

Marangoni Condensation Enhancement Mechanism

Shenhua Hu¹, Junjie Yan²

¹Department of Thermal Power of Electrical Engineering College, Xinjiang University, Urumqi, China

²School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China

Email: hushenhua@xju.edu.cn, yanjj@xjtu.edu.cn

Abstract: This paper reported on the rates of condensation heat transfer for water-ethanol mixtures in an oblique block under a wide range of concentrations. Temperature difference along condensing surface resulting from shape of the oblique block would create surface tension difference and affect Marangoni condensation. It was shown that for ethanol concentrations in the concentration 1 wt% the mean condensation heat transfer was enhanced by up to 15% by comparing experimental results with literature under similar experimental condition. Furthermore, the effect arising from temperature difference was more obvious for low concentrations in low vapour-surface temperature difference (<10K). This enhancement was caused by the two motions which produced a disturbed condensate film and a corresponding drop in the thermal resistance of the condensate film. Moreover, the mean heat transfer coefficient generally increased with increasing pressure for all concentration of the water-ethanol mixtures.

Keywords: Water-ethanol vapor; Oblique plate; Condensation Mechanism

Marangoni 凝结强化机理研究

胡申华¹, 严俊杰²

¹新疆大学, 乌鲁木齐, 中国, 830047

²西安交通大学, 西安, 中国, 710049

Email: hushenhua@xju.edu.cn

摘要: 在带有温度梯度的凝结表面上进行了一系列浓度的 Marangoni 凝结实验, 研究了不同浓度酒精蒸汽的传热系数。实验表明, 质量浓度为 1% 的混合蒸汽在同样实验条件下, 其传热系统提高了 15%; 由于表面温度差异引起的传热增强的效果在低浓度和低过冷度(<10K)时更加明显。这种传热系数的提升是由于扰乱的凝结液膜及其上的液珠运动造成的; 对所有的浓度而言, 传热系数均随压力的增大而增大。

关键词: 水-酒精混合蒸汽; 斜块; 凝结机理

1 引言

换热器是电厂及工业生产中最重要设备之一, 在其中可发生蒸汽的凝结换热。蒸汽的冷凝方式根据冷凝液与冷凝表面的湿润程度可分为膜状冷凝和珠状冷凝, 珠状冷凝其传热系数比膜状冷凝要高一个数量级以上。现有的换热器一般均是以膜状冷凝方式工作的, 若能实现珠状凝结, 则可大大节省金属的消耗和减少换热器的尺寸。在洁净的金属表面可形成珠状凝结, 但难于持久保持。可通过对凝结表面改性, 实现较为持久的珠状凝结^[1-2]。在诸多强化效果中, 利用表

面张力作用强化冷凝传热是一种较为理想的途径。

研究发现, 在水中加入某些物质(如酒精、氨等)的混合工质的蒸汽凝结时, 会呈现出类似于珠状凝结的凝结形态, 有学者称之为“伪珠状凝结”

(Pseudo-dropwise condensation)。出现这种现象的原因是因为两种组分的表面张力存在差异, 高沸点组分的表面张力大于低沸点组分的表面张力, 会发生 Marangoni 效应。Marangoni 效应是由于体系液相表面张力梯度的存在, 引发表面张力低的液体向表面张力高的液体方向流动的物理现象, 又被称为 Marangoni 对流。由于 Marangoni 珠状凝结和非共沸混合物的膜

状凝结换热相比具有较高的表面传热系数，目前 Marangoni 凝结换热已成为世界各国学者的一个研究热点：日本的 Yoshio Utaka^[3]教授利用水-酒精混合蒸气进行了凝结换热实验，在各种酒精浓度条件下进行了竖直平板的凝结换热性能测量，得出了凝结换热表面传热系数与过冷度的关系曲线；西安交通大学的 Marangoni 课题组对平板、圆管和带表面温度梯度的 Marangoni 凝结进行了详细的研究^[4-6]。

对于在具有温度梯度上的 Marangoni 凝结实验，本文对凝结换热的增强的机理进行了一些讨论。

2 实验系统

对实验系统和实验步骤有兴趣的读者可参考文献 [6]。在原有实验系统的基础上，为尽量减少不凝结气体对实验的影响和保持工质浓度的恒定，对抽真空部分进行了改造，由真空管改为冷却器。

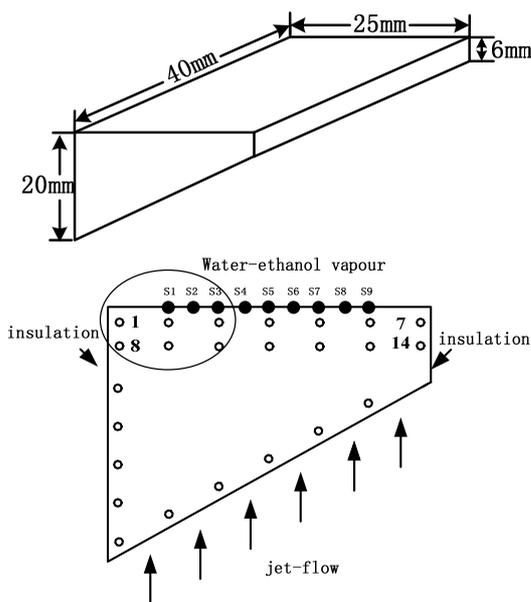


Figure 1. Schematics of test block
图 1. 实验斜块结构简图

实验块的结构和横截面如图 1 所示，材料为紫铜。在实验块的端面上钻有 24 个直径 0.5mm 的小孔，并布置 T 分度的铜-康铜热电偶 24 对，实验块四周用聚四氟乙烯绝热。在实验过程中，冷却水的加热非常缓慢，实验块内的导热过程在每次温度采集时可认为是稳态、无内热源、常物性的二维导热问题。

可以计算出表面各点的局部传热系数 h ；同时，该点的热流密度 q 也可计算出。

3 实验结果

由于凝结实验块的形状，在凝结表面上存在温度梯度，如图 2 所示，随着冷却水温的升高，S2 和 S8 点的温差逐步减小直至减为零。对所有的浓度和速度的实验均存在这样的变化规律。

在实验中，凝结表面横向存在温度差，使得沿此方向的表面过冷度存在差异。Tamir^[7]指出：在二元蒸汽凝结过程中，较低的表面过冷度更有助于增加液膜的扰动。因此，这种扰动很可能在表面过冷度最大的区域，即凝结实验块的左侧开始形成并发展，在凝结液膜内的扰动能产生表面张力的梯度，使得 Marangoni 凝结更容易产生。因沿凝结表面横向各处的热流密度和表面过冷度是变化的，为进行比较，引入平均换热系数 \bar{h} ，表示为：

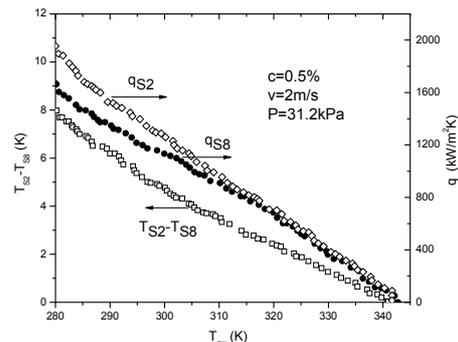


Figure 2. Temperature difference and heat flux versus cooling water temperature for S2 and S8

图 2. S2 和 S8 点的温度差和热流密度

$$\bar{h} = \frac{\bar{q}}{\Delta T} = \frac{\int_0^L q dx}{\int_0^L \Delta T dx} \quad (1)$$

其中 \bar{q} ， ΔT ， L 分别为平均热流密度，平均表面过冷度和凝结表面的横向长度。

在下面的讨论部分，传热系数均是指平均值。

实验是在八个不同的酒精浓度 (0%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20% and 50%) 下进行的。实验结果如图 3 所示。该图表明了在不同压力 (31.2kPa, 84.5kPa) 和流速 (2m/s) 下，不同浓度的酒精混合蒸汽在实验块上的凝结特性曲线。

可以看出，在各种工况下，传热系数与过冷度都呈现出非线性特征。0.5%和 1%浓度的混合蒸气在过冷度很小时 (2K) 出现最大的传热系数或者没有出现，之后，随过冷度的增加，传热系数几乎是线性下降；

其余浓度，除纯水外，都有一个明显的峰值，在达到峰值之前，有一个起增点，从该点起，传热系数增大至峰值，而后传热系数逐渐减小。随着浓度增大，峰值往大的过冷度的方向移动。但 50% 峰值所对应的过冷度小于 20% 所对应的过冷度。在所有浓度中，1% 浓度具有的最大传热系数，达到相同实验条件下最高值；在相同过冷度下，传热系数的数值从大到小依次为 0.5%，2%，5%，10%，20%，0%，50%。

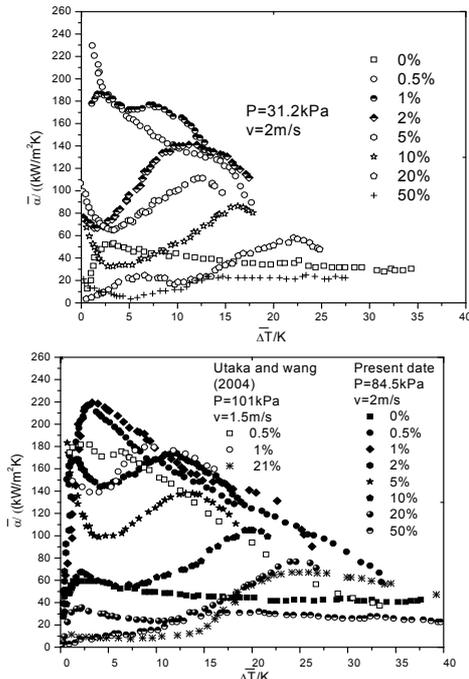


Figure 3. Condensation heat transfer characteristic curves
图 3. 凝结特性曲线

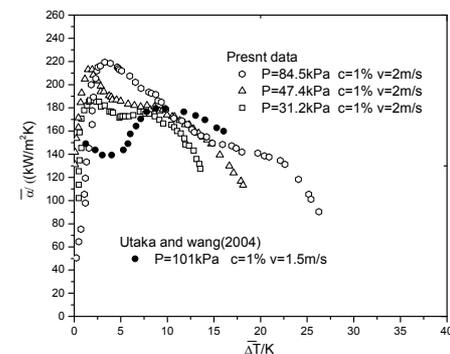


Figure 4. Condensation heat transfer characteristic curves for 1%
图 4. 1% 浓度的凝结特性曲线

图 4 所示为本文的实验数据与 Utaka^[3]的竖直平板表面凝结换热实验结果的对比，二者的实验条件接近，本文的蒸气压力和流速为 84.5 kPa、2 m/s，Utaka

实验的蒸气压力和流速为 101.1 kPa、1.5 m/s。从图可知，二者的凝结传热系数随表面过冷度的均呈非线性变化规律，均存在凝结传热系数的最大值，但本实验要较文献中的凝结传热系数要大。本文在压力 84.5kPa、流速 2 m/s 下传热系数的最大值为 220kW.m⁻².K⁻¹左右；Utaka 的实验在压力 101.1 kPa、流速 1.5 m/s 下传热系数的最大值为 180 kW.m⁻².K⁻¹左右。

4 分析和讨论

对于二元混合蒸气的凝结，气侧到凝结表面存在两个热阻，一个是蒸气侧到凝结液面的扩散热阻 R_{diff} ，另一个是液膜的导热热阻 R_f ；2004 年，Chris Philpott^[8]进行了氨水的实验，他指出在最低浓度的氨蒸气中， R_f 远大于 R_{diff} ，相差一个数量级；随着浓度的增加， R_{diff} 逐渐增大，最终超过 R_f 而占据支配地位。从其实验结果我们可以推断出在低浓度时，扩散热阻相比导热热阻很小，可以不用考虑；但当浓度增大后，就必须考虑扩散热阻的值。

Song^[9]等研究了混合蒸汽珠状凝结中液珠的形成机理。他的研究表明：虽然从凝结状态上看属于珠状凝结，但实际上在液珠之间以及液珠的脱落处都存在一层薄的凝结液膜，其凝结模型可见图 5 所示。

液珠频繁地脱离并滑过凝结表面提高了凝结传热系数；另一个提高换热能力的原因可能是由于表面张力梯度^[10]的存在产生了液膜内的 Marangoni 对流。这两种效应影响了 R_f 和 R_{diff} ，从而在低浓度时大大提高了换热能力。

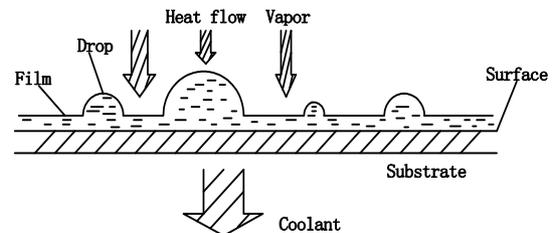


Figure 5. Physical model of dropwise condensation
图 5. 珠状凝结的物理模型

单独考虑液膜如图 6 所示，在此情形下，液膜的表面张力取决于温度 T 和液膜中的酒精浓度 c ，由于

$$\frac{d\sigma}{dL} = \frac{\partial\sigma}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dL} + \frac{\partial\sigma}{\partial c} \cdot \frac{dc}{dL} \quad (2)$$

L 为凝结表面的横向长度，从右至左取为正。

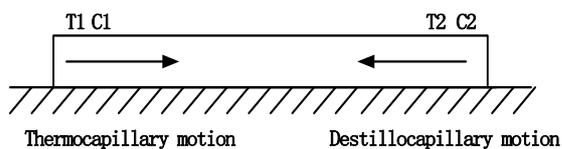


Figure 6. Two motion in liquid film

图 6. 液膜中的两种运动

通常 $\frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0$ 和 $\frac{\partial \sigma}{\partial c} < 0$, 因为右边的温度低于左边的, 即 $\frac{dT}{dL} > 0$, 方程 2 右边的第一项为负的, 产生向右的运动如图 6 所示。这种运动称为 thermocapillary 运动, 是由于温度差引起的运动。假设在界面上的酒精浓度都达到饱和, 则左侧的浓度最高, 即 $\frac{dc}{dL} < 0$, 则方程 4 右边的第二项为正的, 这一项产生的运动由左向右, 称为 destillocapillary 运动。这两种相反的运动相互作用, 使得液膜的导热热阻减小。

混合蒸汽凝结过程中, 水蒸汽先于酒精蒸汽凝结, 在混合蒸汽主体和凝结界面之间形成了一层薄的蒸汽扩散层。穿过该扩散层水蒸汽和酒精蒸汽的组分存在变化: 水蒸汽的分压力逐渐的降低而酒精蒸汽的分压力在增大, 以维持与主体蒸汽压力的平衡。由此可知, 扩散热阻随着壁面温度的减小而增大。

随着表面过冷度的增大, 凝结驱动力变得更大, 有更多的混合蒸汽凝结。另一方面, 在液膜中的 thermocapillary 和 destillocapillary 运动也随着过冷度的增大而变得更强, 最终降低了凝结液的导热热阻。这种效应超过了由于壁面温度降低使得扩散热阻增大的影响, 总的热阻在低的表面过冷度下保持近似不变或略微减小。随着过冷度的进一步降低, 凝结量的增大超过了热阻的减小, 总的热阻将会增大, 从而传热系数降低。

5 结论

在实际的工程应用中, 为了强化对流侧的传热, 通常加装了很多肋片, 凝结过程是在具有温度差, 而

非温度均匀的凝结表面进行的。本文在具有温度梯度的斜块上进行的水-酒精混合蒸汽的凝结实验模拟了实际工程的凝结情况, 实验表明, 在水中加入少量的酒精就能使得混合蒸汽的换热系数大为增加, 尤其是在 1% 浓度时, 换热能力是纯水的 8 倍之多。

致谢

感谢国家自然科学基金提供资助(No.50966003)。

References (参考文献)

- [1] Neill GAO, Westwater JW. Dropwise condensation of steam on electroplated silver surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 1984, 27 (9): P1539-1549.
- [2] Ma X, Rose JW, Xu D. Advances in dropwise condensation heat transfer: Chinese research [J]. Chem Eng J, 2000, 78, P87-93.
- [3] Y. Utaka, S. Wang, Characteristic curves and promotion effect of ethanol addition on steam condensation heat transfer [J], Int. J. Heat Mass Transfer, 2004, 47, P4507-4516.
- [4] Yang Yushen, Yan Junjie, Wu Xinzhuang. Effects of vapor pressure on Marangoni condensation of steam-ethanol mixtures [J], J. Thermophys. Heat Transfer, 2008, 22, P247-253.
- [5] Hu Sehnua, Yan Junjie, Wang Jinshi. Effect of temperature gradient on Marangoni condensation heat transfer for ethanol-water mixtures [J], Int. J. Multiphase Flow, 2007, 33, P935-947.
- [6] Wang Jinshi, Yan Junjie, Hu Shenhua. Marangoni condensation heat transfer of water-ethanol mixtures on a vertical surface with temperature gradients [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52, P2324-2334
- [7] Tamir, A. Mixed pattern condensation of multicomponent mixture [J], Chem.Eng.J, 1979, 17, P141-156.
- [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, P3683-3693
- [9] Song, Y.J, Xu, D. Q., Lin, J.F. A study on the mechanism of dropwise condensation [J], Int J Heat Mass Transfer, 1991, 34, P2827-2831
- [10] Ganzevles, F.L.A, Vandergeld, C.W.M. Temperatures and the condensate heat resistance in dropwise condensation of multicomponent mixtures with inert gases [J], Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45, P3233-3243