

文章编号:1000-582X(2006)05-0048-04

圆形径向梯度表面能材料表面的凝结换热系数*

顾扬彪, 廖强, 朱恂, 王宏

(重庆大学 工程热物理研究所, 重庆 400030)

摘要:在均质表面上的单个球缺形液滴换热模型和液滴通用尺度分布规律的基础上,结合梯度表面能材料表面上的液滴分布和凝结换热特性,得到了圆形径向梯度表面能材料表面上的滴状凝结换热计算式.在此基础上,研究了壁面过冷度、接触角梯度、工质物性等参数对梯度表面能材料表面滴状凝结换热性能的影响.

关键词:水平圆形径向梯度表面能材料表面;滴状凝结换热;液滴尺度分布

中图分类号:TK124

文献标识码:A

传统的滴状凝结强化换热大部分采用竖直表面作为实现滴状凝结的表面,依靠重力作用排除液滴以维持滴状凝结.梯度表面能材料表面的制备于1987年由Elwing H^[1]等人首次提出.与传统的普通均质表面不同,梯度表面能材料表面是通过气相沉积及硅烷化方法在凝结表面上形成连续变化的表面能梯度分布,即沿特定方向,由表面亲水向表面憎水变化.当蒸汽在梯度表面能材料表面上凝结成液滴时,由于液滴四周接触线上各处表面能不同,引起四周的表面张力无法取得平衡;表面张力的合力大于阻碍液体运动的阻力时,液滴则开始运动.梯度表面提供了重力以外的排除凝结液滴方式,对于水平表面或者其他失重状态下的表面,能够及时排除凝结液滴,有效强化滴状凝结换热.

1966年第一次提出了液滴分布的理论计算方法,认为半径为 r 到 r_m 的液滴所占据的凝结面份额为 $a = 1 - (r/r_m)^n$.假设液滴的密度函数为 $N(r)$,则在单位面积上的液滴尺度分布函数可整理为:

$$\frac{dN(r)}{dr} = \frac{r^{n-3}}{r_m^n \pi} \quad (1)$$

式中 $\frac{dN(r)}{dr}$,表示单位面积上在区间 $(r, r + dr)$ 中的液滴数目,个/ m^3 ;根据文献[3],大气压下水蒸汽滴状凝结时,分布指数 $n \approx 1/3$; r 为液滴半径, m ; r_m 为最大液滴半径, m .

对于单个液滴的换热,可由3个热阻^[2]来计算,即液滴本身的导热热阻、液滴界面传质产生的热阻及汽液界面曲率效应导致的热阻.图1是半径为 r 接触角为 θ 的球缺形液滴示意图.

滴状凝结换热可以通过单个液滴的换热和液滴分布来求得.文中基于三热阻模型^[2],包括液滴导热热阻、汽液界面传质热阻和汽液界面曲率效应产生的热阻,从均质表面上液滴通用尺度分布率^[3]出发,考虑梯度表面能材料表面能分布不均匀性对液滴分布和凝结换热特性的影响,提出了水平圆形径向梯度表面能材料表面上的滴状凝结换热模型.

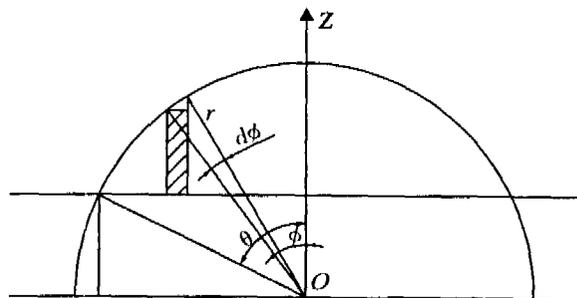


图1 球缺形液滴示意图

1 液滴尺度分布及单个液滴换热计算

针对均质表面上的滴状凝结, Lefevre 和 Rose^[3]于

* 收稿日期:2005-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50276072)

作者简介:顾扬彪(1981-),男,浙江武义人,重庆大学硕士研究生,主要从事工程热物理传热传质的研究.

建立以 O 点为中心的球坐标,则图中阴影部分绕 Z 轴旋转一周形成的微元圆筒体在凝结表面的投影面积和汽液界面距凝结表面的高分别为:

$$\begin{aligned} s &= 2\pi r^2 \cos\phi \sin\phi d\phi, \\ H &= r(\cos\phi - \cos\theta). \end{aligned} \quad (2)$$

对于该微元圆筒体,由于液滴本身导热所产生的温差^[4]为:

$$\Delta T_d = \frac{r(\cos\phi - \cos\theta) dq}{2k\pi r^2 \sin\phi \cos\phi d\phi} \quad (3)$$

式中, k 为凝结液滴导热系数, $W/m \cdot K$, q 为热流量, W .

液滴的界面传质过程所产生的温差^[5]为:

$$\Delta T_i = \frac{dq}{2h_i \pi r^2 \sin\phi \cos\phi d\phi} \quad (4)$$

式中, k 为汽液界面换热系数, $W/m^2 \cdot K$. 界面曲率影响造成的温差^[3]为:

$$\Delta T_c = \frac{\Delta T_w r_{\min}}{r} \quad (5)$$

这里, r_{\min} 为可见最小液滴半径, m ; ΔT_w 为壁面过冷度, K .

液滴换热总温差为:

$$\Delta T_w = \Delta T_d + \Delta T_i + \Delta T_c \quad (6)$$

整理后得到该微元圆筒体的换热量:

$$dq = 2\pi r \Delta T_w (r - r_{\min}) \frac{\sin\phi \cos\phi d\phi}{1/h_i + (\cos\phi - \cos\theta)r/k} \quad (7)$$

在 $0 \rightarrow \theta$ 上积分得到整个液滴的换热量:

$$\begin{aligned} q &= 2\pi k \Delta T_w (r - r_{\min}) \cdot \left[\left(\frac{k}{rh_i} - \cos\theta \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \ln \frac{1/h_i}{1/h_i + (1 - \cos\theta)r/k} + 1 - \cos\theta \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

2 梯度表面能材料表面上的凝结换热

当蒸汽在梯度能表面上产生滴状凝结时,凝结产生的液滴通过聚合及直接凝结而长大;液滴三相接触线上各处表面张力由于表面能不同而不同,表面张力的不平衡产生一作用力,拉动液滴向表面能高(即接触角小)的区域移动.考虑半径为 l 的圆形理想径向表面能梯度表面,表面能梯度可由接触角来表示,并假设:1) 圆心处表面能最低(接触角为 θ_0),沿半径方向升高,接触角为线性分布: $\theta = -k_1 x + \theta_0$, k_1 为接触角梯度($^\circ/m$), x 为凝结表面各点距圆心的距离;2) 视液滴

为球缺形;3) 各个瞬时的液滴大小分布类似,液滴半径随时间而增大.

在该凝结表面上取以圆心为中心,宽为 Δx 的圆环单元带(Δx 与最大液滴覆盖面直径相等),并假设圆环单元带内表面能相同,近似认为是均质表面.结合式(1)和式(8)得到单元带内的换热量:

$$\begin{aligned} Q_j &= A_1 \cdot \int_{r_{\min}}^{r_m} r^{n-3} (r - r_{\min}) \left[\left(\frac{A_2 k}{r} - 1 + A_3 \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \ln \frac{A_2}{A_3 r/k + A_2} + A_3 \right] dr \\ A_1 &= \frac{2nkA\Delta T_w}{r_m^n}, A_2 = \frac{1}{h_i}, A_3 = 1 - \cos\theta. \end{aligned} \quad (9)$$

式中 A 为圆环单元带面积, m^2 ; r_{\min} 为单元带内最小可见液滴半径, m :

$$r_{\min} = \frac{2\sigma T_s}{\rho h_{fg} \Delta T_w} \quad (10)$$

式中 σ 、 ρ 和 h_{fg} 分别为表面张力, N/m ; 凝结液密度, kg/m^3 ; 汽化潜热, J/kg . 设单元带内的最大液滴覆盖面半径为 r_{bm} , 并认为近似等于脱离液滴半径, 而脱离液滴半径由液滴开始运动前瞬时的平衡状态确定.

引起梯度表面上液滴运动的主要驱动力是由于前后接触角不等而造成不平衡的界面力,产生沿表面能梯度方向的拉力;而阻止液滴运动主要因素是接触角滞后. Hong Zhao 等人^[6]认为当液滴小于某一尺寸时,由于表面能梯度产生的驱动力会被接触角滞后产生的阻力所平衡,而保持静止.显而易见,在梯度表面能表面上,液滴越大,则液滴前后接触角差值也越大,所引起的驱动力也越大.由此可以认定,当液滴在梯度表面能表面上的覆盖面足够大时,其前后接触角的差值将大于接触角滞后所产生的前进角与后退角的差值时,液滴开始运动.假设接触角滞后产生的前进角与后退角差值一定,为 $\Delta\theta_c$. 对于文中的梯度表面能表面,由液滴开始运动前瞬间的平衡关系可得到最大液滴覆盖面半径:

$$r_{bm} = \frac{\Delta\theta_c}{2k_1} \quad (11)$$

对应的最大液滴半径为:

$$r_m = \frac{r_{bm}}{\sin\theta} = -\frac{\Delta\theta_c}{2k_1 \sin\theta} \quad (12)$$

由于各单元带内接触角梯度相同,则各单元带内的最大液滴半径也相同.

在式(9)的基础上,对整个梯度表面能表面上的

所有单元带的换热量求和,可得到总换热量:

$$Q = \sum_j^n Q_j, \quad (13)$$

N 为凝结表面上单元带的总数,则平均滴状凝结换热系数为:

$$h = \frac{Q}{\pi l^2 \Delta T_w} \quad (14)$$

3 梯度表面能材料凝结换热计算结果和分析

笔者分别计算了凝结工质为水、甲醇和乙醇时,不同过冷度和不同表面能梯度条件下的平均凝结换热系数. 计算结果见图2-图6,图2-图5分别对应接触角梯度 $k_1 = 3.20 \times 10^3 \text{ }^\circ/\text{m}$ 、 $4.00 \times 10^3 \text{ }^\circ/\text{mm}$ 、 $5.33 \times 10^3 \text{ }^\circ/\text{m}$.

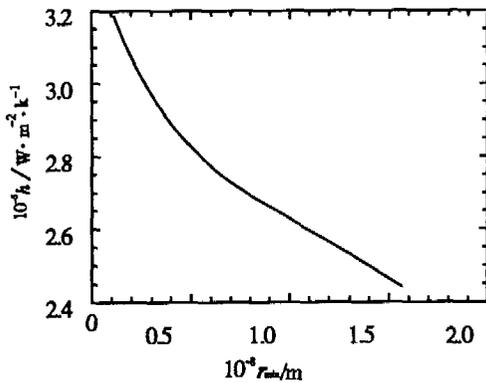


图2 平均表面凝结换热系数与最小液滴半径的关系

图2是以水蒸汽为工质,接触角梯度为 $k_1 = 3.20 \times 10^3 \text{ }^\circ/\text{m}$ 时,平均表面换热系数与最小液滴半径的关系图;从图中可看出,最小液滴半径减小,表面换热系数会明显增大. 从图3-图6中可以看出,梯度表面能材料表面上平均滴状凝结换热系数随过冷度增加略有增加;这是因为随着过冷度的增加,最小液滴半径减小,在滴状凝结中,热量主要是通过小液滴传递的,从而引起换热系数的增加. 凝结工质物性不同,也将引起梯度表面能材料表面滴状凝结换热系数的变化. 在滴状凝结换热中,液滴凝结工质的汽化潜热大小是影响换热的主要因素,汽化潜热大的工质凝结时,其表面换热系数大;而液体工质的表面张力对最小液滴半径的大小具有影响,表面张力越大,最小液滴半径越大,从而造成滴状凝结换热系数的减小,但其影响不及汽化潜热的影响大,这与图3-图5中所示的计算结果相符. 图6示出了不同接触角梯度(k_1 变化)时,表面滴状凝结换热系数的变化(工质为水). 从图中可明显看出:接触角梯度越大(k_1 越大),表面滴状凝结换热系

数也越大. 从式(12)可以看出,最大液滴半径随 $|k_1|$ 的增大而减小,使得小液滴密度加大,因此,表面滴状凝结换热系数随接触角梯度增大而增加.

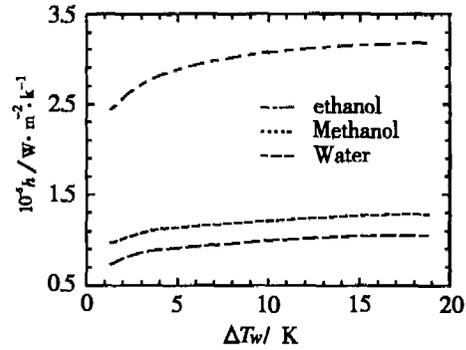


图3 不同工质的表面凝结换热系数 ($k_1 = 3\ 200$)

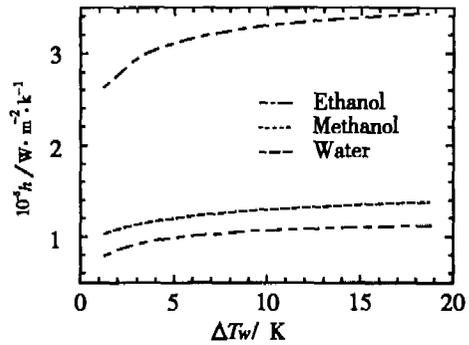


图4 不同工质的表面凝结换热系数 ($k_1 = 4\ 000$)

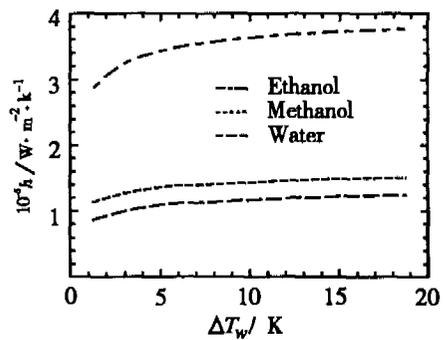


图5 不同工质的表面凝结换热系数 ($k_1 = 5\ 333$)

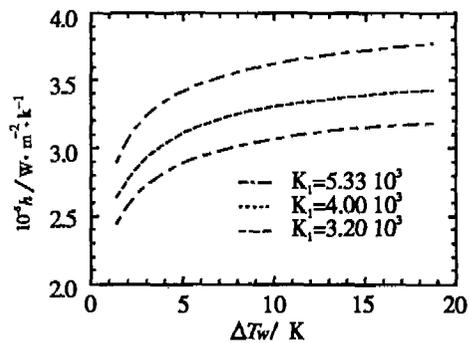


图6 不同 k_1 值时对应的凝结换热系数曲线

4 结 论

1) 圆形径向梯度表面能材料表面的平均滴状凝结换热系数随过冷度增加而略有增加;

2) 最小液滴半径减小,平均表面滴状凝结换热系数会增大;

3) 凝结工质的物性对平均表面滴状凝结换热系数的影响较大,随着凝结工质汽化潜热的增大和表面张力的减小,凝结换热系数增加;

4) 接触角梯度越大,表面滴状凝结换热系数也越大.

参考文献:

[1] ELWING H, WELIN A, ASKENDAL A P. A wettability gradient method for studies of macromolecular interactions at the liquid solid interface [J]. *J. Colloid Interface Sci.*,

1987, 16(2):119-203.

[2] CAREY V P. *Liquid - Vapor Phase - Change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment* [M]. Washington, D. C.: Hemisphere Pub. Corp., 1992.

[3] LEFEVRE E J, ROSE F W. *Theory of Dropwise Condensation. Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf* [Z]. Chicago: AIChE, 1966.

[4] FATICA N, KATZ D L. Dropwise condensation[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1949,45(11):661-674.

[5] WU H W, MAA L R. On the heat transfer in dropwise condensation [J]. *Chemical Engineering journal.*, 1976, 12: 225-231.

[6] ZHAO H, DANIEL B. From Droplet Growth to Film Growth on A Heterogeneous Surface: Condensation Associated with a Wettability Gradient[J]. *Langmuir*, 1995, 11:627-63.

Dropwise Condensation Heat Transfer Coefficient on the Horizontal Circular Surface with Radial Gradient Surface Energy

GU Yang-biao, LIAO Qiang, ZHU Xun, WANG Hong

(Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A theoretical model is developed for the dropwise condensation heat transfer on the horizontal circular surface with radial gradient surface energy based on the heat transfer model of individual condensate drop and the size distribution model of condensate drop on homogeneous condensation surface. The effect of variation of contact angle on the gradient surface on condensation heat transfer and condensate drop size distribution is taken account of in this model. The theoretical calculation method was obtained to predict the dropwise condensation heat transfer coefficient on the horizontal circular surface with radial gradient surface energy under various wall subcooled temperature, contact angle profile on wall surface, and working fluid. The effects of surface energy gradient, wall subcooled temperature, and thermophysical properties of condensate on the condensation heat transfer are discussed respectively. The calculation results show that the condensation heat transfer coefficient increases slightly with the increase of wall subcooled temperature. As latent heat and surface tension increasing, the condensation heat transfer coefficient increases. A larger surface energy gradient induces a larger condensation heat transfer coefficient.

Key words: horizontal circular surface with radial gradient surface energy, dropwise condensation heat transfer, size distribution of condensate drop

(编辑 陈移峰)