

DOI: 10.7652/xjtuxb201605005

微米级余弦槽表面疏水性及冷凝传热实验研究

齐宝金^{1,2}, 李翔¹

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安;

2. 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: 为了研究余弦微槽结构的疏水性和冷凝传热性能, 首先制备了不同槽峰高度和槽距的微米级余弦槽结构表面, 实验研究了不同结构微槽表面的静态接触角及其对滴状冷凝传热性能的影响, 并对冷凝传热过程中液滴在微槽表面合并、脱落过程进行实验研究和热力学分析。结果表明, 液滴在微槽表面的疏水性和传热性能都呈现明显的各向异性, 横向静态接触角 $\theta_{\perp}$ 明显高于纵向接触角 $\theta_{\parallel}$ 。同时, 冷凝传热过程中竖直纵槽阻碍液滴的横向合并, 但其对液滴脱落过程起到极大促进作用, 传热性能较光滑表面提高 30%~50%, 且峰距比越大液滴的脱落半径越小、脱落频率越高, 表面传热效率也越高。水平横槽则相反, 虽然增大峰距比促进了液滴合并, 但却对其脱落过程产生不利影响, 导致整体传热性能较纵向槽表面大幅下降, 与光滑表面接近。引入表面润湿率对微槽表面的液滴脱落半径进行热力学计算, 计算值与实验结果吻合较好, 误差在 20% 以内。

关键词: 滴状冷凝; 微槽; 传热强化; 疏水性

中图分类号: TQ026.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0032-06

Experimental Study on the Hydrophobicity and Condensation Heat Transfer of Cosine Micro-Grooved Surfaces

QI Baojin^{1,2}, LI Xiang¹

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

Abstract: In order to study the effects of cosine micro-grooved structures on hydrophobicity and condensation heat transfer, the cosine micro-grooved surfaces with depth of 12-24 μm and width of 30-60 μm were prepared using dry etching. The wettability and heat transfer characteristics of these micro-grooved surfaces were investigated experimentally, and the coalescence and sweeping processes of droplets on micro-grooved surfaces were thermodynamically analyzed. The results showed that the wetting behavior and heat transfer characteristics of the micro-grooved surfaces presented anisotropic characteristics, and the static contact angle in perpendicular direction $\theta_{\perp}$ was significantly larger than that in parallel direction $\theta_{\parallel}$. In heat transfer experiment, the plates were set vertically and the grooves were arranged in both vertical and horizontal positions. For the vertically grooved surface, the sweeping effect of falling drops was enhanced and the heat transfer in the dropwise condensation was increased to 30%-50%, and a better heat transfer performance was achieved when the ratio of peak to interval increased. Different from vertical grooved surface, the experimental results obtained from horizontal grooved surface were similar to the results of smooth surface. This might be due to the dual effect of horizontal grooves,

收稿日期: 2015-07-30。 作者简介: 齐宝金(1980—),男,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306141); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120201120068)。

网络出版时间: 2016-02-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160202.1550.002.html>

promoting droplet coalescence and hindering the departure process. The surface wetting rate was introduced in developing thermodynamic model to solve the departure radius of droplets, and the calculated values were in good agreement with the experimental results with a largest error less than 20%.

Keywords: dropwise condensation; micro-groove; heat transfer enhancement; hydrophobicity

冷凝过程广泛存在于能源、化工、电力及海水淡化等工业领域。研究表明,蒸汽与低于其饱和温度的疏水表面接触会形成高效的滴状冷凝。通过对滴状冷凝传热过程的对比分析可以发现,冷凝液滴的脱落直径及其脱离时对其下方小液滴的扫落过程显著影响了冷凝表面的传热性能。Tanasawa 等通过实验研究发现,滴状冷凝传热系数随液滴尺寸增大而降低并与液滴尺度成一定比例关系^[1],该结论得到 Rose、Ma 及 Lee 等研究的证实^[2-5]。Izumi 及 Yamali 等分别通过实验研究和理论分析证实了液滴脱离频率是滴状冷凝传热过程中必须考虑的重要因素^[6-7]。

Watanabe 等在 1999 年最早提出,在超疏水表面构造满足特定几何结构的微米级槽能够显著降低液滴的滑移阻力,进而影响液滴在其表面的黏附性能^[8]。Sommers 等研究了液滴在 30 μm 宽几十微米深的矩形微槽表面的润湿性,实验结果表明脱落液滴的体积较光滑表面下降 50% 以上^[9]。Zhong 等对深度为 20~180 μm 、间距为 20~40 μm 的矩形微槽表面润湿性进行实验观察和数值分析,指出几何尺寸对液滴滑落影响显著,且液滴在微槽表面的滑移存在明显的各向异性^[10]。Ma 等研究液滴在矩形微槽表面滑移过程各向异性,实验结果表明液滴沿微槽方向和垂直微槽方向的接触角存在 15.7°~47.4° 的差别,且受微槽的几何结构影响^[11]。Li 系统研究了液滴在不同槽距 V 型槽表面的滑移脱落过程,理论和实验研究结果表明槽越深、槽齿越尖,接触角越大,且增大槽距有利于液滴滑移,同时液滴滑移存在各向异性,纵向接触角明显高于沿槽方向的接触角^[12]。Kannan 等实验对比 U 型表面不同槽向对液滴静态接触角的影响,指出垂直槽向的接触角优于沿槽向的接触角,两者都比液滴在平面的接触角有大幅提高^[13]。Izumi 及 Lara 等实验研究了不同尺度的半圆形槽对滴状冷凝传热过程的影响,指出半圆槽对冷凝传热过程强化作用显著^[6,14]。

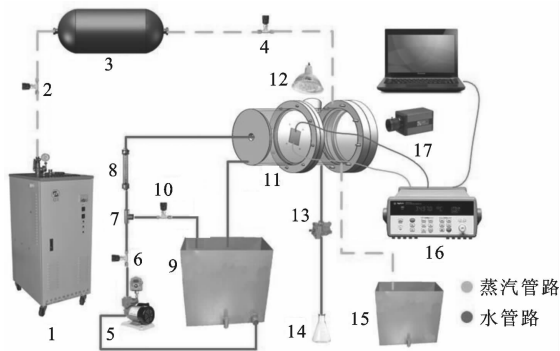
上述理论及实验研究主要集中于结构不连续的微槽结构(如矩形槽、V 型槽、U 形槽及半圆形槽)。然而, Park 和 Promraksa 等通过数值分析发现,结

构连续的微槽结构(如波纹槽、余弦槽等)更有利于液滴的合并、脱落,能够大幅提高冷凝传热效率,但并未给出实验验证^[15-16]。基于此,本文针对不同几何参数的微米级余弦槽表面的润湿性,以及冷凝传热过程中微槽对液滴脱落直径和生长周期的影响进行实验研究和热力学分析,并通过实验对比分析了不同微槽结构对滴状冷凝传热的影响。

1 实验装置及试样制备

1.1 实验装置

实现系统如图 1 所示,实验所需蒸汽由电加热锅炉产生,在蒸汽进入冷凝腔之前,先流经过热器来获得干饱和蒸汽。冷凝腔内蒸汽进口处安装有导流板,以达到均布蒸汽和减缓蒸汽对冷凝面横向剪切的目的。蒸汽在冷凝表面凝结成的水经设置在试样底部的集液漏斗收集后,导入计量瓶内计量并储存。冷凝腔内蒸汽的温度和流量通过电加热锅炉和辅助加热器来调节和控制,并由腔内热电阻进行测量和反馈。在冷却腔内,冷却水由隔膜泵加压后,通过雾化喷嘴喷射到试样背面进行冷却。试样表面的过冷度通过调节喷雾量进行控制。冷却水流量、进出口温度、压力等参数通过转子流量计、热电阻和压力变送器分别进行控制和测量。实验系统温度的测量误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,流量测量误差为 $\pm 1\%$,压力测量误差为 $\pm 0.1\%$ 。整个实验装置的蒸汽管路以及冷凝



1:电加热锅炉;2、4、6、10:微调节阀;3:过热器;5:隔膜泵;7:三通;
8:流量计;9、15:水箱;11:冷凝腔体;12:LED 光源;13:疏水阀;
14:计量瓶;16:数据采集仪;17:高速摄像机

图 1 实验系统图

腔体都采用保温棉进行保温处理,以减少实验过程中系统的热量损失。

1.2 试样制备

实验制备的试样外形结构为边长 80 mm 的正方形,分 A、B 两面,A 面中间为边长 50 mm、厚度 3 mm 的正方形突台,如图 2 所示。凸台侧在实验过程中直接与蒸汽接触,定义为冷凝侧。凸台四周为厚 1 mm、宽 15 mm 开 12 个 $\Phi 8$ mm 孔的回形薄板,起固定试样作用,且实验过程中由绝热材料覆盖。试样 B 面在实验过程中与冷却水接触,定义为冷却侧。在凸台侧面距冷凝表面 1.5 mm 处分别打 $\Phi 1$ mm $\times$ 25 mm 和 $\Phi 1$ mm $\times$ 15 mm 的孔并布置热电偶(T 型铠装)来测量温度,取两测点温度的平均值作为实验测量值,测量误差为 $\pm 0.1\%$,测点布置位置如图 2 所示。

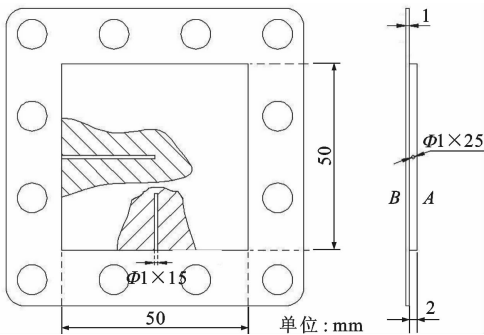


图 2 试样外形结构及温度测点布置

试样的材质为工业纯钛 TA2(宝钛集团提供),通过干式光刻腐蚀在试样表面加工不同几何结构的 μm 级余弦槽,各试样的槽峰高度 H 、槽距 P 、峰距比 $H \cdot P^{-1}$ 等数据列于表 1 中。试样表面微槽结构 SEM 照片如图 3 所示。

表 1 试样表面微结构尺寸

试样编号	$H/\mu\text{m}$	$P/\mu\text{m}$	$A \cdot P^{-1}$
1 [#]	12	30	0.4
2 [#]	18	30	0.6
3 [#]	24	30	0.8
4 [#]	24	40	0.6
5 [#]	24	60	0.4
光滑表面	0	∞	0

采用自组装膜技术在各试样表面沉积一层疏水膜:①将试样浸没在 25℃ 的体积分数为 5% 的 HF 溶液内刻蚀 5 min,然后用去离子水清洗;②将试样浸没在体积分数为 30% 的 H_2O_2 溶液中氧化 10 h 以形成一层氧化膜,溶液温度保持在 25℃,并通过搅拌器进行搅拌以保证溶液温度和浓度的均匀性,

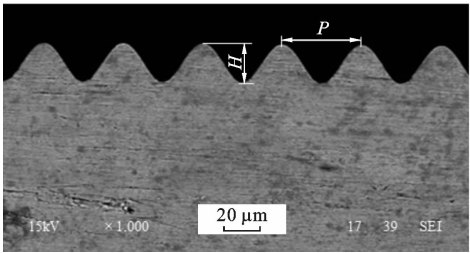


图 3 试样表面微槽结构 SEM 照片

试样氧化后用去离子水清洗;③将氧化好的试样浸没于 2.5 mmol/L 的十八硫醇乙醇溶液中 20 h,然后用无水乙醇清洗晾干。步骤①、②是为了增加自组装膜与基底的吸附强度,提高自组装膜的寿命。试样制备过程中,光滑表面也采取相同处理工艺,以保证其表面的粗糙度及化学组分等参数与微槽试样表面一致。

1.3 数据处理

由传热学理论,通过试样冷凝面的热通量 q 可表示为总传热量与冷凝面积之比

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{2A_c} \tag{1}$$

式中: Q_1 由收集冷凝液的质量求得; Q_2 则根据冷却水所获得热量求解。实验测量的 Q_1 与 Q_2 值的偏差在 5% 范围内。

采用 Fourier 一维导热公式,可根据测点温度 T_i 计算出冷凝面的壁面温度

$$T_w = T_i + \frac{q\Delta l}{\lambda} \tag{2}$$

式中: λ 为试样的导热系数; Δl 为热电偶测温点至冷凝壁面的距离。

2 实验结果与讨论

2.1 试样表面疏水性研究

图 4 列出了液滴在试样 1[#] 表面及光滑表面的润湿形貌,液滴体积为 0.12 μL 。从图 4a 可以明显观察到,试样 1[#] 表面的液滴呈 Cassie 接触模式,并未完全润湿槽谷。与光滑表面相比可知,液滴横向接触角(垂直余弦槽向的接触角) $\theta_{\perp}$ 明显大于光滑表面接触角 θ ,但其纵向接触角(沿余弦槽向的接触角) $\theta_{\parallel}$ 则与其在光滑表面的接触角 θ 接近(但 $\theta_{\parallel}$ 略大于 θ),即液滴在微槽表面呈现明显的各向异性。这主要是由于液滴在微槽结构表面沿不同方向的润湿过程中需要克服的能垒不同。如果液滴沿余弦槽纵向润湿只需要克服表面张力作用,这与液滴在平板表面润湿过程类似。然而,液滴在垂直于槽的横

向润湿过程中,不仅需克服表面张力,而且在液滴边缘越过槽峰的过程中其势能会逐渐升高,因此液滴向该方向润湿更加困难。

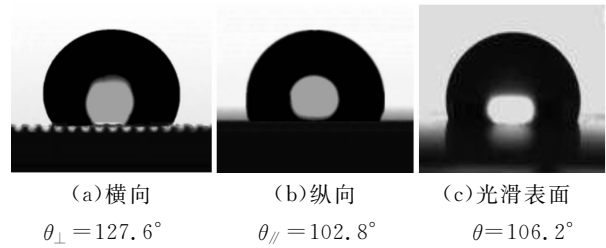


图 4 液滴在试样 1[#]和光滑表面的接触角

液滴在不同微槽结构表面的接触角和润湿深度列于表 2。由于表面张力和重力的协同作用,液滴在微槽表面的润湿深度随着槽峰高度的增加几乎保持不变,均呈 Cassie 润湿状态。对比液滴在不同几何结构的微槽表面的润湿性数据可知,液滴的两向接触角($\theta_{\perp}$ 和 $\theta_{\parallel}$)随着槽峰高度的增大略有增加,但却随着槽距的增大呈减小趋势。这主要是由于槽距增大时,微槽轮廓线曲率降低,液滴润湿需要克服的能垒降低,润湿更加容易,进而导致静态接触角下降。若槽距继续增大,微槽表面的润湿性将逐步趋于光滑表面。通过对比可知, H 和 P 的变化对横向接触角 $\theta_{\perp}$ 影响较为显著,但对纵向接触角 $\theta_{\parallel}$ 的作用十分有限。总之,在槽距保持不变的前提下,增加槽峰高度有利于提高液滴表观接触角,但槽距增大对微槽表面的疏水性不利。

表 2 试样表面接触角和润湿深度

试样编号	$\theta_{\perp}/(^{\circ})$	$\theta_{\parallel}/(^{\circ})$	润湿深度/ μm
1 [#]	127.6	102.8	1.2
2 [#]	132.4	104.2	1.2
3 [#]	138.7	105.3	1.2
4 [#]	135.8	105.1	1.2
5 [#]	131.3	105.6	1.3

2.2 液滴冷凝形貌

蒸汽在试样表面的冷凝形貌如图 5 所示,实验过程保持恒定的过冷度 $\Delta T=8.5\text{ K}\pm 1.0\text{ K}$ 。实验过程中,蒸汽在不同试样表面都维持稳定滴状冷凝,但微槽几何结构和槽的安装方向都对冷凝液滴的合并、脱落、滑移速率有显著的影响。对于纵向槽表面,由于纵槽的引导使液滴呈长轴沿纵向的椭球形,且液滴难以横向合并,导致液滴长大速度明显低于光滑表面,这对传热过程不利,但纵槽的引导使液滴的脱落半径较光滑表面减小,液滴滑移速率较光滑表面更快,该过程有利于冷凝传热。同时,在槽距恒

定的前提下,随着槽峰高度的增加液滴滑移速度增大、脱落半径和冷凝周期减小,但在槽峰高度不变时,增大槽距则导致液滴的滑移速度略有下降、脱落半径和冷凝周期也呈增大趋势。与纵向槽表面不同,横向槽的槽峰阻碍液滴从冷凝面脱离,导致液滴滑移速度显著降低且液滴脱落半径较纵槽和光滑表面明显增大,但槽峰高度和槽距对液滴脱落半径和冷凝周期影响很小。此外,实验中可观察到液滴明显的横向合并运动,且液滴脱落时的滑移路径成 Z 字形。

液滴的滑移速度随着槽峰高度的增大而减缓,液滴脱落半径和冷凝周期则呈增大趋势。实验过程中蒸汽在各试样表面的冷凝周期都随着过冷度的增大而减小,两者呈幂函数关系,如图 6 所示。通过上述实验现象的对比可以推断出,微槽结构及布置方式对近壁区的热量传递和动量交换过程影响显著,蒸汽在微槽表面的冷凝过程呈现明显的各向异性。

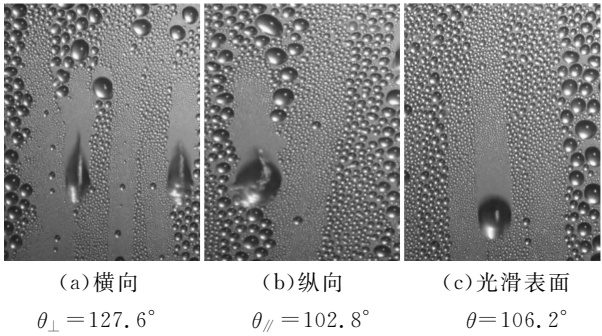


图 5 微槽表面冷凝形貌

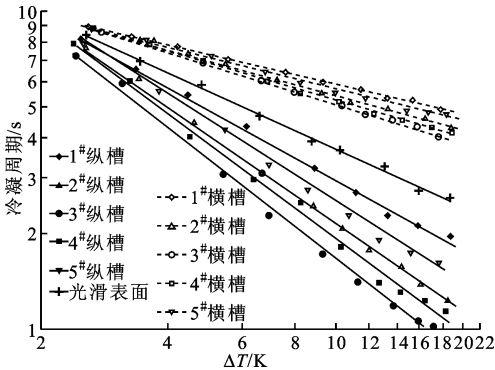


图 6 液滴在不同试样表面的冷凝周期

3 液滴脱落过程热力学分析

当液滴尺寸达到 mm 级,则液滴在重力作用下会产生接触角滞后现象。若接触角滞后现象轻微,可将液滴形状等效为球冠形液滴,前进角、后退角和接触角的关系可表示为

$$\theta_{\text{avg}} = (\theta_{\text{rcd}} + \theta_{\text{adv}})/2 \tag{3}$$

$$\cos\theta = \cos\theta_{\text{adv}} + \left(\frac{\cos\theta_{\text{rcd}} - \cos\theta_{\text{adv}}}{\pi}\right)\xi \tag{4}$$

从热力学角度,液滴从壁面脱落必须在外力作用下克服黏附功才能实现,为便于计算,可将液滴近似为等体积的球冠受力,如图7所示。

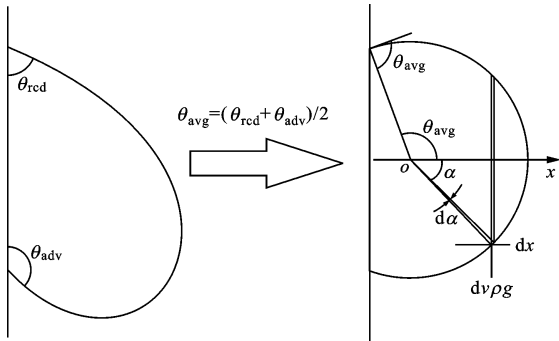


图7 液滴受力分析

液滴与壁面的接触面积为

$$A_{sl} = \eta \pi r^2 (1 - \cos^2 \theta_{avg}) \quad (5)$$

式中: η 为表面润湿率,与冷凝表面结构相关。对于光滑表面, $\eta=1$,对于微槽表面

$$\eta = \frac{\int_{\alpha}^{\alpha+\Delta\alpha} (1 + 0.5A^2 \sin^2 \omega x)^{0.5} d\omega x}{2\pi} \quad (6)$$

式中: α 为槽峰浸润初始点; $\Delta\alpha$ 为单槽峰浸润宽度。显然,微槽表面 $\eta < 1$ 。

液滴在冷凝表面的黏附功为

$$W_a = \int_0^\pi \sigma (1 + \cos \theta) \cos \xi d\xi \quad (7)$$

由上述两式可得液滴脱落所需克服的总功为

$$W = W_a A_{sl} = \int_0^\pi \pi \eta r^2 \sigma (1 + \cos \theta) (1 - \cos^2 \theta_{avg}) \cos \xi d\xi \quad (8)$$

将式(3)、(4)代入式(8),可得

$$W = -2\pi \eta r^2 \sigma (1 - \cos^2 \theta_{avg}) \left(\frac{\cos \theta_{rcd} - \cos \theta_{adv}}{\pi} \right) \quad (9)$$

液滴对壁面的重力矩为

$$M_g = \int_0^\pi \int_0^\theta [(\rho_l - \rho_v) g \pi r^4 \sin^3 \alpha (\cos \alpha - \cos \theta)] \cos \xi d\alpha d\xi \quad (10)$$

当液滴对壁面的重力矩与液滴脱落所需克服的黏附功相等时,求得平衡时球冠半径即液滴脱落半径为

$$r_{max} = K \left[\frac{\eta \sigma}{(\rho_l - \rho_v) g} \right]^{1/2} \quad (11)$$

式中:平均接触角 $\theta_{avg} = \frac{\theta_{rcd} + \theta_{adv}}{2}$;

$$K = \left[\frac{12(1 + \cos \theta_{avg}) \sin^2 \theta_{avg}}{(3 - 8 \cos \theta_{avg} + 6 \cos^2 \theta_{avg} - \cos^4 \theta_{avg})} \right]^{1/2}。$$

从式(11)可以发现,液滴的脱落半径 r_{max} 与表面润湿率 η 及平均接触角等参数相关,而两者在本

研究中都受冷凝表面微槽结构的影响。当冷凝试样竖直放置时,假设液滴在不同结构和方向的微槽表面的润湿深度相同,且静态接触角等于平均接触角,则 H 值越大液滴与冷凝表面的固液接触面积越小, η 值也相应减小,反之, P 值越大液滴与冷凝表面的固液接触面积越大, η 值也相应增大。图8给出了峰距比 H/P 与液滴脱落半径关系的实验值及理论计算值的对比。由图可以看出,理论计算值与实验结果都表明液滴脱落半径随峰距比的增大而减小,且相同峰距比情况下,大尺寸对脱落有利。

此外,从图8中可以明显看出,横槽表面液滴的脱落半径的计算值也明显大于纵槽表面,这与2.2节实验结果一致。对于纵槽表面,液滴的表面润湿率较光滑表面降低,使液滴底部的黏附功降低,同时接触角增大使液滴重心外移,对壁面的重力矩增大。上述两因素协同作用使得液滴的脱落半径大幅降低,而对于横槽表面,液滴在冷凝表面黏附功低于光滑表面,但液滴脱落过程中跨越横槽需要克服一定的势垒,这又阻碍了液滴的脱落,最终导致液滴在横槽表面的脱落半径比光滑表面略高。脱落半径计算值和实验结果吻合较好,误差不超过20%。

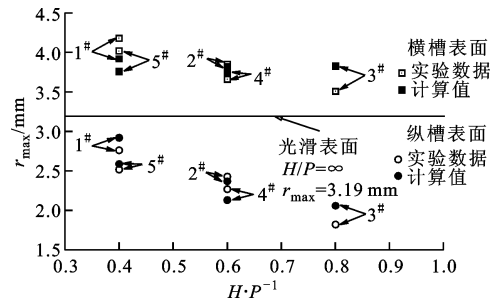


图8 液滴脱落半径与 H/P 的关系

4 冷凝传热分析

不同试样表面的热通量随过冷度的变化规律如图9所示。由图可知,随着过冷度的增加,各试样表

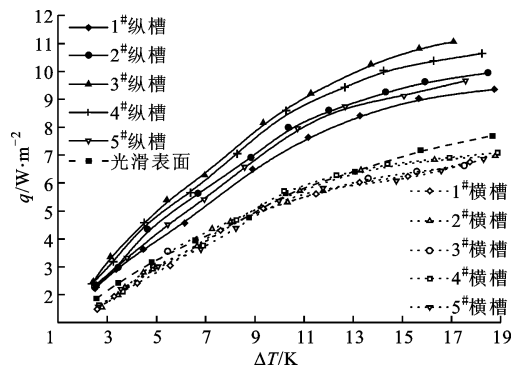


图9 热通量随过冷度变化的曲线

面的热通量也逐渐增大。相同过冷度条件下,竖直布置的微槽表面热通量明显高于水平布置微槽表面和光滑表面,而横槽表面的热通量与光滑表面相当。随着槽峰高度增大,竖直布置微槽表面传热性能有所提高,但高的槽峰对横向布置的微槽道表面传热会产生不利影响,热通量呈降低趋势。这表明微槽表面的传热过程也呈现明显的各向异性,实验结果与上述冷凝传热形貌分析相互印证。

5 结 论

制备了不同槽峰高度和槽距的 μm 级余弦槽结构表面,实验研究了不同结构微槽表面的疏水性及其对滴状冷凝传热性能的影响,并对冷凝传热过程中液滴在微槽表面合并、脱落过程进行实验研究和热力学分析。结果表明,液滴在微槽表面的疏水性和传热性能都呈现明显的各向异性,横向的静态接触角 $\theta_{\perp}$ 明显高于纵向接触角 $\theta_{\parallel}$ 。同时,冷凝传热过程中竖直纵槽阻碍液滴的横向合并,但对液滴脱落过程起到了极大促进作用,传热性能较光滑表面提高 30%~50%,且峰距比越大液滴的脱落半径越小,脱落频率越高,表面传热效率也越高。水平横槽则相反,虽然增大峰距比促进了液滴合并,但却对脱落过程产生不利影响,导致整体传热性能较纵向槽表面大幅下降,与光滑表面接近。引入表面润湿率对微槽表面的液滴脱落半径进行热力学计算,计算值与实验结果吻合较好,误差在 20% 以内。

参考文献:

- [1] TANASAWA I, OCHIAI J. Experimental study on dropwise condensation [J]. Bull Jpn Soc Mech Eng, 1972, 16(4/5): 1184-1192.
- [2] ROSE J W. Dropwise condensation theory and experiment; a review [J]. Journal of Power and Energy, 2002, 216(A2): 115-128.
- [3] MA X H, CHEN X F, BAI T. A new mechanism for condensation heat transfer enhancement; effect of the surface free energy difference of condensate and solid surface [J]. J Enhanc Heat Transfer, 2004, 11(4): 257265.
- [4] PENG B L, MA X H, LAN Z, et al. Analysis of condensation heat transfer enhancement with dropwise-filmwise hybrid surface; droplet sizes effect [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2014, 77(5): 785794.
- [5] LEE S, YOON H K, KIM K J, et al. A dropwise condensation model using a nano-scale, pin structured surface [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2013, 60(1): 664-671.
- [6] IZUMI M, KUMAGAI S, SHIMADA R, et al. Heat transfer enhancement of dropwise condensation on a vertical surface with round shaped grooves [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 28(2/3): 243-248.
- [7] YAMALI C, MERTE H. A theory of dropwise condensation at large subcooling including the effect of the sweeping [J]. Heat and Mass Transfer, 2002, 38(3): 191-202.
- [8] WATANABE K, YANUAR H. Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with highly water-repellent wall [J]. Fluid Mech, 1999, 381(2): 225-238.
- [9] SOMMERS A D, JACOBIB A M. Wetting phenomena on micro-grooved aluminum surfaces and modeling of the critical droplet size [J]. J Micromech Microeng, 2006, 16(2): 1571-1578.
- [10] ZHONG Y F, JACOBIB A M, GEORGIADIS J G. Effects of surface chemistry and groove geometry on wetting characteristics and droplet motion of water condensate on surfaces with rectangular microgrooves [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2013, 57(4): 629-641.
- [11] MA C H, BAI S X, PENG X D, et al Anisotropic wettability of laser micro-grooved SiC surfaces [J]. Appl Surf Sci, 2013, 284: 930-935.
- [12] LI P, XIE J, CHENG J, et al. Anisotropic wetting properties on a precision-ground micro V-grooved Si surface related to their micro-characterized variables [J]. J Micromech Microeng, 2014, 24(7): 075004.
- [13] KANNAN R, SIVAKUMA D. Drop impact process on a hydrophobic grooved surface, colloids and surfaces: a physicochem [J]. Eng Aspects, 2008, 317(1/2/3): 694-704.
- [14] LARA J R, HOLTZAPPLE M T. Experimental investigation of dropwise condensation on hydrophobic heat exchangers: part II Effect of coatings and surface geometry [J]. Desalination, 2011, 280(1/2/3): 363-369.
- [15] PARK I S. Numerical analysis for flow, heat and mass transfer in film flow along a vertical fluted tube [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2010, 53(3): 309-319.
- [16] PROMRAKSA A, CHUANG Y C, CHEN L J. Study on the wetting transition of a liquid droplet sitting on a square array cosine wave-like patterned surface [J]. J Colloid Interf Sci, 2014, 418: 8-19.

(编辑 荆树蓉)