

研究论文

## 倾角及冷却工况对多通路并联回路板式脉动热管传热性能的影响

史维秀<sup>1,2</sup>, 潘利生<sup>3</sup>, 李惟毅<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 100044; <sup>2</sup>北京建筑大学供热供燃气通风及空调工程北京市重点实验室, 北京 100044; <sup>3</sup>中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190; <sup>4</sup>天津大学机械工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 针对多通路并联回路板式脉动热管建立实验台, 采用铜质模块加热水浴冷却方式作为热工条件, 着重考察脉动热管在不同倾角 (90°, 75°, 60°) 及冷却工况 (4.5 g·s<sup>-1</sup> 和 9.0 g·s<sup>-1</sup>) 下的传热性能, 通过壁面温度的振荡和传热热阻来评价其传热效果。实验结果表明, 重力对多通路并联回路板式脉动热管传热性能的影响较大, 随着倾角的减少, 工质的回流变弱, 传热热阻变大, 传热极限变低; 脉动热管的加热功率与冷却能力是相互匹配的, 匹配度越高, 脉动热管越不易干烧, 传热极限越高, 在有倾角的工况下提高传热极限表现得更为明显; 脉动热管运行时存在一个最佳水流量, 在最佳冷却工况下, 脉动热管的运行热阻最低。

**关键词:** 多通路并联回路; 板式脉动热管; 倾角; 冷却工况; 传热性能

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.02.023

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 02—0532—06

## Influences of inclination and cooling condition on heat transfer performance of closed loop plate pulsating heat pipe with parallel channels

SHI Weixiu<sup>1,2</sup>, PAN Lisheng<sup>3</sup>, LI Weiyi<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning Engineering, Beijing 100044, China; <sup>3</sup>State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>4</sup>School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** An experimental setup was established based on a closed loop plate pulsating heat pipe with parallel channels and a series of experiments were conducted to study its operational performance with acetone and ethanol. Heating copper block and cold water bath were adopted as thermal conditions in the experiments. The characteristics were investigated for different inclinations (90°, 75°, and 60°) and cooling conditions (4.5 and 9.0 g·s<sup>-1</sup>). The heat-transfer performance of the pulsating heat pipe was mainly evaluated by thermal resistance and wall temperature. The results show that gravity has great influence on the heat transfer. At smaller inclination, thermal resistance is larger and heat transfer limit is lower. Heating power and cooling capacity need to be matched each other, and heat transfer limit will be higher with higher matching degree, especially with inclination.

2013-04-22 收到初稿, 2013-08-05 收到修改稿。

联系人及第一作者: 史维秀 (1983—), 女, 博士, 讲师。

基金项目: 供热供燃气通风及空调工程北京市重点实验室研究基金项目 (NR2013K07); 2013 年热能动力工程专业建设项目 (04720413003); 北京建筑大学科学研究基金项目。

Received date: 2013-04-22.

Corresponding author: SHI Weixiu, shiweixiu@bucea.edu.cn

Foundation item: supported by Beijing Key Laboratory of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning Engineering (NR2013K07), 2013 construction projects of thermal energy and power engineering (04720413003) and Scientific Research Fund Project for Beijing University of Civil Engineering and Architecture.

There is a best mass flow rate during the operation, and the thermal resistance is the lowest under the best cooling condition.

**Key words:** closed loop with parallel channels; plate pulsating heat pipe; inclination; cooling condition; heat transfer performance

## 引言

脉动热管是一种新型传热元件,由于其通道内径比较小,工质受到表面张力的作用,在脉动热管内部以气塞和液塞的形式存在。在压力差的作用下,工质在蒸发端和冷凝端循环振荡流动,实现热量的传递。脉动热管技术在电子元件的冷却<sup>[1]</sup>、暖通空调<sup>[2]</sup>及低温制冷领域<sup>[3-4]</sup>极具发展潜力。影响脉动热管传热的因素主要有加热冷却方式<sup>[5]</sup>,倾角<sup>[6-7]</sup>,充液率<sup>[8]</sup>,工质热物性<sup>[9]</sup>,管径<sup>[10]</sup>和管路结构<sup>[11-12]</sup>等。王宇等<sup>[13]</sup>对多通路并联回路型脉动热管运行特性进行实验研究,结果表明多通路并联回路型与典型回路型相比具有相似的启动特征,较低的运行热阻。张显明等<sup>[14]</sup>研究倾斜角度及加热方式对多弯回路脉动热管的传热性能的影响,研究表明倾斜角度在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 传热性能变化较大,而在 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 内倾角对传热性能几乎没有影响,非均匀加热方式的传热性能要优于均匀加热的传热性能。Bhuwakietkumjohn等<sup>[15]</sup>针对银-乙醇纳米流体的传热性能及可视化进

行实验,结果表明采用纳米流体可以提高传热热流密度,工质流型主要为泡状流、塞状流和环状流。Hemadri等<sup>[16]</sup>针对脉动热管扩热板进行研究,将以铝板或者低碳钢板为基板加工成蛇形沟槽,将由毛细铜管加工而成的脉动热管借助于木锤嵌入基板的沟槽中,形成脉动热管扩热板,研究发现嵌入式脉动热管只有在特定的边界条件下才具有传热优势,并且要求基板的热导率要小。洗海珍等<sup>[17]</sup>将声空化技术应用用于脉动热管,研究表明该技术能够强化传热,声空化技术应用用于蒸发端能够提高热传输效率 $8\% \sim 24.5\%$ ,应用于冷凝端能够提高 $-39\% \sim 77\%$ 。刘建红等<sup>[18]</sup>对耦合式脉动热管进行研究,发现在相同的热源温度下,耦合式脉动热管传递的热量高于单个脉动热管,随着热源温度的上升,强化传热的趋势下降。本文主要研究倾角和冷却工况对多通路并联回路板式脉动热管传热性能的影响。

## 1 实验装置

图1为脉动热管实验装置流程图。该装置主要

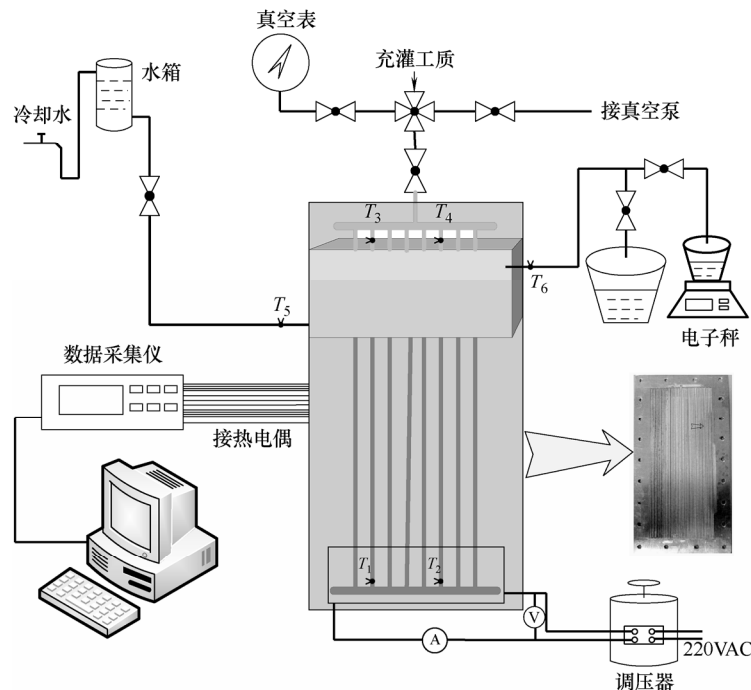


图1 实验系统流程图

Fig.1 Schematic of experiment setup

由三部分组成：脉动热管系统，加热冷却系统及高速动态数据采集系统。脉动热管为多通路并联回路板式脉动热管，由厚度为 3 mm 的铝板通过铣床加工而成，整体尺寸为 91.5 mm × 182 mm × 3 mm，采用在底板上先覆盖一层透明的薄硅胶片(厚度为 0.2 mm)，再盖上铝制盖板，然后采用紧密的螺栓密封方式进行机械密封。冷却系统采用水浴，一端与自来水相连，通过定压水箱稳压后经由脉动热管冷凝端吸热，从另一端的出口通向水池。冷却水的质量流量通过称重法测量，即多次测量 1 min 流经水箱的水的质量取平均值。加热系统由铜质的加热模块进行加热，经由调压器调压后输入加热系统，采用万用表监测电压和电流。高速动态数据采集系统由 Agilent34970A 计算机与高速数据采集器组成，实时显示和保存脉动热管的瞬时温度值和温度脉动曲线。

实验中采用 T 形高精度的铜-康铜热电偶，在加热端和冷凝端各布置 2 根，位于底板上。热电偶的布置位置加工成凹面(没有打通孔)，将热电偶触点放入凹面中，使其与铝板直接接触，同时均匀涂抹导热硅胶，具有减少接触热阻和固定作用，最后在背部采用螺栓将有机玻璃板加紧以固定热电偶。 $T_1$  和  $T_2$  为监测的加热端温度， $T_3$  和  $T_4$  为监测的冷凝端温度。测定冷却水进出口水温的热电偶采用在冷却水管上打孔进行布置，将热电偶与水直接接触测量。 $T_5$  为脉动热管冷却水的进口温度， $T_6$  为脉动热管冷却水的出口温度。整个脉冲热管系统固定在自行研制的旋转平台上。通过控制旋转平台的角度来调节脉动热管的倾斜角度，倾角定义为脉动热管所在平面与水平面之间的夹角。实验中采用无水乙醇和丙酮作为工质。

多通道并联回路板式脉动热管具体尺寸见表 1。

表 1 板式脉动热管设计尺寸

Table 1 Design size of plate pulsating heat pipe

通道间距/mm	截面形状	截面尺寸/mm <sup>2</sup>	通道数	热管长度/mm
0.5	正方形	1×1	40	150

## 2 数据处理

根据板式脉动热管的特点，主要研究脉动热管的壁面温度曲线和传热热阻。各参数的规定如下：

### (1) 传热温差 $\Delta T$

$$\Delta T = \overline{T_e} - \overline{T_c} \quad (1)$$

式中  $T_e$  为蒸发段的平均温度， $T_c$  为冷凝端的平均温度。

(2) 传热量  $Q$ ，可以通过脉动热管冷凝端的冷却水的换热量来计算

$$Q = mC_p(\overline{T_{c,out}} - \overline{T_{c,in}}) \quad (2)$$

式中  $m$  为冷却水箱中水的质量流量， $C_p$  为水的定压比热， $T_{c,in}$  为冷却水的进口水温测点的平均温度， $T_{c,out}$  为冷却水的出口水温测点的平均温度。

(3) 传热热阻  $R$ ，通过传热温差和传热量确定

$$R = \Delta T / Q \quad (3)$$

## 3 实验结果分析

### 3.1 倾角对传热的影响

图 2 为采用无水乙醇和丙酮为工质时在不同倾角下热阻与加热功率的关系。

可以看出，脉动热管在 90° 倾角时，传热性能最优，冷凝液在重力作用的影响下能较好地回流到脉动热管的加热端，工质实现良好的循环流动。随着倾角的减少，脉动热管的运行逐渐变差，传热热阻变大，传热极限变小。以丙酮为工质时，倾角为

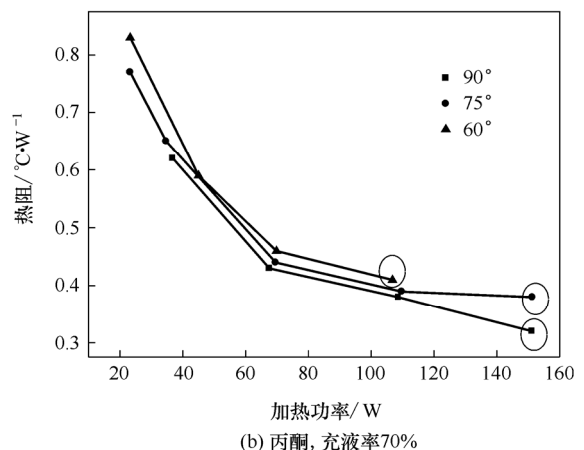
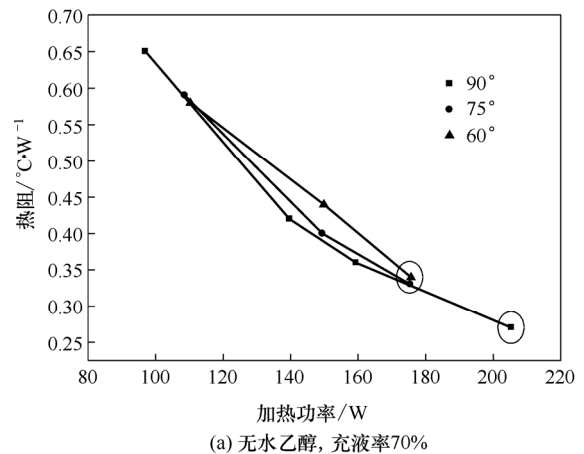


图 2 不同加热功率下热阻随倾角的变化

Fig.2 Thermal resistance variation with indication at different heating power

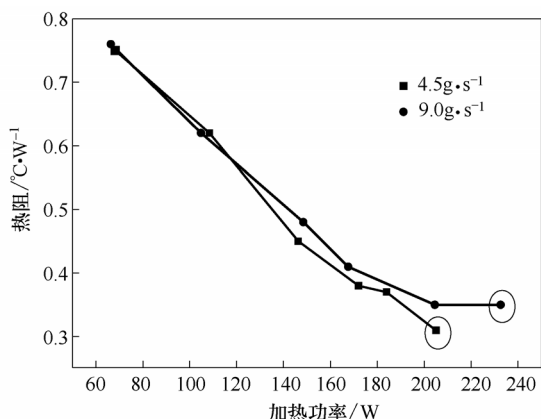
90° 和 75° 时,脉动热管在 150 W 左右仍能正常运行,并且倾角为 90° 时明显优于 75°,但是此加热功率下,倾角为 60° 时,脉动热管已经干烧,达到传热极限。图中标注点即为传热极限点。

重力对多通路并联回路板式脉动热管传热性能的影响较大,不可以忽略。主要是因为气态工质在冷凝端释放热量凝结为液态工质,然后工质依靠重力回流至加热端,实现工质的循环流动。脉动热管稳定流动时,管内存在循环流动,工质的流型为塞状流与环状流并存。在倾角为 90° 时,重力促进了工质的回流,当倾角为 75° 和 60° 时,重力在脉动热管所在平面上的分力起到促进工质回流的作用,重力的分力随着倾角的减少而降低。因此,随着倾角的减少,工质的回流变弱,传热热阻变大,传热极限变低。

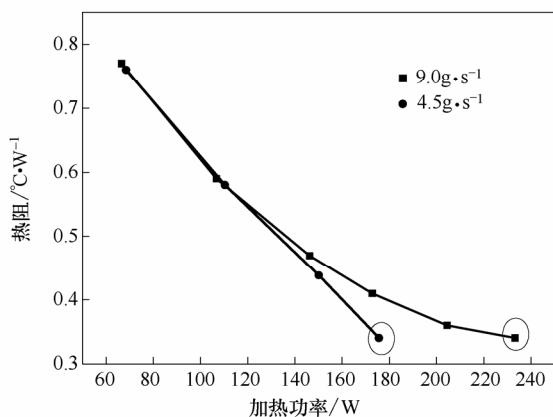
### 3.2 冷却工况对传热的影响

图 3 为采用无水乙醇作为工质,冷却工况对传热性能的影响。

可以看出,增大冷却水流量并没有达到强化换



(a) 无水乙醇, 充液率85%, 倾角90°



(b) 无水乙醇, 充液率70%, 倾角60°

图 3 冷却水流量对传热热阻的影响

Fig.3 Thermal resistance variation with mass flow rate

热、减少热阻的效果,相反热阻相对增大,但在一定程度上能够提高脉动热管的传热极限,在有倾角的工况下提高传热极限表现得更为明显。如图 3(a) 所示,当冷却水流量为 4.5 g·s<sup>-1</sup> 时,脉动热管的传热极限约为 210 W,而当流量增大至 9.0 g·s<sup>-1</sup> 时,脉动热管的传热极限增加至 240 W 附近。如图 3(b) 所示,冷却水流量为 4.5 g·s<sup>-1</sup> 时,脉动热管的传热极限约为 180 W,而当流量增大至 9.0 g·s<sup>-1</sup> 时,脉动热管的传热极限增加至 240 W 附近。图中标注点即为传热极限点。

图 4 为以丙酮为工质,传热热阻及壁面温度的变化情况。

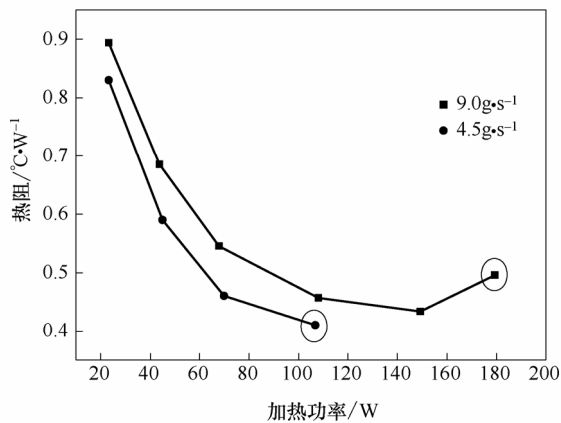
图 4 中可以看出,当流量为 4.5 g·s<sup>-1</sup> 时,脉动热管的传热极限为 107 W,此时加热端壁面温度约为 75°,继续增加输入功率,热端温度急剧上升到 100°,并没出现稳定脉动趋势,加热端已经达到过热状态。当流量为 9.0 g·s<sup>-1</sup>,热端输入功率为 108 W 时,脉动热管能够稳定运行,壁面温度约为 65°,输入功率增加到 179 W 时,仍能稳定运行。当输入功率上升到 203 W 时,壁面温度上升迅速,并且达到 110°,出现干烧工况。

以上工况说明脉动热管的加热功率与冷却能力是相互匹配的,匹配度越高,脉动热管越不容易达到干烧状态,传热极限也就越高。当增加输入功率到一定程度时,小的冷却水流量已经不能满足散热要求,需要增大冷却水流量才能实现较好的传热,即较低的输入功率需要较低的冷却水流量,而较高的输入功率需要较高的冷却水流量,在每个输入功率下存在一个最佳的冷却水流量。

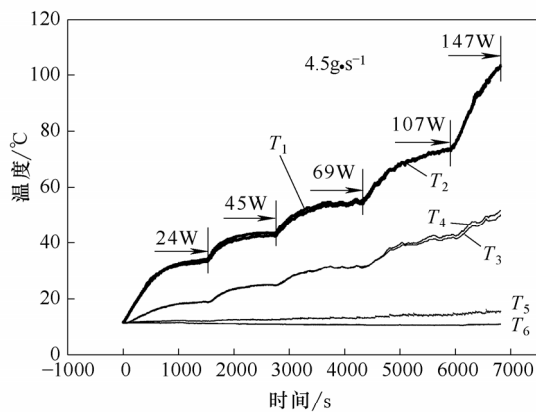
图 5 为脉动热管传热热阻与冷却水流量的关系。

图 5 可以进一步说明脉动热管运行中,加热功率与冷却水流量的匹配问题,并不是冷却能力越强越好,冷却水流量越大越好。在实验工况范围内,当加热功率为 24 W 时,冷却水的质量流量为 2.5 g·s<sup>-1</sup> 时脉动热管的传热性能最优,加热功率为 42 W 和 69 W 时,冷却水的质量流量为 3.5 g·s<sup>-1</sup> 时最优,当加热功率为 104 W 和 143 W 时,冷却水的质量流量为 4.5 g·s<sup>-1</sup> 时最优。

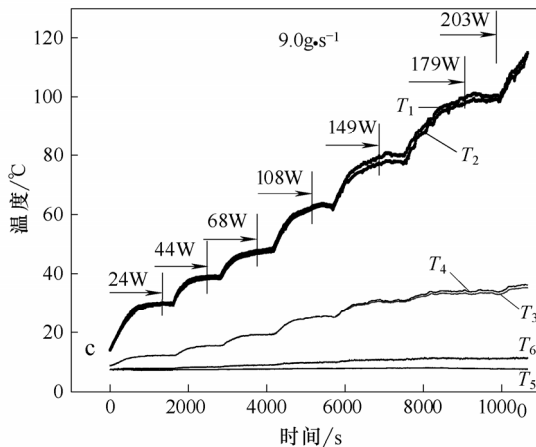
从理论上讲,脉动热管的运行是依靠脉动热管内部的压强差和温度差。温度差越大,造成内部的压力不均衡性越强,越容易启动与运行,传热也就越好。从该点上分析可知,脉动热管在每个工况下运行都需要最佳的水流量来实现冷却,实现冷凝端



(a) 丙酮, 充液率70%, 倾角 60°



(b) 丙酮, 充液率为 70%, 倾角 60°



(c) 丙酮, 充液率为 70%, 倾角 60°

图 4 传热热阻及壁面温度随冷却水流量的变化

Fig.4 Thermal resistance and wall temperature variation with mass flow rate

和加热端具有较好的温度差。如果在最佳水流量的基础上继续增加水流量, 将会导致冷凝端工质温度过低, 从而导致回流到加热端工质的温度也过低, 此时在同样的加热功率下, 加热端工质产生的压力就会降低, 从而不利于脉动热管内部温度差和压强差的产生, 所以脉动热管的传热将受到影响。如果

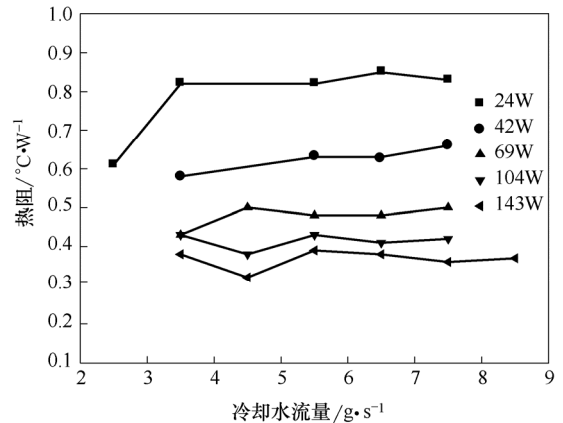


图 5 传热热阻与冷却水流量的关系 (丙酮, 充液率 70%, 倾角 90°)

Fig.5 Thermal resistance variation with mass flow rate

在最佳冷却水流量的基础上减少水流量, 就会导致冷凝端的冷却能力降低, 影响工质的冷凝效果, 导致工质的回流受到影响, 不利于脉动热管的运行。

### 4 结 论

本文从倾角和冷却工况对多通路并联回路板式脉动热管的传热性能进行研究, 主要结论如下。

(1) 重力对多通路并联回路板式脉动热管传热性能的影响较大, 随着倾角的减少, 工质的回流变弱, 传热热阻变大, 传热极限变低。

(2) 脉动热管的加热功率与冷却能力是相互匹配的, 匹配度越高, 脉动热管越不容易达到干烧状态, 传热极限也就越高, 在有倾角的工况下提高传热极限表现得更为明显。

(3) 脉动热管运行时存在一个最佳水流量, 在最佳冷却工况下, 脉动热管的运行热阻最低。

### References

- [1] Maydanik Yuri F, Dmitrin Valery I, Pastukhov Vladimir G. Compact cooler for electronics on the basis of a pulsating heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**: 3511-3517
- [2] Supirattanakul P, Rittidech S, Bubphachot B. Application of a closed-loop oscillating heat pipe with check valves (CLOHP/CV) on performance enhancement in air conditioning system[J]. *Energy and Buildings*, 2011, **43**: 1531-1535
- [3] Han X, Ma H B, Jiao A J, et al. Investigations on the heat transport capability of a cryogenic oscillating heat pipe and its application in achieving ultra-fast cooling rates for cell vitrification cryopreservation [J]. *Cryobiology*, 2008, **56**: 195-203
- [4] Natsume K, Mito T, Yanagi N, et al. Heat transfer performance of cryogenic oscillating heat pipes for effective cooling of superconducting magnets[J]. *Cryogenics*, 2011, **51**: 309-314

- [5] Lips S, Bensalemc A, Bertin Y, *et al.* Experimental evidences of distinct heat transfer regimes in pulsating heat pipes (PHP)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, **30**: 900-907
- [6] Charoensawan P, Terdtoon P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**: 460-466
- [7] Kammuang-lue N, Sakulchangstjatal P, Terstoon P, *et al.* Correlation to predict the maximum heat flux of a vertical closed-loop pulsating heat pipe[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2009, **30**(12):961-972
- [8] Shafii M B, Arabnejad S, Saboohi Y. Experimental investigation of pulsating heat pipes and a proposed correlation[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2010, **31**(10): 854-861
- [9] Wannapakhe S, Rittidech S, Bubphachot B, *et al.* Heat transfer rate of a closed-loop oscillating heat pipe with check valves using silver nanofluid as working fluid[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, **23**: 1576-1582
- [10] Shang Fumin ( 商福民 ), Liu Dengying ( 刘登瀛 ), Xian Haizhen( 洗海珍 ), *et al.* Experiments on enhanced heat transfer of self-exciting mode oscillating-flow heat pipe with non-uniform structure[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2010, **6**(2): 1-10
- [11] Thompson S M, Ma H B, Wilson C. Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with Tesla-type check valves[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, **35**: 1265-1273
- [12] Thompson S M, Cheng P, Ma H B. An experimental investigation of a three-dimensional flat-plate oscillating heat pipe with staggered microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**: 3951-3959
- [13] Wang Yu ( 王宇 ), Li Weiyi ( 李惟毅 ). Operation performance of a closed loop pulsating heat pipe with parallel channels[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering ( 动力工程学报 )*, 2011, **31**(4): 273-278
- [14] Zhang Xianming ( 张显明 ), Xu Jinliang( 徐进良 ), Shi Huilie( 施慧烈 ). The effect of the heating power and the inclination angle on the pulsating heat pipe[J]. *Proceedings of the CSEE( 中国电机工程学报 )*, 2004, **24**(11): 222-227
- [15] Bhuwakietkumjohn N, Rittidech S. Internal flow patterns on heat transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat-pipe with check valves using ethanol and a silver nano-ethanol mixture[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, **34**: 1000-1007
- [16] Hemadri V A, Gupta A, Khandekar S. Thermal radiators with embedded pulsating heat pipes: infra-red thermography and simulations[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, **31**: 1332-1346
- [17] Xian Haizhen ( 洗海珍 ), Liu Dengying ( 刘登瀛 ), Shang Fumin( 商福民 ), *et al.* Experimental study on the heat transfer enhancement of oscillating-flow heat pipe by acoustic cavitation[J]. *Drying Technology( 干燥技术与设备 )*, 2009, **27**: 542-547
- [18] Liu Jianhong( 刘建红 ), Shang Fumin( 商福民 ), Liu Dengying( 刘登瀛 ). Enhanced heat transfer characteristics of synergistic coupling between pulsating heat pipes[J]. *CIESC Journal( 化工学报 )*, 2011, **62**(6): 1549-1553