

相变流体回路中毛细芯内液体气化界面的稳定性分析*

刘伟** 刘志春 明廷臻 涂正凯

华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074

摘要 通过分析液体气化界面位移与界面压力变化的物理机制, 获得了相变流体回路中毛细芯内的界面位移及曲率变化与压力变化的关系式, 导出了气液界面的稳定性判据. 根据这一判据, 并由所建立的丝网型毛细芯中界面位移的物理模型, 得出了毛细芯内液体气化界面的稳定性曲线. 文中的界面模型和稳定性判据, 对分析和揭示毛细泵流体回路(CPL)、回路热管(LHP)和毛细芯热管(CHP)中毛细蒸发界面的位移机制和动力学稳定性, 对预测毛细芯内液体的干涸以及系统运行的失稳乃至崩溃等, 都具有一定意义.

关键词 流体回路 相变 毛细芯 界面 稳定性

在毛细泵流体回路(capillary pumped loop, CPL)、回路热管(loop heat pipe, LHP)和毛细芯热管(capillary heat pipe, CHP)等工质相变循环的热量传递系统中, 发生液体气化的毛细界面一般处于回路的蒸发段, 而跨过气化界面的压差主要用以克服工质的流动阻力, 是系统运行的驱动力^[1-3]. 然而, 由于实际系统的运行工况或热负荷经常会发生变化, 气液相变界面往往会向毛细芯内部移动, 而且, 当蒸发段的热流过大时, 毛细界面甚至会穿透毛细芯, 从而导致毛细芯内的液体干涸, 使系统发生崩溃, 因此, 保持蒸发段毛细芯中气液界面的稳定, 对于系统的运行十分重要^[4]. 尽管国内外学者在任意弯曲气液界面的热力学相平衡理论方面开展了一些研究工作^[5,6], 而且, 在CPL, LHP和CHP毛细芯内的界面行为和相变传热方面也开展了相应的理论研究和计算模拟^[7-10], 但迄今为止, 关于液体气化界面在毛细芯内的位移机制以及稳定性问题, 尚未见有文献报道.

1 界面的压力变化

为了分析上述系统中液体气化毛细界面的稳定

性, 考虑一个处于平衡状态下的任意气液界面, 见图1. 图中, 若作用在界面上的热流发生了变化, 那么, 液体的气化速率随之变化, 也就导致界面气体侧的压力发生变化; 而且, 若气化界面位于一个毛细孔内, 那么, 随着气体侧压力的增减, 界面在毛细孔中的位置会发生位移, 界面的曲率半径也将发生变化, 故而界面液体侧的压力也会相应发生变化.

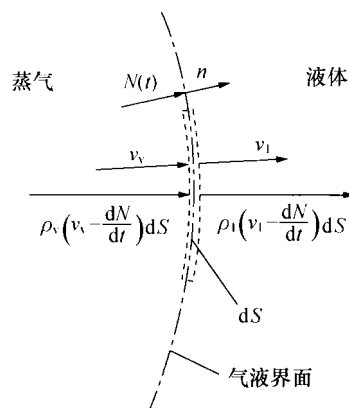


图1 气液界面以及微元控制体示意

2008-10-25 收稿, 2009-02-06 收修稿

* 国家自然科学基金(批准号: 50876035)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB3206903)资助项目

** E-mail: w_liu@hust.edu.cn

在图1所示的界面位置取微元控制体： $dS \times 1$ (1 表示单位厚度)，它包含界面两侧的气体和液体薄层。根据基本守恒定律，可得微元体的平衡方程^[11]。

(1) 质量守恒

$$\rho_l v_l - \rho_v v_v = (\rho_l - \rho_v) \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

式中 ρ 是密度， v 是界面法线方向速度， $N(t)$ 是界面位置， t 是时间， dS 是微元面积，下标 v 和 l 分别代表蒸气和液体。

(2) 动量守恒

$$\rho_l \left(v_l - \frac{dN}{dt} \right) v_l - \rho_v \left(v_v - \frac{dN}{dt} \right) v_v = p_v - p_l - \frac{\sigma}{r'} \quad (2)$$

式中 p 是压力， σ 是表面张力系数， r' 是弯月面曲率半径。

(3) 能量守恒

$$\rho_l \left(v_l - \frac{dN}{dt} \right) h_l - \rho_v \left(v_v - \frac{dN}{dt} \right) h_v = q_v - q_l = q \quad (3)$$

式中 h 是热力学焓， q_v 是由蒸气侧进入微元体的热流， q_l 是由液体侧导出微元体的热流， q 是微元体获得的净热流，它用于使界面处的液体产生气化。

(4) 界面的压力变化

以上微元体的守恒方程建立了界面两侧流体的动力学关系。由方程(1)–(3)，可获得在液体气化条件下的界面平衡方程：

$$\frac{\sigma}{r'} - (p_v - p_l) = \frac{q^2 (\rho_l - \rho_v)}{(h_v - h_l)^2 \rho_v \rho_l} \quad (4)$$

对于球形界面有：

$$\frac{2\sigma}{r} - (p_v - p_l) = \frac{q^2 (\rho_l - \rho_v)}{h_{lg}^2 \rho_v \rho_l} \quad (5)$$

式中 h_{lg} 为气化潜热。

考虑到蒸气密度远远小于液体密度即 $\rho_v \ll \rho_l$ ，则有扩展 Laplace-Young 方程^[12]：

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r} - \frac{q^2}{h_{lg}^2 \rho_v} \quad (6)$$

若界面热流为零，则 $q=0$ ，即(6)式退化为 Laplace 方程：

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r_0} \quad (7)$$

若认为 $p'_{cap} = \frac{q^2}{h_{lg}^2 \rho_v}$ 为因界面相变引起的动量变化而产生的附加力，则在气液平衡态下液体气化界面的毛细压差可表示为： $p_{cap} = p_v - p_l + p'_{cap} = p_v - p_l$ 。这样，相变界面的 Laplace 方程又可表示为：

$$p_{cap} = p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r} \quad (8)$$

式中， p_v 和 p_l 分别表示相变后的蒸气侧与液体侧的压力。

2 界面的稳定性分析

按正三角形排列方式，可构造如下界面在丝网型毛细芯中的位移模型(局部剖面)，见图2。其中， r_0 为不发生相变时液体弯月面的曲率半径， r_{cr} 为毛细芯的临界物理半径。

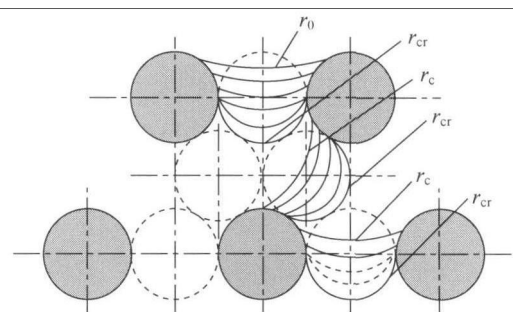


图2 丝网型毛细芯中界面位移的物理模型

若 CPL, LHP 或 HP 中蒸发段的热负荷出现波动，毛细芯内液体的气化速率随之变化，以致界面的气侧压力发生扰动，同时，界面的毛细压差和曲率半径也随之发生变化

$$p_{cap} + dp_{cap} = \frac{2\sigma}{r} + d\left(\frac{2\sigma}{r}\right) \quad (9)$$

为了分析(9)式中毛细压力变化与液体弯月面曲率半径变化之间的对应关系, 可对(8)式求导数

$$\frac{\partial p_v}{\partial r} - \frac{\partial p_L}{\partial r} = \frac{\partial \left(\frac{2\sigma}{r} \right)}{\partial p_v} \cdot \frac{\partial p_v}{\partial r} \quad (10)$$

对(10)式两端除以 $\frac{\partial p_v}{\partial r}$, 并假定 σ 与温度无关, 可得

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{r} \right)}{\partial p_v} = \frac{1}{2\sigma} \left[1 - \frac{\partial p_L}{\partial r} / \frac{\partial p_v}{\partial r} \right]. \quad (11)$$

图3表达了液体弯月面两侧的压力随弯月面曲率半径的变化关系. 图中可见, 若弯月面的曲率半径 r 向减小的方向变化, 则必定对应跨过弯月面的毛细压差 $p_v - p_L$ 向增大的方向发展, 故而恒有如下关系式:

$$\frac{\partial p_v}{\partial r} > \frac{\partial p_L}{\partial r} \quad (12)$$

根据(11), (12)两式, 可得如下界面稳定性判据:

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{r} \right)}{\partial p_v} = \frac{\partial f}{\partial p_v} > 0 \quad (13)$$

式中 f 为液体弯月面曲率, 它是曲率半径的倒数.

上述分析表明: 当系统发生热扰动时, 若界面

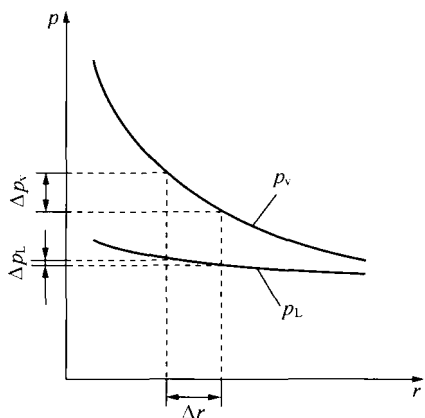


图3 气液界面两侧的压力随液体弯月面曲率半径的变化

仍旧处于稳定, 则液体弯月面必须满足平衡方程(9), 而且, 界面的变化应满足(13)式的正斜率关系. 于是, (13)式即为毛细芯内液体气化界面的稳定性判据, 由此, 可绘制气液界面的稳定性曲线^[13].

根据图2所示的毛细芯模型以及界面的稳定性判据, 可由图4对毛细界面的位移作出如下分析:

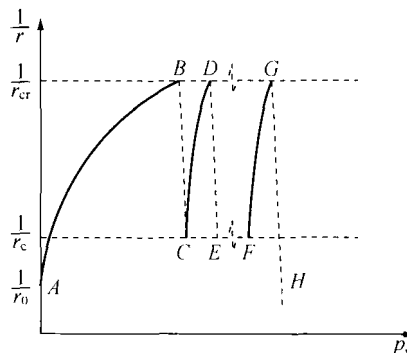


图4 毛细芯内气液界面位移的稳定性曲线

(1) AB段为曲线具有正斜率的稳定段: 当蒸发器的热负荷发生变化、系统出现了压力波动时, 若液体弯月面的曲率在此范围内变化, 则界面是稳定的;

(2) B点为界面失稳的临界点: 当蒸发器的热负荷达到临界热负荷 q_{max} 时, 液体弯月面的曲率半径将达到临界值 r_{cr} ; 若继续增大热流, 界面将会发生失稳;

(3) BC段为失稳段: 当超过临界点后, 界面会因其面积增大而不能承受气侧压力, 从而发生界面的滑落或脱离, 使得界面失稳;

(4) C点为亚稳段的起始点: 它是界面在毛细孔的壁面上滑落或脱离后, 在下一个毛细孔的壁面的重新附着点;

(5) CD段为曲线具有正斜率的亚稳段: 当界面位于亚稳段时, 若热流不再增加, 则界面处于平衡态; 但此平衡较为脆弱, 稍有扰动就会被打破: 若减少热流, 则界面可较快恢复到稳定段, 反之则容易失稳; 若毛细芯由 N 层丝网组成, 则有 $2N-1$ 个亚稳段;

(6) H点为毛细芯的干涸点: 此时, 毛细芯内的液体发生了干涸, 气液界面不复存在, 系统运行也随之崩溃.

由上可见, 热流密度越大, 界面上方的蒸气压力越大, 若超过某一临界热流密度, 压力会发生波动, 相应的界面曲率半径将会出现剧烈变化, 界面则可能会出现失稳现象, 这反映出界面的基本稳定性关系. 尽管以上分析基于的是单个毛细孔, 但所导出的稳定性判据对整个毛细芯界面都有效, 只是当毛细芯发生干涸时, 其表面热流均应达到 q_{\max} , 而实际情况往往有所差异.

3 实际界面的稳定性分析

前述界面稳定性分析针对的是一个理想模型, 为了简化推导, 所给定的毛细芯形状和界面热物理参数均较为简单, 而工程实际遇到的界面情形一般都较为复杂.

3.1 非均匀热流界面

在实际运行的 CPL 或 LHP 中, 毛细芯表面上的热流往往是不均匀的, 如图 5 所示的平面式 CPL 蒸发器: 在加热肋片处, 毛细芯的热流密度高; 在蒸气槽道处, 毛细芯的热流密度低. 由于存在很大的蒸气加热热阻, 当肋片处的毛细芯达到临界热流 q_{\max} 时, 蒸气槽道处毛细芯的热流尚远未达到临界值, 因此, 在毛细芯内会形成一个下凹的气液界面 (见图 5). 在肋片的下方, 气液界面已深入到毛细芯的内部; 而在蒸气槽道的下方, 气液界面接近或处于毛细芯的表面. 此时, 由于毛细界面之间的相互作用, 整个界面仍旧保持稳定; 但若持续增大热流, 则会使所有界面都位移至毛细芯内部, 毛细芯内的液体将面临干涸.

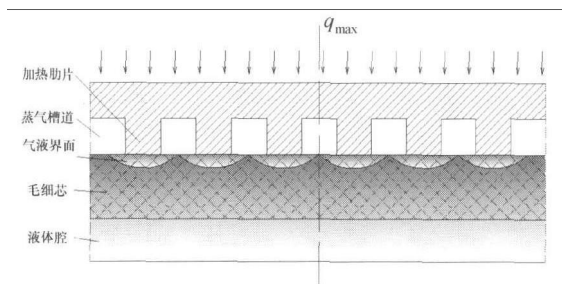


图 5 平面式 CPL 或 LHP 蒸发器中毛细芯内的气液界面位置

3.2 非均匀温度界面

对于实际运行的 CHP, 由于蒸发段加热以及冷凝段散热的缘故, 使得毛细芯的表面和内部均具有

温度梯度, 气液界面的蒸气压力沿热管轴线方向并非一致, 因此, 在一定的热流条件下, 在热管蒸发段的不同部位, 气液界面的位置是不同的. 在靠近热管的端部, 气液界面可能会不同程度地深入到毛细芯的内部; 而在靠近热管的冷凝端, 气液界面会一直维持在毛细芯的表面. 但是, 随着热流的进一步增大, 毛细芯也将会发生干涸.

由上可知, 实际系统的运行性能以及稳定性与毛细界面的热流状况和温度梯度直接相关, 不同结构形式的毛细芯在不同的界面热流或温度条件下, 液体气化界面将处于不同位置并呈现出不同的形状. 但是, 根据界面的稳定性曲线和稳定性判据, 就可以指导系统设计, 使其工作在适当的热流范围, 防止毛细芯的干涸以及系统的失稳.

4 结论

稳定性问题是可移动相变界面的一个重要热动力学问题. 本文通过对相变流体回路中毛细芯内液体气化界面的稳定性分析, 得出以下结论:

(1) 对于毛细芯内的某一气液平衡界面, 因施加于界面上的热负荷波动而产生的压力变化是界面发生位移和曲率变化的根本原因.

(2) 液体气化界面的曲率随界面压力变化的正斜率条件是判断界面是否稳定的基本判据, 而界面的稳定性曲线有助于界定 CPL, LHP 和 CHP 的失稳和崩溃.

(3) 实际界面的热流或温度往往是不均匀的, 当部分毛细芯达到临界热流时, 就会出现局部的界面位移, 尽管这时的界面仍旧是稳定的, 但若持续增大热流, 则会出现气液界面的整体位移, 从而使界面失稳.

参 考 文 献

- 1 Bazzo E, Riehl RR. Operation characteristics of a small-scale capillary pumped loop. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(6): 687-705
- 2 Maydanik Yu F. Loop heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 635-657
- 3 Peterson GP. *An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing, and Applications*. New York: Wiley, 1994
- 4 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用. 北京: 科学出版社, 2006

- 5 Zhang JT, Wang BX. Effect of capillarity at liquid-vapor interface on phase change without surfactant. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2002, 44(13): 2689—2694
- 6 童均耕, 吴孟余, 王平阳. 高等工程热力学. 北京: 科学出版社, 2006
- 7 Figus C, Bray YL, Prat M, et al. Heat and mass transfer with phase change in a porous structure partially heated: Continuum model and pore network simulation. *Int J Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 2557 -2569
- 8 王 强, 刘 伟, 刘志春. CPL 蒸发器多孔芯内压力和温度变化的数值模拟. *华中科技大学学报*, 2004, 32(5), 87—89
- 9 Wan ZM, Liu W, Nakayama A. Conjugate numerical investigate of small-scale flat plate capillary pumped looped evaporator, *Proc of the 22nd Int Conference of Refrigeration*, Beijing, China, 2007
- 10 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术—原理及其应用. 北京: 中国科学技术出版社, 2007
- 11 Arpaci VS, Larsen PS. *Convection Heat Transfer*, New Jersey: Prentice-Hall, 1984
- 12 Khrustalev D, Faghri A. Heat transfer in the inverted meniscus type evaporator at high heat fluxes. *Int J Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(6): 3091—3101
- 13 Liu W, Mizukami K, Peng SW. Stability analysis for a bubble nucleus in surface cavity. *Proc. of the 9th Int. Symposium on Transport Phenomena*, Singapore, 1996