

存在液膜的毛细蒸发过程研究*

何峰 王志军 黄义辉 叶鹏 王锦程†

(西北工业大学, 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

(2013年5月8日收到; 2013年9月15日收到修改稿)

采用水浴恒温蒸发方法研究了液膜存在时的毛细蒸发过程. 研究表明: 毛细蒸发过程中液/气界面符合黏性指延, 且不受蒸发速度及液膜状态的影响; 蒸发过程可分为剧烈减速、匀速蒸发、线性减速蒸发和边界效应四个阶段, 分别对应不同的液膜状态; 毛细蒸发的主要区域在毛细管端口液膜处, 工质由液体区流向端口蒸发区的过程中液膜起到了通道桥梁作用.

关键词: 毛细蒸发, 液/气界面, 蒸发阶段, 液膜

PACS: 64.70.F-, 47.55.nb, 47.15.gm

DOI: 10.7498/aps.62.246401

1 引言

毛细蒸发是发生在细小几何空间内的液/气相变过程, 广泛存在于自然界和工业生产过程中, 如植物的蒸腾作用、食品的烘干、衣物的干燥等. 毛细蒸发过程中的液/气相变具有高效的热量传输能力, 广泛应用于石油、化工、能源等领域^[1-3]. 电子冷却中的热管技术^[4]、毛细泵吸环路^[5]系统、以毛细力和蒸发作用力为驱动的微泵技术^[6]等都是毛细蒸发的具体应用. 此外, 多孔介质中也存在毛细蒸发现象. 因此, 了解毛细蒸发对研究多孔介质蒸发的蒸发阶段^[7]、流动与蒸发耦合^[8]等问题极为重要.

近年来, 毛细蒸发现象已经得到了广泛的研究, 并取得了显著成果. 现有研究多集中在液/气界面形态、蒸发区域、蒸发速度和蒸发中工质的流动现象等方面. 在液/气界面形态研究方面, Swanson和Herd^[9]基于弯月面为圆弧的假说建立了毛细蒸发弯月面的数学模型, 研究了弯月面形态与扩散系数、无量纲过热度及接触角的关系. 曲伟等^[10,11]也基于弯月面为圆的一部分的假说研究了液膜传热及其稳定性判据, 并探讨了毛细管半径和传热对弯月面形态的影响, 认为只有在贴近管壁处才有弯

月面的存在. 在蒸发区域方面, 很多研究者^[10-13]认为毛细蒸发过程中毛细管中的蒸发区域为连接弯月面与稳定液膜的过渡液膜区域. 通常情况下, 稳定液膜为纳米级, 对蒸发过程几乎没有影响. 然而在某些特殊情况下, 稳定液膜可以达到微米尺度, 从而改变了毛细管的蒸发区域. 文献[14,15]报道了当微米级的稳定液膜存在时, 蒸发区域在毛细管端口处, 毛细力把工质源源不断地吸引到毛细管端口而蒸发. 但Chauvet等^[15]实验中所用的毛细管为正方形横截面的毛细管, 实验时毛细管竖立于平台上, 重力将对液膜造成影响, 使液膜随弯月面的下降而下降, 最后导致蒸发速度不能达到稳定状态. 在蒸发动力学方面, 文献[15, 16]通过实验认为蒸发可以分为匀速、急速下降和逐渐消失三个阶段, 但他们未考虑重力对结果的影响. 徐升华等^[17,18]研究了工质与毛细管的接触角、毛细管的几何形状及尺寸对蒸发的影响. 针对毛细蒸发过程中工质的流动情况, 李永强等^[19,20]对圆形和柱形管内毛细流动的解析解做了计算研究. Buffone等^[21]利用微粒子图像速度仪对蒸发中工质在毛细管中的流动情况做了一系列实验, 指出蒸发冷却使毛细管内液/气界面处温度发生变化, 导致表面张力梯度的形成, 从而反作用于流动, 且流动的强弱程度与工质性质及毛细管尺寸相关. 在其他方面, 林

* 国家自然科学基金(批准号: 51101125)和国家大学生创新创业训练计划(批准号: 201210699054)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jchwang@nwpu.edu.cn

晓燕等^[22]模拟了X射线在椭圆毛细管中的传输;李玉德等^[23]用测X射线透过毛细管的折射率的方法测量了毛细管内壁的粗糙度;张向军等^[24]对毛细管的毛细力和管壁阻力等方面做了相应研究,探讨了湿度及毛细管几何形状对这两种力的影响。

上述研究表明,虽然对毛细蒸发现象进行了许多深入的研究,但微米级液膜的存在对毛细蒸发过程中的液/气界面形态、蒸发区域及蒸发动力学等方面的影响目前尚无定论,有必要对此问题进行更深入系统的研究,以澄清毛细蒸发方面的一些争议. 本文通过设计水浴恒温毛细蒸发实验,从液/气界面形态、蒸发动力学、蒸发区域三个方面研究液膜存在时的毛细蒸发过程及稳定液膜对毛细蒸发过程的影响. 本文中的稳定液膜为微米级液膜。

2 实验方法

温度、湿度及周围空气流动均是影响毛细蒸发的重要因素. 在本实验中采用无水乙醇作为工质,排除湿度对蒸发的影响. 实验在封闭的室内进行,空气流动对蒸发的影响极小,可以忽略. 实验时试样放在恒温观察平台上,恒温台的温度控制在23和19℃(室温为23℃),图1给出了恒温观察平台的示意图. 由于毛细管的体积相对于恒温台非常小,可以近似认为毛细管和工质的温度与恒温台的温度一致. 实验中水平放置大长宽比的扁平毛细管,这样可忽略重力对毛细蒸发的影响。

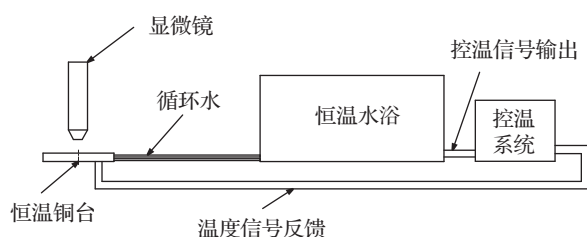


图1 恒温观察平台示意图

实验采用VibroCom公司生产的RT-5015大长宽比的扁平毛细管. 毛细管材质为石英玻璃,壁厚50 μm,横截面1000 μm×50 μm. 具体实验步骤如下: 第一步,截取5 cm长的毛细管,将其一端插入无水乙醇中,利用毛细作用使毛细管内充满工质,然后用硅橡胶将一端密封;第二步,观察实验现象. 重新切割未密封的一端,立即水平放置于水浴恒温观察平台上蒸发;用奥林巴斯公司生产的LEXT-4000型激光共聚焦显微镜录像并观察工质蒸发的速度

和液/气界面的形成与演化,同时,在液膜发生变化的关键阶段用显微镜拍照;第三步,观察蒸发过程中工质流动现象,在工质中均匀混入少量直径为1.78 μm的聚苯乙烯微球(体积分数约为0.2%)作为示踪粒子来观察工质在蒸发过程中的流动情况,同时利用显微镜录像并拍照。

3 结果与讨论

3.1 液/气界面形态

首先,分析蒸发过程中液/气界面形态随时间变化的规律. 由图2可见,随着蒸发时间的延长,毛细管中的工质沿毛细管壁逐渐形成一层相对于毛细管尺寸较薄的工质,这一层工质在蒸发的特定阶段具有稳定不变的性质,称为稳定液膜. 同时在液/气界面处形成弯月面,弯月面的形态随着蒸发的进行逐渐趋于稳定. 蒸发开始时工质在毛细管端口迅速蒸发,液/气界面向封闭端移动,但毛细管壁处的液/气界面移动速度为零,毛细管中心处液/气界面移动速度最快,形成如图2(a)所示的液/气界面形态. 蒸发继续进行,液/气界面继续向封闭端移动,逐渐形成稳定的弯月面形态,端口毛细管壁处的工质一直未消失,依附于毛细管壁形成稳定液膜,如图2(b)所示. 随着蒸发的进行,弯月面和液膜在一段时间内保持稳定状态,如图2(c)所示. 蒸发进行到一定时间后,端口处一侧的液膜变得越来越细,后来完全消失,如图2(d)和(e)所示,但此时弯月面的形态并无明显变化. 最后毛细管端口处另一边的液膜也逐渐消失,毛细管端口处不再有工质,如图2(f)和(g)所示,此时弯月面形态依然保持不变。

液体在毛细管中因受到表面张力而形成弯月面,关于弯月面的形态,Swanson和Herdt^[9]及黄晓明等^[14]认为其近似为圆的一部分,而曲伟等^[11]认为只有贴近毛细管壁的部分液膜存在弯月面,而在试管中心处的液/气界面并不符合弯月面形态,只有在毛细管尺寸较小(100 μm)的情况下毛细管中心处的液/气界面形态才是弯月面. 我们注意到本文所描述的液/气界面形态类似于由两种不同密度和黏性的流体相互作用而形成的Saffman-Taylor黏性指延形态. 毛细蒸发过程中,空气与无水乙醇在毛细管中以与Hele-Shaw槽相同的原理形成黏性指延^[25]. 图3所示为液/气界面形态示意图,黏性指延可用下式描述:

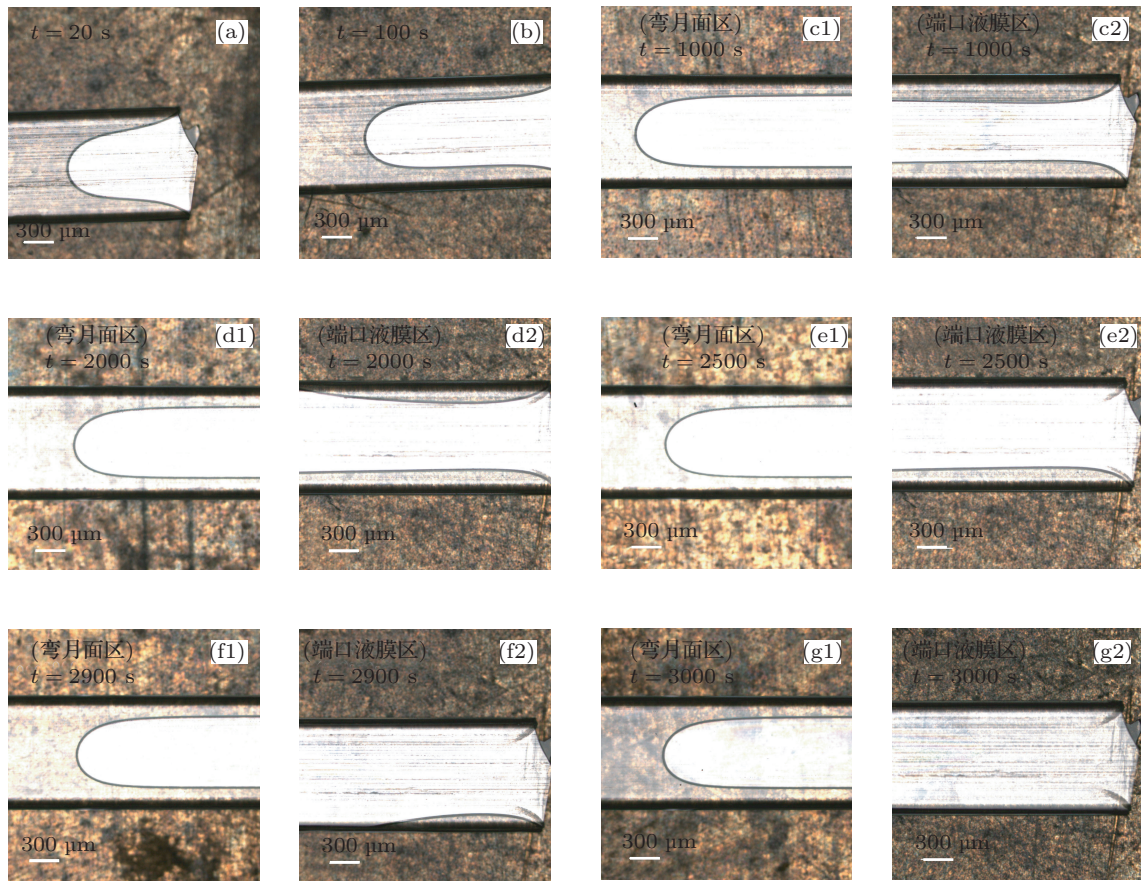


图2 温度为 23 °C 时毛细蒸发过程中液/气界面及端口液膜在不同时刻的典型形态 (a) $t = 20$ s; (b) $t = 100$ s; (c) $t = 1000$ s; (d) $t = 2000$ s; (e) $t = 2500$ s; (f) $t = 2900$ s; (g) $t = 3000$ s

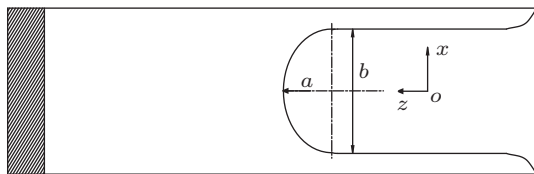


图3 液/气界面形态示意图

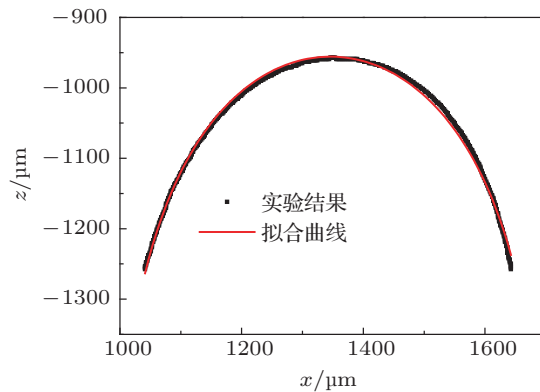


图4 弯月面处液/气界面形态及由黏性指延公式得到的拟合结果 (相关系数 $R = 0.99648$)

$$z = \frac{b^2}{a\pi^2} \ln \left[\cos \frac{\pi(x-d)}{b} \right] + c, \quad (1)$$

其中, a 为弯月面顶端处曲率半径, b 为薄液膜之间的距离, c, d 为常数. a, b, c, d 值都可由 Origin 软件拟合求得. 图4为弯月面处液/气界面形态及由黏性指延公式拟合得到的结果. 由图4可知, 黏性指延公式可以很好地描述弯月面处液/气界面形态.

基于黏性指延公式拟合求出在不同时刻弯月面顶端的曲率半径, 以此描述弯月面形态, 从而可知弯月面形态的变化趋势. 图5为19和23 °C两种水浴恒温条件下弯月面顶端曲率半径随时间的演化曲线. 由图5可见, 在不同温度下液/气界面的曲率半径基本不随时间改变, 这表明只要液/气界面稳定存在, 在相同温度条件下弯月面顶端曲率半径基本保持不变, 即液/气界面形态在达到稳态之后不受蒸发速度以及液膜状态的影响. 对比图5(a)和(b)可知, 温度升高会略微降低弯月面顶端曲率半径.

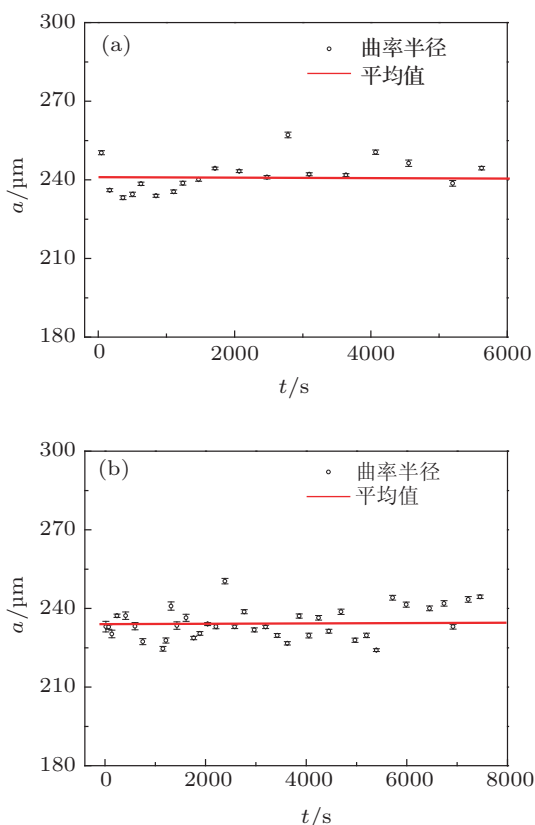


图5 在19和23 °C条件下弯月面顶端曲率半径 a 随蒸发时间 t 的演化 (a) 19 °C; (b) 23 °C

3.2 蒸发动力学

由图2可知,在蒸发过程中毛细蒸发系统处于变化之中,因此在蒸发速度方面必然存在一定改变.接下来我们将通过研究蒸发速度来揭示蒸发动力学问题.蒸发速度是指在单位时间单位面积内被蒸发掉的工质质量.在毛细管中蒸发速度可表示为

$$u = \frac{ls\rho}{ts} = v\rho, \quad (2)$$

其中, u 为蒸发速度, l 为液/气界面后退的位移, s 为毛细管横截面积, ρ 为工质密度, t 为蒸发时间, v 为液/气界面后退速度.所以蒸发速度 u 与 v 成正比.为了简化,用液/气界面后退速度表征蒸发速度.图6给出了温度为19, 23 °C时,蒸发速度随时间的变化曲线,图中已对时间进行了无量纲化处理(以总蒸发时间为单位),排除蒸发总量、蒸发时间等因素对毛细蒸发过程的影响.从图6可以看出,蒸发过程可以分为以下四个阶段: 1) 剧烈减速阶段,在非稳态条件下端口工质快速蒸发并逐渐趋于稳态,此阶段液膜处于形成阶段,对应于图2(a)和(b); 2) 匀速阶段,液膜完全形成,系统达到稳态,蒸发速度恒

定,在图6中,温度为19 °C时由于实验温度与室温相差较大,当毛细管温度达到实验温度时蒸发已经进行一段时间,故蒸发速度呈缓慢下降趋势,此阶段的液膜形态对应于图2(c); 3) 线性减速阶段,此阶段端口液膜开始被破坏,蒸发速度逐渐降低,液膜形态对应于图2(d)—(g); 4) 边界效应阶段,此时毛细管中工质即将全部蒸发,边界效应使蒸发速度突然增加.19 °C下毛细蒸发过程与23 °C下毛细蒸发过程的四个阶段相符合.不同温度下的毛细蒸发过程都可以分为上述四个阶段.

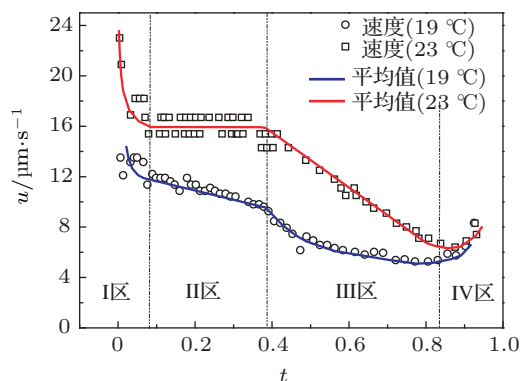


图6 在19, 23 °C条件下蒸发速度 u 随时间 t 的演化过程 I 区为剧烈减速, II 区为匀速阶段, III 区为线性减速阶段, IV 区为边界效应阶段

3.3 蒸发区域

由上述分析可知,工质的蒸发速度随液膜状态的变化而变化,因此液膜对蒸发速度有着决定性的影响.由于可以忽略重力对液膜的影响,且液膜不会随液/气界面向 z 轴正方向移动,蒸发速度在液膜稳定存在时保持恒定.基于本文结果,我们认为工质在毛细管中的蒸发区域并不在弯月面与稳定液膜的过渡区,而是在毛细管端口液膜区域.为进一步验证此观点,我们在工质中加入少量聚苯乙烯颗粒作为示踪粒子,通过观察示踪粒子的流动情况来判断蒸发过程中工质在毛细管内的流动情况.根据示踪粒子在工质中的流动情况绘制出工质流动示意图(图7、图8).

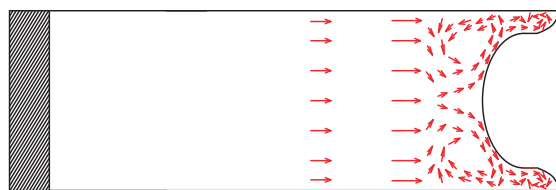


图7 蒸发初期毛细管中工质流动示意图

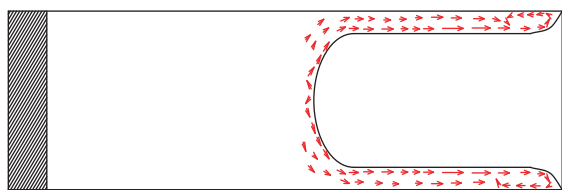


图8 蒸发后期弯月面形态和蒸发速度达到稳定时工质流动示意图

蒸发刚开始时, 暴露在毛细管口的工质较多, 蒸发速度较快, 导致工质在毛细管中的流动较为剧烈, 工质明显有不断流向毛细管端口的现象, 且流动过程中有涡流形成, 如图7所示. 随着时间的推移, 蒸发速度趋于稳定, 此时毛细管中工质流动情况如图8所示. 工质整体向毛细管口流动的现象已经不明显, 但靠近液膜内壁的液体依然不断地快速流向毛细管端口液膜. 毛细管端口液膜的工质以极大的速度旋转流动, 直至工质蒸发完成后只剩下示踪粒子聚集在毛细管端口. 工质在毛细管中形成弯月面和液膜, 在毛细力^[15]、表面张力^[21]及液/气两相不同压强^[26]的作用下, 工质有从毛细管内部向端口流动的趋势. 随着蒸发的进行, 毛细管端口液膜处液体减少, 需要其他地方工质的补充以维持液膜的稳定. 而毛细力和表面张力驱动毛细管内的液体流动到端口补充蒸发损失. 由于蒸发一直进行, 毛细管端口的液体一直需要补充, 这使毛细管内液体流动阻力减小, 流动更加顺畅. 同时, 由于流动使蒸发损失得到源源不断的补充, 毛细管端口的液膜不致消失, 蒸发可以高速顺利进行. 当液膜断裂, 端口液膜区域得不到工质补充, 工质随着蒸发的进行

而蒸干, 蒸发区域向毛细管密封端移动, 蒸发速度受到毛细管内部与外界压力差值的限制, 蒸发速度显著下降, 如图6所示. 因此, 系统处于稳态时, 蒸发区域在端口液膜处, 毛细管内流动与蒸发的耦合作用加强毛细管内液体的流动, 促进蒸发的顺利高速进行, 而液膜则在蒸发与流动的耦合过程中起到了通道桥梁的作用.

综上所述, 蒸发第一阶段后, 液/气界面形态达到稳态; 第二阶段时蒸发速度恒定、液膜完整、界面形态稳定; 第三阶段蒸发速度下降, 液膜被破坏, 但界面形态仍保持稳定. 因此, 界面形态不受蒸发速度和液膜状态的干扰, 它只受表面张力等因素的影响^[15], 液膜通过影响蒸发区域的位置进而影响蒸发速度.

4 结论

本文以无水乙醇为工质, 采用水浴恒温蒸发方法对液膜存在时的毛细蒸发过程进行了实验研究. 研究表明: 液/气界面形态随着蒸发的进行达到稳定状态, 液/气界面形态不受蒸发速度和液膜变化的影响. 毛细蒸发可分为剧烈减速、匀速、线性减速及边界效应四个阶段. 液膜从形成阶段趋于稳态时毛细蒸发为剧烈减速阶段, 液膜处于稳态时毛细蒸发处于匀速阶段, 液膜被破坏时毛细蒸发处于线性减速阶段, 工质蒸干时毛细蒸发出现边界效应. 存在稳定液膜时, 毛细蒸发过程中工质的蒸发主要发生在端口液膜区域, 液膜为蒸发区域和液体区域提供了流动通道, 保证了蒸发的进行.

- [1] Keey R B 1980 *Chem. Eng. J.* **19** 83
- [2] Leng J, Lonetti B, Tabeling P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 084503
- [3] Lataoui Z, Romestant C, Bertin Y, Jemni A, Petit D 2010 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **34** 562
- [4] Stephan P C, Busse C A 1992 *Int. J. Heat Mass Trans.* **35** 383
- [5] Washburn E W 1921 *Phys. Rev.* **17** 273
- [6] Juncker D, Schmid H, Drechsler U, Wolf H, Wolf M, Michel B, de Rooij N, Delamarche E 2002 *Anal. Chem.* **74** 6139
- [7] Yiotis A G, Tsimpanogiannis I N, Stubos A K, Yortsos Y C 2006 *J. Colloid Interface Sci.* **297** 738
- [8] Yiotis A G, Tsimpanogiannis I N, Stubos A K, Yortsos Y C 2007 *Water Resour. Res.* **43** W06403
- [9] Swanson L W, Herdt G C 1992 *J. Heat Trans.* **114** 435
- [10] Qu W, Ma Z T, Miao J Y, Wang J L 2002 *Int. J. Heat Mass Trans.* **45** 1879
- [11] Qu W, Ma Z T 2001 *J. Eng. Thermophys.* **22** 68 (in Chinese) [曲伟, 马泽同 2001 工程热物理学报 **22** 68]
- [12] Zhao N, Du X Z, Yang L J, Yang Y P 2008 *J. Chem. Ind. Eng.* **59** 1930 (in Chinese) [赵娜, 杜小泽, 杨立军, 杨勇平 2008 化工学报 **59** 1930]
- [13] Wang H, Garimella S V, Murthy J Y 2007 *Int. J. Heat Mass Trans.* **50** 3933
- [14] Huang X M, Kaya T 2010 *J. Astronaut.* **31** 1487 (in Chinese) [黄晓明, Kaya T 2010 宇航学报 **31** 1487]
- [15] Chauvet F, Duru P, Geoffroy S, Prat M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 124502
- [16] Coussot P 2000 *Eur. Phys. J. B* **15** 557
- [17] Xu S H, Wang L W, Sun Z W, Wang C X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 166801 (in Chinese) [徐升华, 王林伟, 孙祉伟, 王彩霞 2012 物理学报 **61** 166801]
- [18] Xu S H, Zhou H W, Wang C X, Wang L W, Sun Z W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134702 (in Chinese) [徐升华, 周宏伟, 王彩霞, 王林伟, 孙祉伟 2013 物理学报 **62** 134702]
- [19] Li Y Q, Liu L, Zhang C H, Duan L, Kang Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62**

- 024701 (in Chinese) [李永强, 刘玲, 张晨辉, 段俐, 康琦 2013 物理学报 **62** 024701]
- [20] Li Y Q, Zhang C H, Liu L, Duan L, Kang Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044701 (in Chinese) [李永强, 张晨辉, 刘玲, 段俐, 康琦 2013 物理学报 **62** 044701]
- [21] Buffone C, Sefiane K, Christy J R 2005 *Phys. Fluids* **17** 052104
- [22] Lin X Y, Li Y D, Sun T X, Pan Q L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 070205
- [23] Li Y D, Lin X Y, Tan Z Y, Sun T X, Liu Z G 2011 *Chin. Phys. B* **20** 040702
- [24] Zhang X J, Dong Y K, Liu Y H, Schaefer J A 2009 *Chin. Phys. B* **18** 023107
- [25] Saffman P G, Taylor G 1958 *Proc. R. Soc. London* **245** 1242
- [26] Park K, Lee K S 2003 *Int. J. Heat Mass Trans.* **46** 4587

Investigation on the capillary evaporation process based on the existence of liquid film^{*}

He Feng Wang Zhi-Jun Huang Yi-Hui Ye Peng Wang Jin-Cheng[†]

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 8 May 2013; revised manuscript received 15 September 2013)

Abstract

The capillary evaporation process with stable liquid film along the cell wall is investigated by evaporating under constant temperature. The experimental results show that the liquid/vapor interface coincides with viscous finger, which is independent of the state of liquid film and evaporating rate. During the evaporation process, four stages are found: sharp falling rate stage, constant rate stage, linear falling rate stage and boundary effect stage, which are corresponding to different kinds of liquid film states. The evaporating takes place mainly at the tip of the liquid film region, and the stable liquid film transports the liquid from the liquid region to the capillary tube orifice.

Keywords: capillary evaporation, liquid/vapor interface, evaporating periods, liquid film

PACS: 64.70.F-, 47.55.nb, 47.15.gm

DOI: 10.7498/aps.62.246401

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51101125) and the National Innovation Entrepreneurial Training Program for Undergraduate Students of China (Grant No. 201210699054).

[†] Corresponding author. E-mail: jchwang@nwpu.edu.cn