

DOI: 10.7652/xjtuxb201605004

大量不凝性气体存在时不同润湿性管束 对流冷凝传热实验研究

唐上朝, 胡浩威, 牛东, 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: 为了实现工业中大量不凝性气体存在场合下蒸气的高效冷凝传热,建立了混合蒸气水平管束外对流冷凝传热实验系统,通过化学刻蚀与自组装方法对光管管束、2D肋管管束和3D肋管管束进行疏水与超疏水表面改性处理。当大量不凝性气体存在时,对不同润湿性管束表面的冷凝形式及管束间冷凝液流型进行可视化观测。实验研究了冷却水流速、混合蒸气流速、水蒸气体积分数等因素对不同润湿性的冷凝式换热器对流冷凝传热系数的影响,并分析不同水蒸气体积分数条件下管束效应的影响。通过实验研究发现,当大量不凝性气体存在时,冷凝液在管束间形成滴状流,水蒸气体积分数对不同润湿性的冷凝式换热器的对流冷凝传热特性影响显著,随着管排数增加,对流冷凝传热系数增大,管束效应对超疏水光管管束的强化作用最大,当水蒸气的体积分数约为11%时,9排超疏水光管管束的对流冷凝传热系数是单排的1.53倍,而当水蒸气体积分数约为23%时,9排超疏水光管管束的对流冷凝传热系数是单排的1.34倍。

关键词: 对流冷凝传热;不凝性气体;润湿性;管束效应

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0024-08

Experimental Research on the Convective Condensation Heat Transfer of Tube Bundles in the Presence of Large Amount of Noncondensable Gas

TANG Shangchao, HU Haowei, NIU Dong, TANG Guihua

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

Abstract: To achieve the highly efficient condensation heat transfer in the industry with large amount of noncondensable gas, an experimental system of convective condensation heat transfer for horizontal tube bundles containing air-vapor mixture was established. The methods using self-assembled monolayer coatings of n-octadecyl mercaptan and etching treatment were employed to create the hydrophobic and superhydrophobic surfaces. The convective condensation heat transfer performances of plain, 2D finned and 3D finned horizontal tubes with different wettabilities were studied. The condensation behaviors on the surfaces and the flow patterns of the condensate between bundles were also observed. In the experiment, the effects of typical factors including the flow rate of cooling water, the flow rate of air-vapor mixture, and the volume fraction of water vapor on the convective condensation heat transfer characteristics were investigated. It is found that the droplet flow of condensate may be formed between the tube bundles in the presence of large amount of noncondensable gas. As the number of tube row increases, the convective

收稿日期: 2015-08-08。 作者简介: 唐上朝(1971—),男,讲师;唐桂华(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(51222604,51576156)。

网络出版时间: 2016-02-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160202.1551.004.html>

condensation heat transfer coefficient increases correspondingly and the heat transfer enhancement effect of tube bundle is more significant. When the vapor volume fraction is about 11%, the convective condensation heat transfer coefficient of superhydrophobic plain tubes with 9 rows is 1.53 times of single row, and that of superhydrophobic plain tubes with 9 rows reduces to 1.34 times of single row when the vapor volume fraction reaches about 23%.

Keywords: convective condensation heat transfer; noncondensable gas; wettability; bundle effect

能源是人类社会经济发展源动力,节能与环保成为当今世界的主题。冷凝式换热器作为一种高效的热量回收与利用装置被广泛应用于电力、化工、冶金、制冷等工业领域,一直是研究的热点。在锅炉烟气潜热回收、露点蒸发进行海水淡化等重要过程中,均涉及大量不凝性气体存在时蒸气冷凝传热,当不凝性气体存在时,传热表面附近形成的不凝性气体层是主要传热热阻,对冷凝相变传热产生抑制作用。因此,研究大量不凝性气体存在时冷凝式换热器的对流冷凝传热特性对发展先进的冷凝传热强化技术、提高能源利用效率具有重要意义。

国内外学者在强化蒸气冷凝传热方面做了大量的研究工作。Briggs 等实验研究了纯水蒸气和含有少量不凝性气体的水蒸气在水平单管和管束外的冷凝传热特性,发现管束间的冷凝液淹没效应对冷凝传热系数影响较小^[1]。Lee 等实验研究了空气-水蒸气的混合蒸气在具有聚四氟乙烯涂层的不锈钢水平传热管表面的冷凝传热特性^[2]。Jeong 等提出了一种烟气冷凝换热器中传热传质过程的计算模型,并设计 6 级换热器组成的烟气冷凝式换热器进行冷凝传热实验验证^[3]。Shi 等设计了一种紧凑型翅片管式换热器,以水蒸气-空气的混合蒸气模拟锅炉烟气进行了对流冷凝传热实验,并且发展了烟气余热回收的翅片管换热器冷凝传热的关联式^[4]。马志先等研究了 HFC245fa 制冷剂纯蒸气在光管与强化传热管管束上的冷凝传热特性,并且提出管间冷凝液流态与迁移方式的实际现象与纯蒸气 Nusselt 管束模型假设间的差异是导致 Nusselt 管束模型预测值偏小的主要原因^[5-6]。燕志鹏等实验研究了 4 种制冷剂纯蒸气在花瓣翅片管管束外的冷凝传热特性^[7]。程岫等实验研究了在真空条件下渗层不锈钢管束壁面蒸气冷凝传热特性,与普通铜管束相比,渗层不锈钢管束的冷凝传热系数最大是普通铜管束的 1.7 倍^[8]。

近年来,国内外学者发展并采用表面改性技术将普通冷凝表面制备成疏水或超疏水表面,实现珠状冷凝,提高冷凝传热性能。宋永吉等在紫铜基底

上制备了疏水性碳纳米管膜,并对表面进行氟化处理,实现了较好的珠状冷凝,通过纯水蒸气冷凝实验测试,与膜状冷凝相比,表面改性后珠状冷凝的传热系数是改性前的 3~4 倍^[9]。Vemuri 等通过自组装技术在水平紫铜单管表面进行表面改性,并且进行水蒸气冷凝传热特性实验研究,发现当水蒸气侧压力为 33.6 kPa 时,与膜状冷凝相比,改性获得的珠状冷凝传热系数大约是改性前的 3 倍^[10-11]。Miljkovic 等对无氧铜传热管进行了刻蚀与硅烷沉积表面改性处理,以实现珠状冷凝,通过水平单管外纯水蒸气冷凝特性实验,发现在较小过饱和的情况下,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,能够显著提高冷凝传热系数^[12]。

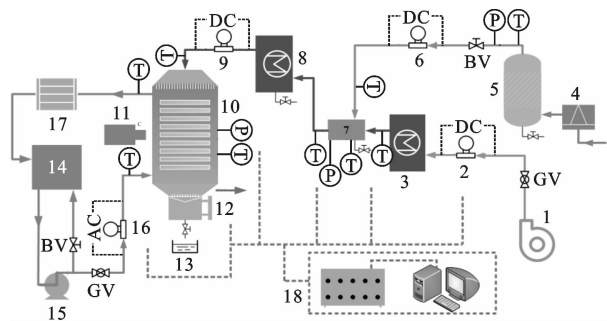
综上所述,前人的研究主要集中于发展翅片技术以强化管束膜状冷凝传热和采用表面改性技术实现铜片或单管的珠状冷凝,几乎没有研究强化传热表面与不同润湿性表面的协同作用的影响,而不同润湿性的水平管束的冷凝传热特性实验研究更鲜见报道。本文实验研究了大量不凝性气体存在时不同润湿性水平管束的冷凝式换热器的对流冷凝传热特性,可视化观测了不同润湿性管束表面的冷凝形式及管束间冷凝液流型,并考察了冷却水流速、混合蒸气流速、水蒸气体积分数对不同润湿性的冷凝式换热器对流冷凝传热系数的影响,分析了不同水蒸气体积分数时管束效应的影响。

1 实验系统

1.1 实验系统介绍

本文实验以空气作为不凝性气体,实验系统如图 1 所示。该实验系统主要由干空气供给及加热系统、水蒸气发生系统、冷却水循环系统、实验测试冷凝式换热器及数据采集系统组成。室温空气经离心式风机 1 输送进入第 1 级电加热器 2(最大电加热功率 90 kW)进行加热,通过控制电加热功率使出口温度与水蒸气出口温度相同。自来水通过软水器 4,经软化处理后泵入蒸气发生器 5(LDR0.1-0.7,中国)加热生成水蒸气,与加热后的干空气在混合腔

7 内进行混合,然后一起输送进入第 2 级电加热器 8 (最大电加热功率 30 kW)进行二次加热至实验所需温度,在一定流速的情况下进入冷凝式换热器 10,自上而下横向冲刷,与冷凝式换热器管束进行对流冷凝传热,为了提高测量精度,在冷凝换热器进出口各布置了 4 个 K 型热电偶,且沿程布置 4 个 K 型热电偶监测气流经过换热器内部温度变化。同时,在冷凝式换热器正面开设直径为 150 mm 的圆形观察窗,在与观察窗同一水平位置,放置高速摄像机 (Phantom Miro M110,美国)观察不同润湿性管束表面的冷凝形式。水蒸气在冷凝式换热器管束表面发生冷凝传热,冷凝液在重力作用下流入换热器底部的收集装置和液位计 12,并且在稳定实验工况下每 60 s 用电子天平 (AL204,瑞士)称量冷凝液质量,获得产生冷凝液的质量速率。



1:离心式风机;2、6、9:气体流量计;3:第1级电加热器;
4:软水器;5:蒸气发生器;7:混合腔;8:第2级电加热器;
10:冷凝式换热器;11:高速摄像机;12:液位计;13:电子天平;14:冷却水箱;15:离心式水泵;16:电磁流量计;
17:冷却器;18:数据采集系统;T:温度测点;P:压力测点

图1 实验系统示意图

该实验系统中冷却介质采用自来水,通过安装在管路上的离心式水泵 15 将冷却水输送进入冷凝式换热器,自下排向上排在管内侧流动,通过冷凝式换热器管壁与高温混合蒸气进行热量传递,最后经过水冷冷却器 17 回到冷却水箱 14 内。冷却水的流量由电磁流量计 (ZFG-50,中国)测量,为了提高冷却水进出口温度的测量精度,在进出口分别安装自制的冷却水混合器,并且在混合器上各布置 2 个 K 型热电偶。

整个实验系统管路及冷凝式换热器外部均铺设保温棉,通过实验系统热平衡测试,管外侧气体释放的热量比管内侧冷却水获得的热量高 3%~4.7%,满足实验测试要求(小于 5%)。该实验系统中冷凝式换热器进出口温度及内部温度和冷却水进出口温度测量所采用的 K 型热电偶,实验前均在高精度恒

温水浴 (Julabo F26,德国)中进行校准。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,美国)采集与监测。

1.2 传热管结构及管束布置

本文实验中冷凝式换热器的传热管分别为紫铜材质的光管、2D 肋管和 3D 肋管,它们的表面结构如图 2 所示。本文设计的冷凝式换热器的管束结构如图 3 所示,冷凝式换热器内部传热管管束以顺排形式布置。冷凝式换热器最多可由 45 根传热管组成 (5 列×9 排)。为了方便安装与拆卸,冷凝式换热器上下均采用法兰连接,且换热器的壳体与管束可以通过带有螺纹的封头进行装配与拆卸,为了保证换热器内部的密封性,在封头与管束之间安装氟胶 O 型圈,且在靠近换热器内部的缝隙处加装硅胶垫。光管、2D 肋管和 3D 肋管的详细几何尺寸及管束的结构尺寸见表 1。

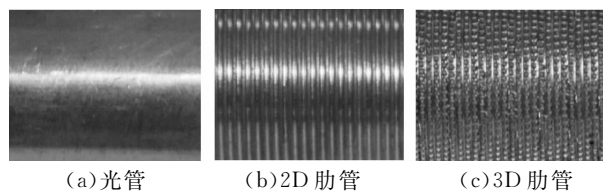


图2 3种传热管表面结构

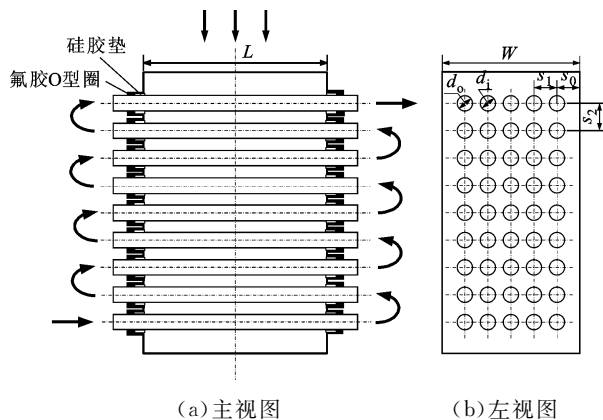


图3 冷凝式换热器管束布置示意图

1.3 数据处理与误差分析

气侧混合蒸气释放的热量由两部分组成:混合蒸气无相变对流传热释放的显热 Φ_s 和部分水蒸气发生冷凝相变释放的潜热 Φ_L 。

$$\Phi_g = \Phi_L + \Phi_s \quad (1)$$

$$\Phi_s = (\rho_g q_{Vg} - m_{\text{cond}}) C_{pg} (t_{g,\text{in}} - t_{g,\text{out}}) + m_{\text{cond}} C_{pv} (t_{g,\text{in}} - t_s) \quad (2)$$

$$\Phi_L = m_{\text{cond}} H_{fg} \quad (3)$$

式中: ρ_g 为混合蒸气密度; q_{Vg} 为混合蒸气的体积流量; C_{pg} 为混合蒸气的比热容; $t_{g,\text{in}}$ 和 $t_{g,\text{out}}$ 为混合蒸气

表 1 换热器几何尺寸参数

参数	光管	2D 肋管	3D 肋管
外径 d_o /m	0.014 10	0.014 26	0.014 12
内径 d_i /m	0.012 00	0.012 42	0.012 14
壁厚 δ /m	0.001 05	0.000 92	0.000 99
翅片高度 e /m		0.000 87	0.000 87
单位长度翅片个数 n/cm^{-1}		10	17
翅片部分长度 L /m		0.249	0.251
迎风面积 S/m^2	0.036 87	0.036 87	0.036 87
横向间距 s_1 /m	0.028 1	0.028 1	0.028 1
纵向间距 s_2 /m	0.032 2	0.032 2	0.032 2

流经冷凝式换热器的进出口温度; m_{cond} 为水蒸气冷凝速率; H_{fg} 为水蒸气汽化潜热; t_s 为水蒸气分压下的饱和温度。

管内侧冷却水带走的热量 Φ_c 为

$$\Phi_c = \rho_c q_{vc} C_{pc} (t_{c,out} - t_{c,in}) \tag{4}$$

式中: ρ_c 为管内侧冷却水的密度; q_{vc} 为冷却水的体积流量; C_{pc} 为冷却水的比热容; $t_{c,in}$ 和 $t_{c,out}$ 为冷却水的进出口温度。

在整个对流冷凝传热过程中,平均热流量 Φ_{av} 可以表示为

$$\Phi_{av} = \frac{\Phi_g + \Phi_c}{2} \tag{5}$$

进行热平衡测试,满足以下关系时

$$\frac{|\Phi_c - \Phi_{av}|}{\Phi_{av}} \times 100\% \leq 5\% \tag{6}$$

保证实验系统保温措施良好,认为测量数据有效。

总传热系数 k 可以表示为

$$k = \frac{\Phi_{av}}{A_o \Delta t_m} \tag{7}$$

式中: 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

$$Nu = \frac{h_i d_i}{\lambda_c} = \frac{(f/8)(Re_c - 1\,000)Pr_c}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr_c^{2/3} - 1)} \tag{8}$$

$$f = (0.79 \ln Re_c - 1.64)^{-2} \tag{9}$$

$$Re_c = \frac{\rho_c u_c d_i}{\mu_c} = \frac{4\rho_c q_{vc}}{\pi \mu_c d_i} \tag{10}$$

式中: f 为管内湍流流动的阻力系数; Pr_c 为普朗特数; Re_c 为雷诺数; d_i 为传热管内径; μ_c 为冷却水的动力黏度。

根据热阻分离法,管外侧对流冷凝传热系数 h_o

可以表示为

$$h_o = \frac{1}{1/k - R_w - R_f + \beta/h_i} \tag{11}$$

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。

本文以 h_{oN} 表示冷凝式换热器管排数为 N ($N = 1, 2, \dots, 9$) 时管外侧的对流冷凝传热系数,且定义 $N \geq 2$ 时的 h_{oN} 与单排的 h_{o1} 之比为管束效应 α ,即

$$\alpha = \frac{h_{oN}}{h_{o1}} \tag{12}$$

根据文献[14-15] 中的方法对实验计算结果进行不确定度分析,对于本文所有测试实验工况,气侧 Re_g 的最大不确定度为 $\pm 3.45\%$,总传热系数的最大不确定度为 $\pm 7.32\%$,单位面积水蒸气冷凝速率的最大不确定度为 $\pm 2.58\%$,管外侧对流冷凝传热系数的最大不确定度为 $\pm 14.73\%$ 。

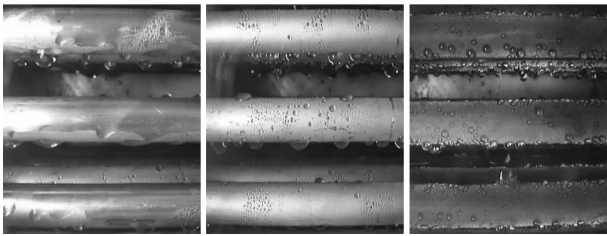
2 传热管表面改性方法及表征

本文采用的疏水与超疏水表面制备方法参见文献[16-18],不再赘述。将疏水和超疏水表面通过接触角测量仪(Powereach JC2000D5,中国)测量其接触角,亲水、疏水与超疏水表面的接触角分别为 $(69.3 \pm 3)^\circ$ 、 $(113.5 \pm 3)^\circ$ 和 $(158.3 \pm 3)^\circ$ 。另外,我们还采用场发射电镜扫描(FESEM)以及 X 射线光电子能谱分析(XPS)对亲水、疏水与超疏水表面的微观结构及元素进行表征与分析,具体测试结果见文献[17-18]。

3 实验结果与讨论

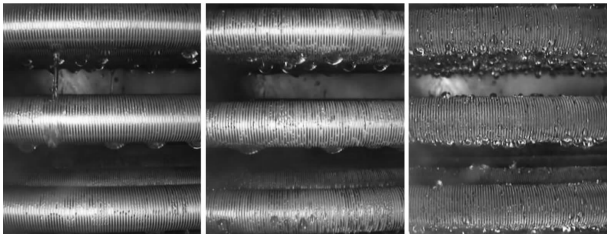
3.1 大量不凝性气体存在时不同传热管的润湿特性及管束间冷凝液流型

当水蒸气体积分数约为 17% 时,亲水、疏水与超疏水光管管束、2D 肋管管束和 3D 肋管管束表面冷凝形式分别如图 4~6 所示。从图 4 可以看出,亲水光管表现为膜状冷凝,疏水与超疏水光管表现为珠状冷凝,且在一定气流冲刷作用下,液滴尺寸较小时会从传热管表面脱落,并影响下排传热管。如图 5 所示:亲水 2D 肋管和疏水 2D 肋管均表现为膜状冷凝,由于扩展肋片作用,在表面张力的作用下,液膜减薄;超疏水 2D 肋管表现为典型的珠状冷凝。如图 6 所示:与 2D 肋管相似,亲水 3D 肋管与疏水 3D 肋管均表现为膜状冷凝,但由于 3D 肋管特殊的



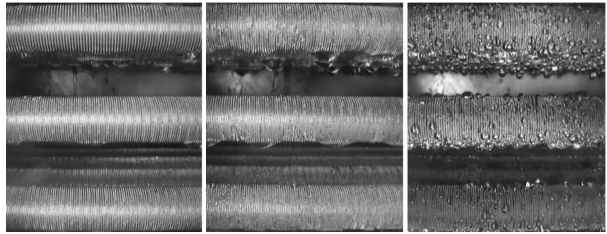
(a) 亲水光管 (b) 疏水光管 (c) 超疏水光管

图 4 光管管束润湿特性



(a) 亲水 2D 肋管 (b) 疏水 2D 肋管 (c) 超疏水 2D 肋管

图 5 2D 肋管管束润湿特性



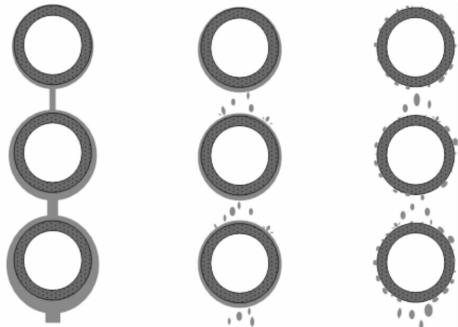
(a) 亲水 3D 肋管 (b) 疏水 3D 肋管 (c) 超疏水 3D 肋管

图 6 3D 肋管管束润湿特性

扩展表面结构,液膜被进一步减薄;超疏水 3D 肋管也表现为典型的珠状冷凝。

不同于水平单管冷凝传热实验研究,管束间冷凝液流型对水平管束的对流冷凝传热特性影响很大,上排传热管表面的冷凝液在风力、重力等外力作用下滴落至下排传热管,其冷凝传热过程与单管相比更加复杂,且存在显著差异。相比于纯水蒸气冷凝,由图 4~6 可知,当大量不凝性气体存在时,水蒸气体积含量较小,冷凝速率降低,生成的冷凝液量减少,传热管表面上的冷凝液在水平管束间难以形成片状流或柱状流(如图 7a 所示),不论在传热管表面形成膜状冷凝还是珠状冷凝,冷凝液在管束间均呈现出间断的滴状流,如图 7b、7c 所示。冷凝液滴在下落过程中不断对下排传热管产生冲击,对下排传热管的液膜或液滴不仅产生较大扰动,使液膜厚度不能均匀增加或提高液滴脱落速度,且冷凝液在管束间形成的滴状流,其流动具有间歇性特点。同时,我们还发现在超疏水管束上的冷凝液滴落至下排管

表面时甚至会引起飞溅或弹跳,扰乱下排传热管附近的气体流场,对不凝性气体层产生剧烈扰动,进一步减小气相热阻。



(a) 片状流或柱状流 (b) 膜状冷凝时滴状流 (c) 珠状冷凝时滴状流

图 7 管束间冷凝液流型示意图

3.2 大量不凝性气体存在时不同传热管束的对流冷凝传热特性

3.2.1 冷却水流速的影响 图 8 表示不同润湿性光管管束(9 排)、2D 肋管管束(9 排)和 3D 肋管管束(9 排)的对流冷凝传热系数随管内水流速的变化关系。从图中可以看出,在 $Re_c=4\ 290\sim8\ 950$ 时,随着冷却水流速增加,对流冷凝传热系数逐渐增大,但冷却水流速对不同润湿性管束的传热特性影响不显著。从图 8 可以得出:超疏水光管管束的对流冷凝传热系数是亲水光管管束的 1.5 倍左右,疏水光管管束的对流冷凝传热系数是亲水光管管束的 1.3 倍左右,而疏水 2D 肋管管束与亲水 2D 肋管管束的对流冷凝传热系数相当,超疏水 2D 肋管管束的对流冷凝传热系数是亲水 2D 肋管管束的 1.4 倍左右;亲水 3D 肋管管束与疏水 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数相当,超疏水 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数是亲水 3D 肋管管束的 1.3 倍左右。

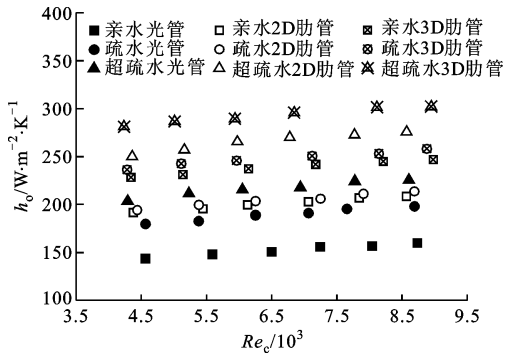


图 8 对流冷凝传热系数与冷却水流速的关系

3.2.2 混合蒸气流速的影响 图 9 表示不同润湿性光管管束(9 排)、2D 肋管管束(9 排)和 3D 肋管

管束(9 排)的对流冷凝传热系数随混合蒸气流速的变化关系。对不同类型的管束,水蒸气体积分数为 10.7%~11.6%时,混合蒸气的雷诺数逐渐增大,超疏水管束的对流冷凝传热系数高于疏水管束,亲水管束的对流冷凝传热系数最小。以 3D 肋管管束为例,疏水 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数约为亲水 3D 肋管管束的 1.1 倍,超疏水 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数约为亲水 3D 肋管管束的 1.3 倍。

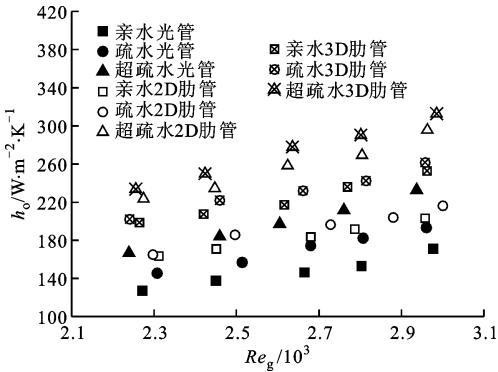


图 9 对流冷凝传热系数与混合蒸气流速的关系

混合蒸气流速越大,对于冷凝形式为膜状冷凝的亲水光管管束、亲水与疏水 2D 肋管管束和亲水与疏水 3D 肋管管束,有利于减薄不凝性气体层和液膜层的厚度,削弱传热阻力;另一方面,对于冷凝形式为珠状冷凝的疏水与超疏水光管管束、超疏水 2D 肋管管束和超疏水 3D 肋管管束,不仅能够减薄壁面附近不凝性气体层厚度,还有利于冷凝液滴快速脱离表面,并对下游及下排管束表面的冷凝液滴进行冲刷。根据可视化观测还发现,由于上排冷凝液滴落至超疏水管束表面时,液滴在管壁表面发生碰撞并飞溅,将进一步扰动不凝性气体层从而增强冷凝传热,这也合理地解释了在混合蒸气流速增大时,超疏水光管管束、超疏水 2D 肋管管束和超疏水 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数的增长斜率较大。

3.2.3 水蒸气体积分数的影响 图 10 给出了不同润湿性的光管管束(9 排)、2D 肋管管束(9 排)和 3D 肋管管束(9 排)的对流冷凝传热系数随混合蒸气中水蒸气体积分数的变化关系。由图中可以看出,随着水蒸气体积分数由 2.9%增加至 24.1%,不同润湿性管束的对流冷凝传热系数均显著增加。这主要因为:一方面,水蒸气体积分数增大,混合蒸气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,水蒸气体积分数增大,提高了混合蒸气中水蒸气与管壁附近的浓度差,增加了传质动力,使更多水蒸气传递至管壁附近发生冷凝,同时释放大

潜热,提高了对流冷凝传热系数。

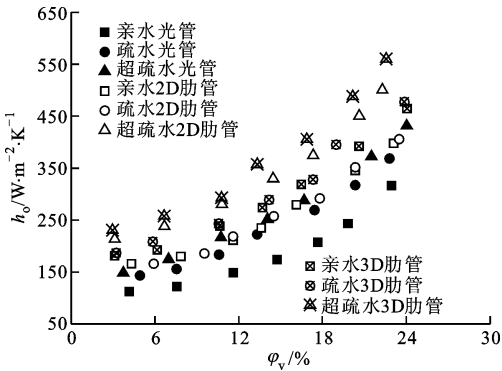


图 10 对流冷凝传热系数与水蒸气体积分数的关系

3.2.4 管束效应的影响 当水蒸气的体积分数为 10.7%~11.6%时,不同润湿性的光管管束、2D 肋管管束和 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数随管排数的变化趋势如图 11 所示。从图中可以看出,管排数从 1 增至 9 时,对流冷凝传热系数逐渐增加,但增长趋势逐渐变缓。图 12 表示了水蒸气体积分数为 10.7%~11.6%时不同润湿性的光管管束、2D 肋管管束和 3D 肋管管束的管束效应。管束效应对超疏水管束的对流冷凝传热特性的强化作用比亲水和疏水管束的大,其中管束效应对超疏水光管管束的强

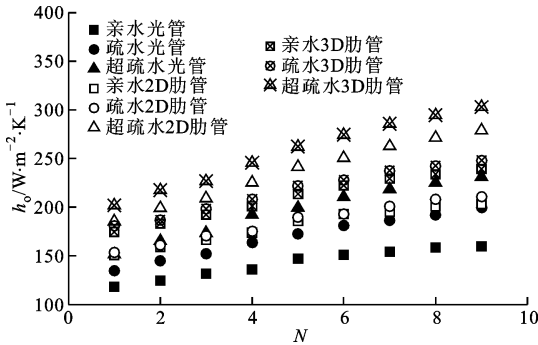


图 11 水蒸气体积分数为 10.7%~11.6%时
对流冷凝传热系数与管排数的关系

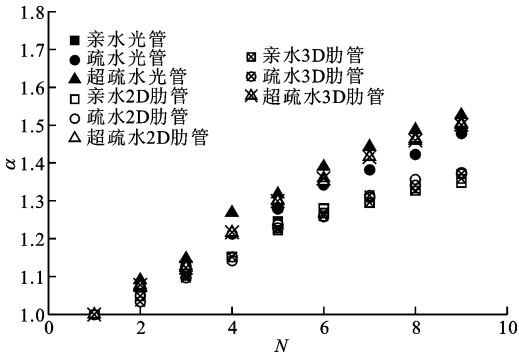


图 12 水蒸气体积分数为 10.7%~11.6%时管排数
对不同润湿性冷凝式换热器管束效应的影响

化作用最大,9 排超疏水光管管束的对流冷凝传热系数约是单排的 1.53 倍,其次是超疏水 2D 肋管管束和超疏水 3D 肋管管束。这主要是因为:一方面,管排数增加,混合蒸气受更多排管束影响,扰动更剧烈;另一方面,针对超疏水表面,不凝性气体嵌入纳米粗糙结构中,与冷凝液滴形成固-气-液复合表面,减小了固体壁面对冷凝液的黏滞力,当上排管的冷凝液滴落至下排管时,冷凝液滴不会附着在管壁表面,而是与壁面发生撞击后迅速弹开,不会发生冷凝液滴淹没现象,从而剧烈地扰动不凝性气体层,减小传质阻力,进一步强化冷凝传热。

本文也给出了水蒸气体积分数为 22.3%~24.1%时不同润湿性的光管管束、2D 肋管管束和 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数和管束效应随管排数的变化关系,分别如图 13、14 所示。图 13 中对流冷凝传热系数的变化趋势与图 11 中几乎一致,随着管排数的增加,对流冷凝传热系数逐渐增大。

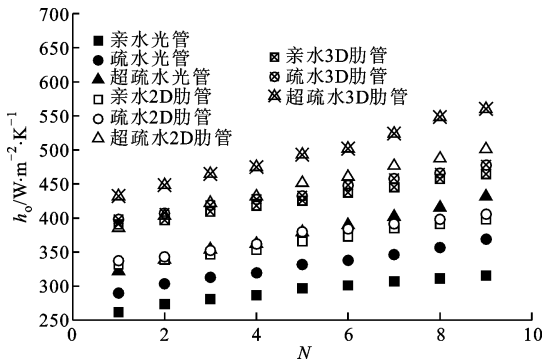


图 13 水蒸气体积分数为 22.3%~24.1%时
对流冷凝传热系数与管排数的关系

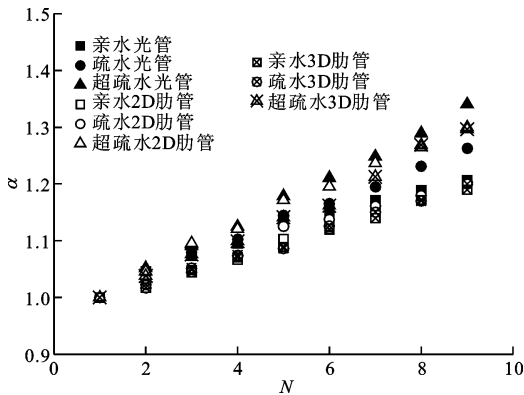


图 14 水蒸气体积分数为 22.3%~24.1%时管排数
对不同润湿性冷凝式换热器管束效应的影响

从图 14 可以看出,当水蒸气体积分数在 22.3%~24.1%时,管束效应对超疏水光管管束的强化作用最大,9 排超疏水光管管束的对流冷凝传热系数

约是单排的 1.34 倍,而 9 排亲水 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数约是单排的 1.19 倍。与图 12 相比,水蒸气体积分数增大,管束效应对不同润湿性管束的对流冷凝传热系数强化作用减弱。这主要是因为:一方面,水蒸气体积分数增大,传质动力增加,更多水蒸气通过气液界面发生冷凝,提高了对流冷凝传热系数;另一方面,混合蒸气中不凝性气体所占份额减少,在管壁附近形成的气体热阻相应减小,管排对气流的扰动作用和冷凝液滴落对不凝性气体层的扰动作用减弱。综合这两方面原因,水蒸气体积分数增大会使管束效应对大量不凝性气体存在时水蒸气冷凝传热性能的强化作用减弱。

4 结 论

本文建立了混合蒸气水平管束外对流冷凝传热实验系统,对紫铜亲水性光管、2D 肋管和 3D 肋管进行疏水和超疏水表面改性处理,当大量不凝性气体存在时对传热管表面的润湿特性与水平管束间冷凝液流型进行观测,并且实验研究了大量不凝性气体存在时不同润湿性光管管束、2D 肋管管束和 3D 肋管管束的对流冷凝传热特性及管束效应,获得以下主要结论。

(1)大量不凝性气体存在时不同润湿性管束间冷凝液的流型均为间断性滴状流,同时,亲水光管管束、亲水 2D 肋管管束与疏水 2D 肋管管束、亲水 3D 肋管管束与疏水 3D 肋管管束均表现为膜状冷凝,疏水光管管束与超疏水光管管束、超疏水 2D 肋管管束、超疏水 3D 肋管管束表现为典型的珠状冷凝。

(2)水蒸气体积分数对不同润湿性的冷凝式换热器的对流冷凝传热系数影响显著,而冷却水流速的作用不明显,随着混合蒸气流速与水蒸气体积分数的增大,对流冷凝传热系数逐渐增大,大量不凝性气体存在时,对于相同管型、不同润湿性的管束,超疏水的冷凝式换热器的对流冷凝传热特性最优。

(3)大量不凝性气体存在时,管排数增加,不同润湿性的光管管束、2D 肋管管束和 3D 肋管管束的对流冷凝传热系数均增加,管束效应对超疏水光管管束的强化作用最大;水蒸气体积分数增大,管束效应对冷凝传热性能的强化效果减弱,当水蒸气的体积分数约为 11%时,9 排超疏水光管管束的对流冷凝传热系数是单排的 1.53 倍,当水蒸气体积分数约为 23%时,9 排超疏水光管管束的对流冷凝传热系数是单排的 1.34 倍。

参考文献:

- [1] BRIGGS A, SABARATNAM S. Condensation of steam in the presence of air on a single tube and a tube bank [J]. *International Journal of Energy Research*, 2003, 27(4): 301-314.
- [2] LEE J, KIM T J, KIM M O O H. Experimental study on the heat and mass transfer of teflon-coated tubes for the latent heat recovery [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2005, 26(2): 28-37.
- [3] JENONG K, KESSEN M J, BILIRGEN H, et al. Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(11/12): 2361-2368.
- [4] SHI X J, CHE D F, AGNEW B, et al. An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(1/2/3): 606-615.
- [5] 马志先, 张吉礼, 孙德兴. HFC245fa 水平光管与强化管管束外冷凝换热 [J]. *化工学报*, 2010, 61(5): 1097-1105.
MA Zhixian, ZHANG Jili, SUN Dexing. Condensation heat transfer coefficient of HFC245fa on horizontal smooth and enhanced tube bundles [J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(5): 1097-1105.
- [6] MA Z X, ZHANG J L, SUN D X. New experimental method for inundation effect of film condensation on horizontal tube bundle [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2012, 55(10): 2856-2863.
- [7] 燕志鹏, 刘建, 张刚, 等. R22, R410A, R407C 和 R134a 在花瓣翅片管管束外的冷凝传热强化 [J]. *化工进展*, 2011, 30(S1): 655-659.
YAN Zhipeng, LIU Jian, ZHANG Gang, et al. Condensation heat transfer enhancement study of R22, R410A, R407C, and R134a on a bundle of petal-shaped finned tubes [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(S1): 655-659.
- [8] 程岫, 孙奉仲. 渗层不锈钢管束表面真空下换热特性的实验分析 [J]. *山东大学学报: 工学版*, 2014, 44(1): 90-94.
CHENG Shen, SUN Fengzhong. Experimental analysis of condensation heat transfer characteristics under vacuum condition of Nickel based implanted tube bundle [J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2014, 44(1): 90-94.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] GNIELINSKI V. New equations for heat mass transfer in turbulent pipe and channel flows [J]. *International Chemical Engineering*, 1976, 16(2): 359-368.
- [14] KLINE S J, MCCLINTOCK F A. Describing uncertainties in single-sample experiments [J]. *Mechanical Engineering*, 1953, 75: 3-8.
- [15] BEVINGTON P R, ROBINSON D K. Data reduction and error analysis for the physical sciences [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1969.
- [16] 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.
- [17] HU H W, TANG G H, NIU D. Experimental investigation of condensation heat transfer on hybrid wettability finned tube with large amount of noncondensable gas [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 85: 513-523.
- [18] 胡浩威, 牛东, 唐上朝, 等. 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 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 30-36.
HU Haowei, NIU Dong, TANG Shangchao, et al. Condensation heat transfer performance of heat transfer tubes with different wettabilities in presence of a large amount of noncondensable gas [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 30-36.

(编辑 荆树蓉)