

重力热管传热波动特性研究及抑制方法探讨

陈彦泽, 周一卉, 信伟

(大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116012)

摘 要: 重力热管在启动、稳定操作、工况条件变化时的脉冲沸腾和温度波动现象, 对热管的传热效果和使用寿命有不利影响。采用简单的弹簧抑泡装置, 可以抑制热管内工质产生气泡, 吸收气泡中的热能, 使工质温度分布趋于均匀, 同时, 可以强化工质和管壁间的对流换热。实验表明, 采用弹簧式抑泡装置的重力热管强化传热效果十分明显。

关键词: 热管; 抑泡; 脉动特性; 喷涌现象

中图分类号: TQ035.6 文献标识码: A

1 引言

热管在实际使用过程中存在传热脉动(或称脉动沸腾)现象, 目前国内外已有许多研究人员开展了对这一现象的深入研究工作。

日本研究人员 A. Nakano, M. Shiraishi 等^[1]对两相氮热管在较大操作条件下的工作特性进行了研究, 分析了低温氮热管在一定操作条件下存在的脉动现象的原因。意大利研究人员 W. Ambrosini 和 J. C. Ferreri^[2]采用数值差分方法对单相 LOOPED 热管的稳定性机理进行了分析, 指出各种边界条件对热管流动稳定性存在明显影响。Yu Yan Jiang, Masahiro^[3]等对环形热管的边界条件对其流动稳定性的影响进行了实验研究和理论分析, 认为导热良好的金属会削弱表面温度的扰动作用, 降低波动的驱动力从而增强整体环形热管的流动稳定性。昂雪野等^[4~5]对钢-水热管的脉冲沸腾的频率和强度分别进行了研究, 得到了脉冲沸腾频率的关联式以及脉冲沸腾强度的回归关联式, 并和实验数据进行了对比。唐志伟等^[6]对重力热管弹状流进行简化分析, 力图定量描述热管工作过程中的蒸发段内气泡的喷涌现象, 给出了液塞在弹状流气泡携带下的提升高度和体积流量与两端压力的关系。

2 实验研究

实验装置如图 1 所示。在待测热管表面安装热电偶测量表面温度, 温度测量采用铜-康铜型点式热电偶, 分度号 T 型, 温度测量范围 $-20 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$, 其响应时间 $< 300 \text{ ms}$ 。通过数据采集单元将温度数据采集到计算机中处理。实验中所采用数据采集单元为 HP47970A, 对铜-康铜热电偶的转换准确率为 $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$, 灵敏度为 $60 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 响应时间 $< 1 \text{ ms}$ 。该数据采集单元由专用的基于 Windows 软件 HP BenchLink Data Logger 管理并对数据进行初步处理。

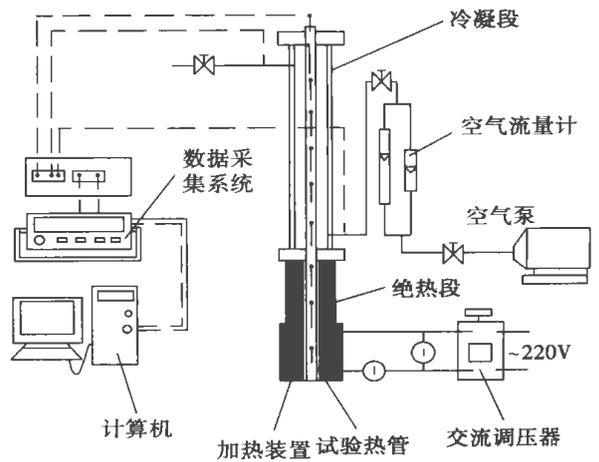


图 1 热管试验装置简图

通过对管材为玻璃制成的水热管的实验观察表明, 热管普遍存在和相关文献报道相符的温度波动现象, 实测玻璃热管的脉动传热过程中, 可观察到伴随工质的弹状流过程, 如图 2 所示, 实验测得热管的典型表面温度波动现象如图 3 所示。

热管表面温度波动的特点是: (1) 一般有明显的周期性, 波形十分有规律; (2) 温度波动的周期、幅度

均与热管蒸发段加热功率大小以及冷凝段空气流量等因素有关, 一般随加热段加热功率的提高, 温度波动周期和波动幅度均减小; (3) 蒸发段和冷凝段温度波动正好反向; 对以水为工质的热管实验, 观察到最大的蒸发段表面温度波动幅度可达 20 °C 左右。

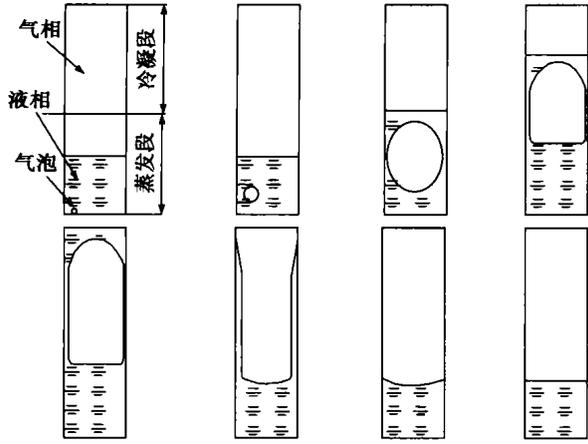


图 2 重力热管的脉动传热过程

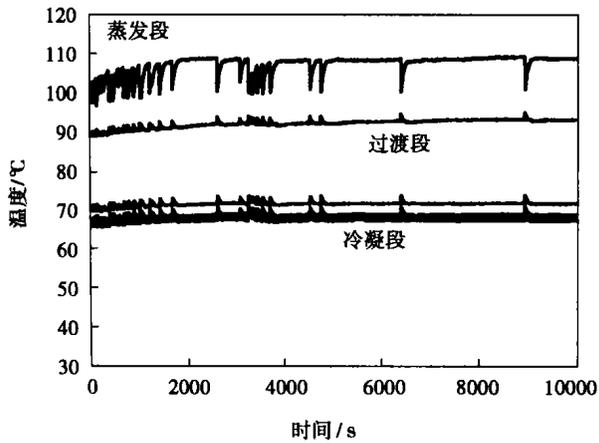


图 3 重力热管温度波动曲线

热管内部脉冲沸腾现象, 可以由两相流理论中的流型变迁导致的流动和传热不稳定性来加以解释。热管稳定工况时, 传热过程为工质在蒸发段吸热蒸发, 形成蒸汽迅速上升, 在冷凝段放热冷凝, 在重力作用下回到热管底部液池中, 开始下一个循环。实际过程中常常由于加热段存在相当程度的过热度, 使热管液池内工质产生大量气泡, 当在气泡长大上升过程中, 就会导致管内蒸汽量发生变化。进一步导致热管内流型由环状流向弹状流的转变, 形成如图 2 所示的流动传热过程, 这是热管典型的脉动传热过程。这一过程有时在很短的时间内完成 (几十~几百毫秒), 有时又要经历一个相对较长的周期

(数十~数百秒), 脉动传热的周期和幅度在很大程度上取决于过热度对气泡成长和上升过程的影响程度。可见, 热管液池内工质中气泡的生成、生长、运动对热管的脉动传热有着十分重要的影响。冷凝段的热流密度影响工质的冷凝速度, 是工质由气相冷凝为液相后返回底部液池的动力, 如果气相能迅速冷凝, 放出热量后形成过冷换热后, 在重力作用下回到底部液池, 就完成了—个循环周期。

研究人员在较早对热管的研究和使用过程中, 就已注意到热管的传热脉动现象和这种现象的不利影响^[7], 并对这一现象提出了解释和抑制方法。如在文献 [7] 中所介绍的抑泡器是一种表面开有一定直径的小孔的圆管, 在表面开孔率为 30% 时抑泡和强化传热效果十分明显, 这种抑泡装置的基本形式见图 4。

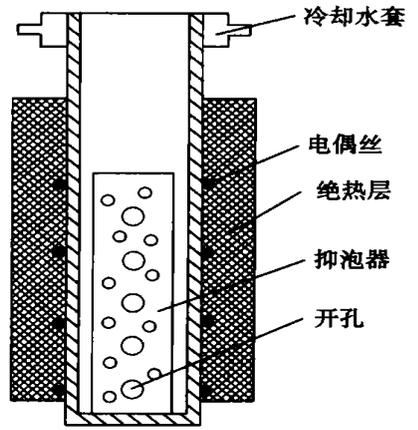


图 4 文献 [7] 中介绍的抑泡装置

本文主要介绍一种结构更加简单的新型抑泡装置和它的基本特点。这种抑泡装置为采用细铜丝卷制的铜弹簧。在底部加装弹簧后的热管如图 5 所示。铜制弹簧和管壁间存在非常小的间隙, 长度略高于热管的充液液面 5~10 mm 为好。弹簧的铜丝尺寸分别为 0.30、0.35、0.5、0.8。其它几何规格见表 1。

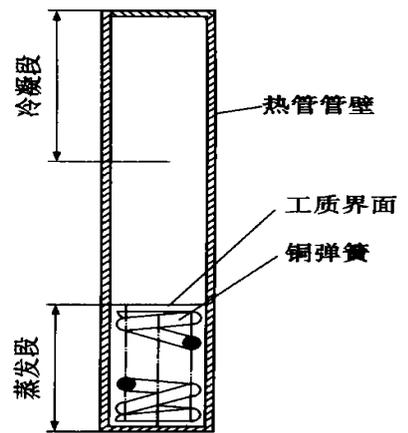


图 5 抑泡器简图

3 数据分析与讨论

通过对实验数据的处理和分析, 发现弹簧不仅

对脉动传热现象有良好的抑制作用，同时还大大强化了热管的传热能力，如图 6 数据对比。图 7 分别对比了不同规格铜丝制成的抑泡装置的传热强化效果，可见在实验条件下，较细的铜丝要好于相对较粗的铜丝。其主要原因与细铜丝吸收能量的能力要高于粗铜丝，但由过细的簧丝制成的弹簧刚度较差，使用时容易失去原来的形状。

表 1 铜丝规格 (mm)

	丝径	弹簧外径	弹簧高度	节距
1	0.30	7.0	45	0.42
2	0.35	7.0	50	0.55
3	0.5	7.0	55	0.61
4	0.8	7.0	48	0.53

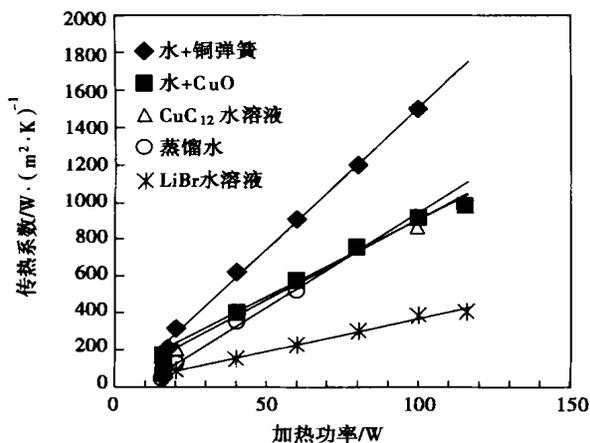


图 6 传热性能实验对比曲线

通过对图 7 的实验数据分析，在加热功率较小时(加热功率为 20 W)，铜丝的粗细对热管的强化传热效果比较接近，这时，通过对玻璃热管观察，管内铜簧表面有极少量小气泡产生，簧丝无明显振动现象。当加热功率达到一定范围时(加热功率 20 ~ 60 W)，细簧丝强化传热的效果开始好于粗簧丝，同时可以观察到弹簧表面有气泡生成，但随即在弹簧表面破裂，簧丝有明显的振动产生。继续提高加热功率(加热功率大约在 60 W 以上)，细簧丝强化传热的效果明显好于粗簧丝。这时在管内工质里开始出现较大气泡并迅速上升，并出现工质的沸腾现象，铜簧振动十分剧烈，有时甚至会向上跳动一定高度后，再降回到液池中。多数气泡沿簧丝上浮到工质界面后破裂。相对较粗簧丝而言，细簧丝的簧丝振动更加剧烈，液池中的大气泡产生的概率相对较少。

在热管蒸发段中加入弹簧的强化传热机理在于，回流的工质在高于工质液面的弹簧簧丝间一般

能形成局部膜状沸腾，弹簧吸收气泡运动的机械能会发生轻微的振动，使小气泡在生长和上升过程中碰到振动的铜簧丝后破裂，从而抑制了气泡的生长。同时，导热性能良好铜簧丝可以使液池中温度更趋于均匀，避免液池蒸发段出现局部过热，减少了生成气泡的初始条件。

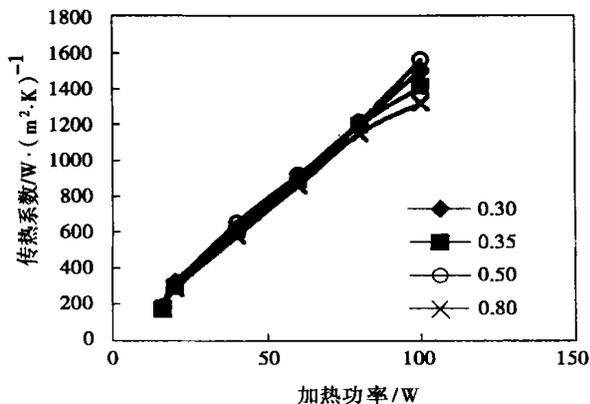


图 7 铜丝规格对传热强化效果的影响分析

实验结果表明，加装弹簧后，特别是细铜丝制成的弹簧，可以使传热得到明显的强化。和文献[7]中介绍的抑泡装置相比，铜簧可以在气泡的作用下发生振动，使工质中无法出现较大尺寸的气泡，抑泡效果更加明显，同时其制造更加简单，成本低廉，实现工业化生产非常容易，可以用于多种工质条件，是一种十分有前途的热管传热强化方法。

采用细弹簧吸收液池中气泡动能、均匀液池温度的方法，可以有效避免温度波动现象的发生。沸腾喷涌现象的机理分析，提示我们采用相似的方法寻找抑制气泡的新装置，进而在高中温热管中使用。

4 结 论

热管在启动、稳定操作以及操作条件变化等条件下，通常会发生脉动传热现象，这种现象和热管内部气泡的产生和成长有着密切的关系，并且对热管的传热性能和使用寿命都有不利的影响。采用在管内加装抑泡弹簧后，在实验条件下(工质为蒸馏水、加热功率从 16 ~ 114 W)，热管未再出现明显的温度波动现象，同时传热效率有较大提高。可见热管采用抑泡装置效果十分明显。较细的簧丝更易于吸收工质沸腾的热能和机械能，使工质内温度分布趋于均匀。采用相对较细的铜丝制造的铜簧对热管传热强化有更好的效果。

不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较

王海刚, 刘 石

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 采用标准 $\kappa-\epsilon$ 模型、RNG $\kappa-\epsilon$ 模型和 RSM (SSG) 模型, 对气-固旋风分离器中的单相湍流流场进行数值模拟计算。旋风分离器网格划分采用分块划分技术, 每一块采用贴体坐标划分网格, 计算结果同试验比较, 三种模型中以 RSM 模型的预报结果最为合理, 对切向速度分布的涡结构给出了合理的预报结果, 同时给出了雷诺应力的各向异性特性, 但同实验值仍有一定的差别, 分析认为同湍流模型本身的原因外, 与入口边界条件的选取和网格划分的多少有一定的关系。

关 键 词: 旋风分离器; 湍流模型; 数值模拟

中图分类号: O241 文献标识码: A

1 前 言

旋风分离器中气相强旋流湍流数值模拟, 大多都采用基于涡粘性假设下的湍流模型, 如标准 $\kappa-\epsilon$ 模型^[1]、代数应力模型^[2]等, 计算结果表明上述模型都不同程度地存在缺陷, 不能给出涡的合理结构。针对这一问题而开发的多种模型修正形式^[3~5], 虽在一定程度上改善了预报结果, 但改进是有限的。严格来说解决上述模型缺陷的根本途径在于完全抛弃基于各向同性涡粘性假设的湍流模型, 采用雷诺应力运输模型。近几年来有不少人采用了雷诺应力

运输模型计算液液分离器^[6]和气固分离器中湍流流动^[7~9]的计算, 但上述雷诺应力模型中压力应变项没有考虑壁面作用, 并且往往将计算简化为二维流动, 这必将会对计算结果带来一定的误差。本文首次采用 RSM 中 SSG^[10] 模型对旋风分离器中三维气相流场进行了数值模拟计算, 该模型压力应变项中考虑了壁面效应。本文采用标准 $\kappa-\epsilon$ 模型、RNG $\kappa-\epsilon$ 模型和雷诺应力三种湍流模型计算旋风分离器中气相流场并同试验结果比较, 选取一种最佳的湍流模型, 为今后旋风分离器中气固两相湍流模拟打下基础。

2 湍流方程

2.1 标准 $\kappa-\epsilon$ 模型

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho (C_{\epsilon 1} G_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}) \quad (2)$$

收稿日期: 2003-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50076045)

作者简介: 王海刚(1971-), 男, 辽宁阜新, 中国科学院工程热物理研究所助理研究员。

参考文献:

- [1] NAKANO A, SHIRAISHI M, NISHIO M, *et al.* An experimental study of heat transfer characteristics of a two-phase nitrogen thermosyphon over a large dynamic range operation [J]. *Cryogenics*, 1998, **38**: 1259-1266.
- [2] YU YAN JIANG, MASASHIRO SHOJI, MASASHI NARUSE. Boundary condition effects on the flow stability in a toroidal thermosyphon [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, **23**: 81-91.
- [3] AMBROSINI W, FERRERI J C. Stability analysis of single phase thermosyphons by finite-difference numerical methods [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2000, **201**: 11-23.
- [4] 昂雪野. 热虹吸管中间歇沸腾频率的研究 [J]. 齐齐哈尔轻工业学院学报, 1994, **10**(3): 9-16.
- [5] 昂雪野. 热虹吸管内脉冲沸腾强度的研究 [J]. 齐齐哈尔轻工业学院学报, 1995, **11**(1): 16-19.
- [6] 唐志伟. 重力热管弹状流工况的简化分析 [J]. 工程热物理学报, 2002, **23**(3): 345-347.
- [7] 庄 骏, 张 红. 热管技术及其工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

(何静芳 编辑)

火力发电机组锅炉控制技术的新进展 = **New Advances in the Development of Boiler Control Technologies for Thermal Power Plants** [刊, 汉] / LUAN Xiu-chun, LI Shi-yong (Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 329 ~ 333

The development both at home and abroad of boiler control technologies for thermal power plants during the past five years has shown that the precise mathematical model-based traditional control techniques suffer from great limitations. This comes about because of the presence of numerous unfavorable factors, such as non-linearity, uncertainty and great inertia, etc, especially in the case of a steady increase in unit capacity of power generating units and highly frequent wide-range load fluctuations in electric networks. However, control techniques not fully dependent on precise mathematical models, such as fuzzy control, neural control, self-adaptive and predictive control, etc have provided new approaches for the control of boilers. In this connection, intelligent control based on the simulation of human reasoning and decision-making has become a trend of future development. From the scientific perspective of non-linear behavior the authors have addressed the boiler control issue as an integral part of the whole power plant, which is conducive to enhancing the performance of the control system of both the boiler and the power plant as a whole. **Key words:** utility boiler control, fuzzy control, neural control, self-adaptive control, predictive control

重力热管传热波动特性研究及抑制方法探讨 = **An Investigation of the Heat-transfer Fluctuation Characteristics in Gravity Heat Pipes and an Exploration of Methods for Their Restraint** [刊, 汉] / CHEN Yan-ze, ZHOU Yi-hui, DING Xin-wei (Chemical Engineering Institute under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 334 ~ 336

Pulse boiling and temperature fluctuations will occur in gravity heat pipes during their startup and in case of a change in their stable operating conditions. This will have a negative effect on the heat transfer efficiency and the service life of heat pipes. The use of a simple spring-loaded bubble-suppression device may restrain the generation of gas bubbles from working media in heat pipes and absorb the heat energy in gas bubbles, thereby making the working-medium temperatures tend to assume a uniform distribution. Meanwhile, this is also conducive to intensifying the convection heat transfer between the working media and pipe walls. Tests have shown that the heat-transfer intensification effectiveness of gravity heat pipes is very conspicuous thanks to the use of the above-mentioned bubble-suppression device. **Key words:** gravity heat pipe, bubble suppression, pulse characteristics, periodic geyser phenomenon

不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较 = **Application and Comparison of Different Turbulence Models in the Three-dimensional Numerical Simulation of Cyclone Separators** [刊, 汉] / WANG Hai-gang, LIU Shi (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 337 ~ 342

Numerical simulation calculations were conducted of single-phase turbulence flow fields in a gas-solid cyclone separator with the use of a standard $k-\epsilon$ model, RNG $k-\epsilon$ model and a Reynolds stress model (RSM). A bloc division technique was employed for the mesh division of the cyclone separator with each bloc using curvilinear coordinates for mesh division. The results of calculation were compared with those of experiments. Among the three models the prediction results of the RSM model have been found to be the most rational, which gave rational forecast results for a vortex structure with a tangential speed distribution. At the same time, the anisotropic behavior of Reynolds stresses was also presented. However, some discrepancy still exists between the simulation results and the experimental ones. An analysis has shown that apart from the feature of the turbulence model itself this can somehow be attributed to the selected inlet boundary conditions and the adopted mesh division. **Key words:** cyclone separator, turbulence model, numerical simulation