薄膜区传热传质蒸发对毛细蒸发弯月面稳定性的影响

黄晓明[1]，吴江权[1]，刘 伟[1]，郁伯铭[2]
(1. 华中科技大学能源与动力工程学院，武汉 430074; 2. 华中科技大学物理学院，武汉 430074)

摘 要: 蒸发毛细弯液面的稳定性对两相传热装置的运行有着重要意义。由于弯液面的蒸发 50% 以上发生在一个微小区域，即延展薄膜区，可以预期不稳定性将最先产生于这一区域。为对蒸发弯月面的稳定特性进行机理性研究，首次提出一种将线性稳定性分析与薄膜区传热传质数值分析巧妙结合的研究方法。该方法通过传热传质数值分析获得能够反映弯月面稳定特性的特征膜厚和长度，并将其应用于线性稳定性判据以获得弯月面的临界过热度。分析表明，两种方法的结合可以有效揭示蒸发弯月面的稳定机制，特别是毛细管半径、弯液面温度和工质的热物性对弯月面稳定性的影响。与相关文献报道的实验结果比较，证实了该方法的有效性。

关键词: 毛细蒸发弯液面; 线性稳定性分析; 传热传质; 数值分析
中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2013)06-0873-08
DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.06.019

Effects of Heat And Mass Transfer of Thin Film Region on the Stability of the Capillary Evaporating Meniscus

HUANG Xiao-ming[1], WU Jiang-quan[1], LIU Wei[1], YU Bo-ming
(1. School of Energy and Power Engineering of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The stability of heated and evaporating capillary meniscus is crucially important for the operation of capillary pumped heat transfer devices. Since more than 50% of the mass transfer by evaporation occurs on a very small region, so-called thin film region, it is expected that the instability will arise from this region. To explain the stability mechanism of the meniscus effectively, a new method that can skillfully combine the linear stability analysis with the numerical analysis of the meniscus is proposed in this paper. Numerical analysis is executed to acquire the characteristic thickness and length of thin film region, and a linear stability criteria is calculated by using these two characteristic dimensions. By use of the combination of these two analysis methods, the stability mechanism of an evaporating meniscus can be clearly disclosed, especially about the effect of the temperature of the meniscus, thermophysical properties of the working fluid and the dimensions of the capillary tube on the stability. The effectiveness of this method can be approved by the experimental results of some published references.

Key words: Capillary evaporating meniscus; Linear stability analysis; Heat and mass transfer; Numerical analysis

0 引 言

蒸发毛细弯月面的稳定性研究对微通道热管(Microchannel Heat Pipe, MHP)和回路热管(Loop Heat Pipe, LHP)等两相毛细热传输装置的运行、沸腾传热过程的换热强化等有着重要意义。

蒸发毛细弯月面 50% 的相变发生在气-固-液三相接触线附近的延展弯月面上。在这一微小区

收稿日期: 2012-07-10; **修回日期:** 2013-01-01
基金项目: 国家自然科学基金(51106057); 华中科技大学自主创新基金(2011QN150)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

域内，热流通过固体壁面传至液体而使大量液体蒸发。由于液膜厚度非常薄，界面热流可以达到 $10^7 W/m^2$ [1]。强烈的质量和能量交换，会产生许多与静态等温界面不同的微观效应，特别是在弯月面的稳定性方面。失去稳定性的液面，可能发生液膜震荡、波动、局部干涸或烧干等现象，气液界面传输能力下降。为此，许多学者对这一微小区域传输特性和稳定性展开了研究[2-4]。

Burelbach[5]通过对平面蒸发薄膜的动力学分析，建立了平面蒸发薄膜的长波演化方程(long-wave evolution equations)。在他的基础上，不少研究者对蒸发薄膜的非线性动态演化过程进行了研究，发现了薄膜非稳定演变过程中的一些重要现象。S. W. Joo[6]对倾斜加热平板表面薄膜的液膜厚度发展规律和壁面干涸规律进行了分析。D. Pratt[7]对毛细管和一个类似 CPL 的简化传热回路(Heat Transfer Loop)内汽液蒸发弯月面的稳定性进行研究，获得界面失稳的临界过热度。Buffon 等[8]采用先进的 PIV 技术和红外测温技术对蒸发弯月面的热毛细对流引起的不稳定进行了系统研究。以上研究表明，蒸发弯液面稳定性已经引起了越来越多的学者的关注。

黄晓明[9]等在全面考虑了固体分子范德瓦尔长程作用力、蒸汽反冲作用、蒸发质量损失作用及热毛细作用后，建立了毛细蒸发弯液面薄膜区的演化方程，并通过线性稳定性分析，获得仅与系统固有参数有关的稳定判据。该判据中各变量完全由系统特征参数和工质的物性参数构成，对实验研究和系统设计都具有很好的实际指导意义。但在特征参数的获取方面，仅采用了量级分析的方法，因而无法对界面的稳定性机理进行更好的解释。

本文将基于弯月面蒸发传热传质特性的数值研究，获取薄膜区的特征参数。并将它们应用于弯月面线性稳定性准则，来分析各种条件下弯月面的稳定特性。

1 蒸发弯月面线性稳定性分析

考虑毛细圆管内处于稳定蒸发的弯液面，如图1所示。根据各部分蒸发机制的不同，可以将其分为三个部分[14]：(1) 固有弯液面区(intrinsic meniscus region)，该区域曲率几乎不变，液体的运动主要由毛细力控制；(2) 薄膜区(thin film region)，由毛细力和脱离压力共同控制；(3) 吸附区(adsorbed region)，由分子力控制，蒸发完全被抑制。其中薄膜区是温度梯度变化最大，也是质量与能量传输机制最为复杂的区域。

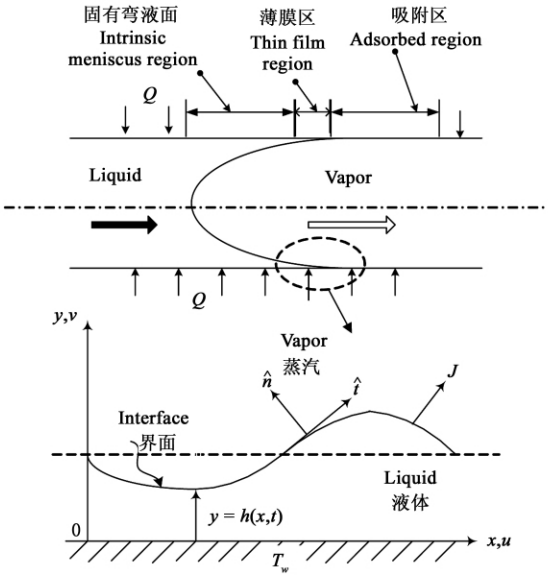

图1 蒸发弯液面薄膜区稳定分析物理模型

Fig. 1 Schematic of evaporation meniscus within a cylindrical capillary pore

由图1可以看出蒸发薄膜的气液界面实际上是一种复杂作用下的自由界面。根据文献[16]的量级分析，当毛细管半径 R 大于 100nm 时，直角坐标带来的差异即可忽略。因此本文考虑了二维直角坐标。界面方程可表示为 $y = h(x,t)$，其中，h 表示液膜的厚度，x、y 分别为水平和垂直方向的几何坐标，t 为时间坐标。需要强调的是图1中坐标系的原点为薄膜区在壁面处的起始位置。在蒸发和扰动的作用下，界面由静态位置(图1局部放大部分的虚线)开始随时间和空间位置而变化。处于蒸发状态的薄膜，气液界面存在着质量损失，动量传输，以及能量消耗。由于蒸汽密度、动力黏度以及导热系数远小于液体，因此忽略了蒸汽侧质量、黏性扩散以及热传导的影响，即采用单侧模型(one-sided model)[5]。基于薄膜润滑理论(lubrication theory)，通过量级简化后，获得零阶系统方程组，进而推导出关于自由界面的演化方程。具体推导过程见文献[9]，这里我们直接给出液膜膜厚 h 的演化方程：

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\tilde{h}_\tau = -\bar{E}(\tilde{h}+K)^{-1} + \left(\frac{\hat{\Pi}_0\tilde{h}_\xi}{h}\right)_\xi - \left(\frac{1}{3}S\tilde{h}^3\tilde{h}_{\xi\xi\xi}\right)_\xi - \frac{2}{3}\bar{E}^2D^{-1}\left((\tilde{h}+K)^{-3}\tilde{h}^3\tilde{h}_\xi\right)_\xi - \left[\frac{1}{2}\frac{Ma}{\mathrm{Pr}}[(\tilde{h}+K)^{-1}\tilde{h}]_\xi\tilde{h}^2\right]_\xi \quad (1)$$

上式中，$\tilde{h}$ 为小扰动后薄膜各处无量纲厚度，$\tilde{h} = h/h_0$，ξ，η 分别为 x 和 y 方向的无量纲坐标，其定义如下:

$$\xi = x/x_c;\ \eta = y/h_0$$

h_0 和 x_c 分别为 x，y 方向上的特征尺寸。下标 ξ、η 和 τ 分别表示变量对 ξ、η 以及对无量纲时间 τ 的导数。$\bar{E}$、D、S、$\hat{\Pi}$、Ma、Pr 为无量纲参数群，分别表示修正蒸发数、密度比、无量纲表面张力、无量纲 Hamaker 常数、Marangoni 数以及 Prandtl 数，其表达式如下:

$$\bar{E} = EX = \frac{k\Delta T}{\rho\nu h_{fg}}\cdot\frac{h_0}{x_c};\ D = \frac{\rho_v}{\rho};\ S = \frac{\sigma_0 h_0^3}{\rho\nu^2 x_c};$$

$$\hat{\Pi} = \frac{\bar{A}}{\rho\nu^2 h_0};\ Ma = \frac{c_p\gamma\Delta T h_0^2}{x_c\nu k};\ P_r = \frac{\mu c_p}{k}$$

其中 k 为液体的导热系数，c_P 为液体的定压比热容，ν 为液体粘性扩散系数，h_{fg} 为汽化潜热。假定表面张力随温度线性变化，σ_0 和 γ 分别为其线性表达式的常数和系数，即 $\sigma = \sigma_0 - \gamma T$。$\bar{A}$ 为修正 Hamaker 常数，可由 Hamaker 常数 A 获得: $\bar{A} = A/6\pi$。

由演化方程式(1) 可以看出，薄膜的稳定性由几个重要效应控制，包括: ① 蒸发引起的质量损失; ② 蒸气离开界面时产生的反冲作用; ③ 由于固体和液体之间的分子作用力引起的脱离压力对界面的作用; ④ 由于表面张力引起的毛细力对界面的作用; ⑤ 由于界面温度梯度引起的热毛细作用。其中①、②和④项会加剧界面失稳，而③和⑤却是抑制界面失稳的主要作用。

对式(1) 应用小扰动理论，并基于线性稳定性分析，可获得毛细弯月面的线性稳定性准则。恢复准则式的量纲后可得:

$$\Delta T < \frac{8\bar{A}x_c}{\gamma h_0^3} \quad (2)$$

准则式(2) 中的 ΔT 表征了薄膜区界面的最大过热度。由于固有弯月面区液膜较厚，蒸发很少，温度接近蒸汽饱和温度 T_v，而吸附区液膜极薄，界面温度接近壁温 T_w，因此可以认为 $\Delta T = T_w - T_v$。ΔT 满足准则式(2) 时，由线性稳定性分析判断，弯月面可以维持固有稳定性，即一切小扰动对弯液面的影响将被抑制，不会出现被放大的小扰动。当准则式(2) 不能被满足，即

$$\Delta T \geqslant \Delta T_{cr} = \frac{8\bar{A}x_c}{\gamma h_0^3}$$

弯液面将是条件稳定。是否失稳与扰动的波数有关，即系统微小变化有可能会导致界面失稳。ΔT_{cr} 被定义为弯月面固有稳定的临界过热度。由上述分析可知，ΔT_{cr} 越大，界面稳定性越好。准则式(2) 中也隐含了一些重要假设，例如蒸发数 $\bar{E}$ 与反映热毛细对流的 Marangoni 数和反映分子长程作用力的无量纲 Hamaker 数相比，应具有较小的量级。

ΔT_{cr} 的值与特征膜厚 h_0 和特征长度 x_c 有很大关系。文献[7,9] 都采用了量级分析的方法，根据薄膜区毛细压力与脱离压力相当、薄膜区末端曲率接近 $1/r$，给出液膜厚度和薄膜区长度的大致量级，由此获得临界过热度的范围。这种分析方法可以反映弯月面稳定性的一定变化趋势，与实验研究结果在趋势上也吻合较好，但还存在很大的局限性: (1) 界面稳定性主要取决于弯月面温度和毛细通道半径，而且半径的影响几乎是线性的，这与一些研究结果(特别是大半径下) 不符; (2) 无法解释一些工质的稳定性，如甲醇，远高于准则式估算值。

2　薄膜区传热传质特性分析

Derjaguin[13] 和 Wayner[14] 基于脱离压力概念发展起来的薄膜蒸发换热模型被视为这一研究领域的基础理论。该模型应用广义 Young-Laplace 方程、动力学理论和 Kelvin-Clapeyron 模型，获得一个描述延展弯月面轮廓的四阶常微分方程。

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\left[\frac{\sigma\delta'''}{(1+\delta^2)^{1.5}} - \frac{3\sigma\delta\delta''^2}{(1+\delta^2)^{2.5}} - \frac{3A\delta'}{\delta^4}\right]\frac{\delta^3}{3\nu}\right) = -m'' \quad (3)$$

式中: δ 为稳定蒸发状态下的薄膜区液膜厚度，δ' 和 δ'' 则分别为液膜厚度沿长度方向的一阶和二阶导数，m'' 为界面蒸发质量流率。

Schrage[15] 在对界面蒸发质量流率进行研究时，基于分子运动论提出界面蒸发流率的计算模型。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$m'' = \frac{2\hat{\sigma}}{2-\hat{\sigma}}\left(\frac{\bar{M}}{2\pi R_g}\right)^{1/2}\left(\frac{P_{v_\mathrm{equ}}(T_{lv})}{T_{lv}^{1/2}} - \frac{P_v}{T_v^{1/2}}\right) \quad (4)$$

式中，$\hat{\sigma}$ 分配系数，$\bar{M}$ 为液体的分子重量，R_g 为通用气体常数，T_{lv} 为气液界面的界面温度，T_v、P_v 分别为汽相的温度和压力。P_{v_equ} 为蒸汽与液体的相平衡蒸汽压力。

$$P_{v_\mathrm{equ}}(T_{lv}) = P_{\mathrm{sat}}(T_{lv})\exp\left[\frac{P_{v_\mathrm{equ}}(T_{lv}) - P_{\mathrm{sat}}(T_{lv}) - (P_d + P_c)}{\rho_l T_{lv} R_g / M}\right]$$

其中，

$$P_{\mathrm{sat}}(T_{lv}) = P_{\mathrm{sat_ref}}(T_{\mathrm{sat_ref}})\exp\left[\frac{Mh_{fg}}{R_g}\left(\frac{1}{T_{\mathrm{sat_ref}}} - \frac{1}{T_{lv}}\right)\right]$$

薄液膜界面温度 T_{lv}，可通过液膜局部热平衡建立于 m'' 关联的关系式进行求解:

$$T_{lv} = -(m''h_{fg}/k_l)\delta + T_w \quad (5)$$

采用 Runge-Kutta 法对式(3)～(5)进行联立求解，可获得薄膜区的界面轮廓、压力、蒸发流率以及温度分布，如图 2 所示。为保持计算精度，取计算步长为 1nm。

图 2 为不同液膜过热度下毛细弯月面薄膜区的各个变量分布特征。图 2(a)显示当弯月面过热度增大时，为抽吸更多液体来维持稳定蒸发，界面曲率变化明显增加，在宏观上表现为弯月面的接触角增大。这一自调节机制与 Pratt[7] 在界面稳定性实验时所观察到的情况完全一致。图 2(a)显示，过热度增大时，弯月面的自调节机制使薄膜区液膜增厚加速，这使得能够抑制界面失稳的脱离压力 P_d 会快速减小; 图 2(b)显示，过热度增长，界面蒸发质量流率急剧增大，此时界面的蒸发质量损失、蒸发反冲均增大; 图 2(c)则显示高热流下界面局部温度梯度沿 x 方向变化非常大，因此热毛细应力作用会增强。由图 2 的分析可知，处于蒸发条件的弯月面与等温静态弯月面之间存在较大差异，高热流密度会使蒸发界面处于易失稳的状态。这一结论与 Pratt[7] 的实验研究完全吻合。

以上分析表明，薄膜区传热传质数值分析对界面稳定性变化可以进行有效的机理解释。采用数值分析的方法，可以揭示实验研究中因尺度微小而无法被揭示出的各种微观效应的变化机理。

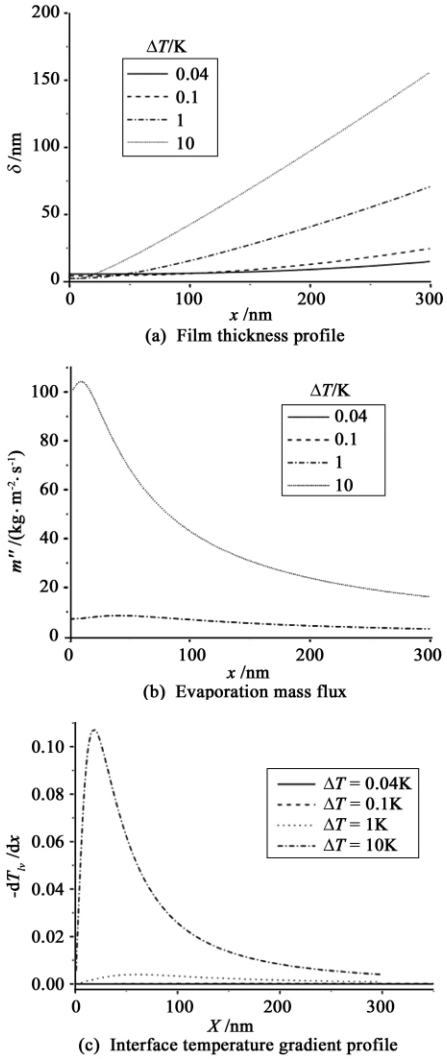

图 2 不同过热度条件对薄膜区蒸发传热的影响

Fig. 2 The effect of superheat on the evaporating characteristic of the meniscus (R = 2500nm, T_v = 320K)

3 稳定性分析

3.1 特征膜厚和特征长度的确定方法

由准则式(2)可推断，薄膜区特征尺寸对判断界面稳定性有着重要影响。为将薄膜传热的各种机制更好地反映在稳定性准则中，本文将应用薄膜区传热传质模型，采用数值分析的方法，对各种蒸发条件下的弯月面薄膜传热过程进行分析，以确定薄膜区特征膜厚和特征长度。特征膜厚和特征长度的选取以能够反映界面不稳定特性为原则。

特征长度 x_c 通常选取为薄膜区长度，但现有文献中对薄膜区结束点的确定方法并不统一。一些文

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

献认为应选取固有曲率近似等于通道半径倒数的地方，亦有文献认为应选取 P_d 影响几乎可以忽略的地方。本文认为薄膜区脱离压力是对界面稳定性有着重要作用，因此选取 P_d 足够小处为薄膜区终点，在计算中定义为 $P_d = 1/2000P_{d0}$ 处。由图 3 可以看出过热度较大时，x_c 大大缩短，由准则式(2)可知，界面稳定性也会随之下降。由此可见，这一特征长度的选取是可以有效反映界面稳定性变化的。

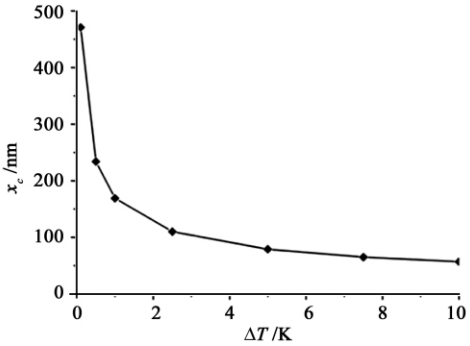

图 3　不同过热度下薄膜区长度变化

Fig. 3　Length of the thin film region with different super heat

反映界面稳定性的特征膜厚 h_0 的选取可以有三种方法。一种是选取最大蒸发流率处的膜厚 h_{0_m}，这里是蒸汽反冲作用及蒸发质量损失最强的地方，可以突出反映蒸发强弱对稳定性的影响。第二种是选取最大温度梯度处的膜厚 h_{0_T}，此处是热毛细对流最大的地方，可以突出反映热毛细作用对稳定性的影响。第三种是选取平均膜厚 h_{0_a}，可以反映薄膜区蒸发综合传热特性对膜厚的影响。基于三种特征膜厚计算得到的不同弯月面温度 T_v 下的临界过热度如图 4 所示。

由图 4 可见，基于 h_{0_m} 获得的临界过热度明显要高于其它两种膜厚计算结果，其量级和趋势与相关实验结果相比较都相差很远。其原因可通过图 5(a)来解释。当界面蒸发温度升高时，蒸发质量流率增大，蒸汽反冲效应和蒸发质量损失对界面的影响也随之增大。但由于蒸发最大的位置在薄膜区非常前端的位置，而且弯月面温度越高，这一位置越靠近吸附区。因此，蒸发最大的地方，维持液膜稳定的脱离压力作用也较大，并非界面最易发生失稳的地方，基于蒸发质量流率获得的临界过热度也就容易被高估。实际上，液膜蒸发非常大时，蒸汽损失而引

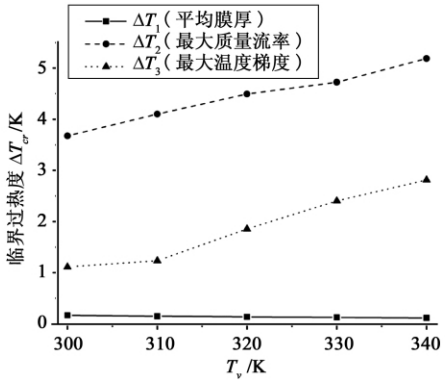

图 4　基于不同 h_0 计算的临界过热度变化

Fig. 4　Critical superheat variation with temperature of meniscus based on different h_0

(Pentane, R = 2500nm, ΔT = 1K)

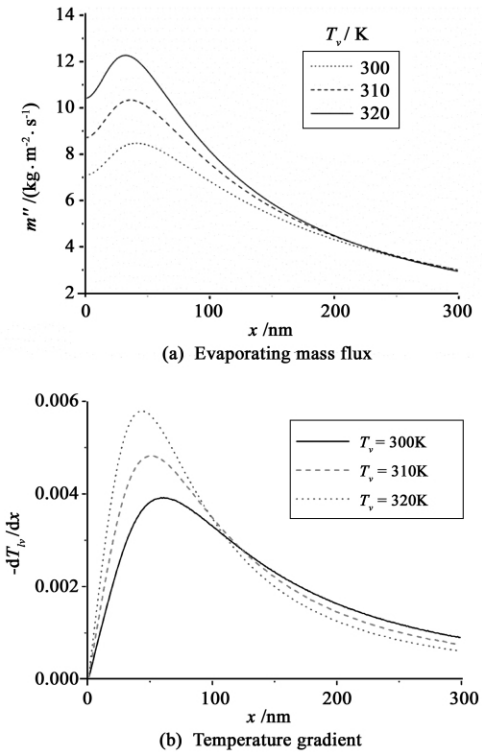

图 5　蒸汽温度对薄膜区蒸发传热的影响

Fig. 5　The effect of meniscus temperature on the evaporating characteristic of the thin film region

(Pentane, R = 2500nm, ΔT = 1K)

发的烧干现象会对稳定性造成很大影响，只是线性稳定性分析对这一作用的反映存在局限。

图 4 中还可以看出，基于 h_{0_T} 得到的临界过热度也存在同样的问题。观察图 5(b)可以看出，温度梯度最大的地方逐渐向薄膜前端移动。一方面温度梯度

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的增大使热毛细流动增强，不利于界面稳定；另一方面，这一影响作用的位置处脱离压力影响也变大，抑制界面失稳的影响也增大。因此，仅考虑热毛细作用最大的薄膜厚度，也会造成界面稳定性被高估。

基于平均膜厚 h_{0_a} 得到的临界过热度在量级上和趋势上都明显较合理。在分析半径和物性等因素对弯月面稳定性的影响时，三种膜厚的分析结果与图4中反映的趋势相同，在此就不一一赘述。由此可见，薄膜区的稳定性是一种综合作用，采用平均膜厚是最为合理的特征膜厚选取方法。

3.2 蒸汽温度的影响

图6给出了在不同弯月面温度下基于平均膜厚 h_{0_a} 计算的薄膜区临界过热度。可以看出，临界过热度随弯月面温度的上升而下降，且这种下降几乎是线性的。通过对薄膜区传热传质特性的分析中可以了解，当弯月面温度升高时，工质的物性发生变化，蒸发变得更容易。随着蒸发的加强，各种不利于稳定的作用，如蒸汽反冲和热毛细应力等，都会加剧，弯月面的稳定性也就随之降低。临界过热度的范围大约为0.1～0.2K，与Pratt实验测定值在量级上吻合得很好。尽管这一温差在数值上显得非常小，但实际上，由于薄膜区的长度仅为几百纳米，因此薄膜区实际上承受了 10^5K/m 的温度变化。

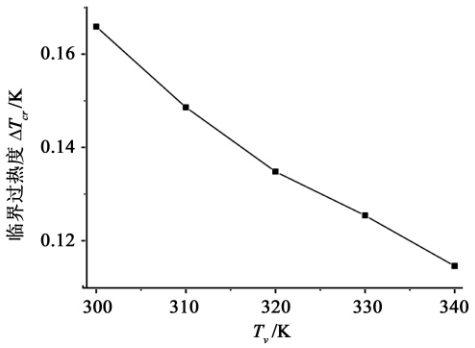

图6 基于 h_{0_a} 的临界过热度随弯月面温度变化趋势

Fig. 6 Critical superheat variant with temperature of meniscus basing on average film thickness (Pentane, R = 2500nm, ΔT = 1K)

3.3 半径的影响

图7给出了基于 h_{0_a} 得到的临界过热度随通道半径的变化。图中三条曲线分别代表了弱蒸发（ΔT = 1K）、中等蒸发（ΔT = 5K）和强蒸发（ΔT = 10K）条件。可以看出，弱蒸发条件下临界过热度受半径的影响最大，特别是在半径较小时，呈线性下降的趋势。但当半径大于25000nm时，半径对稳定性几乎不再有影响。当弯月面处于较大的蒸发速率条件下时（ΔT = 5K），通道半径很快就对弯月面稳定性没有影响了。当热流密度继续增大（ΔT = 10K），弯月面本身的稳定性大大降低，半径的影响就显得更小了。Pratt[7]和Buffone[8]的实验中，热流密度都不高，对应了图中过热度为1K时的曲线，因此测得弯月面稳定性随半径变化明显。

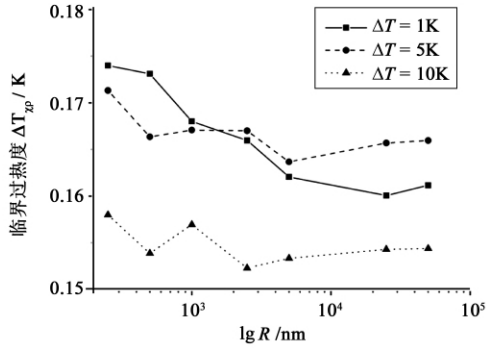

图7 不同蒸发条件下临界过热度随半径的变化

Fig. 7 Critical superheat variation with tube radius at different evaporating condition (Pentane, T_v = 300K)

3.4 物性的影响

图8给出了不同过热下各种物质的临界过热度。可以看出，在通道半径和弯月面温度均相等的条件下，各种物质固有稳定的临界过热度还是会有差别。甲醇在各种过热度下稳定性都最好，氨其次，戊烷最差。这一结论可由Buffone的实验结果验证。Buffone在文献中[8]指出，实验观察到的甲醇的临界过热度要远高于理论预测值。

从物性参数比较来看，戊烷和氨相对甲醇来说都属于挥发性好的工质。图9给出了三种物质薄膜蒸发传热传质特性。从图9(a)可以看出，同样条件下，甲醇界面蒸发质量流率比其它两种工质要小得多，而且局部峰值非常不明显。从图9(b)给出的温度梯度变化比较中也可以看出，甲醇的温度梯度变化较其它两种工质要弱很多。这可以从机理上解释为什么同样条件下，甲醇的稳定性条件要好于其它两种物质。

戊烷和氨在物性的其它方面也有很大差异，特别是二者的表面张力特性和汽化潜热。戊烷的表面

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

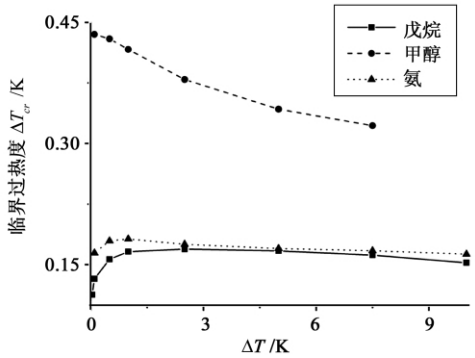

图 8　不同过热度下物性对临界过热度的影响

Fig. 8　Critical superheat at variant superheat for different working fluid (R = 2500nm, T_v = 300K)

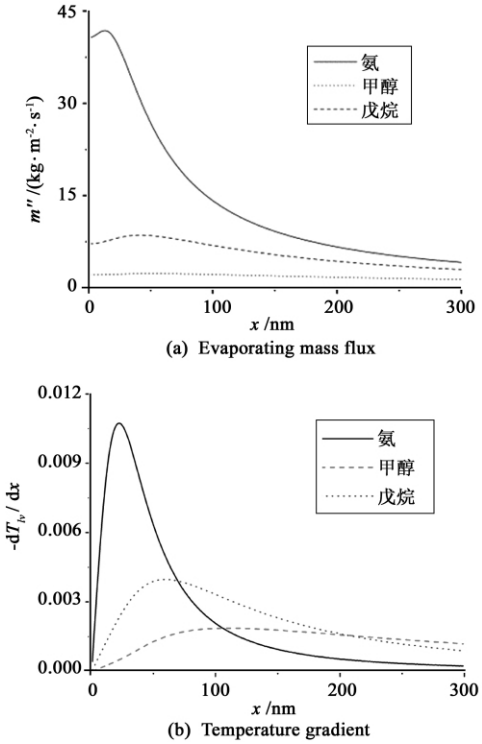

图 9　不同物质薄膜区蒸发传热特性

Fig. 9　Evaporating characteristic of the thin film region for different working fluid (T_v = 300K, ΔT = 1K)

张力随温度变化要小于氨，因此温度梯度的变化较小，所产生的热毛细应力也较小。但由于氨的蒸发最强和温度梯度最大的地方都非常靠近薄膜区前端，因此脱离压力的作用还非常明显，综合效果看二者在稳定性方面的差异非常接近，特别是中等蒸发条件下。

4　结　论

为更好地从机理上解释各种因素对蒸发弯月面稳定性的研究，本文采用了线性稳定性准则式与薄膜传热传质数值分析相结合的方法。通过对界面蒸发温度、通道半径和物性等重要影响因素在蒸发弯月面稳定性方面影响的分析，可以得到如下结论:

(1) 固有稳定性准则可以有效地对弯月面稳定性进行判定。弯月面温度升高、通道几何半径增长会造成界面稳定性的下降; 工质的挥发性界面稳定性也有较大影响，挥发性越小，界面稳定性越好。

(2) 基于薄膜区传热传质数值分析来获得薄膜区特征尺寸的方法，不仅可以获得量化的临界过热度，还有利于对弯月面失稳的机理进行分析。

(3) 线性稳定性的局限性也影响了稳定判据的适用性。由于忽略了非线性信息，对液膜烧干等失稳现象无法判断。

参　考　文　献

[1] Holm F W, Goplen S P. Heat transfer in the meniscus thin-film transition region [J]. ASME. Heat Transfer, 1979, 101: 543 – 547.

[2] Maroo S C, Chung J N. Heat transfer charac-teristics and pressure variation in a nanoscale evaporating meniscus [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 3335 – 3345.

[3] Dhavaleswarapu H K, Murthy J Y, Garimella S V. Numerical investigation of an evaporating meniscus in a channel [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 2012, 55: 915 – 924.

[4] Harmand S, Sefiane K. Experimental and theoretical investigation of the evaporation and stability of a meniscus in a flat micro-channel [J]. Int. J. Thermal Sciences, 2011, 50: 1845 – 1852.

[5] Burelbach J P, Bankoff S G, Davis S H. Nonlinear stability of evaporating/condensing liquid films [J]. J. Fluid Mech, 1988, 195: 463 – 494.

[6] Joo S W, Daivs S H, Bankoff S G. Long-wave instabilities of heated falling films: two dimensional theory of uniform layers [J]. Journal of Fluid Mech, 1991, 230: 117 – 146.

[7] Pratt D M, Brown J R, Hallinan K P. Thermocapillary effects on the stability of a heated curved meniscus [J]. J. Heat Transfer, ASME, 1998, 120: 220 – 226.

[8] Buffone C, Sefiane K, Easson W. Marangoni-driven instability of an evaporating liquid-vapor interface [J]. Phys. Rev. E, 2005, 71, 056302.

[9] 黄晓明, Kaya T. 蒸发毛细弯液面基于线性稳定分析的一个显示稳定判据 [J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1487 – 1494.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[Huang Xiao-ming, Kaya T. A linear stability analysis based explicit stability criterion of capillary evaporating meniscus [J]. J. Astronautics, 2010, 31(5), 1487 – 1494.]

[10] Dasgupta S, Kim I Y, Wayner P C. Use of the Kelvin-Clapeyron equation to model an evaporateing curved microfilm [J]. Journal of Heat Transfer, 1994, 116: 1007 – 1015.

[11] Wang H, Garimella S V. Characteristics of an evaporating thin film in a microchannel [J]. Int. J Heat Mass Transfer, 2007, 50: 163 – 172.

[12] 黄晓明, Kaya T. 蒸发毛细弯液面热质传输特征及其稳定性分析[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 21 – 25. [Huang Xiao-ming, Kaya T. Heat and mass transfer characteristics and stability of capillary evaporating meniscus [J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2010, 44(3): 21 – 25.]

[13] Derjaguin B V. Definition of the concept of andrnagnitude of the disjoining pressure and its role in the statics and kinetics of thin layers of liquids [J]. Colloid J. USSR, 1955, 17: 191 – 197.

[14] Potash M, Wayner P C. Evaporation from a two-dimensional extended meniscus [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972, 15: 1851 – 1863.

[15] Schrage R W. A theoretical study of interface mass transfer [M]. Columbia University Press, New York, 1953.

[16] Hallinan K P, Chebaro H C, Kim S J, et al. Evaporation from an extended meniscus for non-isothermal interfacial conditions [J]. J. Thermo-physics and Heat Transfer, 1994, 8(4): 709 – 716.

作者简介:

黄晓明(1976 –), **女, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为流体传热传质理论及电子器件散热技术。**

通信地址: 湖北武汉华中科技大学能源与动力工程学院(430074)

电话: (027) 87542618 – 603

E-mail: xmhuang@hust.edu.cn

(编辑: 张宇平)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net