

存在温度梯度的竖直壁面 Marangoni 凝结换热特性研究

严俊杰¹, 王进仕¹, 胡申华², 刘继平¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 新疆大学电气工程学院, 830008, 乌鲁木齐)

摘要: 对水-酒精混合蒸气在表面存在温度梯度的竖直壁面上的 Marangoni 凝结换热特性进行了实验研究,并观测了混合蒸气的凝结形态. 实验结果表明:凝结表面不同位置的换热系数不同,温度梯度大的位置凝结换热系数较大;当酒精蒸气的质量分数 $w_v=0.5\%, 1\%$ 时,凝结换热系数随过冷度单调减小;当 $w_v \geq 2\%$ 时,凝结换热系数与过冷度的关系为含有最大值的非线性特性关系;在相同条件下, $w_v=1\%$ 时的凝结换热系数最高, $w_v=0.5\%$ 时的次之, $w_v \geq 2\%$ 以后,凝结换热系数随酒精含量的升高而减小. 与仅由浓度梯度引起的 Marangoni 凝结相比,本实验中由浓度梯度和温度梯度共同驱动的凝结换热更强. 初步的理论分析也表明,凝结表面上的浓度梯度和温度梯度共同作用使水-酒精凝结液表面的表面张力梯度增大, Marangoni 对流加强,凝结换热进一步强化.

关键词: 混合蒸气;凝结;温度梯度;换热系数

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0046-06

Marangoni Condensation Heat Transfer Characteristics on Vertical Surface with Temperature Gradients

YAN Junjie¹, WANG Jinshi¹, HU Shenhua², LIU Jiping¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: Marangoni condensation heat transfer of water-ethanol mixtures on a vertical surface with temperature gradients were studied experimentally, and the variation of condensation modes was observed. The results show that the local heat transfer coefficients at different locations on condensing surface were different, and at the local position with greater temperature gradient the heat transfer coefficient was higher. When the ethanol vapor concentration (mass fraction) was at low range (0.5%, 1%), the heat transfer coefficient decreased with the increase of vapor-to-surface temperature difference. When the ethanol vapor concentration was higher, the characteristic curve was a nonlinear one with a maximum. The highest heat transfer coefficient existed at a ethanol vapor concentration of 1%. The heat transfer coefficient decreased with the increase of vapor concentration when the ethanol vapor concentration was more than 2%. Compared with the solutal Marangoni condensation, the present Marangoni condensation driven by concentration and temperature gradients had stronger heat transfer. The preliminary analysis also shows that, under the coaction of concentration and temperature gradients, the surface tension gradient on the condensate surface is greater, leading to the condensation heat transfer to be further enhanced.

Keywords: mixture vapor; condensation; temperature gradient; heat transfer coefficient

符 号 表

w	酒精的质量分数, %	ΔT	表面过冷度, K	i, j	标号
l	距离, mm	λ	导热系数, $\text{kW} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	w, n, e, s	方向
h	换热系数, $\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	σ	表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	v	蒸气
q	热流密度, $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	Φ	热流量, kW	l	液体
T	温度, K	下标		sat	饱和态
u	蒸气流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$a \sim f$	实验试件内不同位置点		

构成“正系统”的双组分混合蒸气在固体表面凝结时,由于气态和液态的相平衡关系,凝结液面会产生不同的液相局部浓度分布,引起液体局部表面张力差异,产生 Marangoni 对流,使得凝结表面液膜厚度不均匀,从而形成类似珠状凝结状态,使凝结换热表面的传热系数大大提高,一般称这种现象为“Marangoni 凝结”或“Marangoni 珠状凝结”。文献[1]于1961年进行相容性双组分混合蒸气凝结换热实验时首次观察到非膜状凝结现象,凝结状态成条纹状或珠状。文献[2]进行了水-酒精混合物在水平管外的凝结换热实验,观察并总结出了5种凝结状态:珠状、条状、环状、平膜状、带起伏的膜状。文献[3]用氨的质量分数在0.1%~2.2%范围内的混合蒸气,进行了双组分混合蒸气的水平管外凝结换热实验。根据实验观察,随着氨含量的变化,蒸气的凝结状态依次为光滑的膜状、波纹形的珠状、环状。从凝结换热系数的实验测量结果可以看出,水-氨混合蒸气在低含量下凝结时,表面凝结换热系数提高了13%。文献[4]利用水-酒精混合蒸气进行了大气压条件下竖直平板上的凝结换热实验,得出了各种酒精含量下凝结表面换热系数与过冷度的关系曲线。从实验中观察出在较大的酒精含量范围内产生了 Marangoni 珠状凝结,蒸气在凝结表面的凝结状态随过冷度的增大依次出现光滑的膜状、条状、珠状、珠状+条状、膜状的凝结。在低酒精含量下,混合蒸气的凝结换热比纯水蒸气的凝结换热增强了2~8倍。文献[5-6]所做的不同压力下双组分混合蒸气在竖直平板上的凝结换热研究表明,蒸气压力对凝结换热特性具有一定的影响,在蒸气流速、酒精含量相同的条件下,凝结换热系数随蒸气压力的升高而升高。文献[7]所做的不同压力下竖直管外 Marangoni 凝结换热特性研究也得到了与文献[5-6]相似的结论。

Marangoni 效应根据其诱导因素可分为温度驱动的热 Marangoni 效应和浓度驱动的溶质 Marangoni 效应。当前有关 Marangoni 凝结换热的研

究,包括上面所提到的相关研究,都主要集中在基于溶质 Marangoni 效应的浓度差引起的 Marangoni 凝结。在这些研究中,宏观上混合蒸气凝结时凝结表面的温度均匀,表面上各局部的凝结换热系数相同。但是,从前面论述的 Marangoni 对流诱导因素来看,如果凝结表面温度场不均匀,凝结表面的凝结液膜温度会出现差别,从而也会导致 Marangoni 对流,使凝结液膜不稳定,影响凝结换热的效果。本文的主要目的就是研究凝结表面温度不均匀时的 Marangoni 凝结换热规律。

1 实验系统及方法

为了获得具有温度梯度的凝结表面,本文设计了如图1所示截面形状的紫铜实验试件。图2为采用数值模拟方法得到的某一实验工况下的实验试件内温度场。从图2可以看出,实验试件内的温度场呈锯齿形,凝结面上的温度场是不均匀的,呈对称形状,中间最高,两边最低,温差最大达10 K左右。

实验系统(见图3)为循环式的系统,根据功能可分为3个循环系统:混合工质循环系统、射流冷却水循环系统和冷凝器冷却循环系统。水-酒精组成的混合工质在蒸发器中由电加热器加热蒸发,从蒸气发生器出来的混合蒸气经上升管进入凝结室,在凝结室中凝结,凝结后的液体和尚未凝结的蒸气由凝结室下部的管路流出,进入冷凝器使残余混合蒸气完全冷却,最后在重力作用下经过回流管流至蒸气发生器完成循环。混合工质中存在的非凝结气体经由系统中的抽真空-冷却系统尽量抽出,使非凝结气体对凝结换热的影响降低到最小。实验系统中还设计了可视化系统,实验中可用 CCD 摄像机透过实验段的玻璃窗口记录凝结现象的变化。

由于实验试件在竖直方向的均匀性以及传热块的上下端面均为绝热面,实验试件内部的导热可以认为只是在水平截面内的二维导热。为了计算实验试件表面不同局部的凝结换热系数,在实验试件截面内布置了一定数量的热电偶测量其内部的温度分

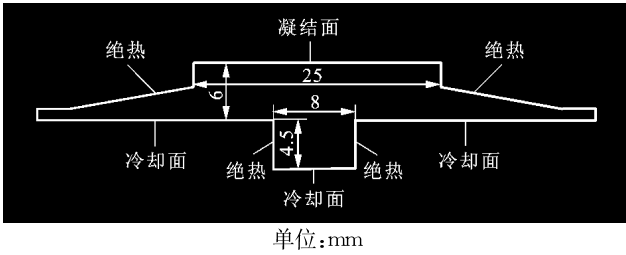


图1 实验试件截面

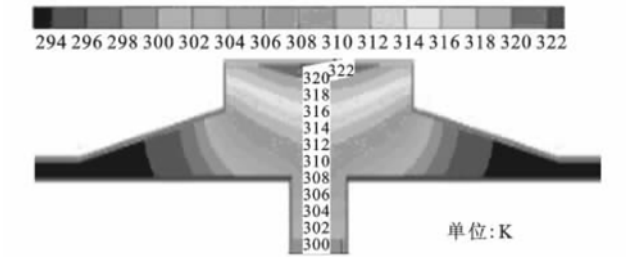


图2 实验试件截面温度场数值模拟计算结果

布(见图4)。为提高实验结果计算的精度,在原来热电偶布置的基础上,将该导热域重新划分网格,图4中所有的黑点均是细分以后网格上新增的节点。下面介绍凝结热流密度与换热系数的计算方法。首先,计算图4中已知温度点中相邻点之间所夹的中点的温度,即点 $a_i(i=1,2,\dots,7)$ 、 c_i 和 $d_i(i=1,2,\dots,6)$ 的温度。由于已知条件有限,这些点的温度初步都按线性差分计算,后面再作修正。然后,计算图4中所示的点 $b_i(i=1,2,\dots,6)$ 的温度。这些点的温度以热平衡法来计算^[8]。以 b_1 为例, b_1 位于 a_1 、 a_2 、 c_1 、 d_1 所围成的矩形域中心,如图4所示,该域内热量平衡,故有

$$\Phi_w + \Phi_n = \Phi_e + \Phi_s \quad (1)$$

式中每一界面所传导的热量可应用傅里叶定律求出,如

$$\Phi_w = \lambda \frac{l_{c_1-d_1}}{2} \frac{T_{a_1} - T_{b_1}}{l_{a_1-b_1}} \quad (2)$$

通过上面的方程即可解出 b_1 点的温度。依此方法可依次解出剩余 $b_i(i=2,3,\dots,6)$ 的温度,再利用已经解出的这些点来修正第一步中按线性差分来计算的中点的温度。还是利用热平衡法的原理,先修正 $a_i(i=2,3,\dots,6)$,再修正 $d_i(i=1,2,\dots,6)$ 。在上面计算结果的基础上,利用同样的原理和方法,可分别求得 $e_i(i=1,2,\dots,11)$ 、 $f_i(i=1,2,\dots,9)$ 点的温度。壁面上的局部热流密度 q 也是用热平衡法计算得到的。壁面上各点对应的过冷度为

$$\Delta T_i = T_v - T_{f_i} \quad (3)$$

则各点处的局部凝结换热系数

$$h_{f_i} = \frac{q_{f_i}}{\Delta T_i} \quad (4)$$

采用文献[9]中介绍的不确定度计算方法计算,本实验中热流密度 q 的最大相对不确定度为11.38%,换热系数 h 的最大相对不确定度为27.22%。

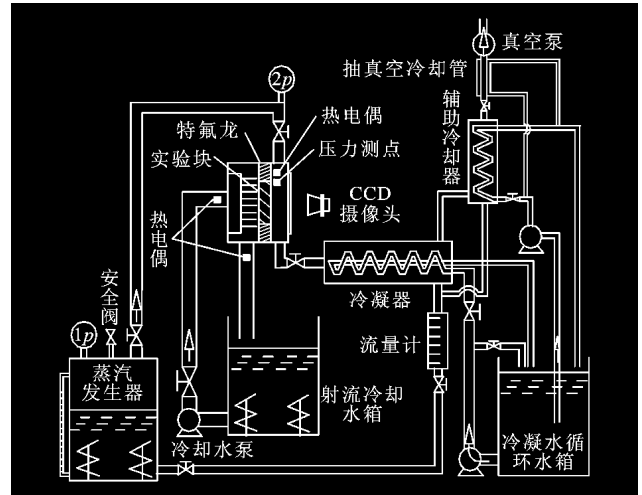


图3 凝结换热实验系统图

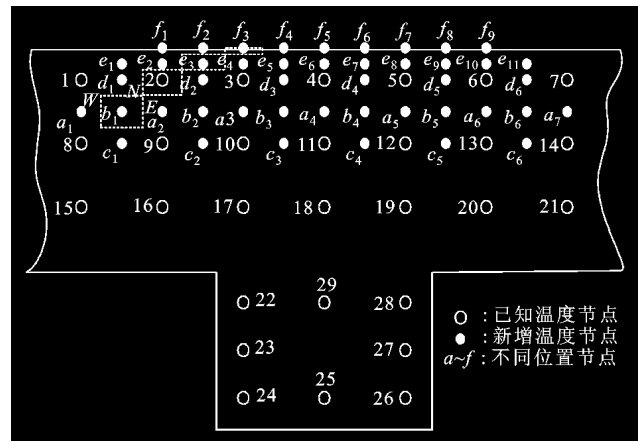


图4 试件内部温度测点分布

2 实验结果

文献[2-7]的研究表明,混合蒸气含量是Marangoni凝结换热特性最重要的影响因素。本文在蒸气压力为47.36 kPa、蒸气流速为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下进行了酒精蒸气质量分数 w_v 为0%~50%的实验,得到了多个酒精含量下凝结表面上温度梯度和浓度梯度耦合时的Marangoni凝结换热特性,同时观察了不同工况下的凝结形态。

2.1 凝结形态

实验中通过可视化系统观察和记录了纯水蒸气和不同酒精含量混合蒸气的凝结形态。图5为不同酒精含量下的凝结形态对比图。

纯水蒸气的凝结状态基本上一直为膜状,但液膜并不平整,可看到明显的波纹差异.这说明实验中凝结表面上的温度梯度所引起的表面张力差异虽然不足以使液膜撕裂,但却对液膜起到了明显的扰动作用.混合蒸气的凝结形态一般都为非膜状,具体形态与蒸气中的酒精含量、过冷度有关.从图 5 可以看出:在 14.2 K 左右的过冷度区域(图中过冷度均为凝结表面上 f_5 点处的过冷度)时, $w_v=1\%$ 的凝结面上比较混乱,液滴常常合并成大的液滴或液条,冲刷频率较高;在 $w_v=10\%, 20\%, 50\%$ 时,随酒精含量增加,底层液珠变大变稀,上层冲刷合并的液滴变大变密集,更易连成条状.在较低的过冷度下(2.1 K), $w_v=1\%, 10\%$ 时凝结形态还处于带条状的珠状,而 $w_v=20\%, 50\%$ 时已转变为起伏的膜状了.实验过程中还可以观察到,酒精含量越低,凝结面上的液珠刷新越快.快速的冲刷会加强对扩散热阻层的扰动,减小扩散热阻,使换热强化.

2.2 凝结换热系数

在本实验中,由于凝结面上存在温度梯度,故不同凝结部位的换热系数不同.从上面介绍的凝结换热系数的计算方法中可知,本实验中一共可以计算出 7 个不同局部的换热系数.考虑实验试件形状的对称性及 7 个可计算的局部在实验试件上所处的位

置特点,选择了其中处于典型位置的 3 点: f_2, f_4, f_5 来分析凝结换热规律.

从图 6 可以发现,在酒精含量相同时,所有不同位置处的凝结换热系数随过冷度的变化趋势基本相同.对于纯水蒸气和不同酒精含量下的混合蒸气, f_4 点处的凝结换热系数均为最大, f_5 点处的换热系数均为最小, f_2 点处的换热系数居中,但在不同的酒精含量下,不同位置之间的换热系数差值不尽相同,低含量下 ($w_v \leq 2\%$) 差值较大.

凝结表面上不同局部(文中的 f_2, f_4 和 f_5 三点)具有不同的换热系数,初步分析是由于凝结表面不同局部的温度梯度不同,从而引起局部表面张力梯度有差异,最终使凝结表面各局部的 Marangoni 对流强弱有别,各局部换热效果自然不同.图 7 所示为纯水和 $w_v=1\%$ 的混合蒸气在实验工况下凝结表面 3 个不同局部处所存在的温度差.从图 7 中可以看出: f_5 点处的温差最小,引起的表面张力梯度最小, Marangoni 对流相对最弱,因而换热系数会最小; f_4 点处的温差最大,引起的表面张力梯度最大,故该点处 Marangoni 对流最强烈,换热系数会最大.

从图 6 还可以看出: $w_v=0.5\%, 1\%$ 时,凝结换热系数随过冷度的变化趋势规律相似,在较小的过

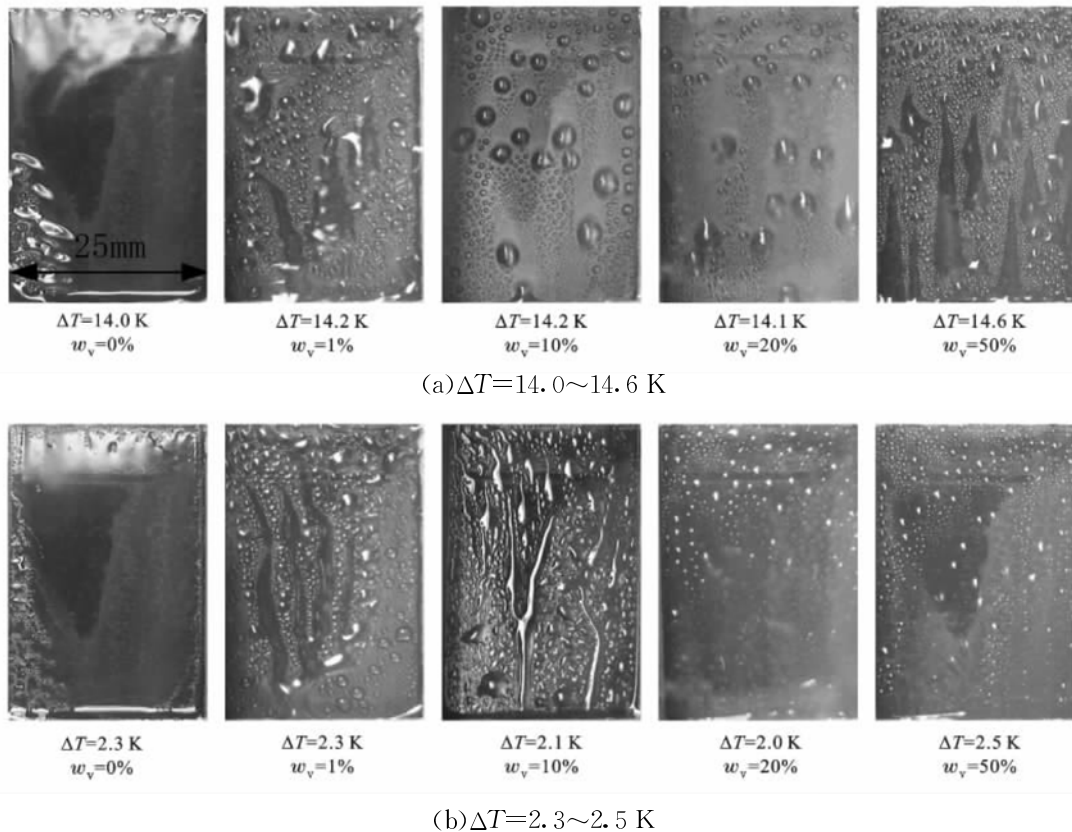


图 5 不同酒精含量混合蒸气凝结形态对比

冷度区域($\Delta T < 5$ K), 凝结换热系数随过冷度的增加而剧烈下降; 在过冷度大约为 5 K 时, 凝结换热系数随过冷度变化的趋势出现转折; 在 $\Delta T > 5$ K 以后, 凝结换热系数随过冷度的增加依然下降, 但下降速率明显减小; 当 $w_v \geq 2\%$ 时, 凝结换热系数随过冷度的变化趋势规律都相似, 表现为小过冷度时 ($\Delta T < 10$ K 左右), 凝结换热系数基本不随过冷度的增加而变化, 维持在一定的较小的数值范围; 到了某一过冷度时, 凝结换热系数开始随着过冷度的增加而显著增加, 直至达到一定的峰值; 其后, 凝结换热系数随着过冷度的增加开始下降. 在相同的条件下, $w_v = 1\%$ 时的换热系数最大, $w_v = 0.5\%$ 时的换热系数次之, $w_v \geq 2\%$ 时换热系数随酒精含量的增加而减小. 纯水蒸气的凝结换热系数在过冷度 $\Delta T < 12$ K 的范围内高于 $w_v = 20\%$ 时混合蒸气的换热系数, 在更大的过冷度下则小于 $w_v = 20\%$ 时混合蒸气的换热系数. 在所有过冷度区域内, 纯水蒸气的换热系数都略高于 $w_v = 50\%$ 时的混合蒸气的换热系数. 从强化传热的角度看, $w_v = 1\%$ 时混合蒸气的换热系数最大, 约是相同条件下纯水蒸气的 5 倍.

从图 8 可以看出: 本实验中的凝结换热系数在各酒精含量下均高于竖直平板^[10]的换热系数; 对于

纯水蒸气, 本实验的换热系数要高出 50% 左右; 对于混合蒸气, 在低酒精含量下, 本实验与竖直平板实验的换热系数的差值很大, 特别是在低过冷度区域, 最高可达 $100 \text{ kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 左右, 增幅高达 100% 以上; 在高酒精含量下, 本实验与竖直平板实验的换热系数差值明显减小, 最大差值出现的过冷度区域也右移到了中过冷度区. 本实验与竖直平板实验的其他条件都相同, 惟一的区别就是本实验中的凝结表面上存在温度梯度, 因此本实验与竖直平板实验的换热系数差别应完全取决于温度梯度对 Marangoni 凝结换热的影响. 由此可以得出, 温度梯度对 Marangoni 凝结换热的强化, 主要集中于低酒精含量 ($w_v \leq 2\%$) 下的低过冷度区域 ($\Delta T < 10$ K), 换热系数最大增量可达 $100 \text{ kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 左右, 增幅维持在 50%~100% 以上.

从图 6 及图 8 中还可以看出, 在低酒精含量下, 本实验的换热系数峰值或极大值都出现在 $\Delta T < 10$ K 的区域. 而实际工程应用中凝结换热的过冷度都不会很大, 一般都在 10 K 以下, 与实验中高凝结换热系数区域重合. 这说明, 温度梯度和浓度梯度共同驱动的 Marangoni 凝结很适合应用在工业条件下的强化换热领域.

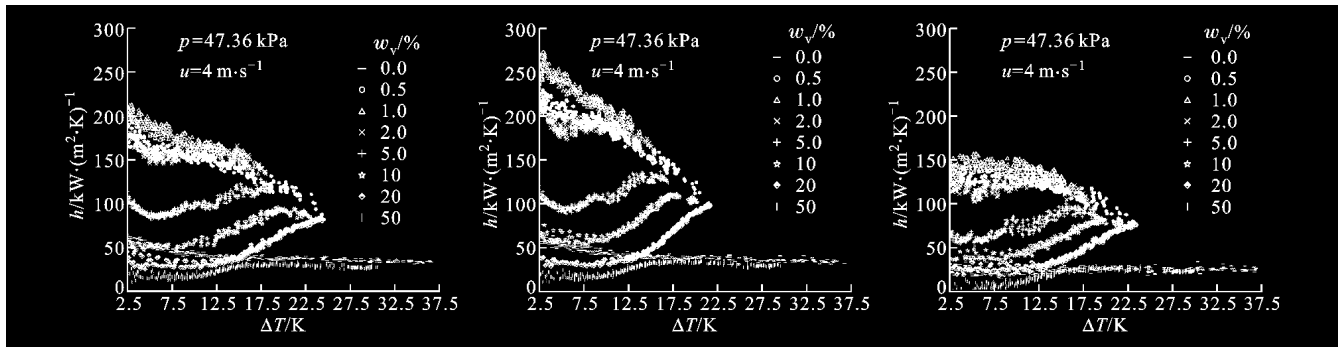


图 6 不同酒精含量下混合蒸气凝结换热特性

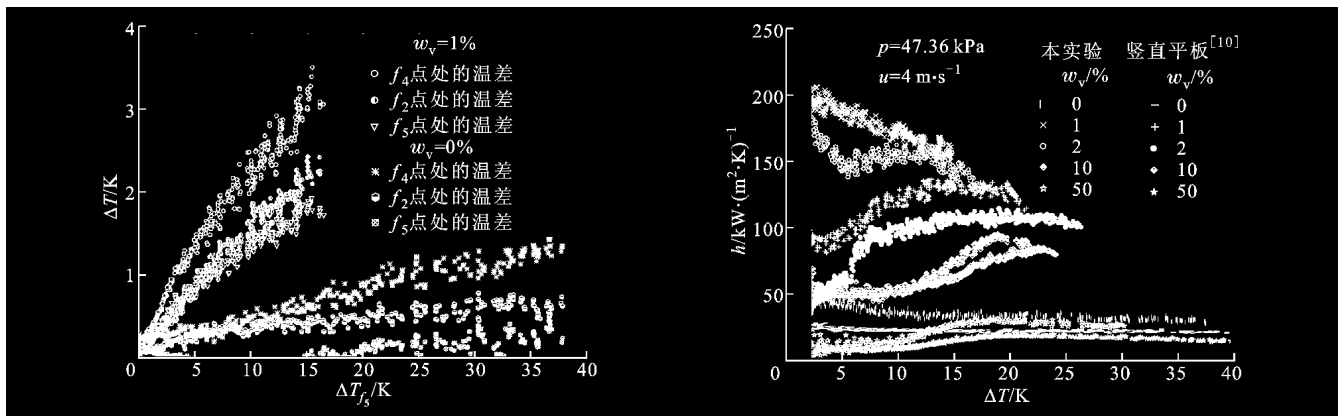


图 7 凝结表面不同局部的温度差比较

图 8 本实验的平均换热系数与竖直平板^[10]的比较

3 理论分析

本实验中所观察到的混合蒸气的珠状凝结,是凝结表面上浓度梯度和温度梯度共同作用引起的表面张力梯度导致的 Marangoni 对流而产生的.上节中的实验结果表明,本实验中的凝结换热系数高于同条件下仅有浓度梯度驱动的 Marangoni 凝结的换热系数.下面从理论方面初步分析浓度梯度和温度梯度共同作用对凝结换热的影响.

水-酒精混合蒸气的凝结液为“正系统”^[11],其表面张力与酒精含量具有下列关系

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial w_1}\right)_{\text{sat}} < 0 \quad (5)$$

酒精为挥发性组分,故有

$$\left(\frac{\partial w_1}{\partial T}\right)_{\text{sat}} < 0 \quad (6)$$

则水-酒精混合蒸气的凝结液的表面张力与温度的关系为

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right)_{\text{sat}} \equiv \left(\frac{\partial \sigma}{\partial w_1}\right)_{\text{sat}} \left(\frac{\partial w_1}{\partial T}\right)_{\text{sat}} > 0 \quad (7)$$

式(5)说明浓度梯度引起的表面张力梯度方向为从低浓度区指向高浓度区,式(7)说明温度梯度引起的表面张力梯度方向为从高温区指向低温区,式(6)则说明,高温区的浓度低,低温区的浓度高.综合式(5)、式(6)的推论可得到浓度梯度引起的表面张力梯度方向为高温区指向低温区的结论,再结合式(7)的推论,可以发现本实验中浓度梯度和温度梯度引起的表面张力梯度指向同一个方向.因此,浓度梯度和温度梯度引起的表面张力梯度相耦合,必然使总的表面张力梯度增大,Marangoni 对流加强,换热进一步强化.

4 结论

本文进行了水-酒精混合蒸气在表面存在温度梯度的竖直壁面上的 Marangoni 凝结换热特性的实验研究,观测了各实验工况下的凝结形态,并进行了初步的理论分析,得到如下结论.

(1)在实验凝结表面的不同位置,凝结换热系数不同.在相同条件下,凝结表面温度梯度大的局部凝结换热系数都较大.

(2)酒精蒸气含量不仅对凝结换热系数的大小有影响,还影响凝结换热系数随过冷度的变化趋势.在 $w_v=0.5\%$, 1% 这两个低含量时,凝结换热系数随过冷度单调减小,减小的速率在某一过冷度时会有转折.在 $w_v \geq 2\%$ 时,凝结换热系数与过冷度的关

系为含有最大值的非线性特性关系.同一过冷度时, $w_v=1\%$ 的凝结换热系数最高, $w_v=0.5\%$ 时次之, $w_v=2\%$ 以后凝结换热系数随酒精含量的升高而减小. $w_v=1\%$ 时混合蒸气的换热系数约是同条件下纯水蒸气的 5 倍.

(3)由浓度梯度和温度梯度共同作用引起的 Marangoni 凝结的凝结换热高于仅有浓度梯度引起的 Marangoni 凝结,且其高换热系数出现在实际工业应用的小过冷度区域 ($\Delta T < 10 \text{ K}$). 这为其在强化换热领域的应用奠定了基础.

参考文献:

- [1] MIRKOVICH V V, MISSEN R W. Non-filmwise condensation of binary vapors of miscible liquids [J]. Canadian J Chem Eng, 1961, 39(4):86-87.
- [2] FUJII T, OSA N, KOYAMA S. Free convection condensation of binary vapor mixtures on a smooth horizontal 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.
- [3] MORRISON J N A, DEANS J. Augmentation of steam condensation heat transfer by addition of ammonia [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1997, 40(4): 765-772.
- [4] UTAKA Y, WANG S X. Characteristic curves and promotion effect of ethanol addition on steam condensation heat transfer [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2004, 47(21): 4507-4516.
- [5] 杨豫森,甄克建,严俊杰,等. 蒸气压力对 Marangoni 凝结换热特性影响的研究[J]. 工程热物理学报, 2006,27(6): 965-968.
YANG Yusen, ZHEN Kejian, YAN Junjie, et al. Effect of vapor pressure on Marangoni condensation heat transfer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006,27(6): 965-968.
- [6] 杨豫森,甄克建,严俊杰,等. 不同蒸气压力下的 Marangoni 凝结换热特性[J]. 化工学报,2006,57(12):2 816-2 822.
YANG Yusen, ZHEN Kejian, YAN Junjie, et al. Marangoni condensation heat transfer for binary mixture vapor at different vapor pressures [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006,57 (12):2816-2822.
- [7] 乔磊,李杨,严俊杰,等. 不同压力下竖直管外 Marangoni 凝结换热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2):268-270.

