

蒸发毛细弯液面热质传输特征及其稳定性分析

黄晓明¹, TARIK Kaya²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 430074, 武汉; 2. 卡尔顿大学机械与航空航天工程学院, K1S5B6, 加拿大渥太华)

摘要: 在基于增广杨拉普拉斯方程及 Wayner 界面传质方程的蒸发毛细弯液面薄膜区热质传输模型的基础上, 利用数值计算分析方法, 讨论了系统运行参数、几何参数、工质物性参数对界面热质传输能力和稳定性的影响. 结果表明: 高过热度和高弯液面温度下, 弯液面具有较强的热传输能力, 但稳定性下降; 毛细通道几何参数对界面热质传输的影响较小, 而选择不同的工质其界面热质传输特征会有较大差异. 相对而言, 高热质传输能力对应了较低的界面稳定性, 故在毛细抽吸两相回路的设计中需综合考虑二者的关系.

关键词: 毛细抽吸两相装置; 蒸发弯液面; 传热传质

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0021-05

Heat and Mass Transfer Characteristics and Stability of Capillary Evaporating Meniscus

HUANG Xiaoming¹, TARIK Kaya²

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Mechanical and Aerospace Engineering Department of Carleton University, Ottawa, Ontario K1S5B6, Canada)

Abstract: From the augmented Young-Laplace equation and the Wayner's interface mass flux equation, the influence of system operating parameters, geometry parameters and working fluid properties on the heat and mass transfer of an evaporating meniscus, as well as its stability, was investigated using the numerical analysis on a thin-film heat and mass transfer model in the present work. The results show that the meniscus with higher superheat degree or higher meniscus temperature has a greater capability of heat and mass transfer, but its stability is lower. The influence of geometry parameters on interface heat and transfer is slight while the effect of working fluid properties is significant. Generally, higher heat and mass transfer capability occurs along with lower stability, which should be carefully considered in the design of a capillary pumped loop system.

Keywords: capillary pumped two phase devices; evaporating meniscus; heat and mass transfer

近年来,被动式毛细驱动两相回路热传输装置,例如毛细抽吸回路以及回路热管,因其具有传热强、热阻低、效率高、布置更灵活、传输距离长等特点,已成为多个热控制领域的研究热点.这类装置中,液体在置有微细通道的蒸发器中被加热并发生相变,系统利用相变潜热将热量传输至冷凝区.液体工质在系统内流动的驱动力来自毛细通道内形成的弯液面

提供的抽吸力,由热毛细两相回路装置的工作原理可知,蒸发毛细弯液面的热质传输能力及其稳定性对系统的稳定运行至关重要.

图1为毛细管内处于稳定蒸发的拓展弯液面的示意图.根据蒸发机制的不同,可以将其分为3部分^[1]:①吸附区,由分子力控制,蒸发完全被抑制;②薄膜区,由毛细力和脱离压力共同控制;③固有弯液

面区,该区域曲率几乎不变,液体的运动主要由毛细力控制.由于80%的蒸发是发生在薄膜区,所以该区域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,因此本文对毛细蒸发弯液面热质传输及稳定性的分析也集中在这一区域.

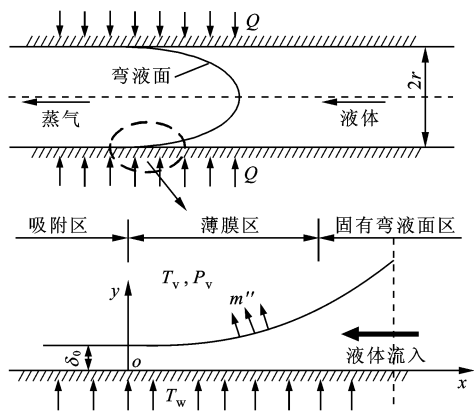


图1 毛细通道内蒸发弯液面分析示意图

Burelbach^[2]等对蒸发界面薄膜区的线性稳定性分析表明,薄膜稳定性由几个重要效应控制(所谓稳定性,是指处于稳定蒸发状态的界面在受到扰动影响后,重新恢复到稳定的能力),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项却能对抑制界面失稳起主要作用.

本文将由稳定蒸发毛细弯液面热质传输模型出发,利用数值分析,观察系统各重要参数,包括界面过热度 ΔT 、主弯液面温度 T_v 、毛细通道几何参数以及工质的物性参数对弯液面热质传输特征的影响,并进一步讨论其对稳定性的影响.

1 蒸发毛细弯液面热质传输模型

1.1 增广杨拉普拉斯方程

Wayner等^[3]在研究薄膜蒸发热质传输过程时,提出了增广杨拉普拉斯方程

$$P_v = P_d + P_c + P_l \quad (1)$$

式中: P_v 为气液界面蒸发侧的蒸气压力; P_d 为脱离压力; P_c 为毛细压力; P_l 为界面液体侧的压力.式(1)表明气液界面两侧蒸气和液体的压差由脱离压力和毛细力共同平衡.

对非极性工质,脱离压力与薄膜厚度 δ 有关,可以定义成下式

$$P_d = -A/\delta^3 \quad (2)$$

式中: A 为扩散常数, $6\pi A$ 为Hamerkar常数.

P_c 可表示为表面张力 σ 和曲率 K 的乘积,即

$$P_c = \sigma K, \quad K = \delta''(1 + \delta')^{-1.5} \quad (3)$$

式中: δ' 和 δ'' 分别为液膜厚度沿长度方向的一阶和二阶导数.由式(1)~(3)可以看出,若假定蒸气压力不变,液体压力可以表示成 δ 的函数.

1.2 薄膜液体流动的质量和动量平衡

根据薄膜流动的特征,在对液膜进行分析时可做出如下假设:

(1)流动为低雷诺数流动,对流项可忽略;

(2)薄膜的长度方向远大于厚度方向,润滑理论适用,即 y 方向上动量方程可忽略;

(3)壁面处为无滑移边界条件;

(4)气液界面处不考虑切应力.

薄膜内流动的动量方程及边界条件为

$$dP_l/dx = \mu d^2 u/dy^2 \quad (4)$$

$$y=0, \quad u=0 \quad (5)$$

$$y=\delta, \quad du/dy=0 \quad (6)$$

式中: x 、 y 分别为薄膜长度方向和厚度方向的坐标; u 为流体在 x 方向上的流动速度; μ 为流体动力黏性系数.坐标原点设为拓展液膜吸附区结束、薄膜区开始处,如图1所示.

由式(4)~(6)可得液体速度分布函数

$$u = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP_l}{dx} \right) \left(\frac{y^2}{2} - \delta y \right) \quad (7)$$

用 Γ 来表示 x 处的液体质量流率,则

$$\Gamma = \rho \int_0^\delta u dy = -\frac{\delta^3}{3\nu} \frac{dP_l}{dx} \quad (8)$$

式中: ν 为液体的运动黏性系数.

根据质量守恒,如图2所示,对薄膜流动有

$$m'' = -d\Gamma/dx \quad (9)$$

式(8)、(9)将局部液体压力梯度和局部界面质量流量联系起来,得到

$$\frac{d}{dx} \left(-\frac{\delta^3}{3\nu} \frac{dP_l}{dx} \right) = -m'' \quad (10)$$

将式(1)~(3)代入式(10),可得

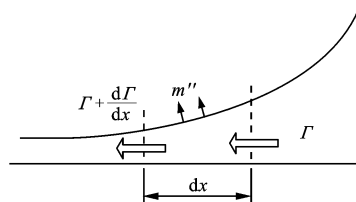


图2 薄膜流动质量守恒示意图

$$\frac{d}{dx} \left(\left[\frac{\delta'''}{(1+\delta')^{1.5}} - \frac{3\delta'\delta''^2}{(1+\delta')^{2.5}} - \frac{3A\delta'}{\delta^4} \right] \frac{\delta^3}{3\nu} \right) = -m'' \quad (11)$$

1.3 界面质量传输

Wayner 等^[3]应用分子运动论和广义克拉伯龙方程,将界面处的蒸发质量流量 m'' 表示成界面处的温度和压力跳跃的函数

$$m'' = a(T_i - T_v) + b(P_i - P_{v,s}) \quad (12)$$

式中: T_i 为气液界面温度; T_v 为界面蒸气侧的温度; $P_{v,s}$ 为工质在 T_v 下所对应的饱和压力. 通常认为蒸气侧压力和温度不变. 系数 a 和 b 定义如下

$$a = C(M/2\pi RT_i)^{1/2} (P_{v,s} M h_{fg} / RT_v T_i) \quad (13)$$

$$b = C(M/2\pi RT_i)^{1/2} (P_{v,s} V_1 / RT_i) \quad (14)$$

式中: C 是调节系数, 对非极性工质取 2.0; M 为工质千摩尔质量; R 为通用气体常数; h_{fg} 为工质在 T_i 下的蒸发潜热. 由式(12)可以看出, 界面处的局部蒸发流量是局部过热度 ($T_i - T_v$) 及 P_i 的函数.

1.4 薄膜液体流动的能量平衡

局部过热度可以通过对液膜的稳态热传输分析获得. 由于液膜的厚度足够小, 可以认为热量传递主要集中在厚度方向, 且对流换热的影响可忽略. 这样, 液膜流动的能量方程及其边界条件如下

$$d^2 T / dy^2 = 0 \quad (15)$$

$$y=0, \quad T=T_w \quad (16)$$

$$y=\delta, \quad -k_l dT/dy = h_{fg} m'' \quad (17)$$

由此可获得界面处温度分布

$$T_i = -(m'' h_{fg} / k_l) \delta + T_w \quad (18)$$

式中: T_w 为受热毛细管的壁温, $\Delta T = T_w - T_v$ 为液膜最大过热度; k_l 为液体导热系数.

联合求解式(11)、(12)和(18), 即可获得 δ 沿长度方向的分布函数, 并进而获得界面温度、压力梯度及蒸发流量的分布函数.

2 计算方法

式(11)是一个 4 阶常微分方程, 为获得 $\delta(x)$, 需要 4 个边界条件. 根据吸附区毛细压力为 0、蒸发流量为 0、温度接近 T_w , 可以由式(12)获得吸附区脱离压力 P_{d0} 和薄膜厚度 δ_0 . 这样, 在 $x=0$ 处的 4 个边界条件可以表示为

$$\delta = \delta_0; \quad \delta' = 0; \quad \delta'' = 0; \quad \delta''' = 0 \quad (19)$$

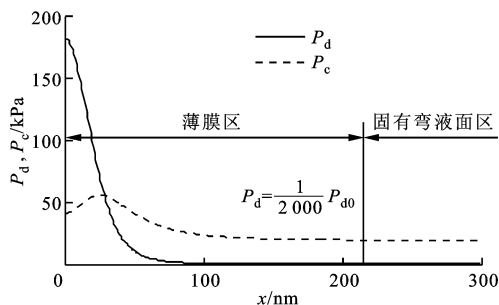
但实际上应用这 4 个初值边界条件进行数值求解, 获得的是方程的零奇异解. 因此, 文献[4-5]等都采用了以厚度 δ_1 (仅略大于 δ_0) 处的位置为计算初始点的方法. 通过数值计算结果比较可知, 在一定范围

内, δ_1 的取值对计算结果产生的影响非常小^[4]. 本文计算中选取 $\delta_1 = \delta_0 + 1(\text{nm})$. 对于完全润湿流体, 薄膜区前端的斜率变化接近 0, 因此 δ'_1 可以取一个微小值, 本文取 $\delta'_1 = 1 \times 10^{-11}$ (数值计算检验表明, 计算结果对该值不敏感). δ'_1 的值不能直接确定, 需给出一个猜测值. 该猜测值必须满足无穷远处 $\delta''(x \rightarrow \infty)$ 趋于定值. 对于完全润湿液体在毛细通道内的弯液面, 可近似认为其固有弯液面区的曲率等于毛细管半径 r 的倒数^[6]. 计算过程中发现, 方程的求解对 δ'_1 的猜测值非常敏感. 为快速找到接近的猜测值, 采用了牛顿-拉斐尔迭代技术. 根据 δ_1 、 δ'_1 及 δ''_1 的猜测值及 $dP_i/dx \approx 0$, 代入式(11)可直接得到 δ''_1 . 常微分方程(11)的数值求解, 应用了 4 阶 Runge-Kutta 法. 计算所采用的工质为戊烷和辛烷, 其物性可参考文献[7].

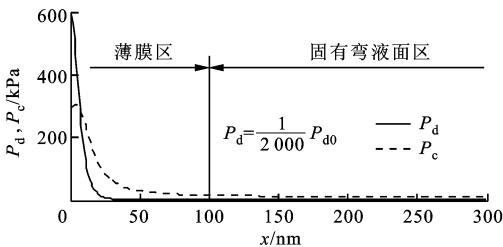
3 结果分析及讨论

3.1 过热度的影响

为维持稳定蒸发, 弯液面需要从主液区获得足够的液体补充, 而补充液体的驱动力来自液体压力梯度. 由图 3 可以看出, 在薄膜区的前段, 液体压力梯度完全由脱离压力的下降来提供. 当脱离压力下降到一定程度, 毛细压力也开始下降, 以提供液体压力梯度. 进入固有曲率区后, 液体压力梯度下降几乎为 0, 液体流动微弱, 因此该区域的蒸发也很微弱.



(a) $\Delta T = 1 \text{ K}$



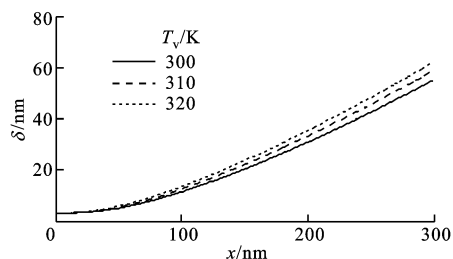
(b) $\Delta T = 10 \text{ K}$

图 3 薄膜区毛细压力和脱离压力沿长度方向的变化 ($T_v = 300 \text{ K}$, $r = 2\,500 \text{ nm}$)

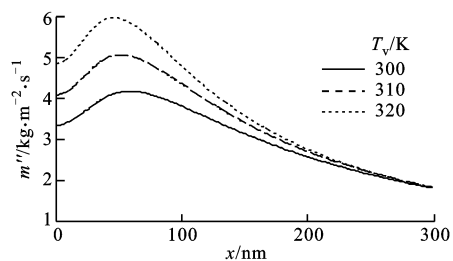
在过热度较小的情况下,如图 3a 所示,若将 P_d 下降至 $\frac{1}{2\,000} P_{d0}$ 处定义为薄膜区结束点,薄膜区的长度大约为 210 nm,而当过热度较大时,如图 3b 所示,为维持较高的蒸发量,脱离压力和毛细压力下降的速度都大大增加,在很短的距离 ($x < 100$ nm) 就由薄膜区过渡到固有弯液面区. 相对于低过热度的工况,高过热度下的液膜需在更狭窄的区域里维持更大的蒸发,液膜的稳定性下降,遇到扰动后,失稳的可能性也就更大.

3.2 液膜温度的影响

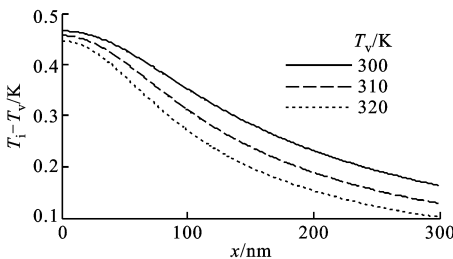
图 4 给出了界面上温度分布、蒸发质量流量和薄膜厚度随弯液面温度的变化. 弯液面温度是指非拓展弯液面的主弯液面区温度,该温度非常接近界面上方蒸气相温度. 可以看出,3 个界面参数中,受弯液面温度影响最大的是界面局部蒸发质量流量. 弯液面温度越高,薄膜区蒸发质量流量就越大,见图 4b,而薄膜区厚度受弯液面温度影响非常小,见图



(a) 薄膜厚度



(b) 蒸发质量流量



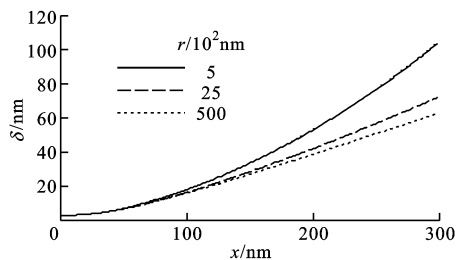
(c) 局部过热度

图 4 不同弯液面温度下薄膜区界面参数的分布
($r=2\,500$ nm, $\Delta T=1$ K)

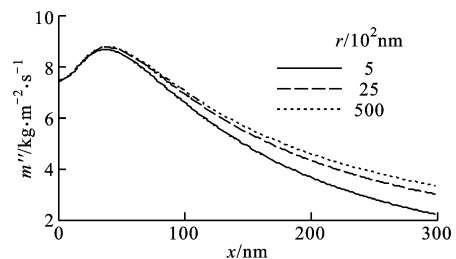
4a. 脱离压力和毛细压力都是薄膜厚度的函数,由此可推断,薄膜区脱离压力和毛细压力的变化特征受弯液面温度变化的影响很小. 蒸发质量流量的增大,导致与其相关的蒸发质量损失、蒸气反冲作用增大,薄膜稳定性减弱,这与线性稳定分析一致.

3.3 半径的影响

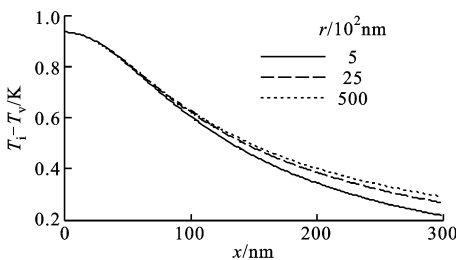
图 5 给出了毛细管半径变化对界面温度、蒸发质量流量和薄膜厚度分布的影响. 可以看出,半径对固有弯液面区域的影响大于其对薄膜区的影响. 3 个参数中受半径影响最大的是薄膜厚度,见图 5a,半径越大,弯液面显得越平坦. 较平坦的弯液面意味着薄膜区有较大的毛细压力梯度下降,从而使弯液面具有更好的液体抽吸力. 由图 5b 也可以看出,半径越大,弯液面的蒸发量越大,而图 5c 则表明,半径的增大也有利于拉平界面温度的分布. 因此,半径增大更有利于界面传输,但在增大到一定程度后,半径变化所带来的影响减弱.



(a) 薄膜厚度



(b) 蒸发质量流量



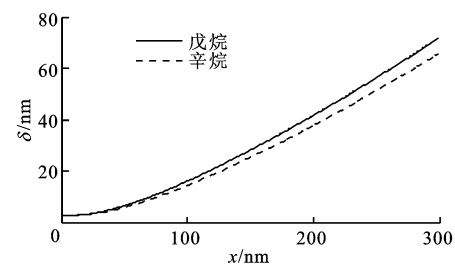
(c) 局部过热度

图 5 不同半径的毛细管中薄膜区界面参数的分布
($T_v=300$ K, $\Delta T=1$ K)

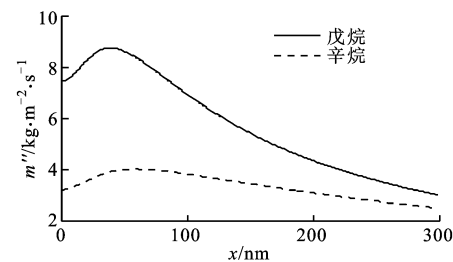
线性稳定分析结果表明^[2],毛细半径对界面稳定性有着较大的影响,半径越小的毛细管对扰动的抑制性越好。由图 5b 还可看出,半径减小对界面蒸发的确产生了一定抑制作用,但从图 5 的计算结果来看,半径对热质传输特征的影响小于温度的影响,这可能与线性分析忽略了一些非线性效应有关。

3.4 物性的影响

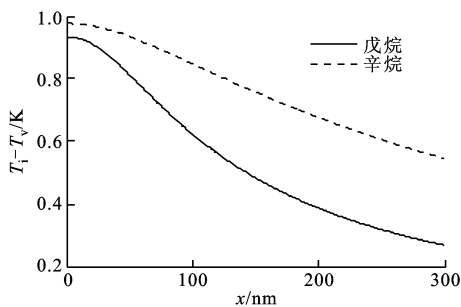
图 6 给出了戊烷和辛烷两种工质界面参数分布的计算结果。相对于辛烷,戊烷具有较高的汽化潜热



(a) 薄膜厚度



(b) 蒸发质量流量



(c) 局部过热度

图 6 不同工质对弯液面传输特征的影响
($T_v=300\text{ K}$, $r=2\ 500\text{ nm}$, $\Delta T=1\text{ K}$)

和较小的表面张力。在运行参数条件均相同的情况下,虽然薄膜厚度相差不大,但戊烷的最大蒸发质量流量是辛烷的两倍以上,界面温度曲线也陡峭许多。因此,从热质传输特征而言,戊烷比辛烷的性能要好得多。如果就界面稳定性而言,戊烷的高挥发性导致蒸气损失和蒸气反冲效应增强,且界面温度梯度较大,导致热毛细效应增强,而较低的表面张力又导致毛细作用较小,这些都不利于抑制扰动。

4 结 论

本文由蒸发毛细弯液面热质传输模型出发,利用数值计算分析方法,对薄膜热质传输特征及其稳定性受各种重要参数影响的情况进行了研究,得到的主要结论如下。

(1)高过热度(对应高热流)或高弯液面温度(对应高运行温度)的运行工况,使得弯液面具有较好的热质传输性能,但蒸发量加剧,会增大界面质量损失及蒸气反冲作用,不利于其稳定性,特别是在高过热度情况下。

(2)毛细管几何尺寸对蒸发毛细弯液面有一定影响,但不及热工况的影响大。总体来说毛细管小,对热传输性能有抑制,却对稳定性有利。

(3)具有高传输性能的工质,例如戊烷,其界面稳定性较弱。

由本文分析结果可以看出,热毛细抽吸装置高传输性与高稳定性之间存在着一定的矛盾。在设计过程中,考虑二者的优化组合,是提高其运行性能的关键因素之一。

参考文献:

- [1] HOLM F W, GOPLEN S P. Heat transfer in the meniscus thin film region[J]. ASME J of Heat Transfer, 1979, 101(2): 498-503.
- [2] BURELBACH J P, BANKOFF S G, DAVIS S H. Nonlinear stability of evaporating/condensing liquid films [J]. J Fluid Mech, 1988, 195: 463-494.
- [3] WAYNER P C Jr, KAO Y K. The interline heat transfer coefficient of an evaporating wetting film[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1976, 19(2): 487-492.
- [4] WANG H, GARIMELLA S V. Characteristics of an evaporating thin film in a microchannel[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2007, 50 (1/2): 163-172.
- [5] WEE S K, KIHM K D. Effects of the liquid polarity and the wall slip on the heat and mass transport characteristics of the micro-scale evaporating transition film [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48(2): 265-278.
- [6] SWANSON L W, HERDT G C. Model of the evaporating meniscus in a capillary tube[J]. ASME J of Heat Transfer, 1992, 114(2): 434-441.
- [7] LAID D A, KEHIAIAN H V. CRC handbook of thermophysical and thermochemical data[M]. New York, USA: CRC Press, 2007.

(编辑 荆树蓉)