

基于纳米多孔薄膜的蒸发特性

王佳豪, 夏国栋, 李 冉, 马丹丹

(北京工业大学 环境与生命学部)

强化传热与过程节能教育部重点实验室暨传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 实验研究了基于纳米多孔薄膜的蒸发特性,以氟化液 FC-72 为液态工质,对比分析了开口向上和向下时的相变特性。结果发现:两种工况下,其热流密度-过热度曲线具有相似的变化趋势,且均出现热流密度增加而温度保持不变的“薄液膜蒸发”区间。在低热流密度下,温度均较为稳定,但开口向下时的传热性能始终优于开口向上时,分析原因为重力对供液的影响和液膜厚度对热阻的改变。随着热流密度的增加,表面温度波动也越来越剧烈,甚至出现了温度的峰值,最终开口向下和向上达到的临界热流密度值分别为 59 W/cm^2 和 47 W/cm^2 ;同时,对蒸发过程进行理论建模,得出其蒸发系数分别为 0.043 1 和 0.021 9。

关 键 词: 蒸发; 纳米多孔薄膜; 开口方向; 传热特性; 温度不稳定性

中图分类号: V231.1; TK124

文献标志码: A

Evaporation processes from nanoporous membranes

WANG Jiahao, XIA Guodong, LI Ran, MA Dandan

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation,

Ministry of Education, Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion,
Faculty of Environment and Life,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Tests were conducted to study the evaporation processes from nanoporous membranes using FC-72. The heat transfer characteristics of two facing directions: membrane facing upward and downward, were compared. Results showed that the heat flux-superheat curves for two directions presented a similar variation trend, and there existed a ‘thin film evaporation’ stage where heat flux increased while temperature remained constant. The temperature was stable in low heat flux. The heat transfer performance of downward-facing membrane was better than that of upward-facing membrane at different heat flux levels. This was caused by the effect of gravity on the liquid supply and the effect of liquid film thickness on thermal resistance. As the heat flux increased, the temperature fluctuated more sharply, eventually a temperature peak appeared. The critical heat flux reached 59 W/cm^2 and 47 W/cm^2 for downward and upward facing membranes, respectively. Additionally, theoretical modeling of the evaporation processes was carried out, and it was found that the evaporation coefficients were 0.043 1 and 0.021 9, respectively.

收稿日期: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51976002)

作者简介: 王佳豪(1993—),男,博士生,主要从事微纳尺度传热方面研究。

通信作者: 夏国栋(1965—),男,教授,博士,主要从事两相流、微纳尺度传热方面研究。E-mail: xgd@bjut.edu.cn

引用格式: 王佳豪,夏国栋,李冉,等. 基于纳米多孔薄膜的蒸发特性[J]. 航空动力学报,2022,37(5):1113-1120. WANG Jiahao, XIA Guodong, LI Ran, et al. Evaporation processes from nanoporous membranes[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(5): 1113-1120.

Key words: evaporation; nanoporous membranes; facing directions;
heat transfer characteristics; temperature instability characteristics

蒸发相变过程作为一种常见的现象,广泛地存在于自然界和工业生产中,从植物蒸腾作用和动物排汗到工业发电和航空航天热防护等方面^[1-4]。而近几年,随着纳米材料成形技术的发展进步,纳米尺度下的蒸发过程逐渐步入研究人员的视野,其中纳米多孔薄膜以其独特的制造工艺和价格优势,成为探究液体相变机理的最佳基底材料之一,备受青睐。

国际上已经开始进行针对基于纳米多孔薄膜的相变特性研究。Xiao 等^[5-6]研究了纳米多孔薄膜各种参数对换热性能的影响,包括孔径、孔隙率和厚度等,发现在高孔隙率和低厚度的情况下,其供液阻力会减小,临界热流密度(CHF)出现升高。Narayanan 等^[7]设计了一种“纳米多孔发汗贴片”,将纳米多孔薄膜与微通道相结合,实现了利用纳米孔内液体蒸发进而达到为局部高热区散热的目的。Wang 等^[8]提出了一种“薄液膜沸腾”的新型相变形式,在纳米多孔薄膜的表面不仅可实现极高的散热通量,同时各个热流密度阶段表面温度均维持稳定。Lu 等^[9]制造出了一种小型的纳米多孔蒸发器,该蒸发器可仅在自身毛细力吸液作用下,实现稳定蒸发散热,为其在电子器件热管理以及航天飞机热防护方面的应用提供了支持。

由此可见,国内外已经逐步展开对基于纳米多孔薄膜相变特性的研究。正如 Plawsky 等^[10]在其综述文章中指出:其潜在的研究价值巨大,一些科学问题仍亟待解决。纳米多孔薄膜因本身具有纳米孔通道,其供液可采用完全不同于传统池沸腾或流动沸腾的方式,即液体工质和相变气体在同一侧的情况,而是采用工质由薄膜底部直接穿过纳米孔,进而到达薄膜表面发生相变,该供液方式可以有效地实现气液分离,加速受热面处的液体供应和气体逃逸,强化换热^[11]。再结合池沸腾和喷涂冷却的相关研究可知,加热面的朝向会对相变过程产生巨大影响^[12-13],由此引发的一个问题就是:不同的开口方向会对基于纳米多孔薄膜的相变换热特性产生何种影响? 相关研究鲜有报道。基于上述分析,展开了一系列研究工作。

本文将通过实验研究基于纳米多孔薄膜的液体相变特性,两种实验工况:开口向上和向下作对比研究,选取电子氟化液 FC-72 作为液态工质,实

验中通过记录压强、电压、电流和温度等一系列参数,进而对传热特性、温度不稳定性进行探究,同时,结合气体动理论对其相变特性展开进一步分析,建立理论模型。

1 实验装置和方法

1.1 实验件制作

在本实验中,以氧化铝多孔薄膜(AAO)作为纳米多孔基底材料,AAO 的孔径和厚度分别为 200 nm 和 60 μm ,孔隙率为 $(17.9 \pm 1)\%$ 。AAO 薄膜的初始面积为 $8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,将各金属层依次沉积到 AAO 表面,实验件加工过程如图 1 所示。首先,在 AAO 的中间区域,大小为 $4 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,沉积 10 nm 厚的钛(Ti)金属层作为第一黏接层,为了增强其黏接性,另外 10 nm 厚的金属钯(Pd)沉积到相同的区域,作为第二黏接层;然后,沉积 50 nm 厚的铂(Pt)层,即作为实验件的加热层,同时利用 Pt 较好的电阻-温度特性,又当作温度传感器,用以获取 AAO 表面温度;接着,在 AAO 两侧区域,采用另一种掩膜,大小为 $4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,沉积 10 nm 厚的 Ti;最后,再沉积 300 nm 厚的金(Au)层,因 Au 具有较好的导电性,作为连接电极。至此,实验件的加工制作就此完成。之后,使用高真空密封胶将实验件与有机玻璃(PMMA)进行封装处理,封装完成示意图如图 2 所示,AAO 薄膜封装完成实物图和扫描电镜(SEM)表面观和断面图分别如图 3 所示。

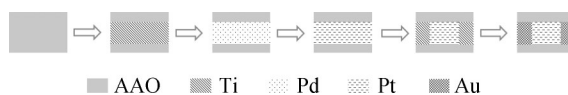


图 1 实验件的制作原理示意图

Fig.1 Schematic of the sample fabrication process

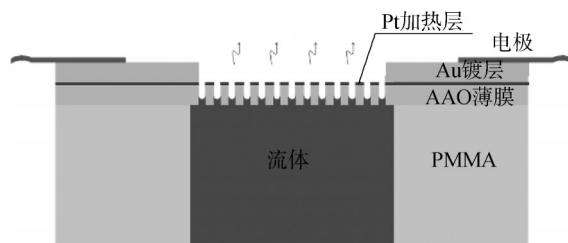


图 2 纳米多孔薄膜的封装结构示意图

Fig.2 Schematic of fixing apparatus of nanoporous membranes

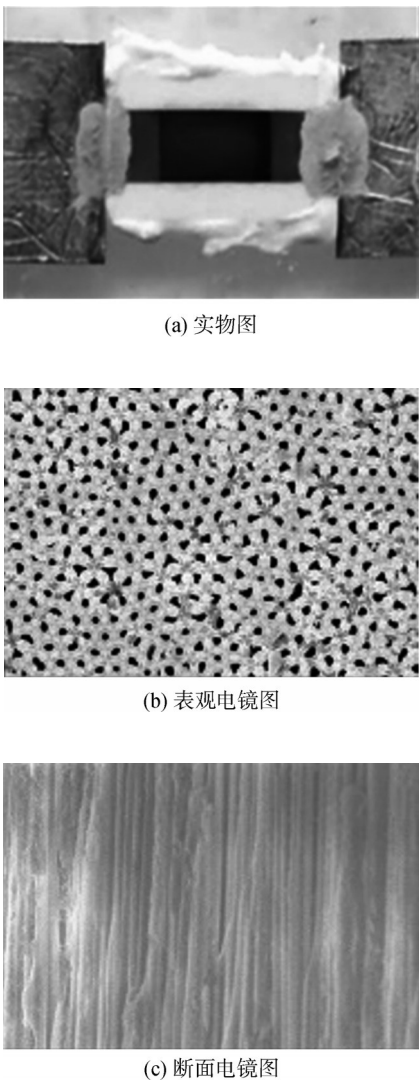


图3 纳米多孔薄膜的封装完成图及表观和断面电镜图
Fig.3 Picture and SEM from top and cross-sectional views of nanoporous membranes

1.2 实验过程

图4(a)为本实验的系统装置图,主要分为四个部分:压力控制系统、测试系统、数据采集系统和可视化系统。压力控制系统负责调控测试系统内的压强大小,通过真空泵机组、压力传感器和一系列调节阀实现,实验时满足压强的波动范围小于 100 Pa;测试系统的示意图如图 4(b)所示,封装件为开口向上放置,开口向下放置时的示意图如图 4(c)所示,所有的实验均在石英真空腔内进行,真空腔内的压强维持在 24.1 kPa,对应温度 293 K 时 FC-72 的饱和压强,蓄液池放置在恒温水箱中维持 290 K,并与大气相连,因此,真空腔内外压差成为供液的主要驱动力。在实验时,管道内的流速远低于 0.01 m/s,雷诺数 $Re=1.5$,流

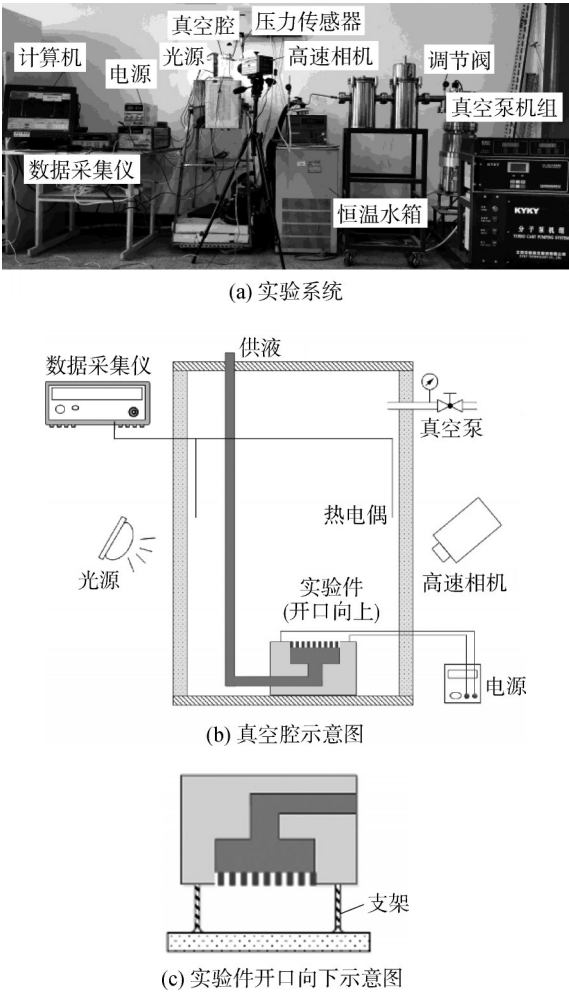


图4 实验系统及装置图
Fig.4 Picture of test system

动为层流,根据沿程阻力计算可得其压损约为 1 kPa,但对不同的开口方向沿程阻力为定值,具有相同的压降影响。工质由蓄液池进入实验件底部,发生蒸发相变,两个 T 型热电偶用来记录腔内温度;可视化系统由高速相机和光源组成,用来记录 AAO 表面的相变过程;数据采集系统主要用来记录实验件的电压和电流等参数值。实验中各仪器的精度及数据的误差分析等详见文献[14]。

实验中,选取某一工况 3 min 内的平均值作为有效实验数据,而误差棒则由同一电压下的三次实验结果得出。热流密度(q')的计算为加热功率与总纳米孔面积的比值,其中总纳米孔面积由薄膜面积与孔隙率的乘积得到,表面传热系数(h)为热流密度除以过热度(ΔT)的值。实验时,电压缓慢增加,保证纳米多孔薄膜不会发生损坏,在本实验中,CHF 的定义为:薄膜表面发生蒸干,同时温度出现持续增加,换热恶化,持续增加热流

密度往往伴随着薄膜的损坏。

1.3 数据校准

金属 Pt 沉积到 AAO 表面,因厚度极薄,其电阻温度系数(TCR)与常规 Pt 金属不同,故须对其进行提前校准。校准过程为:将实验件置于电恒温箱中,同时两个经过校正的热电偶放置在近实验件表面处用以记录温度,当温度达到设定值时,再维持恒温 2 h,然后记录该温度下实验件的电阻值。温度范围为 292~348 K,校正结果如图 5 所示。

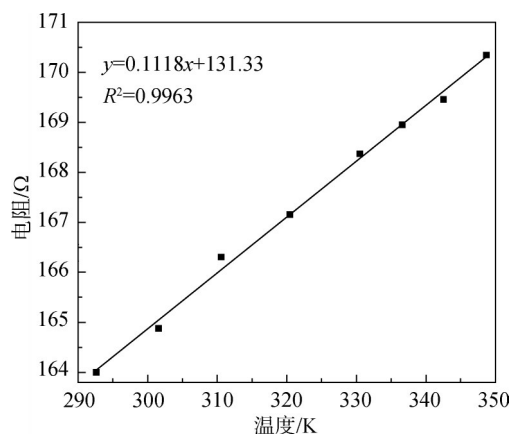


图 5 Pt 的 TCR 校正

Fig.5 Calibrated TCR for Pt

在本实验中,因金属层直接与液态工质接触,为了验证是否出现电解现象,需对电解损失大小进行实验评估,另外一种在 AAO 薄膜表面中间位置无任何金属层的实验件加工完成,如图 6 所示。FC-72 作为工质被供应到该实验件表面,为了产生对比,去离子水也同样被测试,测试时的最高电压为 60 V,远大于实验时的电压值,结果如图 7 所示。由图可知,相对于去离子水,FC-72 的电解大小与无工质作用时一致,因此可认为,以 FC-72 为工质时的电解损失可以合理地忽略。而导热损失也在之前的研究中进行过探讨,也可忽略不计,相关内容及不确定度计算详见文献[14]。

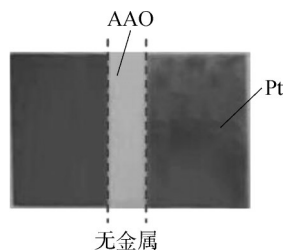


图 6 电解测试实验件

Fig.6 Sample for electrolysis test

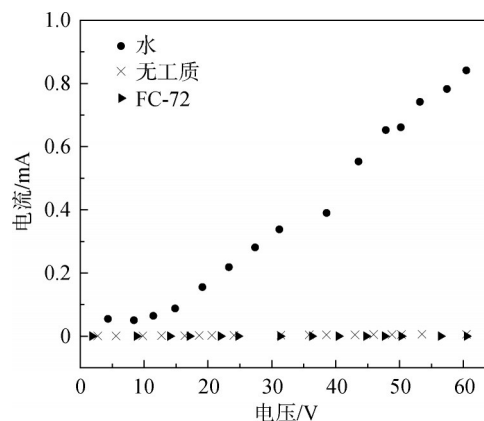


图 7 不同电压下的电解损失

Fig.7 Electrolysis test under different voltages

2 实验结果与讨论

2.1 传热特性

以 FC-72 为工质进行实验时,因其表面张力较小,在 AAO 表面的接触角接近 0° ,如图 8 所示,故其在 AAO 表面的液膜厚度始终处于较薄的状态,在开口向上和向下两种位置时的相变曲线如图 9 所示,从图 9(a)中可以得出,两种位置时的热流密度与过热度的对应曲线具有相似的趋势。实验过程中,没有发现任何气泡的产生和破裂,工质在 AAO 表面始终处于蒸发状态。在低热流密度时,表面过热度随热流密度的增加而单调增加,且误差棒也极小;自 $q'=12 \text{ W/cm}^2$ 左右时起,两种工况下均出现热流密度增加而温度保持不变的区间,此时表面为稳定的蒸发现象,液膜厚度基本维持在同一水平,误差棒也较小,故认为在该区间下发生“薄液膜蒸发”,与 Wilke 等^[15]和 Wang 等^[16]得出的结论相同。而在开口向下时,该区间长度更大,对应的热流密度也更高;在热流密度分别达到 43.3 W/cm^2 和 23.8 W/cm^2 时,两种开口方向下,随着热流密度的增加,AAO 表面均开始出现部分“干涸”现象,表面出现交替润湿的现象,过热度开始增加,纳米孔的毛细吸液作用开始突显,使得表面液膜能够继续维持,同时实验中的误差棒也开始逐渐增大,随着薄膜表面“干涸”的面积越来越

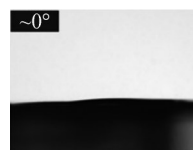


图 8 接触角

Fig.8 Contact angle

大,直至达到CHF。本实验中,开口向下和向上时的CHF分别为 59 W/cm^2 和 47 W/cm^2 。

在开口向上和向下两种工况下,实验发现开口向下时的换热性能始终优于开口向上,分析原因主要为重力因素。封装件的高度为 30 mm ,因此两种开口方向引起的静压差约为 1 kPa 。在开口向下时,重力具有辅助供液作用,使得其具有更大的液体输运量,因此开口向下时会产生更高的换热效率,最大表面传热系数达到 $2.9 \text{ W/(cm}^2 \cdot \text{K)}$;而在开口向上的工况下,重力起到阻碍液体供应的作用,供液量会因此而受到减弱,导致其换热性能受到影响,表面传热系数有所减小,最大仅达到 $1.6 \text{ W/(cm}^2 \cdot \text{K)}$;另外一个因素为液膜厚度的影响,虽然FC-72在AAO表面时液膜较薄,但在两种工况下,仍存在差异。开口向下时液体工质直接从AAO表面流下,这样液膜厚度就会减少,热阻降低^[17],而开口向上时液体在AAO表面会产生一定的积聚,液膜厚度增加,进而导致热阻增加,影响了换热性能。表面传热系数随热流密度的变化如图9(b)所示,在两种开口方向下,表面传热系数均随热流密度而逐渐增加,待达到CHF时,表面传热系数出现下降,传热恶化。

对纳米多孔薄膜的渗透性展开分析,根据实验得出的CHF值和达西公式计算渗透性 K_1 :

$$K_1 = \frac{\mu q_v l}{A \Delta p} \quad (1)$$

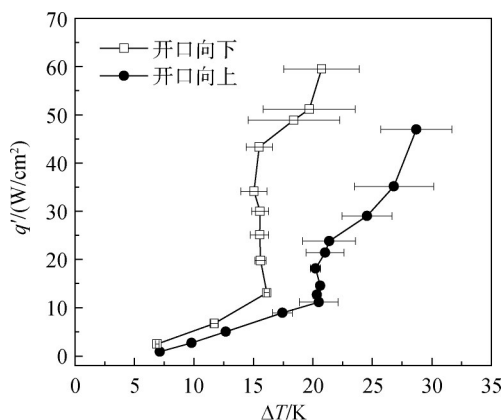
其中 μ 为工质的黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); q_v 为液体体积流量(m^3/s); l 为渗透深度(m),即薄膜厚度; A 为渗透面积(m^2); Δp 为压差(Pa),在实验中压差由两部分组成:一部分为系统的内外压差 $\Delta p_1 = 76 \text{ kPa}$;另一部分为CHF状态下的毛细力吸液作用 $\Delta p_2 = 2\sigma/r$, σ 为表面张力(N/m); r 为纳米孔的半径(m),可得 $\Delta p_2 = 156.6 \text{ kPa}$ 。最终计算得到 $K_1 = 8.377 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。

另一方面,对渗透率进行理论计算,根据哈根-泊肃叶公式,计算水平直通圆管中的层流运动,可得其单位面积的质量通量:

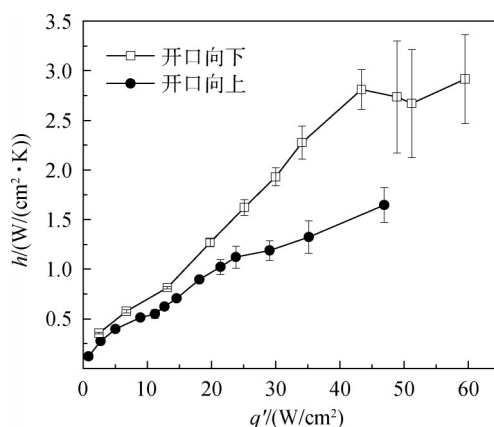
$$m' = -\frac{r^2 \rho}{8\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (2)$$

式中 ρ 为FC-72的密度。将式(2)代入到达西公式中,可得理论渗透率 $K_2 = 2.237 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 。

由此可见,根据CHF而得出的渗透率要小于哈根-泊肃叶公式的计算值,主要原因为该理论值的适用工况为水平直通圆管,流动阻力较小,得出



(a) 过热度与热流密度的对应关系



(b) 热流密度与表面传热系数的对应关系

图9 开口向上和向下时的传热特性

Fig.9 Heat transfer characteristics in facing upward and downward

的为理论最大渗透率;而AAO的孔分布存在孔与孔之间的交叉、不均匀的情况,增加了流动的阻力,因此实验计算得出的渗透率较低。

2.2 温度不稳定性

正如文中第2.1节分析,传热特性是相变过程的一个重要参数,而传热现象不稳定性是气液相变过程的另一个重要特征,在本节中以温度不稳定性进行探讨。两种开口方向时的温度不稳定性如图10所示。在初始阶段的低热流密度区,两种开口方向下的温度较为稳定,而随着热流密度的持续增加,出现了温度波动情况,在高热流密度 49 W/cm^2 和 35.9 W/cm^2 下,温度均出现较为剧烈的波动现象,出现了温度的峰值,在 $q'' = 49 \text{ W/cm}^2$,开口向下时的最高温达到 325 K ,远高于该热流密度下的平均值 319.8 K ,且开口向上的温度峰值持续时间也高于开口向下时的情况,意味着其更易达到CHF值。出现此现象的原因是FC-72的

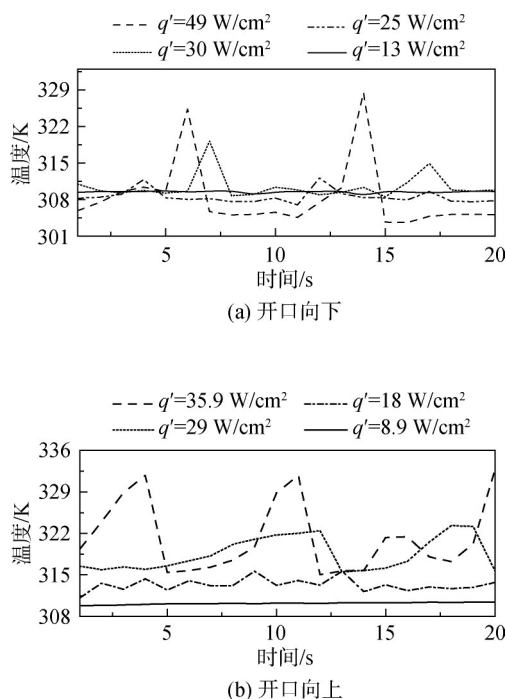


图10 开口向上和向下时的温度不稳定性
Fig.10 Temperature instability in facing upward and downward

汽化潜热值较小,其值为 88 kJ/kg,远小于水的 2 257 kJ/kg,导致其在高热流密度下,FC-72 的汽化潜热不足以带走加热层产生的全部热量,AAO 表面出现了明显的气液交替出现,一旦液面出现“干涸”,温度便会急剧升高,温度波动峰值由此产生,温度急剧升高往往导致实验件产生热应力,严重时甚至会损坏实验件。同时,选取了另外一种电子氟化液 HFE-7100,汽化潜热与 FC-72 相差不多,实验结果仍出现了类似的温度波动现象,故可验证以上分析。

2.3 理论模型

对于液体蒸发问题,气体动理论给出了相关的研究,该理论从气体运动的微观角度出发,考虑了气体分子间的相互作用力,且分子运动遵循经典力学规律,最终统计平均大量分子的集体行为,揭示宏观热运动规律的经典理论。传统意义上将气液界面与远端气体之间的区域分为两部分:界面过渡层和努森层。在界面过渡层出现“液体区”到“气体区”的过渡,蒸发参数在这层往往出现非连续性跳跃,其厚度通常为几个分子直径大小;而在努森层内,气体参数处于非平衡态,出现相对较为平缓的变化,直至达到远端气体参数,实现平衡,其厚度通常为几个分子自由程量级^[18]。经典

的连续性方法难以捕捉这种参数跳跃和非平衡态,而玻尔兹曼方程可以较好地反映这种变化,但因其复杂的碰撞项和高维性,严重限制了其应用,进而一系列基于玻尔兹曼方程的宏观模型逐渐发展,其中以 Ytrehus 等发展的对玻尔兹曼方程进行线性化的矩方法获得了较高的准确性和广泛应用性^[19-21]。而在本研究中,也采用此方法进行理论分析,其表达式如下:

$$\alpha_e Z \sqrt{y} + (1 - \alpha_c) \beta F^- - \beta F^- = 2\sqrt{\pi} S_\infty \quad (3)$$

$$\alpha_e Z + (1 - \alpha_c) \sqrt{\frac{1}{y}} \beta F^- + \beta G^- = 4S_\infty^2 + 2 \quad (4)$$

$$\alpha_e Z + (1 - \alpha_c) \sqrt{\frac{1}{y}} \beta F^- - \sqrt{y} \beta H^- = \sqrt{y} \sqrt{\pi} S_\infty \left(S_\infty^2 + \frac{5}{2} \right) \quad (5)$$

式(3)~式(5)分别对应质量、动量和能量守恒方程。其中 α_e 、 α_c 分别为蒸发系数和冷凝系数,在本实验理论模型中假定两者始终相等; β 为求解方程过程中引入的变量,与分子的速度分布相关; F^- 、 G^- 和 H^- 均由 S_∞ 推导而来,其中 S_∞ 表示无量纲速度比率, F^- 、 G^- 和 H^- 三者均为无量纲参数,并无实际的物理意义,详见附录 A;其他几个参数 Z 和 y 分别表示无量纲压强比和温度比,表达式为

$$Z = \frac{p_1}{p_\infty} \quad (6)$$

$$y = \frac{T_\infty}{T_1} \quad (7)$$

$$S_\infty = \frac{u_\infty}{\sqrt{2RT_\infty}} \quad (8)$$

其中 p_1 和 T_1 为气液界面处的压力和温度值, p_∞ 、 T_∞ 和 u_∞ 表示远端气体的压力、温度和速度值, R 为气体常数。

在上述三个守恒方程中,存在四个未知量: S_∞ 、 Z 、 y 和 β ,一旦其中一个参数确定,即可求解出其他三个任意变量,在本实验中的确定变量为 y 值,即 AAO 薄膜表面的无量纲温度比率,且在气液界面处始终为饱和状态,便可求解守恒方程。热流密度采用如下计算公式:

$$q' = \rho_\infty u_\infty h_{fg} \quad (9)$$

其中 ρ_∞ 和 h_{fg} 分别为远端气体密度和工质的相变潜热。将理论模型与实验结果进行比较,如图 11 所示。由于动理论模型只适用于液膜厚度为零,即 CHF 点对应的状态,故将两种开口方向下对应的 CHF 值代入理论公式中进行迭代计算,可得出

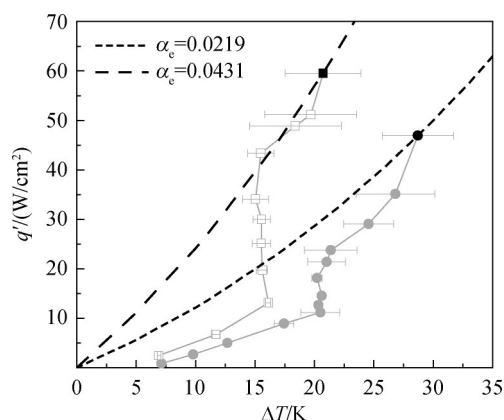


图11 对比理论模型与实验结果

Fig.11 Comparison of theoretical model with test results

蒸发系数分别为0.043 1和0.021 9,该蒸发系数值也与文献[22]中得到的实验值相近,图11中的黑色虚线表示在该蒸发系数下的理论热流密度与过热度的关系,为了更加直观地对比实验值,将实验结果(图9(a)),以灰色线表示。蒸发系数本身的误差极大($10^{-3} \sim 1.0$),FC-72的实验值约为0.01~0.1,本文得出的值是符合这种范围的,证实了该模型可以较好地反映基于纳米多孔薄膜蒸发的CHF值。

3 结 论

本文以AAO作为纳米多孔的基底材料,FC-72为液态工质,通过实验对比研究了两种工况:AAO薄膜开口向上和向下两种放置位置时的蒸发相变特性,得出主要结论如下:

1) 传热特性方面,两种工况下其热流密度与过热度曲线具有相似的趋势,且都出现了热流密度升高而温度维持不变的“薄液膜蒸发”区间。但开口向下时的换热性能明显优于开口向上,主要因重力对不同工况供液作用的影响,其次为液膜厚度引起热阻的变化,影响了换热性能。两种工况下的CHF分别为 59 W/cm^2 和 47 W/cm^2 。

2) 温度不稳定性方面,在低热流密度时,两种工况下温度均较为稳定,而随着热流密度增加,温度波动也变得越来越剧烈,甚至出现了温度的峰值,出现这种现象的原因为FC-72潜热较小,导致薄膜表面产生气液交替现象,出现温度波动。

3) 理论分析方面,采用气体动理论对蒸发现象进行理论建模,对应两种工况下的CHF值,得出蒸发系数分别为0.043 1和0.021 9。

参考文献:

- [1] CHO H J, PRESTON D J, ZHU Y, et al. Nanoengineered materials for liquid-vapour phase-change heat transfer[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 2(2):16092.1-16092.17.
- [2] WHEELER T D, STROOCK A D. The transpiration of water at negative pressures in a synthetic tree[J]. Nature, 2008, 455(7210):208-212.
- [3] ERP R V, SOLEIMANZADEH R, NELA L, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling[J]. Nature, 2020, 585(7824):211-216.
- [4] 朱剑琴,赵超凡,邱璐,等.热障涂层在涡轮叶片应用中的热防护有效性[J].航空动力学报,2019,34(11):2503-2508. ZHU Jianqin, ZHAO Chaofan, QIU Lu, et al. Thermal protection effectiveness of thermal barrier coatings in turbine blade applications[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(11):2503-2508. (in Chinese)
- [5] XIAO R, MAROO S C, WANG E N. Thin film evaporation using nanoporous membranes for enhanced heat transfer[C]// Heat Transfer Summer Conference. Rio Grande, Puerto Rico: American Society of Mechanical Engineers, 2012:103-107.
- [6] XIAO R, MAROO S C, WANG E N. Negative pressures in nanoporous membranes for thin film evaporation[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(12):147-169.
- [7] NARAYANAN S, FEDOROV A G, JOSHI Y K. On-chip thermal management of hotspots using a perspiration nanopatch[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(7):075010.1-075010.10.
- [8] WANG Q, CHEN R. Ultrahigh flux thin film boiling heat transfer through nanoporous membranes[J]. Nano Letters, 2018, 18(5):3096-3103.
- [9] LU Z, WILKE K L, PRESTON D J, et al. An ultrathin nanoporous membrane evaporator[J]. Nano Letters, 2017, 17(10):6217-6220.
- [10] PLAWSKY J L, FEDOROV A G, GARIMELLA S V, et al. Nano- and microstructures for thin-film evaporation: a review[J]. Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2014, 18(3):251-269.
- [11] KANDLIKAR S G. Controlling bubble motion over heated surface through evaporation momentum force to enhance pool boiling heat transfer[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(5):051611.1-051611.5.
- [12] TANJUNG E F, JO D. Surface orientation effects on bubble behaviors and critical heat flux mechanism in saturated water pool[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 133:179-191.
- [13] ZHAO X, ZHANG B, YANG Z, et al. Surface orientation effects on heat transfer performance of spray cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118960.1-118960.14.
- [14] XIA G, WANG J, ZHOU W, et al. Orientation effects on liquid-vapor phase change heat transfer on nanoporous mem-

- branes[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 119:104934.1-104934.11.
- [15] WILKE K L, BARABADI B, LU Z, et al. Parametric study of thin film evaporation from nanoporous membranes[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(17):171603.1-171603.5.
- [16] WANG Q, SHI Y, CHEN R. Transition between thin film boiling and evaporation on nanoporous membranes near the kinetic limit[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154:119673.1-119673.9.
- [17] NARAYANAN S, FEDOROV A G, JOSHI Y K. Interfacial transport of evaporating water confined in nanopores[J]. Langmuir, 2011, 27(17):10666-10676.
- [18] AURSAND E, YTREHUS T. Comparison of kinetic theory evaporation models for liquid thin-films[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 116:67-79.
- [19] POLIKARPOV A P, GRAUR I A, GATAPOVA E Y, et al. Kinetic simulation of the non-equilibrium effects at the liquid-vapor interface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136:449-456.
- [20] LI R, WANG J, XIA G. New model for liquid evaporation and vapor transport in nanopores covering the entire Knudsen regime and arbitrary pore length[J]. Langmuir, 2021, 37(6):2227-2235.
- [21] BUSUIOC S, GIBELLI L. Mean-field kinetic theory approach to Langmuir evaporation of polyatomic liquids[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(9):093314.1-093314.11.
- [22] MA K T, PAN C. The effect of heated wall thickness and materials on nucleate boiling at high heat flux[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1999, 26(8):1103-1114.

(编辑:陈 越)

附录 A

S 与 S_∞ 为同一物理量,表示无量纲速度比率; F^- 、 G^- 和 H^- 三者均为无量纲参数,并无实际的物理意义,与 S_∞ 的对应关系如下:

$$F^-(S) = \sqrt{\pi} S [\operatorname{erf}(S) - 1] + e^{-S^2} \quad (\text{A1})$$

$$G^-(S) = (2S^2 + 1) [1 - \operatorname{erf}(S)] - \frac{2}{\sqrt{\pi}} S e^{-S^2} \quad (\text{A2})$$

$$H^-(S) = \frac{\sqrt{\pi} S}{2} \left(S^2 + \frac{5}{2} \right) [\operatorname{erf}(S) - 1] + \frac{1}{2} (S^2 + 2) e^{-S^2} \quad (\text{A3})$$

$$S = S_\infty \quad (\text{A4})$$