蒸发行为。在 50 °C 的低温条件下,环境压力升高对蒸汽扩散的抑制作用占主导,从而导致 K_{eq} 的降低;但在高温 (150、200、250 °C) 下,对液滴加热的促进作用更明显,因此 K_{eq} 呈现增加趋势。

图 10 定量表征了不同环境压力下 HFE7100 液滴初始加热阶段持续时间占总寿命的比例 (t_H/t_L)。研究表明,在 50 °C 下没有观察到 HFE7100 液滴的

初始加热阶段,而随着环境温度或压力的升高, HFE7100 液滴初始加热阶段的持续时间占比呈现明显的增长趋势。这一现象源于环境温度提升显著增强了液滴蒸发速率,导致潜热需求占液滴吸收总热量的比例大幅增加,从而减少了可用于液滴温升的显热份额。值得注意的是,尽管高温条件下 t_L 显著缩短,但初始加热阶段的相对时间占比却呈现反向增加趋势。此外,环境压力升高引起的初始加热阶段占比延长可归因于 HFE7100 饱和温度升高的结果。

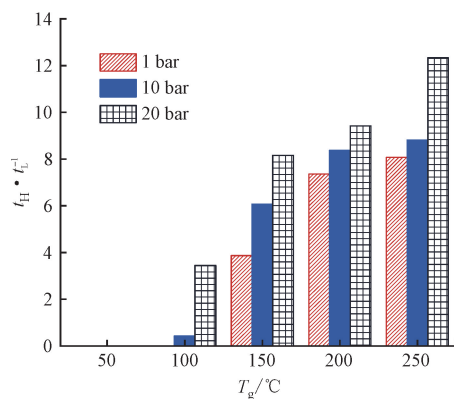


图 10 不同环境压力下 HFE7100 液滴初始加热阶段持续时间占总寿命的比例

Fig. 10 Proportion of the duration of the initial heating stage of HFE7100 droplet to the total normalized lifetime under different ambient pressures

3 结 论

本文采用悬挂法搭建了单液滴蒸发可视化试验平台,利用直径为 50 μm 的细丝热电偶悬挂 HFE7100 液滴,结合高速背光成像技术,系统分析了环境温度 (50、100、150、200、250 °C) 和环境压力 (1、10、20 bar) 对单个 HFE7100 液滴蒸发特性的耦合影响,主要得出以下结论。

(1) 在较低环境温度下, HFE7100 液滴蒸发过程呈现单阶段特征,仅观察到平衡蒸发阶段;而在高温下,液滴蒸发过程呈现两阶段特征,包括初始加热和平衡蒸发阶段。其中,初始加热阶段液滴直径稍有增大,平衡蒸发阶段液滴直径单调减小并满足 d^2 定律。值得注意的是,在 250 °C 下可观察到气泡的形成和破裂现象,但由于 HFE7100 组分沸点差异较小,其对液滴直径减小的促进作用有限,且随着环境压力的升高,破碎前的气泡尺寸显著减小。

(2) 环境温度的提高显著促进了 HFE7100 液

滴的蒸发和升温过程。随着环境温度的升高,液滴归一化寿命呈现非线性降低趋势,但初始加热阶段在液滴总寿命中的时间占比却有所增加。这是由于,环境温度升高增大了液滴与环境的温度梯度,增强了液滴表面与气相之间的传热驱动力,从而加快了液滴升温速率;同时,液滴表面温度的升高提高了饱和蒸气压和扩散系数,进一步促进了蒸发。尽管液滴寿命因蒸发加速而缩短,但蒸发速率的增强导致大量液滴吸收的能量被用于相变,从而增加了初始加热阶段的时间占比。

(3)随着环境温度的升高,环境压力升高对 HFE7100 蒸发的影响经历了从抑制到促进的转变。环境压力升高一方面降低了气化潜热并增强了液滴表面与热环境之间的对流传热效率,从而加快液滴升温速率并促进蒸发;另一方面,液滴表面 HFE7100 蒸气质量分数和气相扩散系数的降低则抑制了蒸汽扩散。这两种相互竞争的效应最终决定了环境压力对液滴蒸发的影响机制。

参考文献:

- [1] PAIS M R, CHOW L C, MAHEFKEY E T. Surface roughness and its effects on the heat transfer mechanism in spray cooling [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1992, 114(1): 211-219.
- [2] GANESHKUMAR P, SIVALINGAM V, VIGNESWARAN V S, et al. Spray cooling for hydrogen vehicle, electronic devices, solar and building (low temperature) applications: a state-of-art review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189(Part A): 113931.
- [3] HSIEH S S, LI Yifang, HUANG C F. HFE-7100/HFE-7300 spray quenching via a piezoelectric atomizer with a single-hole micronozzle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115343.
- [4] 章玮玮. 紧凑型喷雾冷却系统强化换热的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [5] ZHANG Weiwei, CHENG Wenlong, SHAO Shidong, et al. Integrated thermal control and system assessment in plug-chip spray cooling enclosure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 104-114.
- [6] CHENG Wenlong, ZHANG Weiwei, SHAO Shidong, et al. Effects of inclination angle on plug-chip spray cooling in integrated enclosure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 202-209.
- [7] XU Haojie, WANG Junfeng, LI Bin, et al. Electrospray characteristics and cooling performance of dielectric fluid HFE-7100 [J]. *Energy*, 2022, 259: 125072.
- [8] 许浩洁. 静电喷雾冷却特性及其强化传热机理研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [9] CHEN Jiajun, LIU Xiufang, MIAO Qingshuo, et al. Heat transfer characteristics of dielectric fluid spray cooling targeting high heat flux and high evaporation efficiency [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257(Part B): 124403.
- [10] CHEN Jiajun, LIU Xiufang, ZHONG Fuhao, et al. Experimental study of dielectric liquid spray cooling on multi-scale structured surfaces inspired by leaf veins [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024, 109: 109554.
- [11] SADAGHIANI A, BENAM B P, AKDAĞ O, et al. Experimental parametric study on two-phase spray cooling of HEF 7100 using flat spray nozzles [J]. *International Journal of Thermofluids*, 2024, 23: 100809.
- [12] SEZEN K, GUNGOR A. Water droplet evaporation in atmospheric air stream [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(1): 017122.
- [13] WANG Zhaowen, YUAN Bo, HUANG Yuhao, et al. Progress in experimental investigations on evaporation characteristics of a fuel droplet [J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, 231: 107243.
- [14] NOMURA H, UJIIE Y, RATH H J, et al. Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity conditions [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, 26(1): 1267-1273.
- [15] SAHARIN S B, LEFORT B, MORIN C, et al. Vaporization characteristics of ethanol and 1-propanol droplets at high temperatures [J]. *Atomization and Sprays*, 2012, 22(3): 207-226.
- [16] GHASSEMI H, BAEK S W, KHAN Q S. Experimental study on evaporation of kerosene droplets at elevated pressures and temperatures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2006, 178(9): 1669-1684.
- [17] WANG Fang, LIU Rui, LI Min, et al. Kerosene evaporation rate in high temperature air stationary and convective environment [J]. *Fuel*, 2018, 211: 582-590.
- [18] WANG Jigang, LI Jiaqi, SHEN Yukun, et al. Experimental investigation on evaporation, puffing and vapor jetting of multi-component fuel droplets with high-volatility difference [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 239: 122151.
- [19] MANJUNATH M, RAGHAVAN V, MEHTA P S. Vaporization characteristics of suspended droplets of biodiesel fuels of Indian origin and their diesel blends-an experimental study [J]. *International Journal of*

- Heat and Mass Transfer, 2015, 88: 28-41.
- [20] MEHRIZI A A, KARIMI-MALEH H, NADDAFI M, et al. Evaporation characteristics of nanofuel droplets: a review [J]. Fuel, 2022, 319: 123731.
- [21] SHEN Shiquan, LIU Huan, LIU Yi, et al. Dynamic details inside water-in-oil (W/O) emulsion droplet and its impact on droplet evaporation and micro-explosion [J]. Fuel, 2023, 338: 127254.
- [22] WANG Zhaowen, YUAN Bo, CAO Junhui, et al. A new shift mechanism for micro-explosion of water-diesel emulsion droplets at different ambient temperatures [J]. Applied Energy, 2022, 323: 119448.
- [23] XI Xi, LIU Hong, CAI Chang, et al. Analytical and experimental study on boiling vaporization and multi-mode breakup of binary fuel droplet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 165 (Part A): 120620.
- [24] YIN Jing, CHEN Shuyan, ZHU Dongqing, et al. Experimental investigation on evaporation characteristics of RP-3 aviation kerosene droplet above the critical temperature under various pressure conditions [J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 140: 108463.
- [25] CHEN Longfei, LI Guangze, FANG Bin. Droplet evaporation characteristics of aviation kerosene surrogate fuel and butanol blends under forced convection [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 114: 229-239.
- [26] GHASSEMI H, BAEK S W, KHAN Q S. Experimental study on binary droplet evaporation at elevated pressures and temperatures [J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178(6): 1031-1053.
- [27] WANG Lintao, WANG Jigang, QIAO Xinqi, et al. Effect of ambient temperature on the micro-explosion characteristics of soybean oil droplet: the phenomenon of evaporation induced vapor cloud [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 736-746.
- [28] HAN Kai, ZHAO Changlu, FU Geng, et al. Evaporation characteristics of dual component droplet of benzyl azides-hexadecane mixtures at elevated temperatures [J]. Fuel, 2015, 157: 270-278.
- [29] YIN Jing, WANG Qidi, ZHANG Longfei, et al. Evaporation characteristics of cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene (R1336mzz(Z)) droplet in high pressure and temperature environments [J]. Physics of Fluids, 2024, 36(2): 023335.
- [30] JI Renjie, ZHU Dongqing, LIN Xiangwei, et al. Parametric investigation on the close-loop R410A flash spray system for high power electronics cooling under low temperature [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 41: 102643.
- [31] ZHOU Zhifu, LIN Xiangwei, JI Renjie, et al. Enhancement of heat transfer on micro-and macro-structural surfaces in close-loop R410A flashing spray cooling system for heat dissipation of high-power electronics [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 223: 119978.
- [32] 李新, 毕胜山, 赵贯甲, 等. 甲基九氟丁醚的液相密度和表面张力的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(9): 70-73.
- LI Xin, BI Shengshan, ZHAO Guanjia, et al. Experiment on liquid density and surface tension of nonafluorobutylmethylether [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(9): 70-73.
- [33] TSAI W T. Environmental risk assessment of hydrofluoroethers (HFEs) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 119(1/2/3): 69-78.
- [34] AMINIAN A, CELNÝ D, MICKOLEIT E, et al. Ideal gas heat capacity and critical properties of HFE-type engineering fluids: ab initio predictions of C_p^{ig} , modeling of phase behavior and thermodynamic properties using Peng-Robinson and volume-translated Peng-Robinson equations of state [J]. International Journal of Thermophysics, 2022, 43(6): 87.
- [35] ZHENG Yuxin, WEI Zhaohui, SONG Xianglong. Measurements of isobaric heat capacities for HFE-7000 and HFE-7100 at different temperatures and pressures [J]. Fluid Phase Equilibria, 2016, 425: 335-341.
- [36] WANG Jigang, HUANG Xiaoyu, QIAO Xinqi, et al. Experimental study on effect of support fiber on fuel droplet vaporization at high temperatures [J]. Fuel, 2020, 268: 117407.
- [37] 韩凯. 生物柴油/正戊醇单液滴微爆特性实验和数值仿真研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.

(编辑 杜秀杰)