

研究论文

水-酒精混合蒸气的管外凝结

李 杨¹, 严俊杰¹, 乔 磊¹, 刘继平¹, 胡申华²

(¹ 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

² 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要: 在不同蒸气压力, 相同蒸气流速条件下, 完成了不同酒精浓度的混合蒸气在不同管径的竖直管外凝结换热实验。凝结换热特性曲线显示了相似的特性: 随着酒精浓度的增加, 凝结传热系数显著下降; 随着表面过冷度的增加, 凝结传热系数显示出有峰值的非线性特点。在相同条件下, 半径为 5 mm 管外的凝结传热系数峰值出现在较大过冷度范围内, 且峰值高于在半径为 10 mm 管外的凝结传热系数峰值。当蒸气压力为 84.52 kPa, 流速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 酒精浓度为 1% 的混合蒸气在半径为 5 mm 竖直管外凝结传热系数最高达 $150 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 约为水蒸气的 8 倍。此外, 根据记录的凝结形态, 珠状凝结出现在很广的浓度以及过冷度范围内。

关键词: 珠状凝结; Marangoni; 水-酒精混合蒸气; 相变

中图分类号: O 359⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 12-2986-08

Condensation of water-ethanol mixture on vertical tubes

LI Yang¹, YAN Junjie¹, QIAO Lei¹, LIU Jiping¹, HU Shenhua²

(¹ School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

² School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, Xinjiang, China)

Abstract: The condensation heat transfer of the water-ethanol vapor mixture on vertical tubes with different radii was studied experimentally at the same vapor velocity and different vapor pressures. A wide range of ethanol concentration was used. The results indicated that the condensation heat transfer of water-ethanol vapor mixture on vertical tubes was extremely intensified in the low ethanol concentration range. The maximum heat transfer coefficient was $150 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ at $p=84.52 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $C=1\%$, on the tube with 5 mm radius, which was around 8 times of that of pure water vapor. With the increase of ethanol concentration, the condensation heat transfer coefficient decreased notably. Moreover, with the increase of vapor-to-surface temperature difference, the condensation curves of heat flux and heat transfer coefficient revealed nonlinear characteristics and had peak values. The nonlinear condensation characteristic curves were caused by the complex changes in condensation mode and the diffusion resistance inherent as vapor-side thermal resistance in the condensation of the binary vapor mixtures. The condensation heat transfer characteristics were also different when different tube radii were adopted. Under the same conditions, the maximum heat transfer coefficient of the vapor mixture on the vertical tube with 5 mm radius was at a higher degree of super-cooling of surface compared with that of the tube with 10 mm radius, and the value was higher than that of the tube with 10 mm radius. In addition, according to the condensation modes recorded, dropwise condensation occurred over a wide range of ethanol concentration

2007-04-09 收到初稿, 2007-08-02 收到修改稿。

联系人: 严俊杰。第一作者: 李杨 (1978—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50476048, 50521604)。

Received date: 2007-04-09.

Corresponding author: Prof. YAN Junjie. E-mail: yanjj@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50476048, 50521604).

and vapor-to-surface temperature difference.

Key words: dropwise condensation; Marangoni; water-ethanol vapor; phase change

引 言

双组分混合蒸气凝结所具有的强化换热特点在地热、工厂废热等中低温热源的能量利用及航空航天领域中具有广泛的应用。在石油、化工、食品和制冷工程等领域中各类新型相变换热器的出现以及各种高热负荷壁面冷却的需求，也促进了混合蒸气凝结换热的研究。

双组分混合蒸气凝结时，如果高沸点组分的表面张力大于低沸点组分的表面张力，这种气液相界面上的表面张力差，导致了相界面上出现了波纹和界面湍流，甚至类似珠状凝结的不均匀厚度和不规则状态的凝结液膜^[1]。Mirkovich 等^[2]于 1961 年首先拍摄到了相溶性双组分混合蒸气的非膜状凝结现象，凝结状态呈条纹状或珠状。Fujii 等^[3]进行了水-酒精混合物的水平管外凝结换热实验，提出了凝结的 5 种状态：珠状、条状、环状、平膜状、带起伏的膜状。酒精浓度为 0~20% 的混合蒸气的凝结传热系数比水蒸气的小。Hijikata 等^[4]完成了水-酒精混合蒸气在水平平板上的凝结特性研究，结果显示酒精蒸气浓度为 4%~60% 时，凝结液呈珠状，凝结传热系数小于等于水蒸气的传热系数。随后，Hijikata 等^[5]用非稳态方法分析了凝结机理，提出凝结传热系数与过冷度之间的非线性关系是由于凝结状态的改变以及二元混合蒸气凝结时的扩散热阻所引起的。Morrison 等^[6]完成了氨质量浓度在 0.1%~2.2% 范围内的氨-水混合蒸气在水平管外的凝结实验，结果显示混合蒸气的凝结传热系数总是低于水蒸气的凝结传热系数。当浓度为 0.71% 时，混合蒸气的凝结传热系数比水蒸气的凝结传热系数高 13%。Philpott 等^[7-8]对氨-水混合蒸气在管壳式冷凝器内的凝结过程进行了实验，结果显示凝结传热系数随着氨浓度的增加而降低。当氨质量浓度达 0.9% 时，凝结传热系数比水蒸气在同样条件下的 Nusselt 解高 34%。Utaka 等^[9-10]完成了酒精蒸气质量浓度为 17%~71% 的水-酒精混合蒸气在竖直平板凝结的实验研究，结果表明表面过冷度是确定凝结状态和溶质 Marangoni 凝结传热特性的主要因素。水-酒精混合蒸气的 Marangoni

凝结在相当大的表面过冷度范围内表现为珠状凝结。Utaka 等^[11]进行了大气压下，水-酒精混合蒸气在竖直平板上凝结实验，在较低酒精浓度下，凝结传热系数较水蒸气的增强了 2~8 倍，提出凝结传热特性曲线表现出含最大值的特性变化。何仰朋等^[12]研究了凝结表面局部温度不相同，凝结表面上混合蒸气 Marangoni 凝结规律。Kim 等^[13]通过实验研究了在水蒸气中加入不同的醇类的混合蒸气在一束水平管上的凝结，实验结果显示添加 1% 的 2-ethyl-1-hexanol，其传热系数比没有添加剂时的情况高 30%。Murase 等^[14]研究了在水平不锈钢管外的凝结换热特性，实验结果显示，通过加入很少量的酒精，凝结传热系数有显著的提高。

在低于大气压力下，竖直管外的混合蒸气 Marangoni 凝结的研究在强化新型动力循环中的凝汽器及低温工程中的冷凝器内的凝结换热有广泛前景，但相关的文献报道比较少见。本文在低于大气压的条件下，对水-酒精混合蒸气在不同管径的竖直管外凝结换热特性进行实验研究。讨论了低酒精浓度的水-酒精混合蒸气凝结传热系数增加的机理。为混合工质 Marangoni 凝结换热的理论研究及在工程中的应用提供可靠的实验数据和理论基础。

1 实验系统和方法

1.1 实验系统

Marangoni 凝结换热实验系统如图 1 所示，实验系统分为 3 个循环：混合蒸气循环系统，射流冷却水循环系统和抽真空循环系统。

混合蒸气循环系统是实验的主循环系统，由蒸气发生器、凝结室、辅助冷凝器、容积式流量计及相关的连接管路和阀门组成。水-酒精混合液在蒸发器中由电加热器加热蒸发，混合蒸气由管道由上至下导入至凝结室，一小部分混合蒸气在实验件表面凝结，剩余的大部分蒸气进入辅助冷却器完全凝结，凝结室与辅助冷却器中的凝液由辅助冷凝器下部的管路在重力作用下经过流量计返回至蒸气发生器完成循环。

蒸气发生器筒体内直径为 0.3 m、高为 0.5 m，

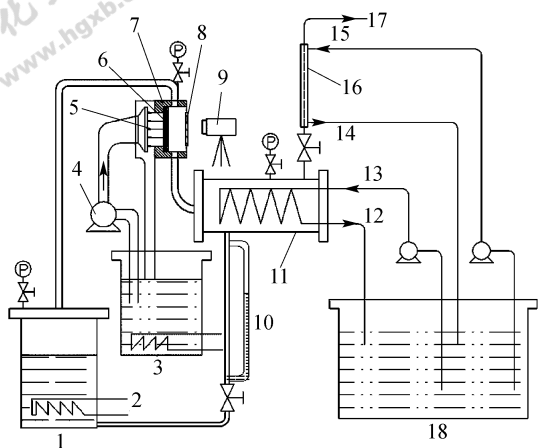


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

- 1—vapor generator; 2—heaters with regulator;
- 3—water tank; 4—hot water pump; 5—cooling water injected;
- 6—tube for test; 7—condensation chamber;
- 8—observation window; 9—CCD camera;
- 10—flow meter; 11—auxiliary condenser;
- 12—cooling water II out; 13—cooling water II in;
- 14—cooling water I out; 15—cooling water I in;
- 16—tube and shell cooler; 17—to vacuum pump;
- 18—constant temperature tank

在蒸气发生器筒体内装有最大功率为 8 kW 的加热棒，通过一个调节器调节加热棒的功率。凝结室用不锈钢加工而成，通流截面积为 0.013 m²，并安装观测窗以便记录凝结状态。实验件固定在环氧树脂板上，安装在凝结室内。辅助冷凝器内直径为 0.12 m、长为 0.4 m，内有 3 组螺旋管。

抽真空冷却循环：从辅助凝汽器的上方持续抽真空，以保证系统中的不凝结气体减少到最低水平，抽真空冷却装置使抽出的不凝结气体中所含的少量混合蒸气凝结返回到蒸气循环系统中循环。蒸气循环系统的漏气量小于 1.2 × 10⁻³ Pa · s⁻¹。

射流冷却水循环系统主要由低温恒温槽、冷却水蓄水箱、高温水泵、射流喷嘴等组成。首先用低温恒温槽将加入 20% 的氯化钙溶液降低至 -10℃，然后加入冷却水蓄水箱，用高温水泵将冷却水送入凝结箱体的后箱体，通过射流喷嘴，形成具有一定速度的喷射冷却水来冷却实验件，冷却水从后箱体下端的排水管排出回流至冷却水蓄水箱。

实验时，调节辅助凝汽器的冷却水 II 的流量以维持实验段的压力稳定，并持续抽真空。当凝结室压力稳定时，将热射流冷却水从接近 0℃ 缓慢加热至混合蒸气的饱和温度，使实验件的表面过冷度逐

渐降低。同时用数据采集系统记录实验数据。并用数字摄像机对实验过程中凝结形态的变化进行记录。

1.2 实验管结构

为了使蒸气凝结侧达到更大的表面过冷度，必须尽可能降低管壁的导热热阻及射流冷却面热阻。实验采用热导率较高的纯铜。对于冷却面处并没有采用传统的管内强制对流换热，而是采用了传热系数比管内强制对流换热高几倍至十几倍的射流冲击换热^[15-16]。因此，实验中采用竖直半圆管作为实验件，如图 2 所示，并在实验件内管壁一侧进行射流冲击换热。选取试件的壁厚为 6 mm 与 3 mm。在铜管加工成型后，用金相砂纸对试件表面进行打磨，再用丙酮溶液进行浸泡清洗，避免打磨抛光遗留的杂质对试件表面特性产生影响。

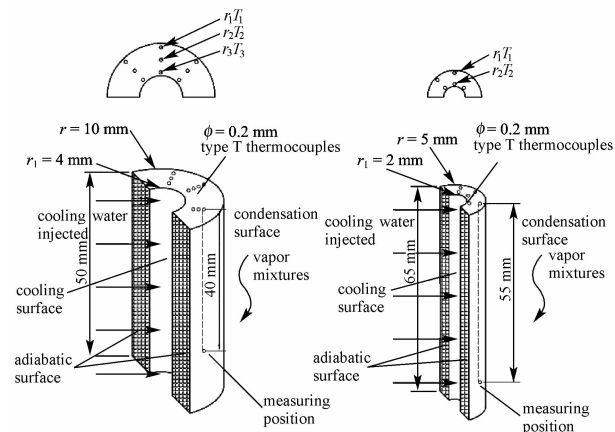


图 2 实验铜管的尺寸以及热电偶的位置分布

Fig. 2 Dimension of test tubes and positions of thermocouples

实验采用带绝缘漆的 T 型热电偶 OMEGA[®] 测量温度，热电偶直径 0.2 mm，精度为 0.1 K。在其中一个铜管的一端钻 9 个直径为 0.5 mm 的小孔，另外一个铜管的一端钻 6 个直径为 0.5 mm 的小孔，小孔的位置如图 2 所示。将热电偶固定于小孔内。以此测量得到管壁的温度分布，用外推的方法计算得出壁面温度，再计算出通过管壁的热通量。另外，用 3 根同样的热电偶安装在凝结室内用来测量蒸气的温度，可得到凝结传热系数。所有的热电偶在使用前都经过标定。

1.3 实验参数测量与采集

水-酒精混合蒸气的浓度指混合蒸气的质量浓度，由 UNIFAC 方法确定^[17]，在压力为 101.3

kPa 与 6.7 kPa 时, UNIFAC 方法与文献 [18] 吻合很好。蒸气压力是指在凝结室中的压力, 由安装在凝结室内压力变送器测量, 型号为 MIS[®] US686-002BA, 精度为 0.1%。混合蒸气的流速是指在凝结室中的蒸气流速, 由蒸气发生器的加热功率结合很少的蒸气循环系统的散热修正计算而得。同时, 用辅助冷凝器下方的流量计所测量凝结液的流量推算出混合蒸气的流速。这两种测量流速的方法相差小于 5%。所有热电偶与压力变送器的信号通过数据采集系统采集, 型号为 NI[®] PXI-6030E。凝结过程的形态由数字摄像机记录, 型号为 RED-LAKE[®] MotionScope2000。

1.4 不确定度分析

本文使用 Moffat^[19] 的方法对实验结果的不确定度进行了分析。总的来说, 在置信度为 95% 时, 凝结热通量 q 的最大相对不确定度为 17%, 凝结传热系数 h 的最大相对不确定度为 25%。影响不确定度的主要因素是测量管壁温度场的热电偶之间的距离以及热电偶本身的误差。由于随着过冷度的降低各物理量对于 q 与 h 的影响逐步增大, 因此本实验舍去了过冷度 0~2 K 的数据。

2 实验结果与讨论

在相同的蒸气流速 ($U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和不同压力 ($p=47.36 \text{ kPa}$ 、 84.52 kPa) 下, 进行了不同酒精浓度 ($C=0$ 、 0.5% 、 1.0% 、 2.0% 、 5.0% 、 20.0% 、 50.0%) 混合蒸气分别在不同管径 ($r=10 \text{ mm}$ 与 $r=5 \text{ mm}$) 竖直管外的凝结换热实验, 实验得到了各工况下凝结换热热通量和传热系数随表面过冷度变化的特性曲线。当酒精浓度 $C=0$ 时 (水蒸气凝结), 在上述的工况条件下, 在半径为 10 mm 和半径为 5 mm 的表面上都能得到稳定的膜状凝结, 水蒸气的凝结传热系数与 Nusselt 理论解具有相同的趋势并略高于 Nusselt 理论解。

2.1 不同管径下的凝结换热特性曲线

图 3 所示为蒸气压力 $p=84.52 \text{ kPa}$ 、蒸气流速 $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 工况下混合蒸气在半径为 10 mm 的竖直管外凝结特性曲线, 图中为不同酒精浓度的混合蒸气凝结热通量及凝结传热系数随过冷度的变化曲线。图 3 中的凝结换热的热通量显示了相似的特性。在低酒精浓度范围内 ($C=0.5\%$ 、 1.0% 、 2.0%), 凝结换热的热通量随着过冷度的增加而急

剧增加。随着酒精浓度的增大 ($C=5.0\%$ 、 10.0% 、 20.0%) 凝结换热的热通量随过冷度增加而增加的趋势逐渐减缓。酒精浓度很高时 ($C=50.0\%$), 凝结换热的热通量低于水蒸气凝结时的热通量。酒精浓度为 1.0% 时, 凝结换热的热通量随过冷度增长最为剧烈。

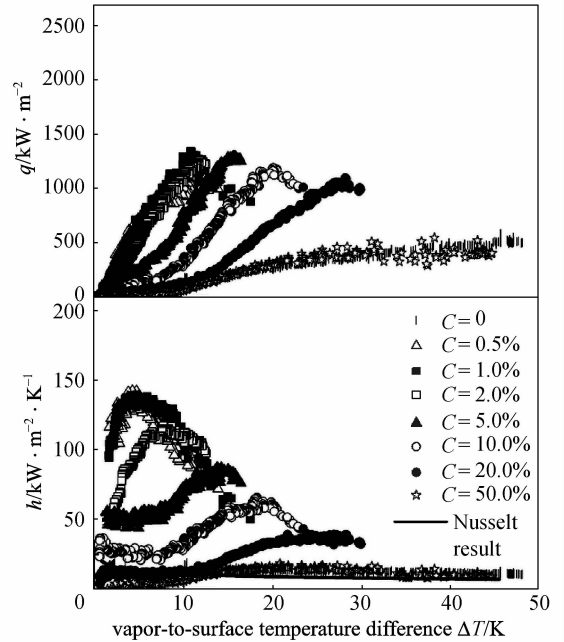


图 3 凝结换热特性曲线

($p=84.52 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=10 \text{ mm}$)

Fig. 3 Condensation heat transfer curves

($p=84.52 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=10 \text{ mm}$)

在低酒精浓度范围 ($C=0.5\%$ 、 1.0% 、 2.0%) 内, 凝结传热系数对表面过冷度的依赖性很强, 随着过冷度的升高, 凝结传热系数急剧增加, 并达到峰值, 随着过冷度的进一步增加, 凝结传热系数又急剧下降。在高酒精浓度范围 ($C=5.0\%$ 、 10.0% 、 20.0% 、 50.0%) 内, 凝结传热系数对表面过冷度的依赖性减弱, 在过冷度开始增加的一段范围内没有明显的变化, 只有当过冷度越过其陡增点所对应的过冷度时, 才开始缓慢增加, 达到峰值后, 随着过冷度的进一步增加, 又缓慢下降。随着酒精浓度的增大, 凝结传热系数也随之降低, 酒精浓度为 0.5% 时较 1.0% 时有所降低, 但依然高于其他浓度下的凝结传热系数。 $C=50.0\%$ 下的凝结传热系数低于水蒸气凝结传热系数。由图 3 可以看出, 混合蒸气凝结传热系数的最大值在酒精浓度为 1.0% 时, 约为纯水的 8 倍。

图 4 所示为蒸气压力 $p=84.52 \text{ kPa}$ 、蒸气流速 $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 工况下, 混合蒸气在半径为 5 mm 的管外凝结特性曲线。从图中可以看出, 凝结换热热通量与凝结传热系数与图 3 中的曲线有相似的特性。随着过冷度的增加, 凝结热通量与传热系数都呈现了有峰值的非线性变化。随着酒精浓度的增加, 二者都减小。

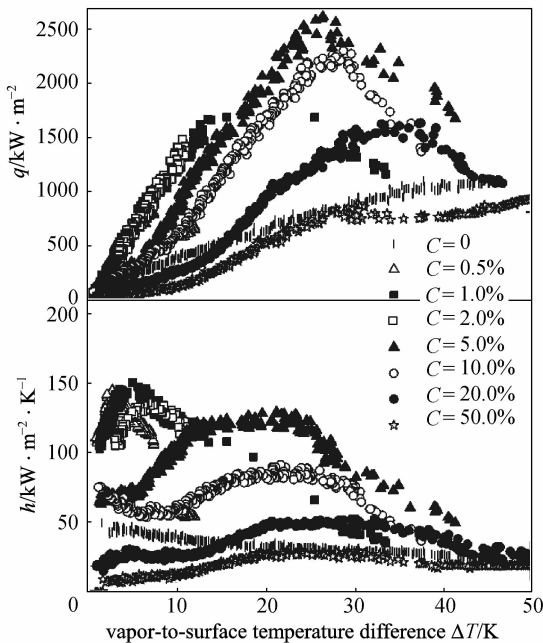


图 4 凝结换热特性曲线

($p=84.52 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=5 \text{ mm}$)

Fig. 4 Condensation heat transfer curves

($p=84.52 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=5 \text{ mm}$)

对比图 3 与图 4 可以看出, 在相同的蒸气浓度、流速及压力条件下, 半径为 5 mm 的管外凝结热通量近似为半径为 10 mm 的管外凝结热通量的 2 倍。这是由于管壁的热阻占从射流冷却水到混合蒸气的总体热阻的大部分, 半径为 5 mm 的圆管的管壁为 3 mm , 而半径为 10 mm 的圆管壁厚为 6 mm 。在低酒精浓度范围 ($C=0.5\%$ 、 1.0% 、 2.0%) 内, 不同管径的凝结传热系数基本相同, 半径为 5 mm 管外的凝结传热系数略高于半径为 10 mm 管外的凝结传热系数。在高酒精浓度范围 ($C=5.0\%$ 、 10.0% 、 20.0%) 内, 半径为 10 mm 管外的凝结传热系数比半径为 5 mm 管外的凝结传热系数低 $10\% \sim 20\%$ 。半径为 5 mm 管外的凝结传热系数峰值所对应的过冷度比半径为 10 mm 管外的凝结传热系数峰值所对应的过冷处于更高的过

冷度范围内。

在 $p=47.36 \text{ kPa}$ 、 $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 半径为 10 mm 与半径为 5 mm 管外的不同浓度下凝结换热特性随过冷度的变化分别如图 5 和图 6 所示, 得到与图 3、图 4 相似的规律。

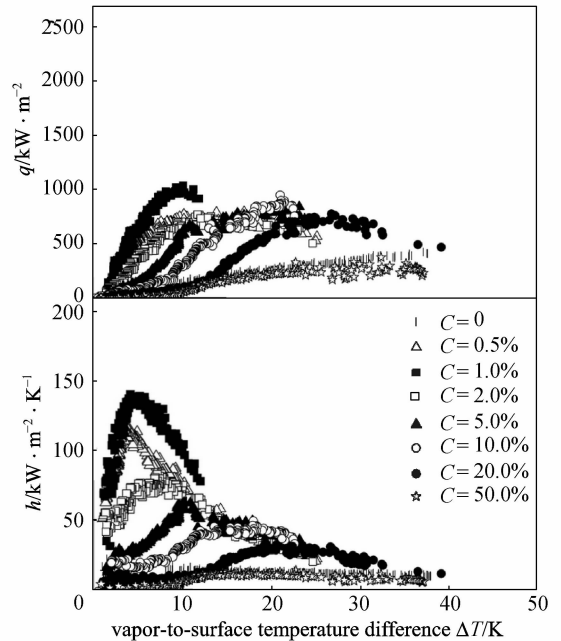


图 5 凝结换热特性曲线

($p=47.36 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=10 \text{ mm}$)

Fig. 5 Condensation heat transfer curves

($p=47.36 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=10 \text{ mm}$)

2.2 凝结传热系数特征

从上述各工况下的凝结换热特征曲线可以看出, 随着过冷度的变化, 所有的凝结传热系数都呈现了有峰值的非线性变化。如 2.1 所述, 凝结传热系数有 2 个特征点: (1) 凝结传热系数的陡增点 (在低酒精浓度范围内, 没有明显的陡增点, 凝结传热系数随着过冷度的增加而立即增加); (2) 凝结传热系数的峰值。

图 7 所示为凝结传热系数的陡增点与水-酒精混合蒸气的汽液相平衡图中露点与泡点线之差的比较。可以看出, 在不同管径下, 凝结传热系数的陡增点所对应的过冷度都近似与露点与泡点线之差一致。随着酒精浓度的增加, 凝结传热系数的陡增点所对应的过冷度也随之增加, 但当酒精浓度进一步增加时, 凝结传热系数的陡增点所对应的过冷度有下降的趋势。在低酒精浓度范围内, 由于露点线与泡点线之差非常小, 以及在小过冷度区域内凝结传

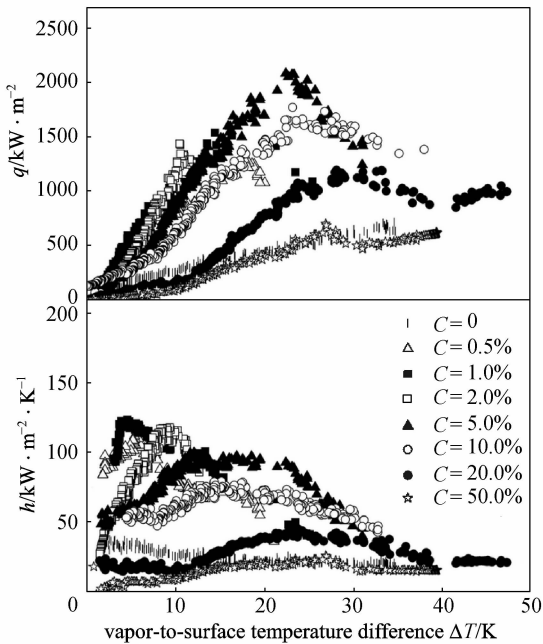


图 6 凝结换热特性曲线

($p=47.36 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=5 \text{ mm}$)

Fig. 6 Condensation heat transfer curves

($p=47.36 \text{ kPa}$, $U=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $r=5 \text{ mm}$)

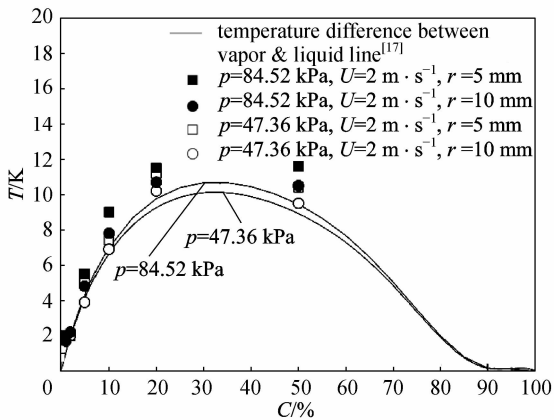


图 7 凝结换热的陡增点

Fig. 7 Steep increasing point of heat transfer coefficient

热系数的不确定度很大，所以凝结传热系数没有明显的陡增点。

图 8 所示为凝结传热系数的峰值及其所对应的过冷度与酒精浓度的关系，凝结传热系数的峰值随着酒精浓度的增大而减小，但在酒精浓度为 1.0% 时的凝结传热系数峰值比酒精浓度为 0.5% 时的凝结传热系数峰值大。凝结传热系数的峰值所对应的过冷度随着酒精浓度的增加而增加，但当酒精浓度进一步增加很高时，峰值所对应的过冷度增加量减缓甚至减小。当酒精浓度为 50.0% 时峰值所对应

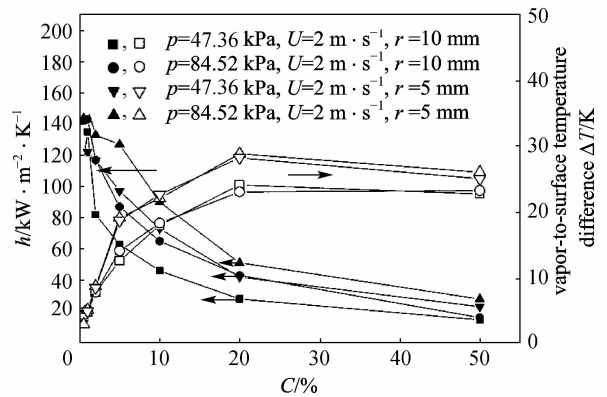


图 8 凝结换热的峰值及其所对应的过冷度

Fig. 8 Characteristics of maximum values of heat transfer coefficient

的过冷度与酒精浓度为 20.0% 时峰值所对应的过冷度大致相等。此外，随着酒精浓度的增加，在半径为 5 mm 的管外凝结传热系数的峰值与相同条件下在半径为 10 mm 管外的凝结传热系数的峰值之差增大。在半径为 10 mm 管外的凝结传热系数的峰值所对应的过冷度小于在半径为 5 mm 管外的凝结传热系数峰值所对应的过冷度。

2.3 凝结形态的转变

随着凝结传热系数的非线性变化，凝结形态的转变也是复杂的。实验中观测到 4 种凝结状态：膜状凝结 (FWC, filmwise condensation)、溪流状凝结 (RC, rivulets condensation)、珠状凝结 (DWC, filmwise condensation)、大块液珠凝结 (BC, big drop condensation)。这些凝结状态在不同浓度混合蒸气凝结时，全部或者部分出现。并且在一些凝结过程中，有 2~3 种凝结状态混合出现。

以蒸气浓度为 1%，蒸气压力为 84.52 kPa，蒸气流速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，在 10 mm 管外凝结过程为例，凝结状态随过冷度的增加经历了由膜状到溪流状的珠状凝结，再到珠状凝结，再变为大块液珠凝结，最后变为带液珠的膜状凝结，如图 9 所示。

对比凝结形态及其相对应的凝结传热系数可以看出，膜状凝结对应较低的凝结传热系数，珠状凝结则对应较高的凝结传热系数。在不同管径下，凝结过程的凝结形态也有类似的变化。

2.4 凝结过程的热阻分析

本文将凝结过程中蒸气侧的热阻分为两部分：由凝结状态所决定的凝结液热阻 R_c ；由蒸气扩散层的浓度所决定的蒸气扩散层热阻 R_w ；蒸气侧的

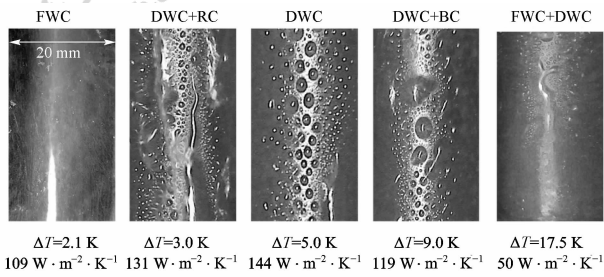


图 9 凝结形态随过冷度的变化

Fig. 9 Transition of condensation modes ($C=1.0\%$, $p=84.52\text{ kPa}$, $U=2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $r=10\text{ mm}$)

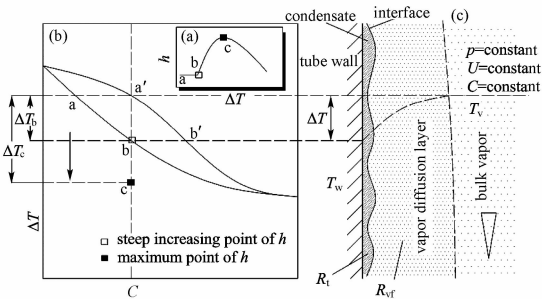


图 10 双组分混合蒸气凝结热阻分析

Fig. 10 Elementary analysis of vapor mixtures condensation on vertical tube

总热阻 $R_t = R_{vf} + R_c$ 。图 10 (a) 为凝结传热系数的示意图, 图 10 (b) 为凝结换热的特征点与汽液相平衡的关系, 图 10 (c) 为混合蒸气管外凝结物理模型示意图。

当过冷度由 ΔT_a 增加到 ΔT_b 时 [图 10 (a)], 凝结液的浓度由 $C_{l,a}$ 增加到 $C_{l,b}$ [图 10 (b)]。由于液相的酒精浓度增加, 通过气液相界面的酒精通量增加, 这就增加了气液相界面随机的浓度差, 从而引起凝结液表面张力差增大, 增大了 Marangoni 效应, 同时凝结状态也由膜状凝结转变为珠状凝结, 凝结液热阻减小。而蒸气扩散层的浓度由 $C_{l,a'}$ 增加到 $C_{l,b'}$ 从而增大了蒸气扩散层的热阻。过冷度由 ΔT_a 增加到 ΔT_b 时, 凝结传热系数没有变化是因为凝结液热阻减小的同时而蒸气扩散层热阻增大。当过冷度由 ΔT_b 增加到 ΔT_c 时, 由于凝结液的浓度没有变化, 所以 Marangoni 效应对凝结液的影响没有变化, 凝结形态仍为珠状凝结。但由于过冷度较大, 混合蒸气完全凝结, 蒸气扩散层消失, 所以凝结传热系数显著增加。当过冷度大于 ΔT_c 时, 由于凝结速率很大, 液滴的并聚现象加剧, 凝结形态变为大块液珠凝结甚至膜状凝结, 增大了凝结液热阻, 凝结传热系数减小。此外, 随着酒精浓度的增

加, 蒸气扩散层的浓度增加, 增大了扩散热阻, 凝结传热系数减小。

3 结 论

(1) 水-酒精混合蒸气在不同管径的管外凝结时, 凝结曲线有相似的特性。随着过冷度的增加, 凝结换热热通量与凝结传热系数都显示了有峰值的非线性变化。随着酒精浓度的减小, 凝结传热系数显著增加, 同时凝结传热系数峰值所对应的过冷度向较小的过冷度范围移动, 凝结传热系数的陡增点所对应的过冷度也向较小的过冷度范围移动。酒精浓度为 1.0% 时, 蒸气压力为 84.52 kPa , 蒸气流速为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在半径为 5 mm 管外凝结传热系数的峰值达到了 $150\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 是相同流速及压力条件下水蒸气凝结传热系数的 8 倍。

(2) 与相同的蒸气浓度、流速及压力条件下半径为 10 mm 的管外凝结换热系数的峰值所对应的过冷度相比, 半径为 5 mm 管外凝结传热系数峰值所对应的过冷度出现在较大范围内, 且凝结传热系数的峰值高于相同条件下半径为 10 mm 管外凝结传热系数峰值。而管径的变化对凝结传热系数的陡增点所对应的过冷度没有影响。

(3) 在不同实验条件及不同管径下, 凝结过程中的凝结形态有相似的转变过程。混合蒸气凝结传热系数曲线的非线性变化与其凝结形态的变化有直接的关系。珠状凝结对应较高的凝结传热系数, 膜状凝结对应较低的凝结传热系数。

符 号 说 明

- C ——水-酒精混合蒸气的浓度, %
- h ——凝结传热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- p ——混合蒸气的压力, kPa
- q ——凝结热通量, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
- R ——热阻, $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
- r ——实验圆管外径, mm
- T ——温度, K
- ΔT ——过冷度, K
- U ——混合蒸气的流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

下角标

- a, b, c ——凝结传热系数的特征点
- l ——凝结液
- t ——总体
- v ——混合蒸气
- vf ——蒸气扩散层

References

- [1] Scriven L E, Sternling C V. The Marangoni effects. *Nature*, 1960, **187**: 186-188
- [2] Mirkovich V V, Missen R W. Non-filmwise condensation of binary vapors of miscible liquids. *Canadian J. Chem. Eng.*, 1961, **39**: 86-87
- [3] Fujii T, Koyama S, Shimizu Y. Gravity controlled condensation of an ethanol and water mixture on a horizontal tube. *Trans. JSME, Series B*, 1989, **55** (509): 210-217
- [4] Hijikata K, Fukasaku Y, Nakabeppu O. Condensation characteristics of a water-ethanol binary vapor mixture// Proc. 29th Japan Heat Transfer Symp., 1992
- [5] Hijikata K, Fukasaku Y, Nakabeppu O. Theoretical and experimental studies on the pseudo-dropwise condensation of a binary vapor mixture. *ASME, J. Heat Transfer*, 1996, **118**: 140-147
- [6] Morrison J N A, Deans J. Augmentation of steam condensation heat transfer by addition of ammonia. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, **40**: 765-772
- [7] Philpott C, Deans J. The condensation of ammonia-water mixtures in a horizontal shell and tube condenser. *ASME, J. Heat Transfer*, 2004, **126**: 527-534
- [8] Philpott C, Deans J. The enhancement of steam condensation heat transfer in a horizontal shell and tube condenser by addition of ammonia. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, **47**: 3683-3693
- [9] Utaka Y, Terachi N. Study on condensation heat transfer for steam-ethanol vapor mixture (relation between condensation characteristic curve and modes of condensate). *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. (Series B)*, 1995, **61**: 3059-3065
- [10] Utaka Y, Terachi N. Measurement of condensation characteristic curves for binary mixture of steam and ethanol vapor. *Heat Transfer Jpn. Res.*, 1996, **24**: 57-67
- [11] Utaka Y, Shixue W. Characteristic curves and the promotion effect of ethanol addition on steam condensation heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, **47**: 4507-4516
- [12] He Yangpeng (何仰朋), Yan Junjie (严俊杰). The characteristic of the water-ethanol binary vapor condensation. *J. Engineering Thermophysics (工程热物理学报)*, 2004, **25**: 77-80
- [13] Kim K J, Lefsaer A M, Razani A. The effective use of heat additives for steam condensation. *Applied Thermal Engineering*, 2001, **21**: 1863-1874
- [14] Murase T, Wang H S, Rose J W. Marangoni condensation of steam-ethanol mixtures on a horizontal tube//The Seventeenth International Symposium on Transport Phenomena. Toyama, Japan, 2006: 1-6
- [15] Yang Shiming (杨世铭), Tao Wenquan (陶文铨). *Heat Transfer (传热学)*. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998: 205-215
- [16] Xu Jinglei (徐惊雷), Xu Zhong (徐忠), Xiao Min (肖敏). General introduction to jet impingement. *Mechanics and Practice (力学与实践)*, 1999, **21**: 8-16
- [17] Fredenlund A, Jones R L, Prausnitz J M. Group contribution estimation of activity coefficients in nonideal liquid mixtures. *AIChE J.*, 1975, **27**: 1086-1099
- [18] Gmehling J. Vapor-liquid Equilibrium Data Collection; Organic Hydroxy Compounds; Alcohol and Phenols. Frankfurt: DECHEMA Deutsche Gesellschaft fur Chemisches Apparatewesen, 1978: 356-368
- [19] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, **1**: 3-17