

水-酒精混合蒸气在竖直接管外凝结特性的研究

严俊杰¹, 李杨¹, 乔磊¹, 胡申华², 刘继平¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 新疆大学电气工程学院, 830008, 乌鲁木齐)

摘要: 在低于大气压下,通过实验研究了水蒸气和不同酒精含量的水-酒精混合蒸气在竖直铜管外的凝结换热特性,同时记录了凝结状态. 实验结果显示:在不同的酒精含量下,随着过冷度的变化,凝结换热系数均呈现出具有峰值的非线性变化特征;随着酒精含量的减少,凝结换热系数显著增大;当酒精的质量分数为1%时,凝结换热系数的峰值是相同条件下水蒸气凝结换热系数的9倍;当酒精的质量分数为50%时,凝结换热系数与相同条件下的水蒸气凝结换热系数相当. 分析表明,凝结换热系数的非线性特征是由于凝结液热阻以及扩散热阻的复杂变化所引起的.

关键词: 凝结; 换热; 水-酒精蒸气

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1342-06

Condensation Characteristic of Ethanol-Water Mixtures on External Wall of Vertical Tube

Yan Junjie¹, Li Yang¹, Qiao Lei¹, Hu Shenhua², Liu Jiping¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: The condensation heat transfer of the vapor mixture on a vertical tube was studied experimentally under a wide range of ethanol concentrations. Moreover, the condensation modes were observed. The results indicate that, with the change of the vapor-to-surface temperature difference, the heat flux and the heat transfer coefficients revealed nonlinear characteristics with the peak values for all ethanol concentrations. The heat transfer coefficients were significantly intensified in the low ethanol concentration range. The maximum heat transfer coefficient was $165 \text{ kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ at $p=47.36 \text{ kPa}$, $u=6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $w_v=1\%$, which was around 9 times as large as that of the steam. This augmentation was caused by the Marangoni effect which yielded dropwise condensation and a corresponding decrease in the thermal resistance of the condensate. At the low ethanol concentration, the thermal resistance of the mass diffusion layer between the bulk vapor and the surface of the condensate was small. With the increase of ethanol concentration, the condensation heat transfer coefficient decreased obviously. When the ethanol concentration reached 50%, heat transfer coefficients were lower than those of steam.

Keywords: condensation; heat transfer; ethanol-water vapor

符 号 表

w_v	混合蒸气中酒精的质量分数, %	p	蒸气压力, kPa	ΔT	表面过冷度, K
		R	热阻, $\text{m}^2 \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	r	半径, m
q	热流密度, $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	T	温度, K	u	蒸气流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

h	换热系数, $\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	l	凝结液	v	混合蒸气
x	酒精的摩尔分数, %	t	总体	vf	靠近界面的蒸气扩散层
下标		w	管壁	$\max$	凝结曲线的最大值
a, b, c	凝结换热系数特征点				

当双组分非共沸混合蒸气凝结时,在气液相界面上由于浓度的差异而引起的表面张力梯度所导致的界面运动可被界面区域流体的牵引作用所放大,导致了在可浸润的凝结面上,凝结液表面出现湍流,甚至类似珠状凝结的凝结形态,称为 Marangoni 效应^[1]. 文献[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,凝结状态成条纹状或珠状. 文献[3]研究了水-酒精混合物的水平管外凝结换热实验,提出了 5 种凝结状态:珠状、条状、环状、平膜状、带起伏的膜状. 当酒精的质量分数为 0~20% 时,凝结换热系数比纯水蒸气的小. 文献[4]对水-酒精混合蒸气在水平平板上的凝结进行了研究,指出当酒精的质量分数为 4%~60% 时,凝结液呈珠状,凝结换热系数不大于水蒸气的凝结换热系数,并用非稳态方法分析了凝结机理,提出凝结换热系数与过冷度之间的关系具有非线性特点,认为这是由于凝结状态的改变以及双组分混合蒸气凝结时的扩散热阻变化所引起的. 文献[5]完成了酒精质量分数为 17%~71% 的水-酒精混合蒸气在竖直平板上的实验,结果显示水-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. 文献[6]完成了水-酒精混合蒸气在竖直平板上的凝结实验,结果显示:在较低酒精含量下,凝结换热系数比水蒸气的增加了 2~8 倍;凝结换热特性曲线具有最大值的非线性变化特点;传热特性由凝结状态以及气相扩散边界层的变化决定. 文献[7]研究了凝结表面具有局部温度梯度时混合蒸气的 Marangoni 凝结规律.

在低于大气压下,竖直面外的混合蒸气 Marangoni 凝结在工程上的应用有广阔前景,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-酒精混合蒸气在竖直面外的凝结换热特性进行实验研究,通过不同酒精含量的水-酒精混合蒸气凝结现象的观测,分析了酒精含量对水-酒精混合蒸气的凝结特性的影响以及凝结换热曲线的特征,讨论了低酒精含量的水-酒精混合蒸气凝结换热系数增大的机理,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.

1 实验系统与方法

实验所采用的 Marangoni 凝结换热实验系统如图 1 所示,包括混合蒸气循环、射流冷却水循环和抽真空冷却循环.

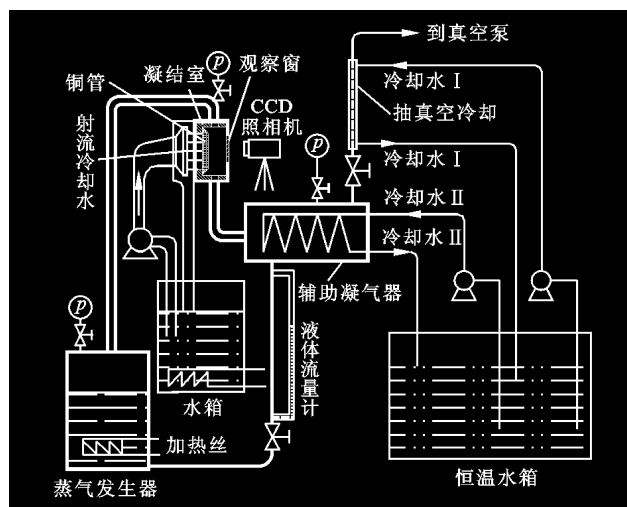


图 1 Marangoni 凝结换热实验系统

混合蒸气循环:蒸气发生器产生水-酒精混合饱和蒸气,由上到下垂直导入凝结室. 在凝结室中,少量的混合蒸气在实验件表面凝结,剩余部分在辅助凝气器内凝结. 凝结室及辅助凝气器的凝结液在重力的作用下返回到蒸气发生器中再循环. 凝结液在返回到蒸气发生器之前,用液体流量计测量凝结液的流速. **抽真空冷却循环:**从辅助凝气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回到蒸气系统中循环. 实验时,调节辅助凝气器的冷却水流量以维持实验段的压力稳定. 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. 用 CCD 摄像机透过实验段的观测窗口记录凝结现象的变化.

实验件选取导热系数为 $398 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 的纯铜为材质,如图 2 所示. 采用半圆管是考虑冷却水在管内的强制对流换热系数要远比冷却水射流到铜管内侧的换热系数低,冷却水射流冲击换热可以获

得较大的热流密度与表面过冷度. 实验铜管尺寸如图2所示, 在试验件的一端钻9个直径为0.5 mm的小孔, 孔的位置如图2所示, 每个小孔布置一对热电偶, 由此测量管壁内的温度梯度. 同时由3个热电偶测量蒸气温度. 通过获得铜管壁内的温度分布以及混合蒸气温度, 即可计算出铜管凝结面的表面温度、热流密度、凝结换热系数. 温度测量均采用直径为0.2 mm的T型热电偶. 所有热电偶在使用前都经过标定.

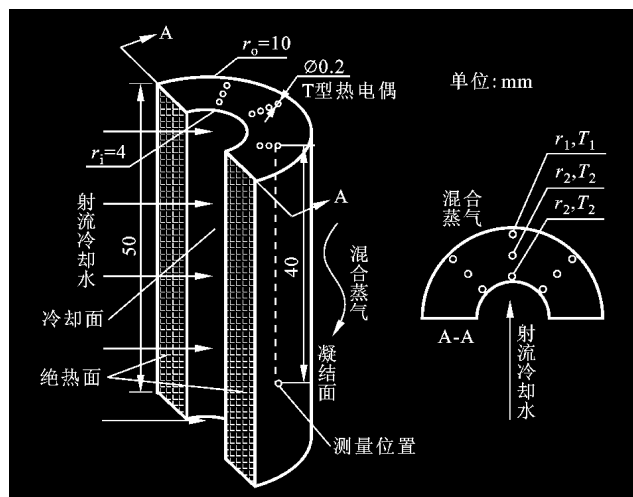


图2 实验件结构图

2 实验结果

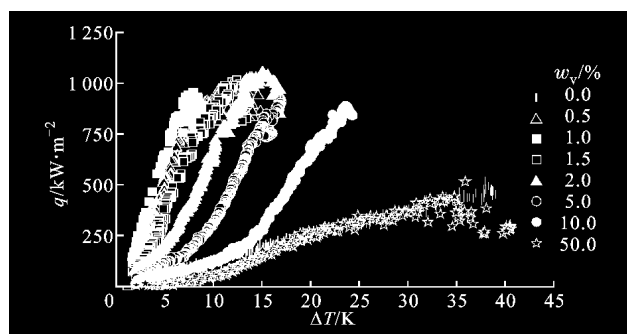
在蒸气压力为 47.36 kPa(绝对压力)、蒸气流速为 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下, 完成了酒精质量分数 w_v 分别为 0、0.5%、1%、2%、5%、10%、20%、50% 的混合蒸气在竖直接管外的凝结换热实验.

2.1 凝结换热曲线

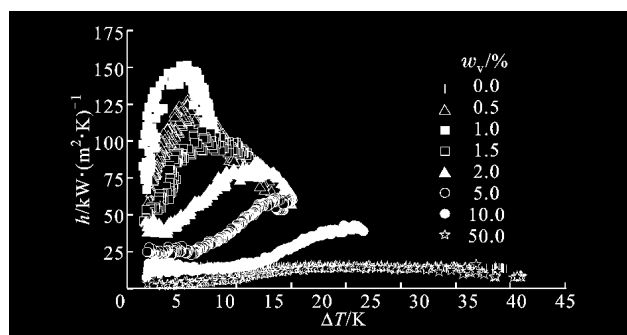
如图3、图4所示, 在不同的蒸气流速下, 凝结换热热流密度显示了相似的规律. 在低酒精含量范围内($w_v=0.5\%$, 1% , 2%), 凝结换热的热流密度随着过冷度的增加而急剧增加. 随着酒精含量的增大($w_v=5\%$, 10% , 20%), 凝结换热的热流密度随过冷度的增加而增加的趋势逐渐减缓, 当酒精含量很高时($w_v=50\%$), 凝结换热的热流密度低于水蒸气凝结时的热流密度. 当 w_v 为 1% 时, 凝结换热的热流密度随过冷度增大最为剧烈.

从图3、图4还可看出, 凝结换热系数同样显示了相似的规律: 凝结换热系数在不同的酒精含量下都呈现出了具有峰值的非线性变化特征; 在低酒精含量范围内, 凝结换热系数对表面过冷度的依赖性强, 随着过冷度的增加而急剧增加, 达到峰值后又急

剧减小; 随着酒精含量的增加, 凝结换热系数对表面过冷度的依赖性减弱, 随着过冷度的增加凝结换热系数由基本不变到陡然增高, 达到峰值后又逐步减小; 当 $w_v=1\%$ 时, 凝结换热系数的峰值最大; 当 $w_v=50\%$ 时, 凝结换热系数的峰值与水蒸气凝结换

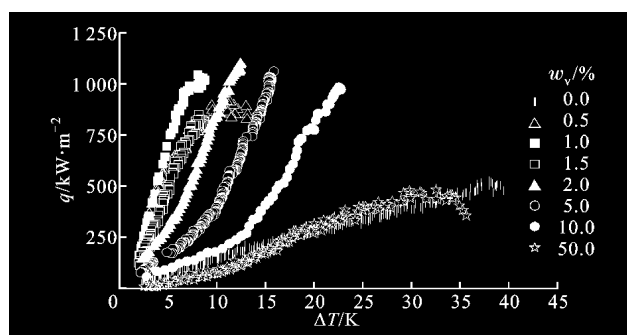


(a) 热流密度

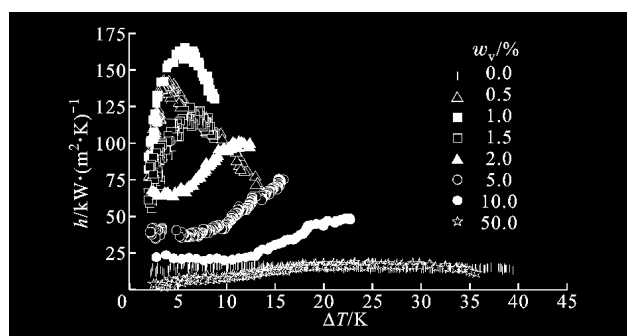


(b) 换热系数

图3 $u=4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时水-酒精混合蒸气的凝结换热曲线



(a) 热流密度



(b) 换热系数

图4 $u=6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时水-酒精混合蒸气的凝结换热曲线

热系数近似相等. 另外, 图 3 与图 4 还表明, 凝结换热系数随着蒸气流速的增加而增加. 这是由于流速的增加使得凝结液的表面黏性应力增加, 而且蒸气流动的方向与凝结液下落的方向一致, 因此加快了液珠的刷新与脱落. 此外, 流速的增加使蒸气扩散层减薄, 减小了扩散热阻. 在 w_v 为 1%、蒸气流速为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 凝结换热系数的峰值达到 $176 \text{ kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$.

凝结换热系数在低酒精含量范围内没有明显的陡增点, 随着过冷度开始增加, 凝结换热系数立即增加, 而在高酒精含量范围内, 凝结换热系数的陡增点则很明显, 随着过冷度开始增加, 凝结换热系数基本上没有变化, 只有当过冷度大于凝结换热系数的陡增点所对应的过冷度时, 凝结换热系数才开始增加. 凝结换热系数的陡增点所对应的过冷度随着酒精含量的增加向过冷度较大区域内移动. 此外, 凝结换热系数峰值随酒精含量的增大而减小. 凝结换热系数峰值所对应的过冷度随酒精浓度的增大同样向过冷度较大区域内移动.

2.2 凝结状态的变化

随着过冷度的增加, 水-酒精混合蒸气的凝结状态也随之变化, 本文观测到文献[6]中所述的 5 种状态: 膜状、条纹状、带条纹状的珠状、珠状、振荡的液膜.

图 5 为通过 CCD 摄像机观测到的水-酒精混合蒸气凝结状态的图像, 此时凝结状态随着表面过冷度的增大有如下的变化: 膜状→条状→带条状的珠状→珠状→大块的液珠. 带条状的珠状和珠状凝结维持在较广的过冷度范围内 ($\Delta T = 2.2 \sim 7.1 \text{ K}$). 膜状和条状凝结出现在过冷度很小时 ($\Delta T < 2.5 \text{ K}$). 当过冷度大于 7 K 时, 凝结液珠变为较大的液珠或大块的凝结液. 对照图 3 中 $w_v = 1\%$ 时的凝结换热系数曲线, 当凝结状态为珠状凝结时, 凝结换热系数较高, 当凝结状态为条状凝结或大块液珠时, 凝结换热系数则较低, 膜状凝结的凝结换热系数最低.

2.3 混合蒸气凝结过程分析

从图 6 中可以看出, 当过冷度与露点线和泡点线之差相等时, 凝结换热系数出现陡增. 在低酒精含量范围内, 由于露点线与泡点线之差比较小, 所以凝结换热系数的陡增点所对应的过冷度比较小, 再由于凝结换热系数的不确定度在较小的过冷度 ($\Delta T < 2.0 \text{ K}$) 时较大, 故凝结换热系数没有明显的陡增点. 在高酒精含量范围内, 凝结换热系数的陡增点所对应的过冷度和露点线与泡点线之差相一致, 随着

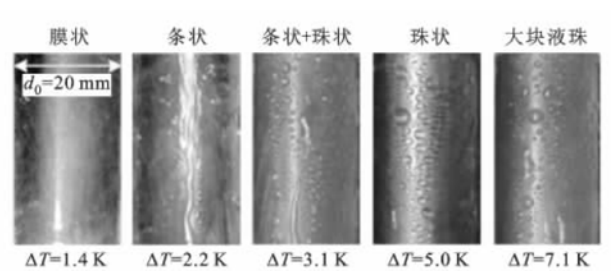


图 5 酒精含量 1%、蒸气流速为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 凝结状态随过冷度的变化

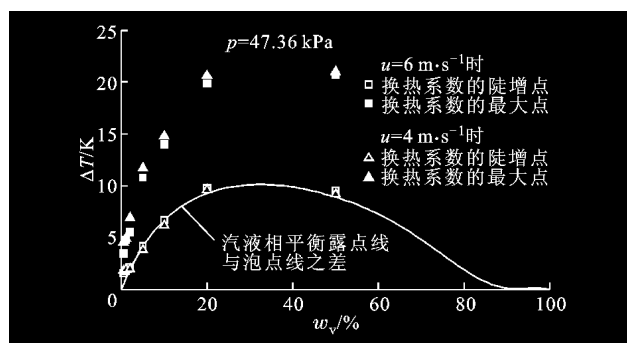


图 6 凝结换热系数的峰值点与陡增点

酒精含量的增加, 凝结换热系数的陡增点所对应的过冷度也增加, 但当 $w_v = 50\%$ 时, 凝结换热系数的陡增点所对应的过冷度又减小.

凝结换热系数的峰值随着酒精含量的增加而减小 (见图 7), 但当 $w_v = 0.5\%$ 时, 凝结换热系数的峰值小于 $w_v = 1\%$ 时的峰值. 凝结换热系数的峰值所对应的过冷度随着酒精含量的增加而增加, 但当酒精含量进一步增加到很高时, 峰值所对应的过冷度增加量减缓甚至减小. 如图 7 所示, 当 $w_v = 50\%$ 时, 峰值所对应的过冷度与 $w_v = 20\%$ 时峰值所对应的过冷度大致相等.

水-酒精混合蒸气的凝结换热特性曲线呈现了非线性的特点, 这是由于蒸气侧的热阻复杂变化所决定的. 蒸气侧的热阻可以分为凝结液热阻以及靠近气液分界面的扩散层所引起的扩散热阻. 凝结液

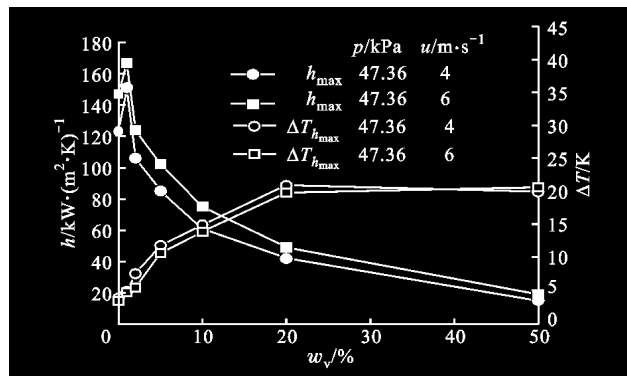
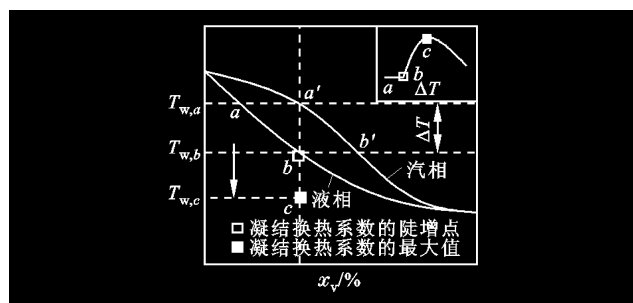


图 7 凝结换热系数的峰值与其所对应的过冷度

热阻是由凝结液形态所决定的.随着过冷度的增大,凝结液由膜状凝结经带条纹的珠状凝结等过渡状态变为珠状凝结.其原因为当传质发生时,气液相界面上局部含量的随机变化引起表面张力的随机变化,从而引起界面的湍流、变形.因此,界面湍流的程度一部分可能与酒精穿过气液相界面的通量有关,穿过界面的酒精通量越多,界面湍流的程度越高.此外,溶质的扩散也会引起界面湍流,这与凝结液主体的流动无关,界面湍流导致传质速率加快.扩散热阻是由于2种组分的沸点不同,低沸点的易挥发组分容易保持气态,较难凝结,在气液界面上逐渐浓缩,使界面附近的酒精含量增加,形成一个阻碍高沸点组分的蒸气向冷凝面移动的扩散层.主流蒸气必须通过酒精含量较高的扩散层扩散,才能到达凝结液表面.本文从蒸气侧热阻的变化,简要地分析水-酒精混合蒸气凝结换热曲线的特性.

图8为水-酒精蒸气凝结气侧热阻分析图.蒸气侧的总热阻 R_t 由凝结液热阻 R_l 与蒸气扩散层热阻 R_{vf} 组成.



I: 为凝结换热曲线的示意图; II: 凝结换热曲线的特征点(陡增点与峰值)所对应的过冷度与气液相平衡图的比较

图8 水-酒精蒸气凝结气侧热阻分析

对于任意定值的酒精摩尔分数 x_v 的混合蒸汽凝结,随着过冷度增加,蒸气侧热阻有如下变化:①当壁面温度 $T_{w,a}$ 略低于主蒸气温度 T_v 时,凝结液中酒精的摩尔分数可由图8中 a 点对应的摩尔分数得出,这时凝结液中的酒精含量很少,所以 Marangoni 效应很小,凝结液膜尚未被扰动或者扰动很小(膜状或者条纹状凝结),故 $R_{l,a}$ 较大.蒸气扩散层尚未形成, $R_{vf,a}=0$;②当壁面温度为 $T_{w,b}$ 时,凝结液中酒精的摩尔分数可由图8中 b 点对应的摩尔分数得出,这时凝结液中的酒精摩尔分数达到该蒸气摩尔分数下所能达到的最大液相摩尔分数,Marangoni 效应达到最大,凝结液膜被剧烈扰动(珠状凝结),故 $R_{l,b}$ 较小.蒸气扩散层的摩尔分数也达到最大($x_{vf,b}=x_b$), $R_{vf,b}$ 达到最大值.因此,当过冷度从

ΔT_a 到 ΔT_b 时,凝结换热系数基本不变是由于在 R_l 减小的同时 R_{vf} 增大;③当壁面温度为 $T_{w,c}$ 时,凝结液中酒精的摩尔分数可由图8中 c 点对应的摩尔分数得出,Marangoni 效应所产生的扰动效果不变(也为珠状凝结), $R_{l,c}=R_{l,b}$.由于过冷度很高,混合蒸气完全被凝结,所以蒸气扩散层消失, $R_{vf,c}=0$.如图8中的小图所示,从 ΔT_b 到 ΔT_c 凝结换热系数显著增加;④当壁面温度进一步降低时,过冷度进一步增大,凝结液量进一步增大,液滴的并聚效果显著增加,从而形成较大的液珠,甚至大块的凝结液, R_l 增大,凝结换热系数随之减小.

3 结 论

(1)在相同压力($p=47.36$ kPa)和不同流速($u=4,6$ m·s⁻¹)下,凝结换热的热流密度和凝结换热系数显示了相似的规律:随着过冷度的增大,凝结换热系数均呈现了具有峰值的非线性变化特征.这是由蒸气侧的凝结液热阻与蒸气扩散层热阻复杂变化所决定的.

(2)随着酒精含量的增加,凝结换热系数逐步减小,凝结换热系数对过冷度的依赖程度也逐渐减小.凝结换热系数的最大值在酒精的质量分数为1%、压力为47.36 kPa、流速为6 m·s⁻¹时出现,最大换热系数为165 kW·(m²·K)⁻¹.通过对混合蒸气和水蒸气的凝结换热系数进行比较,表明通过加入少量酒精可显著增强换热效果,混合蒸气的凝结换热系数最高为水蒸气凝结换热系数的9倍.

(3)当凝结状态为珠状凝结时,凝结换热系数较高.当凝结状态为条状凝结或大块液珠时,凝结换热系数则较低,膜状凝结的凝结换热系数最低.

参考文献:

- [1] Scriven L E, Sternling C V. The Marangoni effects [J]. Nature, 1960, 187:186-188.
- [2] Mirkovich V V, Missen R W. Non-filmwise condensation of binary vapors of miscible liquids [J]. Canadian J Chem Eng, 1961, 39:86-87.
- [3] Fujii T, Osa N, Koyama S. Free convection condensation of binary mixtures on a smooth tube: condensing mode and heat transfer coefficient of condensate [C]// Proc Engng Foundation Conference on Condensation and Condenser Design. St Augustine, Florida: ASME, 1993: 171-182.
- [4] Hijikata K, Fukasaku Y, Nakabeppu O. Theoretical and experimental studies on the pseudo-dropwise con-

- densation of a binary vapor mixture [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1996, 118(1): 140-147.
- [5] Utaka Y, Terachi N. Measurement of condensation characteristic curves for binary mixture of steam and ethanol vapor [J]. Heat Transfer Jpn Res, 1996, 24(1): 57-67.
- [6] Utaka Y, Wang Shixue. Characteristic curves and the promotion effect of ethanol addition on steam condensation heat transfer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(21): 4507-4516.
- [7] 何仰朋,严俊杰,杨玉森,等. 水和酒精 Marangoni 凝结换热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 77-80.
- He Yangpeng, Yan Junjie, Yang Yusen, et al. Research on Marangoni condensation heat transfer for water and ethanol mixture vapor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1): 77~80.

(编辑 王焕雪)