

基于中心复合设计的平板型脉动 热管传热性能研究

傅烈虎¹, 王瑞祥^{1,2}, 李青冬¹, 吴业正¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 北京建筑工程学院环境与能源工程学院, 100044, 北京)

摘要: 应用中心复合设计的统计学原理对研究平板型脉动热管传热性能的试验方案进行了设计并进行了试验研究. 由试验数据得到了以充液率、倾斜角度和加热量作为变量的二阶回归模型, 统计回归结果与试验结果偏差在5%以内. 结果表明: 倾斜角度和加热量对传热热阻的影响均是二次方的关系; 充液率与加热量的乘积以及倾斜角度与加热量的乘积对传热热阻也存在影响; 充液率对脉动热管传热性能的影响与倾斜角度对脉动热管传热性能的影响之间没有统计学上的联系. 通过求解回归极值, 可以对模型在给定工况下进行优化, 从而获得脉动热管的最佳传热性能.

关键词: 脉动热管; 传热性能; 中心复合设计;

中图分类号: TB172.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1102-05

Research on Heat Transfer Performance of Flat Plate Pulsating Heat Pipe Based on Central Compound Design

FU Liehu¹, WANG Ruixiang^{1, 2}, LI Qingdong¹, WU Yezheng¹

(1. School of Power and Energy Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Environment and Energy Engineering, Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The experiment on heat transfer performance of flat plate pulsating heat pipe (PHP) was designed based on the central compound design. A second order regression model with variables including charge liquid rate, inclined angle, and heat quantity was obtained from the experiment data, and the deviation was within 5% between statistical regression values and the experiment values. The results show that transfer heat resistance of PHP was sensitive to the square of inclined angle and square of heat quantity, and it was also impacted by the arithmetic product of charge liquid rate or inclined angle and heat quantity. In addition, there was not obvious directly correlation between charge liquid rate and incline angle impacted on heat transfer performance of PHP in statistics. The conclusion can be drawn that the optimal heat transfer performance of PHP can be achieved by solving for extremum of regression model.

Keywords: pulsating heat pump; heat transfer performance; central compound design

影响闭回路脉动热管运行与传热的因素有很多, 大致可分为3类^[1]: 几何参数、物理参数和操作参数. 脉动热管的传热特性通常是这3类因素共同作用的结果, 不能认为它们是孤立的. 以往的研究^[2-4]主要限于在试验的基础上研究单个因素对传

热特性的影响, 给出传热特性随单个因素变化的曲线图, 并没有研究传热特性与不同因素间的关系, 以及这些因素(包括交互作用)的影响程度.

本文首先介绍影响脉动热管传热的主要因素, 如: 热管直径、充液率、通道弯数、倾斜角度、工质物

性等,随后以铝-FC72 闭合回路平板型三角槽道脉动热管为研究对象,采用统计方法研究充液率、倾斜角度、加热量与传热热阻间的关系,以及对传热的影响程度。

1 影响脉动热管传热性能的主要因素

1.1 管径

脉动热管内工质的状态依赖于重力与表面张力之间的平衡程度,Akachi^[5]令 Bond 数($Bo=d(g(\rho_l-\rho_v)/\sigma_l)^{1/2}$)等于 2,得到脉动热管的最大临界直径(内径)

$$d_{\max} = 2 \left(\frac{\sigma_l}{(\rho_l - \rho_v)g} \right)^{1/2} \quad (1)$$

当 $d \gg d_{\max}$ 时,热管变为热虹吸管;当 $d > d_{\max}$ 时,如图 1a 所示,若脉动热管不工作,液体存留在热管底部,若脉动热管工作,蒸发、沸腾以及冷凝现象如同热虹吸管,最明显的特征是有液桥出现,并伴有间歇的振荡;当 $d \leq d_{\max}$ 时,如图 1b 所示,脉动热管工作或不工作,管内均出现液塞和气泡共存的现象^[6]。

Yang^[7]认为式(1)仅适用圆形槽道截面,对于非圆形槽道截面,由于尖角的存在,相应的临界尺寸比圆形槽道要大。

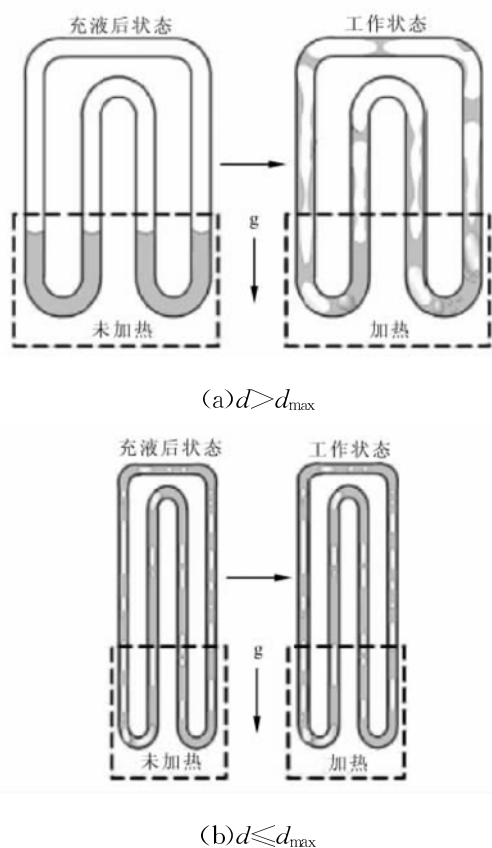


图1 管径对管内气液分布的影响

常用工作介质对应的最大管径如下。

水: $d=5.54$ mm; 丙酮: $d=3.36$ mm; 乙醇: $d=3.25$ mm; R142b: $d=2.04$ mm。

如果管径太小,则克服毛细力的压头就要明显升高,从而影响振荡效果。通常管径的取值范围为

$$0.7 \left(\frac{\sigma_l}{\rho_l g} \right)^{1/2} < d < 1.8 \left(\frac{\sigma_l}{\rho_l g} \right)^{1/2} \quad (2)$$

1.2 充液率

充液率定义为:工作介质的总体积占脉动热管内部总容积的百分比。通常充液率范围为 20%~80%^[8]。如图 2 所示:0 和 100% 是 2 个极端充液率,充液率为 0 时,脉动热管变成封闭的空管,主要依赖管壁的热传导传递热量,而充液率为 100% 时,脉动热管变成单相热虹吸管;充液率为 0~20% 时,工作不稳定,蒸发段容易出现烧干现象;充液率为 80%~100% 时,气泡较少,会严重削弱脉动和传热的效果。

关于最佳充液率,Akachi^[5]认为充液率应大于 50%,具体的量根据脉动热管形状和工作条件决定。崔晓钰等人^[3]在铜-水闭合回路脉动热管试验中得出最佳充液率为 50%~70%。Gi 等人^[8]在聚四氟乙烯-R142b 的可视化试验中得出的最佳充液率为 50%~60%。Miyazaki 等人^[9]研究了内径为 1 mm、通道弯数为 30 的铜-R142b 闭合回路脉动热管在不同加热方式下的传热特性,并发现不同的加热方式对应着不同的最佳充液率。底部加热时合适的充液率范围较宽,水平加热时最佳充液率在 45%~55% 之间,顶部加热时充液率基本限制在 35% 左右。

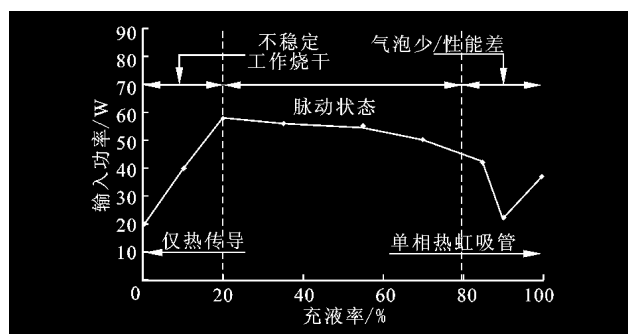


图2 脉动热管的工作区域

1.3 通道弯数和倾斜角度

倾斜角度为脉动热管放置方向与水平方向的夹角,范围从 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。Akachi 等人^[5]研究发现,当脉动热管的通道弯数大于某一数值时,其热阻与倾斜角度无关,即在相同的试验条件下,底端加热、水平加热和顶端加热时的热阻相近。在该试验条件

下,通道弯数的临界值为 80. Charoensawan 等人^[4]证实了临界值的存在,认为临界值与工质、管径、加热热流密度有关,当通道弯数小于临界值时,若水平和顶端加热,运行较差,若底端加热,垂直放置的工况下传热量最大.

1.4 工质物性

工质物性包括表面张力、比热、汽化潜热、动力黏度、密度、饱和状态下压力随温度的变化率 $(dp/dT)_{\text{sat}}$ 等,其中汽化潜热和 $(dp/dT)_{\text{sat}}$ 对脉动特性的影响较为显著.

Schneider^[10]认为应该存在一个最佳的汽化潜热值:由于加热段气泡的生成和长大的速率与汽化潜热成反比,如果潜热值太小,那么气泡生成得过快,结果是将液柱都压到了冷却段,导致传热恶化,但该问题可以通过增加充液率来改善;如果潜热值太大,那么气泡生成和长大的速度减慢,压力脉冲也相应减小,从而影响脉动的频率和幅度. Rittidech 等人^[11]研究了开放回路脉动热管,通过对比水、乙醇、R123 得出结论:汽化潜热值愈低, Q_{max}/Q_0 就愈大,并得出如下拟合公式

$$\frac{Q_{\text{max}}}{Q_0} = 2.53 - 0.000 1 h_{\text{fg}} \quad (3)$$

式中: Q_{max}/Q_0 为最大传热量与水平放置传热量的比值; h_{fg} 为汽化潜热.

如果 $(dp/dT)_{\text{sat}}$ 较大,那么小的温度变化就会产生大的压力波动,脉动传热效果就越好;反之,传热效果就越差.

Charoensawan^[4]比较了不同管径闭合回路脉动热管中水、R123 和乙醇对传热性能的影响,认为:当管径为 2 mm 时,水的传热效果最好;管径为 1 mm 时,水的传热效果最差.该结论可能是物性和管径交互作用的结果.

2 铝-FC72 脉动热管多因素分析

以闭合回路铝-FC72 脉动热管为例,采用统计方法研究了充液率、倾斜角度、加热量等因素对脉动热管传热热阻的影响.脉动热管的传热热阻 R_{PHP} 定义为:脉动热管的冷凝段温度 T_c 与蒸发段温度 T_e 之差与加热量 Q 的比值,即

$$R_{\text{PHP}} = \frac{T_c - T_e}{Q} \quad (4)$$

2.1 中心复合设计

利用搭建的试验装置对 3 个影响脉动热管传热性能的主要因素进行了研究,它们是:充液率 φ ,范

围为 30%~70%;倾斜角度 θ ,范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$;加热量 Q 的输入由 WYJ303 型晶体管直流稳压电源调节,范围为 3~61 W.

采用标准中心复合设计依据上述试验条件设计了 16 次试验,并划分为析因区组和坐标轴点区组,每个区组各增加一次相同的中心点试验,因此总共设计试验次数为 18 次.

Box 和 Draper^[12]给出了如下 γ 的计算式

$$\gamma = \left(\frac{k(1 + n_{\text{so}}/n_{\text{s}})}{1 + n_{\text{co}}/n_{\text{c}}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: k 为因素个数; n_{so} 为析因区组内的中心点数; n_{s} 为析因区组内的非中心点数; n_{co} 为坐标轴点区组内的中心点数; n_{c} 为坐标轴点区组内的非中心点数.

由式(5)计算得 $\gamma=1.789$.中心复合设计如图 3 所示.完整的数据组见表 1,其中自然变量是根据规范变量经以下变换得到

$$\varphi = 50\% + 10\%x_1; \theta = 50 + 20x_2; Q = 32 + 16x_3$$

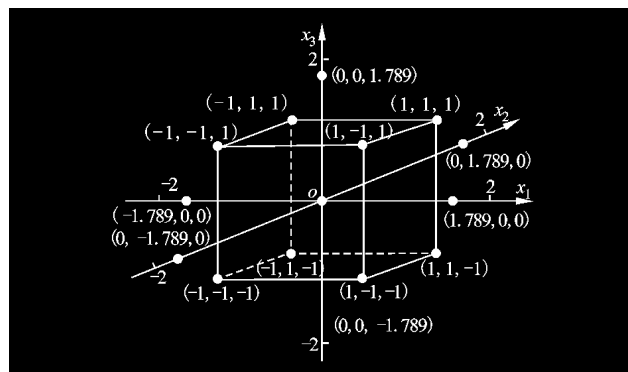


图3 $k=3$ 的中心复合设计

2.2 试验结果与讨论

2.2.1 模型回归 回归二阶多项式的方法,首先将非线性模型转化为线性模型.除了考虑表 1 中自然变量的影响外,还要考虑区组的影响:当试验点属于区组 1 时, $x_b=1$;当试验点属于区组 2 时, $x_b=-1$.由统计回归得到二项回归方程如下

$$R_{\text{PHP}} = -3.504 1 - 0.301 5x_b + 13.910 7\varphi + 0.044 5\theta + 0.079 6Q - 0.035 9\varphi\theta - 0.033 7\varphi Q + 0.000 3\theta Q - 10.658 2\varphi^2 - 0.000 4\theta^2 - 0.001 3Q^2 \quad (6)$$

2.2.2 模型有效性验证 图 4 为回归值与试验值的对比曲线,偏差在 5%以内.可见采用二阶回归模型进行拟合是合理的,且结果具有一定的可信度.

由于 2 个区组各添加了一次中心的试验,重复试验可用来估计纯误差和检验拟合不足的显著性.

表1 试验设计及试验结果

编号	区组	规范变量			自然变量			响应
		x_1	x_2	x_3	$\varphi/\%$	$\theta/(^{\circ})$	Q/W	$R_{\text{PHP}}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$
1	1	-1.000	-1.000	-1.000	40.00	30.00	16.00	1.281 7
2	1	-1.000	-1.000	1.000	40.00	30.00	48.00	1.209 5
3	1	-1.000	1.000	-1.000	40.00	70.00	16.00	1.132 3
4	1	-1.000	1.000	1.000	40.00	70.00	48.00	1.343 4
5	1	1.000	-1.000	-1.000	60.00	30.00	16.00	1.760 2
6	1	1.000	-1.000	1.000	60.00	30.00	48.00	1.380 2
7	1	1.000	1.000	-1.000	60.00	70.00	16.00	1.221 5
8	1	1.000	1.000	1.000	60.00	70.00	48.00	1.439 2
9(C)	1	0.000	0.000	0.000	50.00	50.00	32.00	2.416 7
10(C)	1	0.000	0.000	0.000	50.00	50.00	32.00	2.416 7
11	2	-1.789	0.000	0.000	32.11	50.00	32.00	1.241 1
12	2	1.789	0.000	0.000	67.89	50.00	32.00	1.407 3
13	2	0.000	-1.789	0.000	50.00	14.22	32.00	2.251 4
14	2	0.000	1.789	0.000	50.00	85.78	32.00	2.118 5
15	2	0.000	0.000	-1.789	50.00	50.00	3.376	2.169 4
16	2	0.000	0.000	1.789	50.00	50.00	60.624	1.382 1
17(C)	2	0.000	0.000	0.000	50.00	50.00	32.00	2.416 7
18(C)	2	0.000	0.000	0.000	50.00	50.00	32.00	2.416 7

注:标记C的编号为中心试验点。

对二阶模型进行回归分析如表2所示,其中显著性水平 $\alpha=0.05$. 结果显示:拟合不足不显著($F_{\text{lof}}<F_{\alpha}(5,2)$);回归显著($F_r>F_{\alpha}(10,7)$). 回归模型(式(6))近似地反映了响应与变量之间真实的关系.

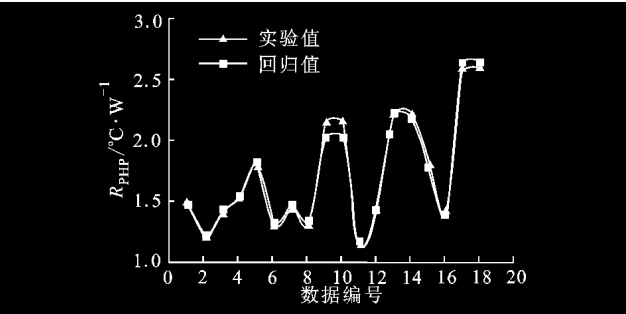


图4 回归值与试验值的比较

同时,从决定系数 R^2 的大小来看, $R^2=1-0.044\ 8\div3.702\ 4=0.987\ 9$,即 R^2 很接近于1,表明回归模型(式(6))的拟合效果是比较好的.

2.2.3 影响因素分析 影响因素的方差分析见表

3,包括区组的影响, φ 、 θ 和 Q 三个因素的线性影响、二次影响及交互影响. 表中最后一列是与 F 检验统计量对应的概率 p 的值. 分析显示: φ 、 θ 和 Q 的一次影响都是统计显著的($p<0.05$), θ 和 Q 的二次影响也是显著的($p<0.05$), φ 和 Q 以及 θ 和 Q 的交互影响是显著的($p<0.05$).

2.2.4 模型优化 从表3可以看出: φ 的二次影响和 φ 与 θ 的交互影响相对较小,因此它们的影响可以忽略,此时回归模型式(6)可以简化为

$$R_{\text{PHP}}=-3.504\ 1-0.301\ 5x_b+13.910\ 7\varphi+0.044\ 5\theta+0.079\ 6Q-0.033\ 7\varphi Q+0.000\ 3\theta Q-0.000\ 4\theta^2-0.001\ 3Q^2 \quad (7)$$

在实际工程应用中,比较关心的是充液率和倾斜角度对脉动热管传热性能的影响. 因此,令区组变量 x_b 和加热量 Q 为常数,求解回归模型在稳定点下的最大响应. 然而,在本例中,式(7)对任意给定的 x_b 和 Q ,其系数组成的赫斯矩阵都是不定的,其稳定点只能在鞍点处取得,但不一定是极值点.

表2 二阶模型的回归分析

	平方和	自由度	均方	F	F_α
总和	3.702 4	17	0.221 80		
误差	0.044 8	7	0.006 40		
纯误差	0.001 3	2	0.000 65		
拟合不足	0.043 5	5	0.008 70	13.38	$F_\alpha(5,2)=19.296$
回归	3.657 6	10	0.365 80	57.165 3	$F_\alpha(10,7)=3.637$

表3 影响因素的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p -水平
区组影响	0.593 0	1	0.593 0	912.31	0.001 1
线性影响	φ 0.060 8	1	0.060 8	93.54	0.010 5
	θ 0.037 3	1	0.037 3	57.38	0.017 0
	Q 0.142 4	1	0.142 4	219.08	0.004 5
二次影响	φ^2 0.000 3	1	0.000 3	0.46	0.567 6
	θ^2 0.036 6	1	0.036 6	56.31	0.017 3
	Q^2 0.285 1	1	0.285 1	438.62	0.002 3
交互影响	$\varphi\theta$ 0.000 5	1	0.000 5	0.77	0.472 8
	φQ 0.042 2	1	0.042 2	64.92	0.015 1
	θQ 0.111 5	1	0.111 5	171.54	0.005 8

3 结 论

基于统计学原理对脉动热管的传热性能进行了中心复合试验,得到了关于充液率、倾斜角度和加热量的二阶回归模型,通过对模型的有效性验证和影响因素分析得到如下结论。

(1)应用此模型和试验值进行了比对,偏差在5%以内。

(2)充液率、倾斜角度和加热量是影响脉动热管传热性能的主要因素,其中倾斜角度和加热量对传热热阻存在二次影响,充液率和加热量之间以及倾斜角度和加热量之间对传热热阻存在交互影响。

(3)充液率对脉动热管传热性能的影响与倾斜角度对脉动热管传热性能的影响之间没有统计学上的联系。

(4)通过求解回归极值,可以对模型在给定工况下进行优化,从而获得脉动热管的最佳传热性能。

参考文献:

- [1] KHANDEKAR S, SCHNEIDER M, GROLL M. Mathematical modeling of pulsating heat pipes: state of the art and future challenges[C]//5th ASIVTE/TSHMT Joint International Heat and Mass Transfer Conference, Kolkata, India: Kolkata Press Club, 2002:721-725.
- [2] KHANDEKAR S, DOLLINGER N, GROLL M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study [J]. Applied Thermal Engineering, 2003(23): 707-719.
- [3] 崔晓钰, 翁建华, GROLL M. 铜/水振荡热管传热性能的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 864-866.
- [4] CUI Xiaoyu, WONG Jianhua, GROLL M. Experimental investigation of heat transfer performance for the copper/water pulsating heat pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 864-866.
- [5] CHAROENSAWAN P, KHANDEKAR S, GROLL M, et al. Closed loop pulsating heat pipes: parametric experimental investigations [J]. Applied Thermal Engineering, 2003(23): 2009-2020.
- [6] AKACHI H, POLASEK F, STULC P. Pulsating heat pipes [C]//5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne, Australia: Melbourne University Press, 1996: 208-217.
- [6] BURELBACH J P, BANKOFF S G, DAVIS S H. Nonlinear of evaporating/condensing liquidfilms [J].

- Journal of Fluid Mechanics, 1988, 195(7): 463-494.
- [7] YANG H, KHANDEKAR S, GROLL M. Operational characteristics of flat plate closed loop pulsating heat pipes [C]//13th International Heat Pipe Conference. Shanghai, China: Shanghai Jiaotong University Press, 2004: 283-289.
- [8] GI K, SAYO F, MAEZAWA S. Flow visualization experiment on oscillating heat pipe [C]//11th International Heat Pipe Conference. Tokyo, Japan: Tokyo University Press, 1999: 149-153.
- [9] MIYAZAKI Y, AKACHI H. Heat transfer characteristics of looped capillary heat pipe [C]//5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne, Australia: Melbourne University Press, 1996: 378-383.
- [10] SCHNEIDER M, KHANDEKAR S, SCHAFER P, et al. Visualization of thermo fluid dynamic phenomena in flat plate closed loop pulsating heat pipes [C]//6th International Heat Pipe Symposium. Chiang Mai, Thailand: Chiang Mai University Press, 2000: 366-380.
- [11] RITTIDECH S, TERDTON P, TANTAKOM P, et al. Effect of inclination angles, evaporator section lengths and working fluid properties on heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe [C]//6th International Heat Pipe Symposium. Chiang Mai, Thailand: Chiang Mai University Press, 2000: 413-421.
- [12] BOX G E P, DRAPER N R. Empirical model-building and response surfaces [M]. New York, USA: Wiley Press Club, 1987.

(编辑 王焕雪)