

管壁导热对脉管内自然对流换热影响的研究

丁文静 何雅玲 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 本文计算了不同脉管倾角和管壁材料下脉管管壁导热对自然对流换热的影响。发现脉管壁面导热对换热的影响不仅体现在增加了壁面的纯导热部分, 更主要的是强化了脉管内的自然对流; 壁面和内部气体的温度差异沿脉管轴向的变化是管壁导热强化自然对流的主要原因。

关键词 管壁导热; 脉管; 倾斜圆柱; 自然对流

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2003)03-0469-03

STUDY OF THE EFFECT OF TUBE WALL HEAT CONDUCTION ON THE NATURAL CONVECTION IN PULSE TUBE

DING Wen-Jing HE Ya-Ling TAO Wen-Quan

(School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The effect of the pulse tube wall heat conduction on the natural convection in the pulse tube was numerically investigated with the pulse tube of different materials being positioned at different orientations. It is found that the cylindrical envelope lateral wall heat conduction can significantly enhance the heat transfer from the hot end to the cold end, not only because the increase in pure heat conduction in the wall, but more importantly, also intensify the natural convection within the enclosure. This enhancement is resulted from the big temperature difference between the tube wall and the adjacent fluid near the hot and cold ends.

Key words tube wall heat conduction; pulse tube; tilted cylindrical envelope; natural convection

1 问题的提出

脉管制冷机是利用高低压气体对脉管空腔进行周期性地充、放气来获得制冷效果的, 图 1 是脉管制冷机的结构示意图。

通常, 脉管的热端处于环境温度, 而冷端获得低温。显然, 脉管内沿长度方向有一个较大的温度梯度。脉管制冷机既可以在太空领域中应用, 也可以在地面(包括近地面)领域中应用, 而且随着高新技术的发展, 在地面的应用领域会越来越广。对地面及近地面应用的低频脉管制冷机, 其脉管冷、热端的巨大温差可能会引起其内气体的自然对流。

当脉管冷、热端被摆放的位置不同时, 脉管内

的自然对流会对脉管制冷机产生不同的影响。脉管倾角对自然对流的影响在文献 [1] 中已经有了详细

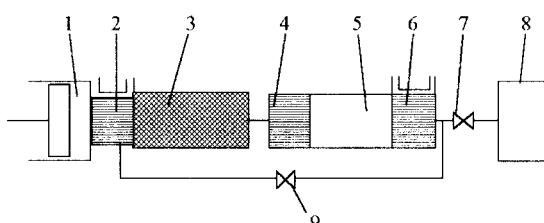


图 1 脉管制冷机的结构示意图

1 压缩机 2 水冷器 3 回热器 4 冷端换热器;
5 脉管 6 热端换热器 7 小孔 8 气库 9 双向进气孔

收稿日期: 2002-12-12; 修订日期: 2003-03-28

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展规划资助项目 (No.G2000026303); 国家自然科学基金资助项目

作者简介: 丁文静 (1978-), 男, 山东单县人, 博士研究生, 主要从事传热强化、计算传热以及脉管制冷机的数值模拟的研究。

的计算和讨论，但是文献[1]在计算时没有考虑到脉管的壁面导热对脉管内自然对流的影响。对于实际的脉管，脉管壁面不管是尼龙还是不锈钢，其导热系数都大于脉管内工质的导热系数，因此分析管壁导热的影响具有重要意义。

本文计算了脉管在不同倾角和材料下的自然对流换热量，并和文献[1]中不考虑壁面导热作用的结果进行了比较。

2 物理问题及数学描写

本文所采用的脉管计算模型如图2所示。

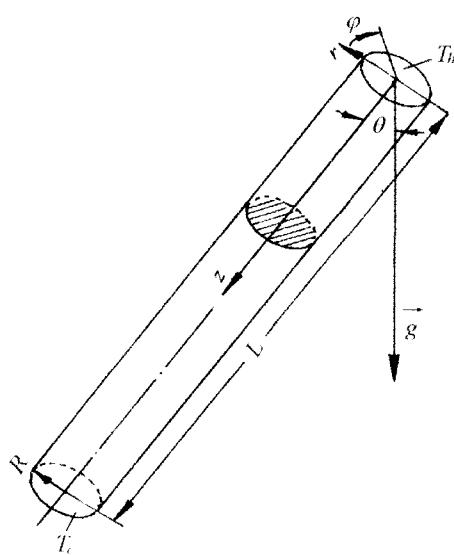


图 2 3 维脉管计算模型立体图

$\varphi - r - z$ 是 3 维圆柱坐标系的 3 个坐标。设重力与脉管轴线(从热端指向冷端)的夹角为 θ 。显然气体在脉管内的自然对流是一个 3 维的流动，该流动以通过轴线和重力作用方向的平面为对称面。计算中取脉管长为 0.250 m，内径为 0.0278 m，外径为 0.0298 m，热端温度为 300 K，冷端温度为 80 K，计算工质为氦气。由于冷热端的温差高达 220 K，氦气的物性(密度、粘性、导热系数等)的变化达 2.35~3.75 倍，一般封闭空腔内的自然对流计算时采用的 Boussinesq 假设已经不能适用^[2]，需要全面考虑变物性的影响。据文献[3]，3 维圆柱坐标系中变物性的控制方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}(\rho w \phi) = \\ \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(\Gamma r \frac{\partial \phi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial \varphi}\right) + S \quad (1) \end{aligned}$$

其中 ϕ 为通用变量，代表三个速度分量 u, v, w 以及温度 T ， Γ 为广义扩散系数， S 为广义源项。当计算

区域内流体的动力粘性系数发生剧烈变化时，速度的广义源项计算如下：

(1) 计算区域为脉管内的流体时

$$w : S = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \cos \theta \quad (2a)$$

$$v : S = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\rho w^2}{r} - \frac{2\eta}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \quad (2b)$$

$$-\frac{\eta v}{r^2} - \rho g \sin \theta \cos \varphi$$

$$u : S = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} - \frac{\rho w v}{r} + \frac{2\eta}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \quad (2c)$$

$$-\frac{\eta w}{r^2} + \rho g \sin \theta \sin \varphi$$

(2) 计算区域为脉管固壁时

$$u, v, w : S = 0.0 \quad (3)$$

本文所计算问题的边界条件为：

速度：在脉管的外壁面处 $u = v = w = 0$ ；在 $\theta = 0$ 和 $\theta = \pi$ 的对称面处， $u = 0, \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{\partial w}{\partial \theta} = 0$ ；

温度： $z = 0, T = T_h; z = L, T = T_c; r = R, \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \theta = 0$ 和 $\theta = \pi, \frac{\partial t}{\partial \theta} = 0$ 。

3 数值方法

对脉管内工质气体和脉管固壁的耦合计算采取整场求解方法，即把计算区域中的固体当作粘性无穷大的流体，整场离散，整场求解。在采用整场求解时，固体与流体区中的导热系数采取各自的实际值，但固体区中的比热容则采用流体区的比热容之值，这样才能保证耦合界面上物理上的热流密度连续^[3]。

网格取为 $22(r) \times 20(\varphi) \times 80(z) = 35200$ 。基于温度的剧烈变化主要发生在冷、热端附近，因此在轴线方向采用非均分网格，使网格向两端面逐渐加密；在圆周方向采用均分网格；在半径方向，因为脉管的壁面较薄，故在壁面内采用较密的网格系统。

4 计算结果及讨论

4.1 脉管在不同倾角和不同管壁材料下的自然对流换热量

本文分别计算了尼龙(导热系数取为 0.25 W/(m·K))和不锈钢(导热系数取为 10.0 W/(m·K))两种不同材料的脉管在不同倾角下的自然对流换热

量。并和文献[1]中不考虑固壁的结果进行比较,结果如图3所示。

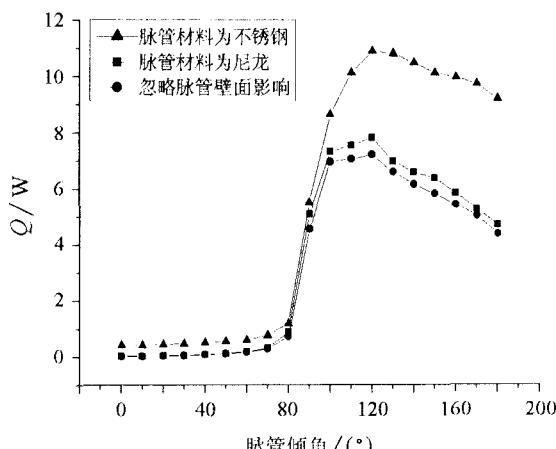


图3 脉管在不同材料和倾角下的自然对流换热量的对比

由图3可以看出:(1)在脉管的倾角为 $0^\circ \sim 80^\circ$ 时,脉管内的自然对流很小,换热主要是由于脉管冷热端温差引起的纯导热,这时脉管壁面对换热的影响主要为脉管壁面的纯导热;(2)当脉管的倾角为 $80^\circ \sim 180^\circ$ 时,脉管内的自然对流逐渐增强,到 120° 时达到最大值。这时脉管增加的换热量要远大于脉管固壁的纯导热量,所以脉管固壁对换热的影响除了增加一部分壁面的纯导热外,更主要的是强化了脉管内的自然对流;(3)脉管材料的导热系数对自然对流有很大的影响,从图3可以看出,不锈钢对自然对流的影响远大于尼龙。

4.2 脉管壁面强化自然对流的原因分析

图4为倾角为 120° 时,脉管截面平均温度沿轴向的变化,脉管材料为不锈钢。由图4可以看出在脉管冷热端处有很大的温度梯度,由于壁面材料的导热系数远大于内部气体的导热系数,所以在脉管的两端有较大一部分热量从壁面处导出或导入。在靠近热端处,壁面的平均温度要高于内部气体的平均温度,热量从壁面传向内部气体;在靠近冷端处出现了相反的温度分布,热量又从内部气体传回壁面。所以壁面强化自然对流的原因可以概括为:在脉管两端壁面处导入或导出了较多的热量,形成了

热冷端处壁面与附近流体间的大温差,增强了该处的局部自然对流,这样就使整个脉管的自然对流换热量大大增加。

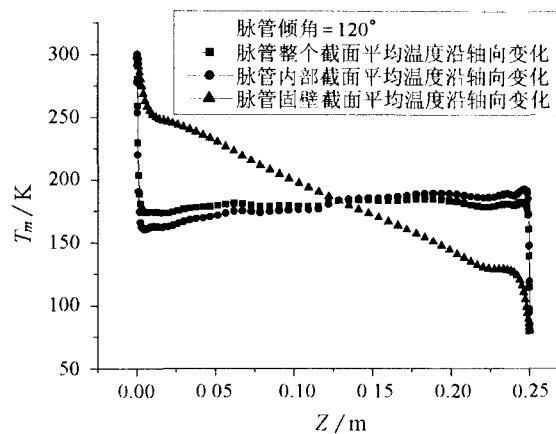


图4 脉管截面平均温度沿轴向分布

5 结 论

(1) 脉管壁面导热对换热的影响不仅体现在增加了固壁处的纯导热,更主要的是能强化脉管内的自然对流。

(2) 当脉管的倾角为 $0^\circ \sim 80^\circ$ 时,壁面的影响主要体现在增加了一部分纯导热量;在 $80^\circ \sim 180^\circ$ 时,在壁面的影响中,强化自然对流成为主要的因素。

(3) 脉管材料的导热系数对脉管内气体的自然对流有很大的影响,材料的导热系数增加时,壁面对脉管内自然对流的影响也大大加强。

(4) 在同一截面上管壁和内部气体的巨大温差是壁面强化自然对流的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 何雅玲. 分布式斯特林制冷机及脉管制冷机性能改进的理论与实验研究: [博士论文]. 西安: 西安交通大学, 2002
- [2] Gray D D, Giorgini A A. The Validity of the Boussinesq Approximation for Liquids and Gases. Int J Heat Mass Transfer, 1976, 19: 545-551
- [3] 陶文铨编著. 数值传热学, 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001