

一种两管径式脉动热管的流动与传热特性

章旺¹, 卢晓剑¹, 许国良¹, 陈新涛², 黄晓明¹

(1. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074;

2. 张家港科瑞电器有限公司, 苏州 215624)

摘 要: 为提高脉动热管的传热特性,提出了一种两管径式脉动热管结构,并基于质量、动量和能量守恒方程发展了适用的物理和数学模型。这种两管径式脉动热管对蒸发段和冷凝段取不同管径,两者的比值定义为直径比,应用上述理论模型分析了直径比对脉动热管运动规律和传热特性的影响。结果显示:采用两管径结构,可以有效提升脉动热管的自激振荡机制,特别是直径比小于1时的情况。而从传热特性而言,相比于传统等管径式脉动热管(直径比等于1),采用直径比小于1的结构可以使脉动热管的热阻明显减小,采用直径比大于1的结构却反而使传热特性下降。

关键词: 脉动热管; 两管径; 相变传热; 自激振荡; 传热特性

中图分类号: V231.1; TK124

文献标志码: A

Flow and heat transfer characteristics of a two-diameter pulsating heat pipe

ZHANG Wang¹, LU Xiaojian¹, XU Guoliang¹,

CHEN Xintao², HUANG Xiaoming¹

(1. School of Energy and Power Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Zhangjiagang Core Electric Company Limited, Suzhou 215624, China)

Abstract: In order to improve the heat transfer characteristics of pulsating heat pipes, a type of two-diameter pulsating heat pipe structure was proposed, and the applicable physical and mathematical model was developed based on the mass, momentum, and energy conservation equations. This two-diameter pulsating heat pipe adopted different pipe diameters between the evaporation section and the condensation section. The ratio of the two was defined as the diameter ratio. The above theoretical model was used to analyze the effect of the diameter ratio on the pulsating heat pipe motion and heat transfer characteristics. Results show that the two-diameter structure can effectively improve the self-excited oscillation mechanism of the pulsating heat pipe, especially when diameter ratio is less than 1. In terms of heat transfer characteristics, compared with the traditional equal-diameter pulsating heat pipe (diameter ratio equals to 1), using the structure of diameter ratio less than 1 can significantly reduce the thermal resistance of the pulsating heat pipe, but using the structure of diameter

收稿日期:2019-09-14

作者简介:章旺(1995—),男,硕士生,研究方向为脉动热管散热。E-mail:2863067678@qq.com

通信作者:黄晓明(1976—),女,副教授,博士,研究方向为热流体科学领域。E-mail:xmhuang@hust.edu.cn

引用格式:章旺,卢晓剑,许国良,等.一种两管径式脉动热管的流动与传热特性[J].航空动力学报,2020,35(11):2371-2377.

ZHANG Wang, LU Xiaojian, XU Guoliang, et al. Flow and heat transfer characteristics of a two-diameter pulsating heat pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11): 2371-2377.

ratio more than 1 instead can decrease the heat transfer characteristics.

Key words: pulsating heat pipe; two-diameter; phase change heat transfer; self-excited oscillation; heat transfer characteristics

随着科学技术的发展,电子产品朝着高集成度化发展,发热量急剧增大,对于微型散热器的需求不断增大。脉动热管(pulsating heat pipe)因其结构简单,且具有良好的传热特性和适应性成为近年来研究热点。无须吸液芯的特点使其能够在百微米量级的内径状况下正常启动运行^[1],从而在军用、航空、民生等领域具有独特的技术优势和广阔的市场前景^[2]。脉动热管由于冷热端温差使得交替分布的汽塞存在压差,推动工质在冷热段来回振荡做工,发生相变换热。在这一过程中,脉动热管的结构会对热管的启动及传热效果产生直接影响。目前针对等截面脉动热管的研究已有不少,包括实验研究^[3-5]、数值模拟^[6-8]、理论研究^[9-10],以及应用研究^[11]等方面。

不少研究指出,脉动热管的几何截面变化可能会增强其自激性,提高传热特性。因而特殊截面结构的脉动热管在近年来得到了广泛关注。商福明等^[12]通过实验证明在中、高负荷条件下,蒸发段与冷凝段交错布置的非均匀椭圆截面结构热管可以明显起到强化传热效果,与均匀截面结构热管相比,热传输功率提高了13.6%。王迅等^[13]以水为工质,对于变管径单回路脉动热管传热特性进行了CFD数值模拟,研究结果表明:变管径热管在脉动过程中的脉动振幅较小,具有良好的均温性,有利于降低单回路脉动热管的热阻,提高其稳定运行时的脉动频率,随着充液率的增加,该优势更加明显。Chien等^[14]设计了一种有着16个大小不一的平板方形通道的非均匀板式脉动热管,横截面分别为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 和 $1\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。实验结果表明非均匀脉动热管能够通过增大倾角增强传热特性。Kwon等^[15]通过实验研究了双直径通道对平板式微通道脉动热管流动和传热特性的影响。实验结果表明,在满足一定条件的情况下,具有双直径通道的平板式微通道脉动热管具有更好的热稳定性。孙芹等^[16]采用可视化与温度测量的方法对比研究了等截面和渐变式变截面硅基微型脉动热管内的工质运动和传热特性,实验结果发现:变截面通道结构的设计不仅有利于降低微型脉动热管的热阻,提高其传热能力,同时可有效改善其启动性能。

可以看出变截面脉动热管的研究以实验研究

居多,还缺少相关的理论模型对其进行系统分析。为更好地阐述截面变化对脉动热管自激特性的影响规律,本文提出一种简单的两管径式脉动热管,即蒸发段和冷凝段非等径结构,并采用能够较好反映工质脉动特性的“质量-弹簧-阻尼”模型对其进行数值研究,讨论了截面直径比对脉动热管传热特性的影响。

1 物理模型

1.1 两管径式脉动热管几何表征

本文所提出的两管径式脉动热管的几何模型如图1所示。图1(a)为典型等截面脉动热管示意图。金属毛细管弯曲成蛇形结构,一端为蒸发段,另一端为冷凝段,中间可根据需要布置绝热段。本文提出的两管径式脉动热管就是在这种结构的基础上发展起来的,主要区别在于蒸发段和冷凝段采用了不同直径。图1(b)为两管径式脉动热管的一个传热单元模型,用于对其内部的汽塞、液塞的运动和传热特性进行分析。该传热单元忽略了绝热段,由一个液塞和两个汽塞组成。汽塞与管壁之间存在液膜层,液膜与液塞相连。液膜与汽塞之间的气液界面,是汽塞和液塞发生相变传热和传质交换的主要界面。

图1(c)为其等效水平示意图,建模时忽略了弯头效应,保留了重力的影响。如图所示,脉动热管传热单元的蒸发段长度为 L_e ,管壁温度恒为 T_e 。冷凝段位于两个蒸发段之间,长度为 L_c ,管壁温度恒为 T_c 。液塞段长度 L_p 由脉动热管的充液率和几何结构决定。 x_p 表示液塞运动过程中的位移,下标1、2分别表示两端的汽塞,且 x_p 的正负表示液塞的运动方向,初始状态时 $x_{p0}=0$ 。

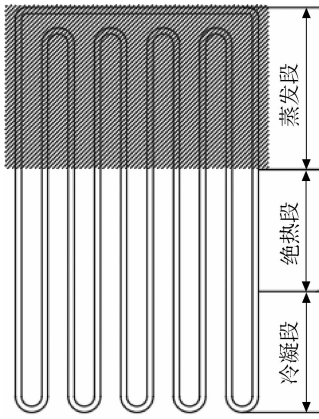
本文针对两管径式脉动热管进行分析,即在蒸发段和冷凝段采用不同直径的结构设计。直径比 β 被用来表示两管径的比值,其定义式为

$$\beta = \frac{d_1}{d_2} \quad (1)$$

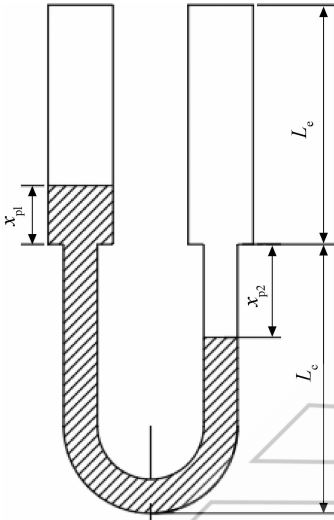
其中 d_1 为蒸发段管径, d_2 为冷凝段管径,当 $\beta=1$ 时,为均匀直通脉动热管。

建模中考虑如下假设:

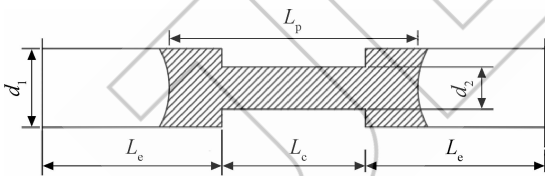
1) 汽塞中的气体视作理想气体,气体状态方



(a) 等截面脉动热管模型示意图



(b) 两管径式脉动热管传热单元



(c) 等效水平传热单元

图 1 两管径式脉动热管模型

Fig. 1 Two-diameter pulsating heat pipe model

程适用;液塞中的液体视为不可压缩流体,满足牛顿黏滞阻力公式。

2) 忽略对流换热,只考虑气液交界面上液体的相变换热。

3) 忽略管壁与外界环境的换热损失。

4) 液塞的位移、速度等参数均取其质心位置参数,汽塞中气体的温度、压力等参数,取一个汽塞内的平均值。

1.2 动量守恒

液塞在脉动热管中受到的各种作用包括:两

端压力差产生的推动力 F_p ,由于管型结构受到的形阻 F_f ,气液界面切应力 τ_p ,重力 F_g 。基于动量守恒原理,有

$$\sum F = F_p + F_f + \tau_p + F_g \quad (2)$$

根据式(2),其动量方程可以表示为

$$m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} = [p_{v1} A(x_1) - p_{v2} A(x_2)] - F_f - \Delta m_p g - A_{lp} \tau_p \quad (3)$$

其中 m_p 为液塞质量; $A(x)$ 为热管截面积; A_{lp} 为液塞管壁面积; g 为重力加速度; p_v 为汽塞压力。

热管截面积 $A(x)$ 与重心位置 x 有关

$$A(x) = \begin{cases} \frac{\pi d_2^2}{4} & L_e \leq x \leq L_e + L_c \\ \frac{\pi(\beta d_2)^2}{4} & x \leq L_e \text{ 或 } x \geq L_e + L_c \end{cases} \quad (4)$$

切应力 τ_p 可以表示为

$$\tau_p = 0.5 C \rho^2 \quad (5)$$

其中 ρ 为工质密度; C 为摩擦系数,由雷诺数 Re 决定^[17]

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (6)$$

$$C = \begin{cases} 0.078 Re^{-0.25} & Re \geq 1180 \\ 16/Re & Re < 1180 \end{cases} \quad (7)$$

其中 u 为速度, ν 为运动黏度。

研究表明,流动过程中截面变化带来的形阻(F_f)与动压头成正比关系。根据文献[18],本文对两管径式脉动热管中液塞流动过程产生的局部损失(h_j),采用下面的公式进行计算:

$$F_f = h_j \rho g A(x) \quad (8)$$

$$h_j = \frac{\epsilon u^2}{2g} \quad (9)$$

其中 ϵ 为局部损失系数,与 β 有关,可根据式(10)、式(11)进行计算^[18]。

对于突然扩大截面

$$\epsilon = \left(1 - \frac{1}{\beta^2}\right)^2 \quad (10)$$

对于突然缩小截面

$$\epsilon = \left|\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2}\right)\right| \quad (11)$$

1.3 能量守恒

当脉动热管处于稳定振荡状态时,两个汽塞与液膜因为工质相变而发生质量和能量交换,同时推动液塞做功。汽塞热力学能的变化量等于液塞做功与进入或离开系统的质量流带入和带出的能量

之和。建立两个汽塞在某时刻的能量守恒方程：

$$\frac{d(m_v u_v)}{dt} = p_v A(x) \frac{dx_p}{dt} + dm_v h_v \quad (12)$$

其中 m_v 为汽塞中气体质量； u_v 为汽塞单位质量的热力学能； dm_v 为汽塞质量的变化量； h_v 汽塞单位质量焓； dx_p 为汽塞的位移量。

汽塞中气体满足状态方程

$$p_v V = m_v R_g T_v \quad (13)$$

其中 R_g 为气体常数； V 为汽塞体积； T_v 为汽塞中气体温度。

液塞对汽塞的压缩过程可视为绝热压缩过程，根据前后状态变化可以建立如下关系式^[19]：

$$\frac{T_{v1}}{T_{v10}} = \left(\frac{p_{v1}}{p_{v10}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (14)$$

$$\frac{T_{v2}}{T_{v20}} = \left(\frac{p_{v2}}{p_{v20}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (15)$$

其中 T_{v0} 为初始温度， γ 为比热比； p_{v0} 为初始汽塞压力。汽塞中气体质量 m_v 与气体温度 T_v 和气体压力 p_v 存在关系：

$$m_{v1} = \frac{p_{v10}}{R_g T_{v10}} V_1 \left(\frac{p_{v1}}{p_{v10}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (16)$$

$$m_{v2} = \frac{p_{v20}}{R_g T_{v20}} V_2 \left(\frac{p_{v2}}{p_{v20}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (17)$$

1.4 质量守恒

两个汽塞中气体的质量变化量与相变导致的工质变化量相等。相变换热导致的工质变化可表示为^[17]

$$\frac{dm_{v1}}{dt} = \begin{cases} -k_c \pi dx_p (T_{v1} - T_c)/h_{fg} & x_p \geq 0 \\ k_e A_1(x_1)(T_e - T_{v1})/h_{fg} & x_p < 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{dm_{v2}}{dt} = \begin{cases} k_e A_1(x_2)(T_e - T_{v2})/h_{fg} & x_p \geq 0 \\ k_c \pi dx_p (T_{v2} - T_c)/h_{fg} & x_p < 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中 k_c 为冷凝段传热系数， k_e 为蒸发段传热系数， h_{fg} 为工质的汽化潜热。

1.5 脉动热量性能评价

本文通过对不同结构下脉动热管的热阻分析，对其散热性能进行评价。

热阻定义为

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (20)$$

其中 ΔT 为蒸发段与冷凝段温差，表示为 $\Delta T = T_e - T_c$ ；本文采用定温加热条件， Q 为脉动热管蒸发段和冷凝段传递的总传热率，可以表示为

$$Q = \sum_1^N Q_i \quad (21)$$

其中 Q_i 为传热单元传热率； N 为传热单元数目。

2 模型计算方法及验证

脉动热管内的初始条件包括：液塞的初始位移(x_{p0})、汽塞初始压力(p_{v0})与初始温度(T_{v0})、蒸发段温度(T_e)与冷凝段温度(T_c)。汽塞中气体质量通过理想气体状态方程与相变质量计算。

模型利用 MATLAB 采用迭代计算求解，对每个时间步长上的控制方程采用牛顿迭代，通过 4 阶 Runge-Kutta 法求解动量方程(3)，根据式(18)~式(19)求解相变换热质量，根据式(14)~式(17)求解汽塞状态参数，对式(3)~式(19)进行循环迭代求解，计算换热量。

为了验证模型的正确性，本文应用所提出的模型对王学会等^[20]的脉动热管传热特性实验系统进行了理论分析，并将数值计算结果与研究结果进行了对比。研究表明^[17]，可以应用脉动热管单元模型计算结果来推演完整的脉动热管传热特性。图 2 中，脉动热管的计算参数选取与文献^[20]的实验研究保持完全一致($\beta=1$ ，管径为 3 mm，传热单元数 $N=5$)，工质为去离子水，充液率选取 47%。图 2 为两种结果的对比图。可以看出，无论是热阻的变化趋势还是数值，理论模型计算结果与实验测量结果都十分吻合，说明本文提出的物理模型能够很好地分析脉动热管的传热特性。由于模型中采用了忽略环境散热、弯头损失等假设条件，在低传热量时与实验结果存在一定误差，最大误差约为 11.3%，而在高传热量时，这些假设引起的误差非常小，在允许误差范围内。

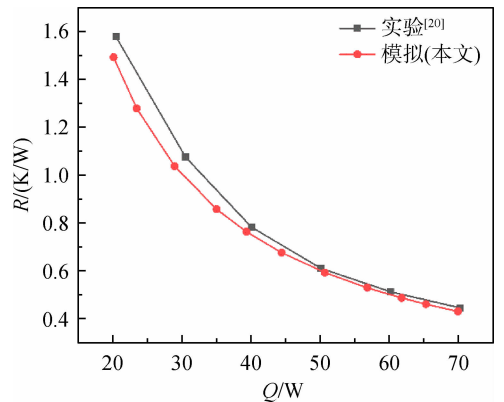


图 2 模拟热阻与实验热阻的对比

Fig. 2 Comparison of thermal resistance between models and experiments

3 结果分析

应用文中第 2 节的模型,本文主要分析了两管径式脉动热管结构参数对其热管散热性能的影响。为更好地分析 β 值变化带来的影响,在计算中改变 β 值的同时确保了热管的总管长 L 和总体积(V_{tol})不变。将对应的均匀等截面热管直径定义为当量基础管径(d_{eff}),即采用同一基础管径的脉动热管,其总管长和总体积均是相等的。计算中用到的主要分析参数如表 1 所示。

表 1 脉动热管单元计算参数

Table 1 Parameters of pulsating heat pipe unit

参数	数值及说明
工质	去离子水
充液率 $\alpha/\%$	40
直径比 β	0.5,0.8,1,1.5,2
冷凝段温度 T_c/K	293.15
加热功率 Q/W	0~80
环境温度 T_∞/K	298.15
基础管径 d_{eff}/mm	4

3.1 液塞振荡特性分析

图 3 为在 $\Delta T=313.15\text{ K}$ 加热条件下,两管径式脉动热管稳定振荡时液塞位移随时间(t)的变化。可以看出,对于两管径式脉动热管,液塞振荡特性随传热量的变化趋势相同,位移随着时间做周期性变化。

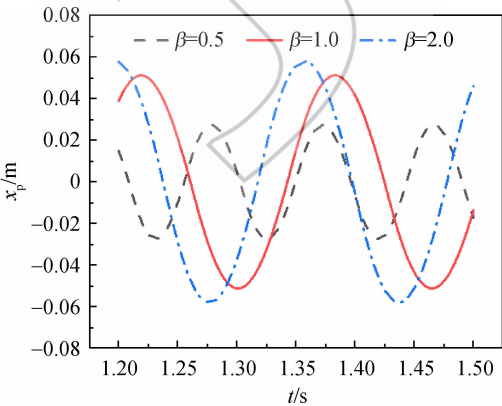
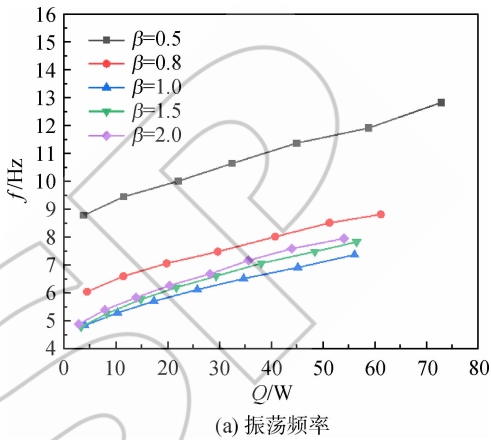


图 3 液塞位移变化($\Delta T=313.15\text{ K}$)

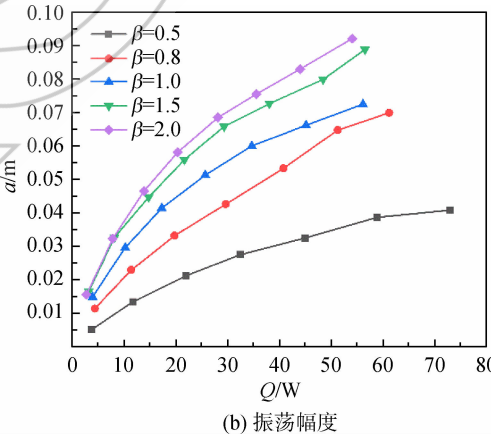
Fig. 3 Variation of liquid plug displacement ($\Delta T=313.15\text{ K}$)

图 4(a)和图 4(b)分别给出了两管径式脉动热管振荡频率(f)和幅度(a)随热负荷变化的情

况。由图中可以看出,所有热管液塞的振荡频率和振幅均随着传热量的增大而增大。相比 $\beta=1$ 时, $\beta>1$ 的结构带来的振荡频率增大并不明显,而振幅的增大却较为明显,说明产生的形阻需要消耗较大的能量积聚,对换热带来了不利影响。而 $\beta<1$ 时,振荡频率有明显提高,同时振幅也明显下降,说明形阻的影响没有带来较大的能量消耗,因而传热特性提高了。



(a) 振荡频率



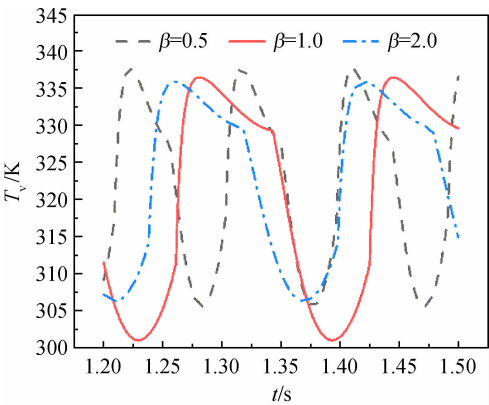
(b) 振荡幅度

图 4 液塞振荡特性随传热率的变化

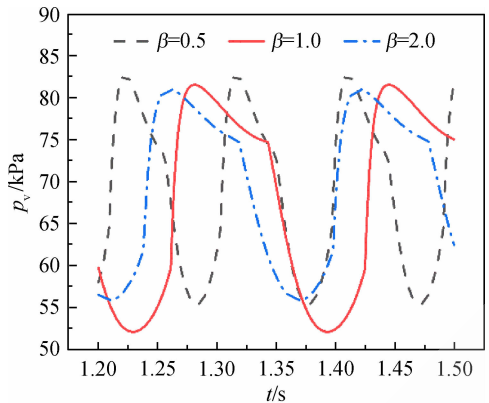
Fig. 4 Variation of liquid plug oscillation characteristics with heat transfer rate

3.2 汽塞状态分析

图 5 给出了两管径式脉动热管稳定振荡时汽塞 1 内气体温度和压力的变化情况(汽塞 2 的情况与之类似,仅存在相位差)。可以看到温度和压力变化情况基本上一致,它们的变化周期与液塞振荡特性基本相同。 $\beta<1$ 时,汽塞状态参数变化周期明显变短,即频率高于 $\beta=1$ 和 $\beta>1$ 时。还可以看出, $\beta=1$ 时气体压力和温度的变化范围最大,这意味着等管径脉动热管液塞运动需要自激励作用较大。分析原因,应该与液塞受到的形阻有关。



(a) 温度变化曲线



(b) 压力变化曲线

图 5 汽塞中气体状态参数比较($\Delta T=313.15\text{ K}$)
Fig. 5 Comparison of state parameters in vapor plugs ($\Delta T=313.15\text{ K}$)

图 6 给出了 3 种管型的汽塞内气体质量变化率随时间的变化。可以看出,同样热边界条件下, $\beta=0.5$ 时,气体质量变化率的周期更短,单位周期内的相变质量也更大。 $\beta=1$ 和 $\beta=2$ 的变化周期相当,但 $\beta=2$ 时的单位周期内的相变质量明显减小。这表明 $\beta<1$ 的结构设计对相变质量传输

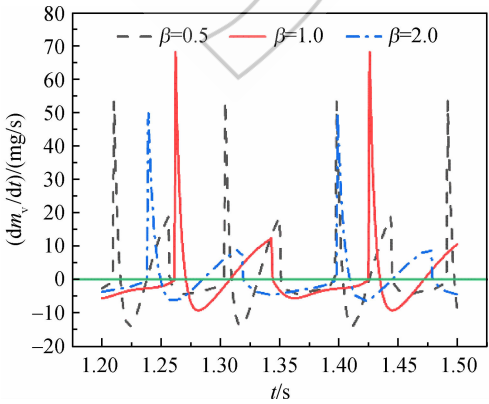


图 6 气体质量变化率比较($\Delta T=313.15\text{ K}$)
Fig. 6 Comparison of vapor mass change rates ($\Delta T=313.15\text{ K}$)

更为有利。

3.3 传热特性分析

本文通过热管的热阻对脉动热管传热特性进行评估。图 7 给出了不同 β 下的两管径式脉动热管热阻随传热率的变化。可以看出所有热管的热阻变化趋势相同。传热率较小时,热阻随传热率的增大而快速下降;传热率较大时,热阻随传热率的变化呈缓慢下降的趋势,并逐渐趋平。比较相同传热率下不同热管的热阻,可以发现 β 越小,热管的热阻越小,而 β 越大,热阻越大。

由图 7 分析结果看,并非变截面结构都可以改善脉动热管的传热特性。采用蒸发段直径较小、冷凝段直径较大的结构对脉动热管的传热性能更为有利。

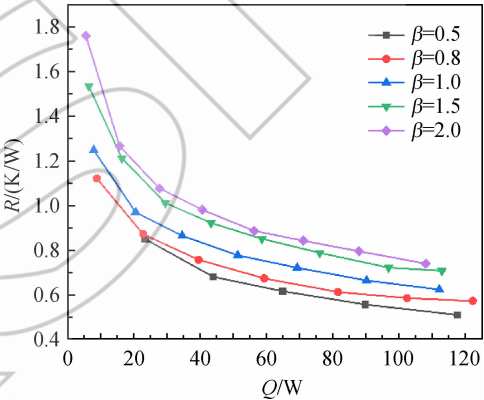


图 7 不同 β 下两管径式脉动热管传热特性分析
Fig. 7 Analysis of heat transfer characteristics of two-diameter pulsating heat pipe with different β

4 结 论

本文提出了一种两管径式脉动热管,在传热量相等的情况下,基于质量、动量和能量守恒方程发展了适用的物理和数学模型,利用数值求解的方法分析了几何结构对该类热管流动与传热特性的影响,得到了如下结论:

- 1) 采用两管径式结构对脉动热管自激励机制的影响主要表现在液塞振荡频率和振幅的变化。但振幅的大小是随着 β 单调变化的,即 β 越小,液塞位移的幅度越小。
- 2) 相比 $\beta=1$ 和 $\beta>1$ 的情况, $\beta<1$ 时因具有较高振荡频率和较小振幅,单位时间内的相变质量也更大,即具有更好的传热特性。
- 3) 从传热特性看,应采用 $\beta<1$ 的两管径式结构,即蒸发段管径要小,冷凝段管径要大。这种结构有利于缩短液塞长度,加快其振荡机制。

参考文献:

- [1] QU J, WANG Q, SUN Q. Lower limit of internal diameter for oscillating heat pipes: a theoretical model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 110: 174-185.
- [2] SARAFAZ M M, HORMOZI F. Experimental study on the thermal performance and efficiency of a copper made thermosyphon heat pipe charged with alumina-glycol based nanofluids[J]. Powder Technology, 2014, 266: 378-387.
- [3] SAHA N, DAS P K, SHARMA P K. Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 74: 238-250.
- [4] PASTUKHOV V G, MAYDANIK Y F. Development of a pulsating heat pipe with a directional circulation of a working fluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 155-161.
- [5] 屈健, 吴慧英, 唐慧敏. 微小型振荡热管的流动可视化实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 766-771.
QU Jian, WU Huiying, TANG Huimin. Flow visualization of micro/mini pulsating heat pipes[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 766-771. (in Chinese)
- [6] WANG J, XIE J, LIU X. Investigation on the performance of closed-loop pulsating heat pipe with surfactant[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 113998. 1-113998. 9.
- [7] SEDIGHI E, AMARLOO A, SHAFIL B. Numerical and experimental investigation of flat-plate pulsating heat pipes with extra branches in the evaporator section[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 39: 431-441.
- [8] 刘建红, 邓涛, 白俊超, 等. 脉动热管激励机制强化传热数值研究[J]. 科技创新与应用, 2018, 224(4): 38-39.
LIU Jianhong, DENG Tao, BAI Junchao, et al. Numerical study on enhanced heat transfer of pulsating heat pipe excitation mechanism[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2018, 224(4): 38-39. (in Chinese)
- [9] BAE J, LEE S Y, KIM S J. Numerical investigation of effect of film dynamics on fluid motion and thermal performance in pulsating heat pipes[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 151: 296-310.
- [10] MA H B, HANLON M A, CHEN C L. An investigation of oscillating motions in a miniature pulsating heat pipe[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2006, 2(2): 171-179.
- [11] KARGAR S A H, GHIASI M, JAHANGIRI M S, et al. A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe[J]. Desalination, 2013, 311: 206-210.
- [12] 商福民, 刘登瀛, 冼海珍, 等. 非均匀截面自激振荡流热管内热传输特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(2): 201-204.
SHANG Fumin, LIU Dengying, XIAN Haizhen, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of self-excited oscillating flow heat pipe with non-uniform cross section[J]. Thermal Power Engineering, 2007, 22(2): 201-204. (in Chinese)
- [13] 王迅, 刘梦阳, 王盼, 等. 变管径单回路脉动热管传热特性数值研究[J]. 化学工程, 2018, 46(9): 39-43.
WANG Xun, LIU Mengyang, WANG Pan, et al. Numerical study on heat transfer characteristics of single-loop pulsating heat pipe with variable tube diameter[J]. Chemical Engineering, 2018, 46(9): 39-43. (in Chinese)
- [14] CHIEN K H, LIN Y T, CHEN Y R, et al. A novel design of pulsating heat pipe with fewer turns applicable to all orientations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22): 5722-5728.
- [15] KWON G H, KIM S J. Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-diameter channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89: 817-828.
- [16] 孙芹, 屈健, 袁建平, 等. 截面和变截面通道硅基微型脉动热管传热特性比较[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 1803-1810.
SUN Qin, QU Jian, YUAN Jianping. Comparison of heat transfer characteristics of silicon-based micro-pulsation heat pipes with equal and variable cross-section channels[J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 1803-1810. (in Chinese)
- [17] YUAN D, QU W, MA T. Flow and heat transfer of liquid plug and neighboring vapor slugs in a pulsating heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(7/8): 1260-1268.
- [19] 赵汉中. 工程流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [19] SHAO W, ZHANG Y. Effects of film evaporation and condensation on oscillatory flow and heat transfer in an oscillating heat pipe[J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(4): 042901. 1-042901. 11.
- [20] 王学会, 袁晓蓉, 郑豪策, 等. 3 mm 闭式脉动热管传热性能的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 101-106
WANG Xuehui, YUAN Xiaorong, ZHENG Haoce, et al. Experimental study on heat transfer performance of 3 mm closed pulsating heat pipe[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 101-106. (in Chinese)

(编辑: 叶 青、陈 越)