

重力热管泡状流工况的定量描述

唐志伟¹ 马重芳¹ 蒋章焰²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要 计及冷凝段换热特性和热管几何尺寸的影响, 借助定量分析给出热管工作时蒸发段液池液位变化的预测式。通过计算实例与已发表的关联式作了比较。

关键词 热管; 液池液位; 泡状流; 定量分析

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2003)05-0837-03

PHYSICO-MATHEMATICAL DESCRIPTION ABOUT VESICLE FLOW WORKING OF GRAVITATIONAL HEAT PIPES

TANG Zhi-Wei¹ MA Chong-Fang¹ JIANG Zhang-Yan²

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The variation in the liquid level of the pool must be defined in order to analysis correctly the heat transfer in the evaporator. Considering the influence of heat transfer in condenser and geometric dimension of the heat pipe on the liquid level, a simplified physico-mathematical model is developed to describe the multi-phase flow heat transfer in the evaporator.

Key words heat pipe; the liquid level of the pool; bubble flow; physico-mathematical model

1 前言

重力热管作为一种高效相变传热元件已在许多工业过程获得广泛应用。为了适应应用的需要并合理评价其性能, 迄今已进行大量的实验和理论研究。众所周知, 重力热管蒸发段包含有液膜段和液池段两部分, 这两部分的始发沸腾和换热规律各不相同。为了准确分析蒸发段的换热特性, 首先就必须确定液池液位在工作状态下的变化。文献 [1,2] 分别根据漂移流模型和汽泡动力学模型整理实验数据, 提出了各自的液池液位变化关联式。然而这两个关联式均未能充分反映冷凝段换热特性和热管几何尺寸对蒸发段液池液位变化的影响。本文将运用简化分析方法, 对这一问题作进一步探讨。

2 冷凝段凝结液膜的厚度分布及其对热管蒸发段液池的作用

重力热管正常稳定运行时, 沿壁面均匀覆盖薄液膜, 而中间空间则为蒸汽所充满。要确定此时蒸发段液池的液位, 首先必须弄清冷凝段凝结液膜的

厚度分布。如图 1 所示, 忽略凝结液膜中的压力梯度和动量变化, 由微元体 $(dx, \delta - y, z)$ 力的平衡给出。

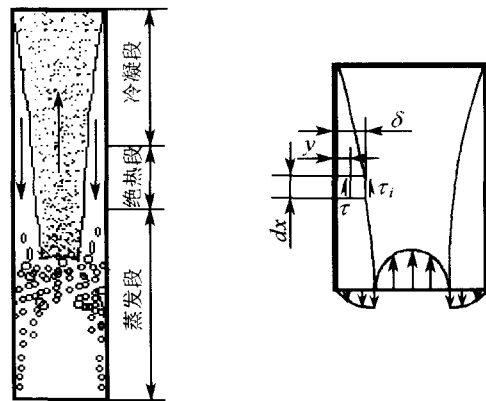


图 1 热管内部两相流及简化分析微元体

$$\begin{aligned} -\tau z dx - \tau_i z dx + \rho_l g(\delta - y) z dx - \rho_v g(\delta - y) z dx &= 0 \\ \tau &= g(\rho_l - \rho_v)(\delta - y) - \tau_i \\ (du_l/dy) &= (g/\rho_l \nu_l)(\rho_l \rho_v)(\delta - y) - (1/\rho_l \nu_l)\tau_i \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期: 2002-12-10; 修订日期: 2003-07-03

基金项目: “973” 国家重点项目支持 (No.G2000026304)

作者简介: 唐志伟 (1966-), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 博士, 主要从事强化传热、过程节能、可再生能源开发利用等研究。

从而有:

$$u_l = (g/\rho_l\nu_l)(\rho_l - \rho_v)[\delta_y - (1/2)y^2] - (1/\rho_l\nu_l)\tau_i y \quad (2)$$

界面切应力 τ_i 主要取决于蒸汽的速度 u_v 。因为 $\delta \ll d_i$ (此处 d_i 为热管内径), 作为初步近似, 可以认为 u_v 和 τ_i 沿冷凝段为常数。于是液膜的平均流速可由下式求得:

$$u_{lm} = \left(\frac{1}{\delta}\right) \int_0^\delta u_l dy = \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l\nu_l}\right] \left(\frac{\delta^2}{3}\right) - \left(\frac{\tau_i}{\rho_l\nu_l}\right) \left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3)$$

单位周长的液膜流量为

$$\Gamma = \rho_l u_{lm} \delta = (g/\nu_l)(\rho_l - \rho_v)(\delta^3/3) - (\tau_i/\nu_l)(\delta^2/2) \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可以看到, 界面切应力将使液膜平均流速减小、液膜厚度增加, 从而使凝结换热系数降低。但从液膜对蒸发段液池的透入作用看, 液膜平均流速的影响要比液膜厚度大些, 因而作为初步近似, 把凝结液膜当作 $\tau_i = 0$ 的层流液膜处理。于是由式 (4) 可得:

$$d\Gamma = (g/\nu_l)(\rho_l - \rho_v)\delta^2 d\delta \quad (5)$$

由能量平衡给出:

$$dq_c dx = h_{fg} d\Gamma = (\lambda_l/\delta)(T_s - T_{wc}) dx \quad (6)$$

从而有

$$h_{fg}(g/\nu_l)(\rho_l - \rho_v)\delta^2 d\delta = (\lambda_l/\delta)(T_s - T_{wc}) dx \quad (7)$$

重新整理式 (7) 并积分得:

$$\delta = [4\lambda_l\nu_l(T_s - T_{wc})x/g(\rho_l - \rho_v)h_{fg}]^{1/4} \quad (8)$$

实验研究表明, 低过冷度自由降膜加热后, 要经历一段热发展段才发生始发沸腾, 而且始发沸腾产生的汽泡会被液膜扫带到下部液池才弥散开来并逸出。据此, 可以不计蒸发段液膜的表面蒸发, 而认为离开冷凝段的冷凝液量 G_c 等于蒸发段液池沸腾汽化的液量 G_{vp} 。记离开冷凝段进入绝热段的液膜厚度为 δ_c , 且认为此后沿流动方向液膜厚度保持不变, 则有:

$$G_c = \rho_l \pi d_i u_{lm} \delta_c = (\pi d_i g/\nu_l)(\rho_l - \rho_v)(\delta_c^3/3) \quad (9)$$

$$G_{vp} = (\pi d_i L_e q_e / h_{fg}) \quad (10)$$

由 $G_c = G_{vp}$ 可求得冷凝段出口液膜厚度:

$$\delta_c = [3\nu_l L_e q_e / g(\rho_l - \rho_v)h_{fg}]^{1/3} \quad (11)$$

由式 (8) 得:

$$\delta_c = [4\lambda_l\nu_l(T_s - T_{wc})L_e/g(\rho_l - \rho_v)h_{fg}]^{1/4} \quad (12)$$

比较式 (8) 和式 (12) 可得:

$$\delta = \delta_c(x/L_e)^{1/4} \quad (13)$$

将式 (11) 代入上式, 即可导出冷凝段液膜厚度分布为:

$$\delta = [3\nu_l L_e q_e / g(\rho_l - \rho_v)h_{fg}]^{1/3} (x/L_e)^{1/4} \quad (14)$$

根据冷凝段液膜厚度分布, 很容易求得冷凝段蒸汽空间的体积从而可以求得冷凝段蒸汽质量折算的蒸发段液池高度

$$L_{vce} = (\rho_v/\rho_l)L_c[1 - (16/5)(\delta_c/d_i) + (64/17)(\delta_c/d_i)^2] \quad (15)$$

冷凝段液膜体积:

$$V_{fcc} = (1/4)\pi d_i^2 L_e - V_{vc} = L_c \pi [(4/5)d_i \delta_c - (16/17)\delta_c^2]$$

冷凝段液膜质量折算的蒸发段液池高度:

$$L_{fce} = L_c [(16/5)(\delta_c/d_i) - (64/17)(\delta_c/d_i)^2] \quad (16)$$

绝热段液膜体积 $V_{fa} = \pi d_i L_a \delta_c$, 绝热段液膜质量折算的蒸发段液池高度:

$$L_{fae} = 4(\delta_c/d_i)L_a \quad (17)$$

绝热段蒸汽空间的体积 $V_{va} = (1/4)\pi(d_i - 2\delta_c)^2 L_a$, 绝热段蒸汽质量折算的蒸发段液池高度:

$$L_{vae} = (\rho_v/\rho_l)L_a[1 - 2(\delta_c/d_i)]^2 \quad (18)$$

要保证热管正常运行, 蒸发段内表面至少必须覆盖一层薄液膜。假定液膜厚度等于 δ_c , 则相应的等效充液高度为:

$$L_{ef} = [\pi d_i L_e \delta_c (\pi d_i^2/4) \delta_c] / (\pi d_i^2/4) \approx 4L_e \delta_c/d_i \quad (19)$$

蒸发段蒸汽空间的等效充液高度为:

$$L_{ev} = [(\pi d_i^2/4)L_e(\rho_v/\rho_l)] / (\pi d_i^2/4) = L_e(\rho_v/\rho_l) \quad (20)$$

热管最小充液高度为:

$$L_{min} = L_{ef} + L_{ev} + L_{fce} + L_{vce} + L_{fae} + L_{vae} \quad (21)$$

热管无量纲最小充液率为:

$$F_{min} = L_{min}/L_e \quad (22)$$

若充液率为 F , 则蒸发段液池静态高度:

$$L_1 = FL_e \quad (23)$$

热管正常运行时扣除分布在冷凝段和绝热段工质质量后的蒸发段液池液位:

$$L_2 = L_1 - L_{vce} - L_{fce} - L_{vae} - L_{fae} \quad (24)$$

因蒸发段液膜及相应蒸汽空间占有一定量的工质, 未计及液池体积含汽量(空泡份额)时的液位将为 L_3 。由图 2 所示几何关系有 $(1/4)\pi d_i^2(L_2 - L_3) = \pi d_i \delta_c(L_e - L_3)$ 。从而有:

$$L_3 = (d_i L_2 - 4\delta_c L_e)/(d_i - 4\delta_c) \quad (25)$$

对气-液两相流的流型转变的实验研究表明, 当体积含汽量 $\varepsilon < 0.25$ 时, 两相流的流型为泡状流。然而, 降落液膜始发沸腾所需的壁面过热度要低于液池始发沸腾所需的壁面过热度, 在降落液膜与液池的相互作用下, 只有当体积含汽量 $\varepsilon < 0.1$ 时方才是泡状流工况。按均匀流考虑, 混合物的密度可按下列式计算:

$$\rho_m = \varepsilon \rho_v + (1 - \varepsilon) \rho_l \quad (26)$$

若计及液池体积含汽量后的实际液位为 L_4 , 则有:

$$\rho_m L_4 = \rho_l L_3 \quad (27)$$

从而得:

$$L_4 = (\rho_l / \rho_m) L_3 \quad (28)$$

无量纲液位为:

$$F^* = L_4 / L_e \quad (29)$$

令

$$B = (\rho_l / \rho_m) [1 / (d_i - 4\delta_c)] \quad (30)$$

将式 (15)、式 (18) 及式 (23) 代入式 (29) 得:

$$F^* = Bd_i \left\{ (F - L_c/L_e) \left[(16/5)(\delta_c/d_i) - (64/17)(\delta_c/d_i)^2 \right] \times \right. \\ \left. [1 + (\rho_v/\rho_l)] (\rho_v/\rho_l) \right\} - (L_a/L_e) \left\{ (4\delta_c/d_i) - (\rho_v/\rho_l) \times \right. \\ \left. [1 - (2\delta_c/d_i)^2] - 4(\delta_c/d_i) \right\} \quad (31)$$

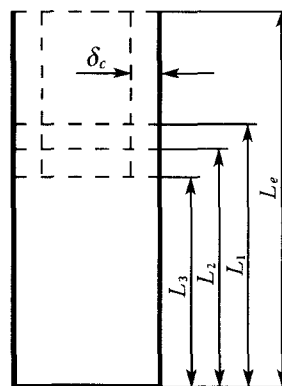


图 2 液位变化的几何关系

因为在热管通常应用的工作条件下, $\rho_v \ll \rho_l$, $(\delta_c/d_i) < 0.05$, 所以 (ρ_v/ρ_l) 及 (δ_c/d_i) 的二次项可以忽略不计, 于是, 式 (32) 可以简化为

$$F^* = Bd_i [F - 3.2(L_c/L_e)(\delta_c/d_i) - \\ 4(L_a/L_e)(\delta_c/d_i) - 4(\delta_c/d_i)] \quad (32)$$

由上式可以看到, 热管工作时, 蒸发段液池液位的变化不仅与蒸发段的换热特性密切相关, 而且还与冷凝段的换热效果和热管的几何特性有极大关系。冷凝段逆流汽-液两相流动的界面切应力和不凝结气体都将使冷凝段的换热系数降低, 从而使离开冷凝段的液膜增厚, 进而增强对蒸发段液池液位变化的影响。

按漂移流模型处理, 加上式 (28) 通过迭代计算, 即可得到 L_4 与 L_3 的关系。

4 结 论

计及冷凝段换热特性和热管几何尺寸的影响, 借助简化分析得出热管工作时蒸发段液池液位变化的预测式, 可供实际应用参考。

参 考 文 献

- [1] He Jialun, Ma Tongze, Zhang Zhengfang. Investigation of Boiling Liquid Pool Height of a Two-Phase Closed Thermosyphon. In: Proceedings of the 8IHPC. Beijing, 1992. 154-159
- [2] Jiang Zhangyan, Ma Tongze, Qin Jian. Heat Transfer and Incipient Boiling of Saturated Falling Liquid Films. In: Proceedings of the 8IHPC. Beijing, 1992. 77-82