

小型分离式热管工作温度与传热特性的实验研究

唐志伟¹ 马重芳¹ 蒋章焰²

(1. 北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100022; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要 本文对具有短管束的小型分离式热管工作温度与传热特性进行了实验研究。实验装置的蒸发段和冷凝段都是由 5 根直径 20 mm 的无缝钢管短管束组成, 管子长度为 152 mm, 带有紧套的钢帛环形肋片结构尺寸如下: 肋片外径 40 mm、厚 1 mm、片间距 4 mm。工作温度 140~220°C, 热流密度 21.2~40.2 kW/m²。试验结果表明, 在本实验条件下, 小型分离式热管最佳充液率按蒸发段总容量计为 48%~63%, 按管束总容量计为 20%~40%。根据实验结果, 总结了最佳充液率下 (25%, 按管束总容量计) 的蒸发段内部平均沸腾换热系数和冷凝段内部凝结换热努赛尔数综合关系式。

关键词 小型分离式热管; 充液率; 换热

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)06-1043-03

EXPERIMENTAL STUDIES TO WORKING TEMPERATURE WITH HEAT EXCHANGING OF THE SMALL SEPARATED HEAT PIPES

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

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Research Institute of Engineering Thermal Physics, China Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Some experimental studies were carried out to working temperature with heat exchanging of the small separated heat pipes with short canals. The studies were taken under the following conditions: the temperature were between 140°C and 220°C and the heat current was between 21.1 and 40.2 kW/m². The diversification of α_e (average boiling heat exchanging coefficient) and α_c (average coagulation heat exchanging coefficient) along with the q (heat fluxion) and working temperature were measure in 6 different filling liquid ratio test conditions. According to the results of the experiments, the most optimum filling liquid ratio (which is 25%, by all capacity of pipes), and the average coefficient of boiling heat exchanging in evaporator and the synthetical equation of coefficient of heat exchanging Nusselt in condenser were developed.

Key words the small separated heat pipes; liquid ratio; heat exchanging

1 引言

分离式热管因其蒸发段和冷凝段可以分开布置而具有若干众所周知的优点, 诸如蒸发段和冷凝段可以根据热、冷两种换热流体的环境条件而采用不同的材料, 可以实现热量在一定范围内的远距离传输, 可以方便地实现一热源多冷源或多热源-冷源之间的传热等等。迄今对大型和中型分离式热管的性能已进行了比较充分的研究, 其应用也有了长足进展。但在许多应用场合, 采用具有短管束的小型分离式热管, 是一种合理的选择。小型分离式热管的内部沸腾、流动和凝结换热过程及其影响因素与大、中型分离式热管的相应特征有较大的差异,

迄今这方面的研究报道较少, 因而有必要就此作进一步深入了解, 以便为实际应用提供合理依据。本文对小型分离式热管的工作温度与传热特性的关系进行实验研究。根据实验结果给出了最佳充液率以及最佳充液率下的内部平均沸腾换热系数和凝结换热努赛尔数综合关系式。

2 实验装置

实验装置的蒸发段和冷凝段都是由 5 根 $\phi 20$ mm \times 1 mm 的无缝钢管短管束组成, 管子长度为 152 mm, 带有紧套的钢帛环形肋片 (肋片外径 40 mm, 厚 1 mm, 片间距 4 mm), 其简图如图 1。

收稿日期: 2004-1-08; 修订日期: 2004-09-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (973 项目) 资助 (No.G2000026304)

作者简介: 唐志伟 (1966-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 主要从事传热强化、过程节能以及地热能的热泵利用等方面的研究。

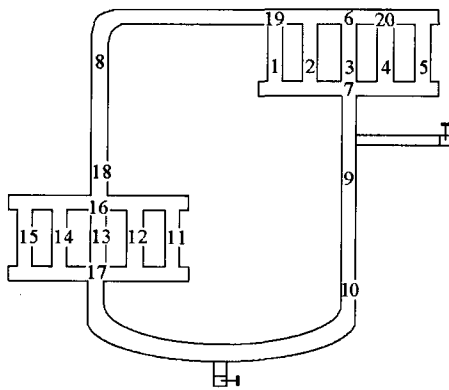


图 1 实验装置简图

蒸发段下端有一较粗 ($\phi 38 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$) 的集液管, 其中焊一套管 ($\phi 28 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$), 套管内插入管状电加热器, 此外在集液管、带肋管束外部还缠绕电加热带。管状电加热器和电加热带并联, 用做蒸发段的加热电源。通过稳压器、调压器和精密电流电压表控制和测量加热功率。冷凝段上端有一较粗 ($\phi 38 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$) 集汽管, 其中焊一带盲端的紫铜套管 ($\phi 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$), 紫铜套管内插入两副热电偶, 用以测量蒸汽温度。蒸汽上升管和冷凝液回流管均为 $\phi 25 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的无缝钢管。冷凝段带肋管束安置在开式风道中, 可以用小型离心式风机进行强制对流冷却, 除此之外整个实验装置都用保温材料严密包裹起来。在实验装置上共敷设 20 副热电偶, 用以测量相应各点的温度, 图中阿拉伯数字示意表示所敷设的热电偶测点的大致位置。还在冷凝段带肋管束之前的风道中, 安装 1 副热电偶, 在其后的风道中均布 3 副热电偶, 用以测量空气的温升。热平衡实验表明, 在实验参数范围内, 实验装置保温部分的热损失不超过 3%。实验时, 先使冷凝段处于自然对流冷却状态, 接着接通蒸发段加热电源, 在适当功率水平下使实验装置逐步升温。当蒸发段外壁温达到 110°C 左右时, 打开排气阀排出不凝结气体。根据冷凝外壁温的水平分布, 确定排气次数。排气夹带的蒸汽由玻璃冷凝器冷凝收集, 以准确核定充注液量。断开加热电源, 开风机对冷凝段进行强制对流冷却 (冷却过程中要继续注意关严排气阀)。当冷凝段外壁温降到 50°C 以下时, 重新接通蒸发段加热电源, 并在若干不同功率水平下进行相应实验测定。温度数据的采集由 DXJ-839 多回路温度显示记录仪进行, 功率由 0.2 级精密电流表和电压表进行测量。实验装置内部经过预处理, 实验工质为预处理过的蒸馏水。实验参数变化范围: 工作温度 $140 \sim 220^\circ\text{C}$, 最大热流密度 $21200 \sim 40200 \text{ W/m}^2$ 。

3 结果与分析

本项研究在工作温度 $t_v = 140 \sim 220^\circ\text{C}$ 范围内进行不凝结气体、沸腾及两相流不稳定性对热管性能的影响研究。在六种不同充液率下测定平均沸腾和凝结换热系数随热流密度和温度变化, 借以确定最佳充液率。根据所测定壁温和加热功率数据, 按下式计算平均沸腾换热系数 (α_e) 和凝结换热系数 (α_c):

$$\alpha_e = q / (t_{wie} - t_v) \quad (1)$$

$$\alpha_c = q / (t_v - t_{wic}) \quad (2)$$

式中热流密度 $q = P / 5\pi dL$ 这里 P 是热管蒸发段的加热功率, d 和 L 分别是热管蒸发段和冷凝管束基管的外径和长度; 工作温度 t_v 是测点 18、8 和 19 三处测定值的平均值。测点 20 的测定值因包含有不凝结气体的影响而不予计入; 蒸发段和冷凝段的 t_{wie} 和 t_{wic} 已分别由测定的相应外壁温 t_w 减去或加上按一维导热计算的沿管壁厚度的温降。考虑到各支管间实际存在着压力分布和流量分配的不均匀性, 确定以中间支管作为整理数据的基准。处理实验数据时用到的热物性数据均取自文献 [1]。

图 2 示出不同工作温度下热管各点的温度分布, 可以看到, 随着工作温度的升高, 冷凝段各点的温度趋于均匀, 这也定性表明了不凝结气体的影响; 而蒸发段各点的温度则一直比较均匀, 这可能是沸腾引起的强烈扰动所致。

图 3 给出不同工作温度下根据测定的壁温和加热功率数据而计算的平均沸腾换热系数和凝结换热系数随充液率的变化。由此可以看出, 按管束充液量与管束总容量之比计, 最佳充液率的范围是 20%~40%。就本实验装置而言, 蒸发段集液管还装有电加热器, 因而, 若把集液管的容量也计处在内, 则最佳充液率的范围应为 48%~63%。

蒸发段的沸腾—蒸发过程是个十分复杂的过程, 可能是包含有充分发展的泡态沸腾、薄液膜对流蒸发以及振荡流动沸腾在内的一个复杂过程。在实验中, 用听棒可以听到振荡流动声, 其频率随热流密度的增加而增加。对于这样一个复杂的过程, 要按热物理学相似分析的方法, 引入合理的物理—数学模型, 给出基本的相互作用物理量的量纲要求, 由此得出无量纲组合量之间的关系, 并以此为依据来拟合实验数据, 还有相当的困难, 有待继续深入研究。参照经验公式, 将本项研究所获取的最佳充液率下的沸腾换热系数实验数据分析整理并绘在图 4 上, 由此可以拟合出下列经验公式:

$$\alpha_e = 4.6891q^{0.0154}p^{0.4833} \quad (3)$$

沸腾换热系数单位是 W/m^2K , 热流密度单位是 W/m^2 , 压力单位是 Pa 。可以看到, 在同样压力下, 当热流密度相同时, 本文结果要比经验公式所给的值高得多。这高出的份额可能就包含着脉冲振荡沸腾和薄液膜蒸发等诸多因素强化作用的贡献。

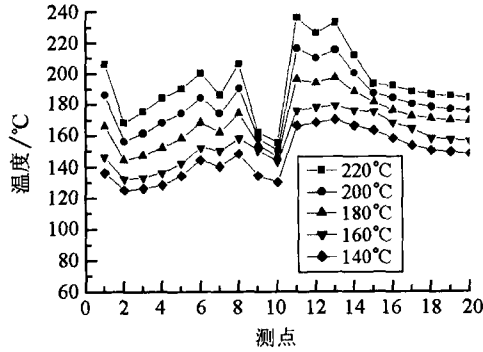


图2 不同工作温度下热管各点的温度分布

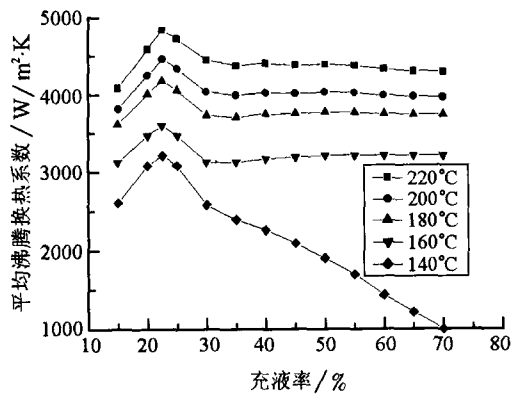


图3 平均沸腾换热系数随充液率的变化

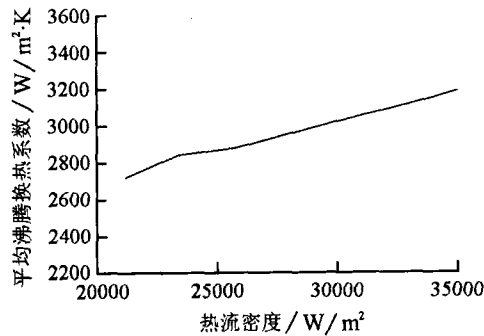


图4 平均沸腾换热系数随热流密度的变化

最佳充液率下热管冷凝段内凝结换热努赛尔数 Nu 随凝结液膜雷诺数 Re_l 的关系进行整理并标绘在图5上, 由此可以拟合出下列经验公式:

$$Nu = 15.5 \times 10^{-4} Re_l^{1.23} \quad (4)$$

式中:

$$Nu = \left(\frac{\alpha_c}{\lambda_l} \right) \left[\frac{\rho_l v_l^2}{(\rho_l - \rho_v)g} \right]^{1/3} = \left(\frac{\alpha_c}{\lambda_l} \right) \left(\frac{v_l^2}{g} \right)^{1/3}$$

$$Re_l = 4P / (5i_{lv} \rho_l v_l \pi d_i)$$

式中 λ_l , ρ_l , v_l 分别为冷凝液的导热系数、密度和运动粘度, 按定性温度 $(t_v + t_{wic})/2$ 取值; ρ_v 是蒸汽的密度, 因其远小于 ρ_l , 故不予计及; i_{lv} 是汽化潜热, 按定性温度 $(t_{wie} + t_v)/2$ 取值; α_c 是按测定的实验数据计算的平均凝结换热系数; d_i 是冷凝段支管的内径。

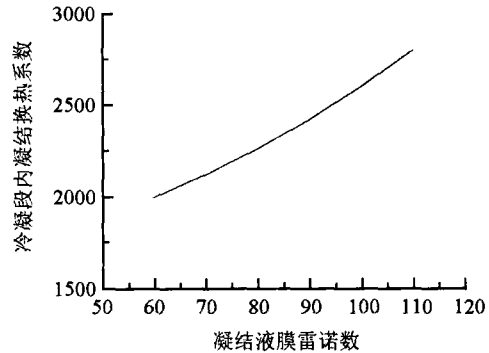


图5 冷凝段内凝结换热系数随凝结液膜雷诺数而变化的关系 (Nu , Re_l)

可以看到, 努赛尔数随凝结液膜雷诺数的增加而增加, 这表明液膜流动不是平滑层流, 而是具有某种形态界面波的波纹层流, 依据自由降膜流动表面波特性的观测, 界面波的扰动可能随凝结液膜雷诺数的增加而增强。

4 结 论

在本项实验研究的条件下, 小型分离式热管的最佳充液率, 按管束总容量计, 为 20%~40%; 按蒸发段总容量计, 应为 48%~63%。

根据实验结果拟合出最佳充液率下的蒸发段平均沸腾换热系数经验公式以及冷凝段凝结换热努赛尔数综合关系式, 式 (3) 和 (4), 可供实际应用参考。

小型分离式热管冷凝段的凝结换热受到诸多因素的不利影响, 特别是不凝结气体、蒸发段脉冲振荡沸腾和两相流不稳定性以及腐蚀等因素造成的表面粗糙度等的不利影响, 这些方面的定量比较仍有待继续进行研究。

参 考 文 献

- [1] 科利尔. 对流沸腾和凝结. 魏先英译. 北京: 科学出版社, 1982. 74-102
- [2] Stephen K. Heat Transfer in Condensation and Boiling. The English Translation, Translated by C V Green, Springer-Verlag, New York, 1992. 150-151