

DOI: 10.7652/xjtuxb201507006

大量不凝性气体存在时不同润湿性 传热管冷凝传热特性实验研究

胡浩威, 牛东, 唐上朝, 唐桂华

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了提高大量不凝性气体存在时水蒸气的冷凝传热性能, 实现对电力、化工、制冷等工业领域中余热的高效回收利用, 基于水平管外冷凝传热实验系统, 实验研究了氮气-水蒸气混合气体在不同润湿性光滑管和翅片管表面的润湿特性和冷凝传热特性。通过化学刻蚀与自组装方法对紫铜光滑管与翅片管表面进行疏水与超疏水改性处理, 并且根据仿生原理, 制备了亲水+疏水组合翅片管表面与亲水+超疏水组合翅片管表面。研究发现, 当大量不凝性气体存在时, 亲水+超疏水组合翅片管的冷凝传热特性最优, 水蒸气体积分数对不同润湿性传热管的冷凝传热特性影响显著, 并且随着水蒸气体积分数增大, 超疏水翅片管和亲水+超疏水组合翅片表面的冷凝形式由珠状冷凝逐渐向膜状冷凝过渡。

关键词: 翅片管; 冷凝传热; 超疏水; 不凝性气体

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)07-0030-07

Condensation Heat Transfer Performance of Heat Transfer Tubes with Different Wettabilities in Presence of a Large Amount of Noncondensable Gas

HU Haowei, NIU Dong, TANG Shangchao, TANG Guihua

(Key Laboratory of Thermal-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the condensation heat transfer performance of water vapor in the presence of a large amount of noncondensable gas and realize the high-efficiency recovery of industrial residual heat in electricity, chemical engineering, refrigeration and other fields, the outside condensation heat transfer performances of horizontal plain and finned tubes with different surface wettabilities were experimentally studied. The self-assembled monolayer coatings of n-octadecyl mercaptan using oxidation and etching treatments were employed to create the hydrophobic or superhydrophobic surfaces with nanostructures. The hydrophilic-hydrophobic and hydrophilic-superhydrophobic hybrid surfaces based on finned tubes were prepared. The experimental results showed that the hydrophilic-superhydrophobic hybrid finned tube achieved the highest condensation heat transfer performance in the presence of a large amount of noncondensable gases. The volume fraction of water vapor in the nitrogen-vapor mixture has important influence on the heat transfer characteristics. And as the vapor volume fraction increased, the dropwise condensation was transformed gradually to the film condensation on both superhydrophobic and

收稿日期: 2014-12-05。 作者简介: 胡浩威(1986—),男,博士生;唐桂华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB710702);国家自然科学基金资助项目(51222604)。

网络出版时间: 2015-04-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150421.1711.001.html>

hydrophilic-superhydrophobic hybrid finned tubes.

Keywords: finned tube; condensation heat transfer; superhydrophobic; noncondensable gas

我国能源资源约束不断加剧,环境问题日益突出,在提高能效、促进节能等方面面临重大技术挑战,余热资源的回收利用是节能减排的重要环节。水蒸气冷凝传热过程广泛存在于电力、化工、制冷、冶金等工业领域中,尤其在天然气锅炉烟气余热利用过程中,如何高效利用冷凝潜热是当前的研究热点。

目前,强化冷凝传热的途径主要是利用翅片传热管增加传热面积并且能够减薄膜状冷凝的液膜厚度。Kumar 等进行了低肋翅片管的水蒸气和 R134a 冷凝传热实验^[1]。Namasivayam 等实验研究了翅片间距分别为 0.25、0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 的翅片铜管的强制对流冷凝传热特性,在不同流速条件下,发现翅片间距为 0.25 mm 的翅片管性能最优,其传热通量是光管的 1.57~2.74 倍^[2]。

近年来,大量的研究报道了通过表面改性技术制备疏水或超疏水表面促进形成珠状冷凝,实现强化水蒸气冷凝传热的目的。Vemuri 等利用自组装技术制备了疏水和超疏水表面且进行水蒸气冷凝传热实验,发现在水蒸气侧压力为 33.6 kPa 时,与膜状冷凝相比,改性后的珠状冷凝传热系数大约提高 3 倍^[3-4]。宋永吉等在紫铜基底上制备了疏水性碳纳米管膜,且进行氟化处理,获得较好的珠状冷凝,与膜状冷凝相比,珠状冷凝的传热系数提高 3~4 倍^[5]。马学虎等利用自组装技术制备了疏水性表面和超疏水表面,分别研究了纯水蒸气和含有少量不凝性气体的冷凝传热特性,提出了水蒸气及含不凝性气体的冷凝环境中液滴在超疏水表面上的润湿模式^[6-8]。Miljkovic 等实验研究了硅烷沉积的氧化铜表面的珠状冷凝特性,并且发现在较小过饱和情况下,具有纳米粗糙结构的超疏水表面冷凝液滴合并诱导发生弹跳现象,大大强化了冷凝传热等^[9-10]。Xiao 等对硅烷沉积的氧化铜表面进行了油浸处理,增加冷凝液滴的成核点,实验验证通过该表面改性方法制备的超疏水表面的珠状冷凝传热特性比普通疏水性表面大约提高 100%^[11]。

前人的研究中只涉及单一强化冷凝传热技术,即增加传热表面强化技术或表面改性强化技术,而几乎没有报道将这两种传热强化技术协同作用于水蒸气冷凝过程的实验研究。本文基于紫铜光滑管和翅片管表面,通过化学刻蚀和自组装方法进行疏水和超疏水改性处理,并且根据仿生原理,制备了亲水

+疏水组合翅片管表面和亲水+超疏水组合翅片管表面,实验研究了氮气-水蒸气混合气体在不同润湿性光滑管和翅片管表面的润湿特性和冷凝传热特性,并且考察了水蒸气含量对不同润湿性传热管的润湿特性与冷凝传热特性的影响。

1 实验系统与数据处理

1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示,该实验系统由冷凝实验腔体、不凝性气体供给系统、水蒸气发生器、冷却水循环系统和数据采集系统等主要部件组成。冷凝实验腔体外部缠绕电加热丝,由调压器供电并调节加热功率,确保实验过程中水蒸气在内壁无冷凝,且维持实验系统热平衡。冷凝腔体内部的温度与压力分别由 T 型铠装热电偶和压力传感器(Tecsis P3276, Germany)监测。测试的冷凝传热管水平放置于实验腔中,本文实验所用传热管为紫铜材质的光滑管与翅片管,具体几何参数见表 1。冷却水在冷凝传热管内强制对流,进出口水温由 T 型铠装热电偶测量,为了提高测量精度,在进出口连接处自制冷却水混合器^[12],冷却水的流量由电磁流量计(Rosemount 8732A, USA)测量。

表 1 冷凝传热管几何参数

参数	光滑管	翅片管
外径 d_o /mm	14.10	14.26
内径 d_i /mm	12.09	12.62
翅片高度 e /mm		0.87
单位长度翅片个数 N/cm^{-1}		10
有效长度 L /mm	325	265
导热系数 $\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	398	398

本文实验中的不凝性气体为氮气,通过带有减压阀的高压氮气瓶提供,在气路上安装气体质量流量控制器(七星华创 CS200A, 中国),控制和测量冷凝实验腔体内的不凝性气体含量。同时,在冷凝实验腔体正面与观察窗水平位置,放置高速摄像机(Phantom Miro M110, USA)用以观察冷凝实验过程中传热管表面的冷凝形式。为了保证实验过程中数据测量的准确性,在进行实验前先用烘干机将实验系统内部干燥处理,利用真空泵(First FX16, 中

国)对实验腔进行抽真空,直至内部绝对压力低于1~5 Pa,以保证实验过程中空气体积分数小于0.5%。

实验系统中水蒸气发生器内部温度、冷凝腔内部温度以及冷却水进出口温度均采用T型铠装热电偶测量,在实验前所有热电偶均在高精度恒温水浴(Julabo F26, Germany)中进行标定,精度为0.1℃。前述所有温度、压力与流量传感器的信号均通过数据采集系统(Keithley 3706, USA)采集,在计算机上实时监测与存储。

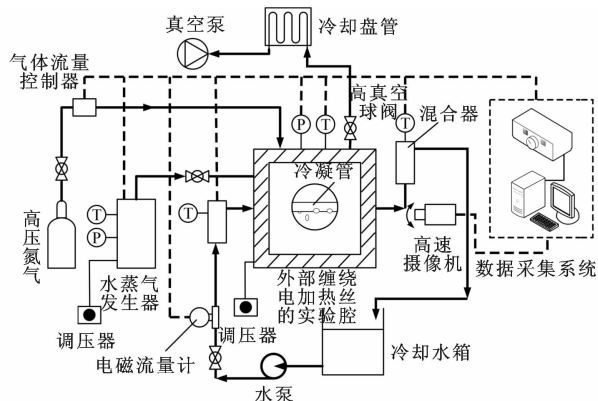


图1 实验装置原理图

1.2 数据处理

实验冷凝传热管的总传热系数 k 由下式计算

$$k = \frac{\Phi}{A_o \Delta T_m} = \frac{q_v \rho_l C_{pl} (t_{l,out} - t_{l,in})}{A_o \Delta T_m} \quad (1)$$

式中: Φ 为热流量,由冷却水进出口温差计算求得; A_o 为传热管的基管面积; ΔT_m 为对数平均温差。

由于冷凝传热管内表面无强化肋片,因此管内侧强制对流传热系数 h_i 由Gnielinski公式^[13]计算

$$Nu = \frac{h_i d_i}{\lambda_l} = \frac{(f/8)(Re_1 - 1000)Pr_1}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr_1^{2/3} - 1)} \quad (2)$$

$$f = (0.791 \ln Re_1 - 1.64)^{-2} \quad (3)$$

$$Re_1 = \frac{\rho_l u_1 d_i}{\mu_l} \quad (4)$$

式中: f 为管内湍流流动的阻力系数; Pr_1 为普朗特数; Re_1 为雷诺数。

根据热阻分离法,管外侧冷凝传热系数 h_c 经推导可以表示为

$$h_c = \frac{1}{1/k - \beta/h - R_w - R_f} \quad (5)$$

式中: R_w 为传热管管壁的热阻; R_f 为污垢热阻(由于所有冷凝传热管在测试前进行清洗,因此本文忽略污垢热阻); $\beta = A_o/A_i$,表示管外侧基管面积 A_o 与管内侧面积 A_i 之比。

在氮气-水蒸气混合气体中,水蒸气的体积分数 φ_v (水蒸气的摩尔分数 x_v)由理想气体Gibbs-Dalton方程求出

$$\varphi_v = x_v = \frac{n_g - n_{NCG}}{n_g} \quad (6)$$

式中: n_g 为混合气体的物质的量,可以通过测定冷凝腔内的温度和压力确定; n_{NCG} 为不凝性气体(氮气)的物质的量。

根据文献[14]中的方法对实验结果进行不确定度分析,对于本文所有测试传热管,水蒸气体积分数的不确定度小于±1.75%,传热通量的不确定度小于±2.06%,冷凝传热系数的不确定度小于±11.24%。

2 冷凝表面制备与表征

2.1 表面制备方法

根据固体表面的润湿特性,制备超疏水表面通常分为两步:构造纳米级粗糙结构和在粗糙表面上修饰低表面能物质。本文使用的超疏水表面制备方法^[15]如下。

(1)化学刻蚀。首先将待测紫铜试样放入2 mol/L的盐酸水溶液中浸泡30 min,然后依次用丙酮和去离子水清洗,去除表面的污染物与油脂,吹干待用;将清洗干净的紫铜试样浸入2.5 mol/L氢氧化钾和0.065 mol/L过硫酸钾的混合水溶液中,放置于干燥箱(DZ-3AII,中国)中70℃恒温处理1 h,取出后用去离子水清洗干净,然后再放置于干燥箱中180℃恒温处理2 h,最后取出自然降温晾干。

(2)分子自组装膜。将完成第(1)步的试样浸入2.5 mmol/L十八烷基硫醇乙醇溶液中,在70℃下恒温处理1 h,取出后用去离子水冲洗吹干。

本文使用的疏水表面制备方法是:将清洗干净的紫铜试样进行第(2)步的分子自组装膜处理。

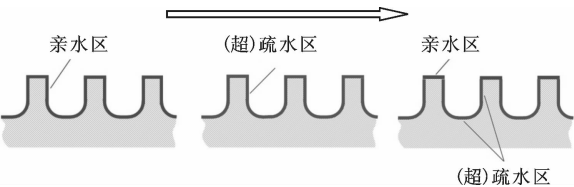
图2a给出纳米比亚沙漠甲虫的背部结构。文献[16]研究表明:在干燥的非洲南部纳米比亚沙漠中,由于该甲虫背部具有超疏水基底和间隔排列的亲水突起的组合式特殊结构,因此它可以更轻易地从空气中收集水分形成水珠。根据仿生原理,组合翅片表面的制备过程如图2b所示。首先将翅片管清洗干净,然后按照上述表面改性处理方法将翅片管表面整体改性为疏水性或超疏水性,处理完成后,用2000#砂纸轻轻将翅片尖部区域打磨,除去尖部表面的分子组装膜或纳米粗糙结构,最后用乙醇、去离子水清洗表面,并迅速用氮气吹干。

2.2 表面表征

利用接触角测量仪(Powereach JC2000D5,中



(a)纳米比亚沙漠甲虫背部结构^[16]

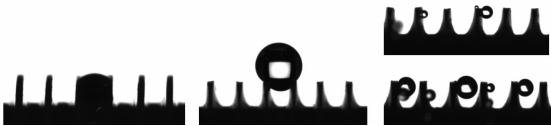


(b)组合翅片管表面制备过程示意图

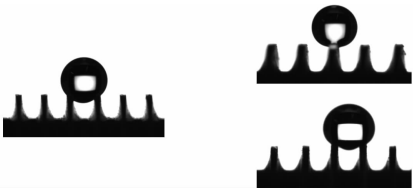
图 2 亲水+(超)疏水组合翅片管结构及制备流程

国)测量不同润湿性冷凝表面的接触角,液滴体积为 5 μL ,在同一个表面随机选取 5 个点测量其接触角取平均值,在亲水、疏水和超疏水紫铜表面上的接触角分别为 69.3°、113.5°和 158.3°。

图 3 表示液滴在翅片管表面的润湿特性。将 5 μL 液滴滴在亲水翅片管表面,液滴迅速润湿表面,而将 5 μL 液滴滴在疏水翅片管表面上,液滴会悬浮在两个翅片上。由于液滴不能直接滴落在超疏水翅片管表面上,我们采用水雾喷淋方法生成尺寸更小的液滴,可以看出,直接生长的小液滴悬挂在翅片表面,形状接近完美球形,表现出良好的疏水特性。亲水+疏水组合翅片管表面的液滴润湿形态与疏水翅片管表面几乎一致。将 5 μL 液滴滴在亲水+超疏水组合翅片管表面,液滴能够悬立在单个翅片尖部,而将液滴体积增加至大约 8 μL 时,液滴难以悬立在单个翅片尖部,会滚落并与相邻翅片尖部接触,但仍不能很好地润湿翅片表面。



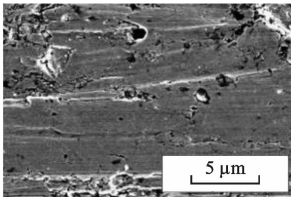
(a)亲水翅片管 (b)疏水翅片管 (c)超疏水翅片管



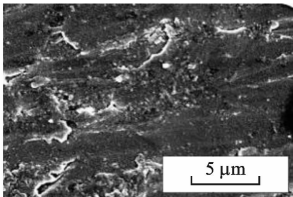
(d)亲水+疏水组合翅片管 (e)亲水+超疏水组合翅片管

图 3 液滴在翅片管表面的润湿性

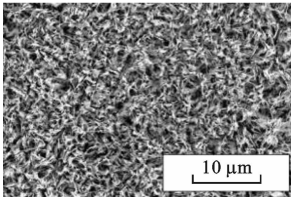
利用场发射扫描电镜(FESEM)(Hitachi SU8010, Japan)对亲水、疏水和超疏水区域的微观形貌进行观测,结果如图 4 所示。图 4a 和 4b 分别为放大 10 000 倍的亲水区域和疏水区域,表面相对平滑,且疏水区域的十八烷基硫醇分子组装膜几乎没有改变紫铜基底的微观形貌。图 4c~4e 分别为放大 5 000 倍、10 000 倍和 30 000 倍的化学刻蚀表面,可以看出,经过氢氧化钾与过硫酸钾溶液刻蚀,在紫铜基底表面上形成了纳米级“尖刺”粗糙结构。图 4f 为放大 30 000 倍的经十八烷基硫醇修饰的具有纳米粗糙结构的超疏水表面。液滴在具有纳米粗糙结构的超疏水表面上容易形成 Cassie-Baxter 润湿形态,在固液界面上实际形成固-气-液界面,液滴接触角增大,且更容易脱离。



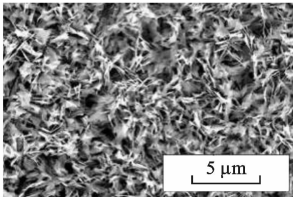
(a)亲水表面



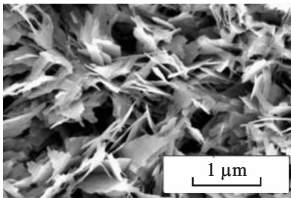
(b)疏水表面



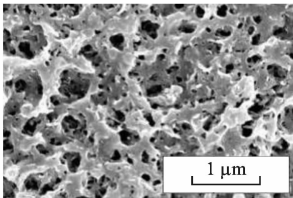
(c)纳米粗糙结构×5 000



(d)纳米粗糙结构×10 000



(e)纳米粗糙结构×30 000



(f)超疏水表面

图 4 不同润湿性表面的微观形貌

3 实验结果与讨论

3.1 实验系统可靠性验证

为了验证本文中实验系统的可靠性,首先对亲水光滑管和疏水光滑管进行了纯水蒸气的冷凝传热实验。图 5 表示了实验获得的冷凝传热系数与理论模型计算值的比较结果,可以看出:亲水光滑管的实验测量值与 Nusselt 膜状冷凝理论解^[17]比较,偏差在 12%之内;疏水光滑管与文献[18]中理论模型相比,偏差在 25%之内。因此,可以认为本文的实验结果是可信的。

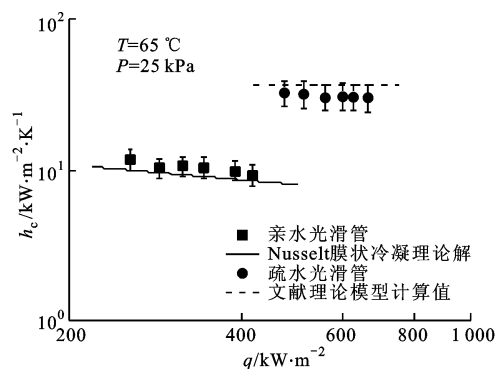


图5 纯水蒸气冷凝传热系数结果比较

3.2 不凝性气体存在时不同润湿性传热管表面的润湿特性

图6给出了大量不凝性气体存在时不同润湿性传热管表面上的冷凝形式:亲水光滑管、疏水光滑管和超疏水光滑管表面分别呈现出膜状冷凝、珠状冷凝和珠状冷凝;亲水翅片管、疏水翅片管和亲水+疏水组合翅片管为膜状冷凝,而超疏水翅片管和亲水+超疏水组合翅片管表现为珠状冷凝。从图6中还可以看出,超疏水翅片管表面上分布的冷凝液滴尺寸比超疏水光滑管的小,而亲水+超疏水组合翅片管表面上的冷凝液滴尺寸更小。

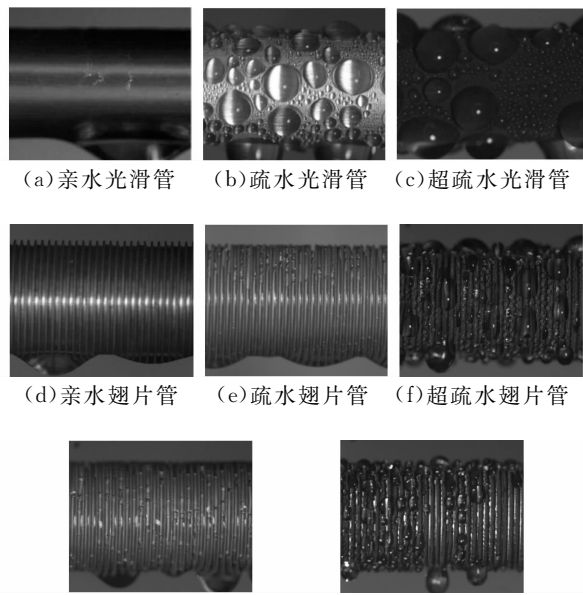


图6 大量不凝性气体存在时不同传热管表面的润湿特性

如图7与图8所示,当水蒸气体积分数小于65%时,在超疏水翅片管和亲水+超疏水组合翅片管表面上表现为珠状冷凝,当水蒸气体积分数增加至65%~85%时,冷凝液会陷入翅片之间,在表面上逐渐形成液膜,珠状冷凝向膜状冷凝过渡。因此,当水蒸气体积分数不同时,超疏水翅片管和亲水+

超疏水组合翅片管的冷凝形式会发生变化。

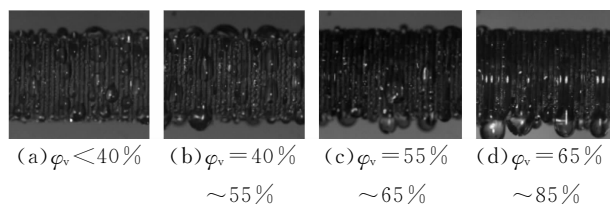


图7 不同水蒸气体积分数时超疏水翅片管的冷凝形式

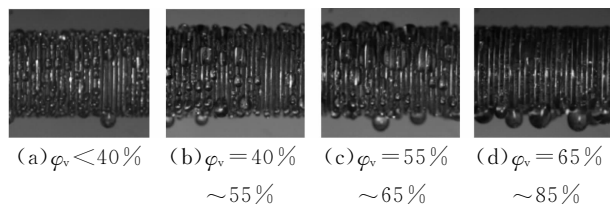


图8 不同水蒸气体积分数时亲水+超疏水组合翅片管的冷凝形式

3.3 不凝性气体存在时水蒸气冷凝传热特性分析

图9表示不凝性气体的体积分数为21.4%时不同润湿性传热管的冷凝传热系数。光滑管的冷凝传热系数由高到低依次为:超疏水光滑管>疏水光滑管>亲水光滑管;对于不同润湿性的翅片管,冷凝传热系数由高到低依次为:亲水+超疏水组合翅片管>超疏水翅片管>亲水+疏水组合翅片管>疏水翅片管>亲水翅片管。图10表示不凝性气体的体积分数为19.2%时不同润湿性传热管的冷凝传热通量。与纯水蒸气冷凝时相比,大量不凝性气体条件下的冷凝传热系数降低了1~2个数量级。这主要是由于在传热管壁附近形成了不凝性气体层,成为起主导作用的热阻,大大增加了传热与传质阻力,使冷凝传热特性降低。

从图10中可以得出,与亲水光滑管相比,超疏水光滑管的传热通量大约提高了87%~115%。这主要是因为超疏水光滑管表面形成了珠状冷凝,且不凝性气体会滞留在超疏水表面的纳米粗糙结构中形成气囊,在接触面上与冷凝液共同形成液-气-固复合界面,形成Cassie-Baxter^[19]或sinkage润湿形态^[8],减小了冷凝液与固体壁面的接触面积,使冷凝液滴从壁面上脱离速度加快,实现了强化冷凝传热效果。亲水+超疏水组合翅片管表现出比超疏水翅片管更优越的冷凝传热特性,与超疏水翅片管相比,亲水+超疏水组合翅片管的传热通量提高了8%~12%。一方面,亲水区的表面自由能比超疏水区大,水蒸气优先在吸附势较大的亲水区发生冷凝形成冷凝液,并且会合并聚合附近超疏水区的小液滴,冷凝液在亲水区逐渐积聚增多;另一方面,由于

亲水性翅片尖部的细长结构,限制了亲水区与冷凝液的接触面积,减小了亲水区对冷凝液的黏滞力,使液滴能够快速地脱离壁面。因此,亲水+超疏水组合翅片结构能够有效地促进液滴积合并,并且提高液滴的更新频率,同时由于液滴的脱落运动强化不凝性气体层扰动,使不凝性气体边界层内的速度场发生变化,能够有效地减小相际传质阻力。

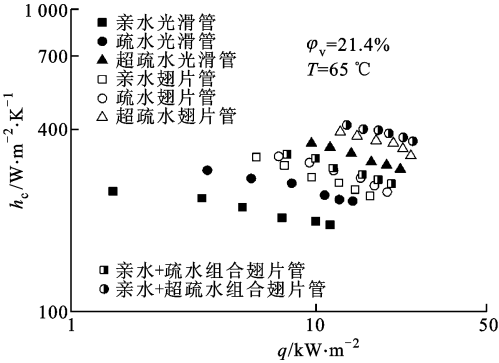


图 9 大量不凝性气体存在时不同润湿性传热管冷凝传热系数的变化规律

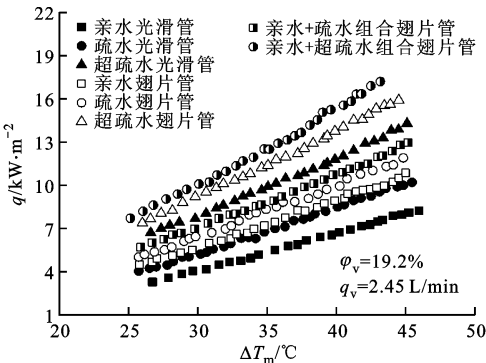


图 10 大量不凝性气体存在时不同润湿性传热管传热通量的变化规律

图 11 给出了不同润湿性传热管的冷凝传热系数随水蒸气体积分数的变化规律。随着水蒸气体积分数从 11% 增长至 91%, 冷凝传热系数逐渐增加。一方面,是由于水蒸气含量增大,混合气体中不凝性气体的浓度降低,使不凝性气体层的热阻减小;另一方面,水蒸气含量增大,提高了主流混合气体中水蒸气与管壁附近的浓度差,增加了传质动力,使更多水蒸气发生冷凝,同时释放大 量潜热,提高了冷凝传热系数。从图 11 中还可以得出,当水蒸气体积分数大约小于 70% 时,亲水+超疏水组合翅片管的冷凝传热系数最大,而随着水蒸气含量继续增大,它的冷凝传热系数虽然增大,但是增大的趋势变缓。这是由于在这个范围内,亲水+超疏水组合翅片管表面上冷凝形式发生了改变,由珠状冷凝向膜状冷凝过渡。

当水蒸气体积分数为 89% 左右时,亲水+超疏水组合翅片管的冷凝传热系数低于亲水+疏水组合翅片管、疏水翅片管和疏水光滑管。与亲水光滑管相比,亲水+超疏水组合翅片管的冷凝传热系数约提高了 43%,与亲水翅片管相比,亲水+超疏水组合翅片管的冷凝传热系数约提高了 22%。

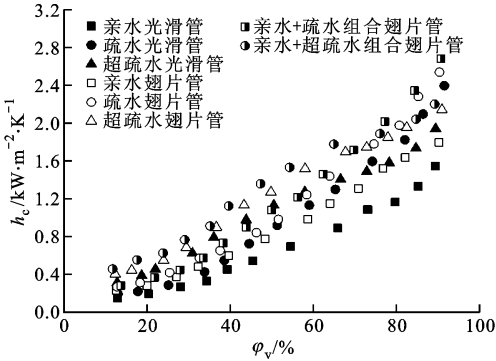


图 11 水蒸气体积分数对不同润湿性传热管的冷凝传热系数的影响

4 结 论

本文通过化学刻蚀和自组装方法对紫铜光滑管和翅片管进行了疏水和超疏水改性处理,并且根据仿生原理,制备了亲水+疏水组合翅片管和亲水+超疏水组合翅片管,实验研究了氮气-水蒸气混合气体在不同润湿性光滑管和翅片管表面的润湿特性和冷凝传热特性,获得以下主要结论。

(1)当大量不凝性气体存在时,冷凝液滴在具有纳米粗糙结构的超疏水表面为 Cassie-Baxter 或 sinkage 润湿形态,更易从壁面脱落,且由于超疏水特性与组合翅片结构的协同影响,亲水+超疏水组合翅片表现出最优的冷凝传热特性。

(2)水蒸气体积分数对不同润湿性传热管的润湿特性和冷凝传热特性影响显著。随着水蒸气体积分数增大,超疏水翅片管和亲水+超疏水组合翅片管表面的冷凝形式发生改变,由珠状冷凝向膜状冷凝过渡。

参考文献:

[1] KUMAR R, VARMA H K, MOHANTY B, et al. Prediction of heat transfer coefficient during condensation of water and R-134a on single horizontal integral-fin tube [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(1): 111-12.

[2] NAMASIVAYAM S, BRIGGS A. Effect of vapour velocity on condensation of atmospheric pressure steam

- on integral-fin tubes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(8/9): 1353-1364.
- [3] VEMURI S, KIM K J. An experimental and theoretical study on the concept of dropwise condensation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(3/4): 649-657.
- [4] VEMURI S, KIM K J, WOOD B D, et al. Long term testing for dropwise condensation using self-assembled monolayer coatings of n-octadecyl mercaptan [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(4): 421-429.
- [5] 宋永吉, 任晓光, 任绍梅, 等. 水蒸气在超疏水表面上的冷凝传热 [J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(1): 95-97.
SONG Yongji, REN Xiaoguang, REN Shaomei, et al. Condensation heat transfer of steam on super-hydrophobic surfaces [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(1): 95-97.
- [6] 王四芳, 兰忠, 王爱丽, 等. 超疏水表面蒸汽及含不凝气蒸汽滴状冷凝传热实验分析 [J]. *化工学报*, 2010, 61(3): 607-611.
WANG Sifang, LAN Zhong, WANG Aili, et al. Dropwise condensation of steam and steam-air mixture on super-hydrophobic surfaces [J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(3): 607-611.
- [7] LAN Z, MA X H, WANG S F, et al. Effects of surface free energy and nanostructures on dropwise condensation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 156(3): 546-552.
- [8] MA X H, WANG S F, LAN Z, et al. Wetting mode evolution of steam dropwise condensation on superhydrophobic surface in the presence of noncondensable gas [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2012, 134(2): 021501.
- [9] MILJKOVIC N, ENRIGHT R, WANG E N. Effect of droplet morphology on growth dynamics and heat transfer during condensation on superhydrophobic nanostructured surfaces [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(2): 1776-1785.
- [10] MILJKOVIC N, ENRIGHT R, NAM Y, et al. Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 13(1): 179-187.
- [11] XIAO R, MILJKOVIC N, ENRIGHT R, et al. Immersion condensation on oil-infused heterogeneous surfaces for enhanced heat transfer [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1-6.
- [12] KRISHNASWAMY S, WANG H S, ROSE J W. Condensation from gas-vapour mixtures in small non-circular tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(9): 1731-1737.
- [13] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass-transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. *International Chemical Engineering*, 1976, 16(2): 359-368.
- [14] BEVINGTON P R, ROBINSON D K. Data reduction and error analysis for the physical sciences [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1969.
- [15] QIAN B T, SHEN Z Q. Super-hydrophobic CuO nanoflowers by controlled surface oxidation on copper [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2006, 21(3): 747-752.
- [16] PARKER A R, LAWRENCE C R. Water capture by a desert beetle [J]. *Nature*, 2001, 414(6859): 33-34.
- [17] NUSSELT W. Die oberflächencondensation des wasserdampfes [J]. *Zetschr Ver Deutch Ing*, 1916, 60: 541-546.
- [18] HU H W, TANG G H. Theoretical investigation of stable dropwise condensation heat transfer on a horizontal tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(2): 671-679.
- [19] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40: 546-551.

[本刊相关文献链接]

- 张凡, 李兆辉, 李晓宇, 等. 不同材料翅片管换热器特性的实验研究. 2015, 49(5): 62-67. [doi:10.7652/xjtuxb201505010]
- 文键, 杨辉著, 杜冬冬, 等. 螺旋折流板换热器换热强化的数值研究. 2014, 48(9): 43-48. [doi:10.7652/xjtuxb201409008]
- 王学会, 袁晓蓉, 郑豪策, 等. 3 mm 闭式脉动热管传热性能的实验研究. 2014, 48(9): 101-106. [doi:10.7652/xjtuxb201409017]
- 刘华, 沈胜强, 龚路远, 等. 水平管降膜蒸发器温度损失的计算与分析. 2014, 48(4): 90-94. [doi:10.7652/xjtuxb201404016]
- 韩辉, 何雅玲, 唐桂华. 硫酸蒸气在换热器表面沉积特性的数值研究. 2013, 47(11): 7-13. [doi:10.7652/xjtuxb201311002]
- 龙延, 魏进家, 吕琥. 不同倾角下平板型环路热管的实验研究. 2013, 47(5): 38-43. [doi:10.7652/xjtuxb201305007]

(编辑 荆树蓉)