

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.12.012

# 水基 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性液体脉动热管传热性能实验研究\*

唐正男, 苏磊\*

(南京工业大学 能源科学与工程学院, 江苏 南京 211186)

**摘要:** 针对磁性液体脉动热管传热性能及其影响因素问题, 在风洞试验台上, 采用电加热方式对 13 种水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体脉动热管及 1 根水工质脉动热管传热性能进行了试验研究。测量了磁性液体工质质量浓度(1.5%, 3%, 4.5%, 9%, 12%)、热管冷热段长度比(12:14, 14:12, 16.5:9.5)、充液率(30%, 50%, 70%)、结构形式(等高, 渐高, 高低结构)、外磁场强度及作用角度, 随电加热功率变化下的脉动热管传热性能, 对脉动热管性能影响规律进行了对比分析与归纳。研究表明: 4.5% 磁性液体质量浓度, 50% 充液率, 冷热段长度比为 14:12, 8 弯头等高结构且在无外加磁场下的脉动热管传热性能最优; 热阻最小值较水工质脉动热管降低了 85%, 并且热传导系数较紫铜导热系数提高了 340 倍。

**关键词:** 脉动热管; 水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体; 传热性能; 热导率

中图分类号: TH140; TK172.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)12-1319-05

## Heat transfer performance of pulsating heat pipe with water based $\text{Fe}_3\text{O}_4$ fluid

TANG Zheng-nan, SU Lei

(School of Energy Science and Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211186, China)

**Abstract:** Aiming at the heat transfer performance and influence factors of the oscillating heat pipe(OHP), on air cooling and electric heating experimental conditions, a water medium OHP and 13 kinds of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic liquid OHPs were tested. The fluid's concentration (1.5%, 3%, 4.5%, 9%, 12%), length-heat segment length ratio(12:14, 14:12, 16.5:9.5), filling rate(30%, 50%, 70%), structural changes, the magnetic field and angle and the heating power were included in test item. The influence law of OHPs were analyzed and summarized. The results indicate that the OHP with 4.5% mass concentration, 50% filling rate, 14:12 length ratio, 8 elbows, contour structure and nonmagnetic has the best heat transfer performance, the minimum thermal resistance is 85% lower than the water medium OHP, and the thermal conductivity is 340 times higher than copper.

**Key words:** pulsating heat pipe; water-base  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic fluid; heat-transfer performance; heat-conducting property

## 0 引言

脉动热管是由 AKACHI H 等<sup>[1-2]</sup>于 1990 年提出的一种传热元件, 因其高效传热性能, 且相较于普通热管具有结构简单、尺寸小巧、布置灵活、运行无须动力输入等优势<sup>[3-4]</sup>, 受到国内外学者的广泛关注。脉动热管

的运行及传热性能受内部工质及热物性影响较大, 其中纳米流体作为工质对脉动热管性能有一定的强化作用。

MA 等<sup>[5]</sup>制备了颗粒直径很小的纳米 C-H<sub>2</sub>O 液体, 纳米颗粒充入脉动热管后, 在平稳工作时, 纳米流体悬浮性较好, 但当管内工质停止脉动运动后, 纳米颗

收稿日期: 2018-05-15

基金项目: 江苏省科技计划资助项目(BE2013129)

作者简介: 唐正男(1993-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事热管散热器方面的研究。E-mail: 18795871398@163.com

通信联系人: 苏磊, 女, 副教授, 硕士生导师。E-mail: njxz\_tzn@163.com

粒开始出现沉降现象,同时相比 H<sub>2</sub>O 热管具有较好的传热性能;纪林林等<sup>[6]</sup>通过以纳米级碳管和铜粉制作的混合溶液作为脉动热管工质,研究其传热性能,得出加入混合后的工质的脉动热管传热热阻更低,传热效率更高,启动更快。

磁性液体是一种新型磁性纳米材料,因其独特的性能<sup>[7]</sup>,被广泛应用于小型热交换器、航天领域和机械工程领域<sup>[8-9]</sup>,例如磁性液体陀螺和加速度器、选矿和自由升降装置<sup>[10-13]</sup>,并且磁性液体还具有提高冷却和强化传热的能力<sup>[14-16]</sup>。

陈小潭等<sup>[17]</sup>采用数值模拟法,针对水基铁磁性流体脉动热管建立模型,得出结论:水基铁磁流体脉动热管的在 60% 充液率下传热性能最优,磁性液体在 ≤5% 体积浓度,热管外加恒定或梯度磁场时,脉动热管的传热性能随磁场的增强而逐步增强;邱晟华等<sup>[18]</sup>对充灌磁性液体脉动热管的传热性能进行研究,分析了充液率 and 外加磁场对热管传热性能的影响,得到结论:Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性液体脉动热管在 40% 充液率时传热性能最优,当外加一个通直流电的线圈形成 0 ~ 60 kA/m 且平行于热管流动方向的磁场时,脉动热管的传热性能被恶化。

本文将选取磁性液体作为脉动热管的充灌工质,在风冷方式下研究磁性液体质量浓度、充液率、加热功率、热管结构、冷热段长度比等对脉动热管传热热阻和工质导热系数等的影响规律,并与同条件下水工质脉动热管的传热性能进行对比,获得磁性流体脉动热管主要因素对热管传热性能的影响规律。

## 1 实验装置

### 1.1 实验测试系统

磁性液体脉动热管传热性能实验测试系统包括脉动热管、加热系统、冷却风道、保温装置、K 型热电偶、外加磁场及数据采集系统。

脉动热管为紫铜材料,管内/外径为 3 mm/4 mm,总长 2.125 m,总高 0.026 m,由 8 根直管段 8 个弯头组成的闭式等高型结构,热管垂直放置,下部为加热段,上部为冷却段,无绝热段;加热段缠电加热丝加热,并用抽真空保温罩及保温棉隔热保温,加热功率 10 W ~ 200 W;冷却段垂直插入自行设计的冷却风道中,风机由直流电源驱动,风速为 2.1 m/s。

脉动热管中部冷却段外布置有外加磁场,由 NS 极磁铁组成,位于热管两侧,由支架固定,强度由 SJ200 数字高斯计测得,精度 0.1 mT。数据采集系统

包括 OMEGA 传感热电偶、Agilent 34970A 数据采集仪、插入式模块、计算机及软件组成,测温精度 0.05 °C,数据采集间隔 0.1 s。

实验选取 1.5%、3%、4.5%、9% 和 12% 这 5 种浓度的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 水基磁性液体为工作介质,其中,4.5% 浓度的磁性液体为购买的成品,由化学共沉淀法制得,其 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 原生粒直径为 5 nm ~ 15 nm,其余 4 种浓度通过配制获取。

### 1.2 热管测温点布置及数据处理

热管共设 20 个测温点,冷却段测点为 1 ~ 10 号,加热段测点为 11 ~ 20 号,热管共 14 根。

热管的传热温差、传热热阻、热流密度及导热系数由下式计算:

$$\Delta t = t_h - t_c \quad (1)$$

式中: $\Delta t$ —传热温差,°C; $t_h$ —热管热段 10 个测点的温度平均值; $t_c$ —冷段 10 个测点的温度平均值,°C。

热管的传热阻抗  $R$  为:

$$R = \frac{\Delta t}{Q} \quad (2)$$

式中: $R$ —热管的传热阻,°C/W; $Q$ —传热功率,W。

紫铜管的传热功率  $Q_{\text{壁}}$  为:

$$Q_{\text{壁}} = \frac{\lambda_{\text{铜}} \cdot A_{\text{壁}} \cdot \Delta t}{\delta} \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{壁}}$ —紫铜管的传热功率,W; $\lambda_{\text{铜}}$ —紫铜的导热系数,380 W/m·K; $A_{\text{壁}}$ —紫铜外管壁导热面积,m<sup>2</sup>; $\delta$ —导热管冷端端的导热厚度,取热管高度的一半,m。

内部工质传热功率  $Q_g$  为:

$$Q_g = Q - Q_{\text{壁}} \quad (4)$$

式中: $Q_g$ —内部工质传热功率(即总传热功率减去管壁的导热功率),W。

热管的导热面积  $A_g$  为:

$$A_g = \left(\frac{1}{2}d_0\right)^2 \cdot \pi n \quad (5)$$

式中: $A_g$ —热管的导热面积,m; $n$ —直管段数; $d_0$ —管内径,m。

工质的导热系数  $\lambda_g$  为:

$$\lambda_g = \frac{Q_g \delta}{A_g \cdot \Delta t} \quad (6)$$

式中: $\lambda_g$ —工质的导热系数,W/m·K。

## 2 水基 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性液体脉动热管性能分析

### 2.1 磁性液体质量浓度对热管性能的影响

笔者研究质量浓度对热管传热性能的影响,通过

试验测试了蒸馏水工质,1.5%、3%、4.5%、9%、12% 这 5 种磁性流体质量浓度的脉动热管在相同 8 弯头等高结构、50% 充液率、14:12 冷热段长度比和无外磁场作用下,脉动热管稳定运行时传热性能随加热功率的变化情况,先后为热阻和热传导系数。测量结果如图 1 所示。

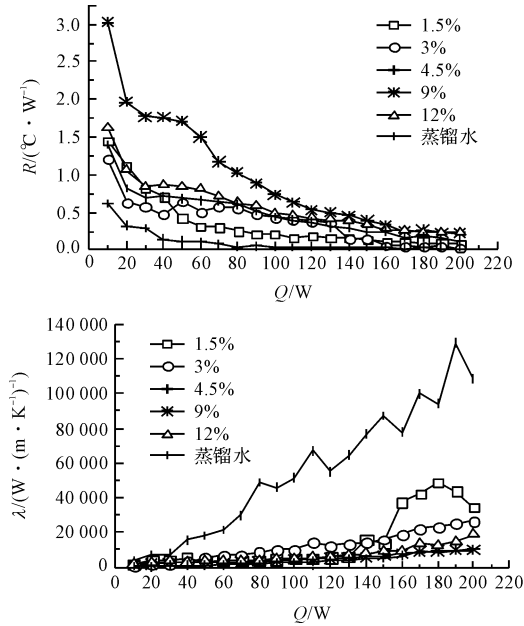


图 1 浓度对热管热阻及热传导系数影响

图 1 结果显示:1.5%、3% 和 4.5% 质量浓度的磁性液体的传热性能都优于纯水热管,但 9% 和 12% 浓度热管传热性能较纯水热管差;热管的传热热阻随加热功率的升高呈快速下降,再缓慢降低直至稳定的变化规律;而热管的热导率随加热功率升高呈波动上升趋势。4.5% 浓度热管的传热性能最优,10 W 时的热阻为  $0.6214\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ ,热导率  $3405\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;

200 W 时热阻降到  $0.0177\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ ,热导率升高到  $129109\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,是铜管热导率( $380\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )的 340 倍,是水热管的 10 倍左右。因此本研究总结出适宜浓度的磁性液体可大大降低热管的传热热阻,改善热管的传热及传导性能,过小的浓度对脉动热管传热性能的强化作用减弱,而过高的浓度又会降低热管的传热性能。

原因在于:在水(基载液)中添加一定浓度的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性颗粒,使悬浮于水中的纳米级磁性颗粒和游离的表面活性剂分子数比例增加,相当于增添了水工质汽化核心的数量,促进了水工质的相变汽化,从而强化了脉动热管的传热性能,但较小的浓度,强化传热性能的能力减弱;当磁性流体浓度较高时,管内工质的粘度大大增加,振荡阻力加大,不利于热管内部工质的

振荡流动,从而恶化了热管的传热性能。

## 2.2 冷热段长度比对热管传热性能的影响

笔者研究了热管冷热段长度比对热管传热性能的影响,通过试验测试了 12:14、14:12、16.5:9.5 这 3 种冷热段长度比的脉动热管在相同的 8 弯头等高结构,50% 充液率,4.5% 浓度,无外磁场时热管传热性能随加热功率的变化情况,测量结果如图 2 所示。

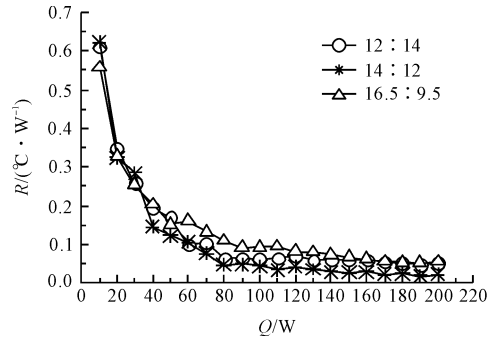


图 2 冷热段长度比对热管传热热阻的影响

图 2 显示了 3 种冷热段长度比的热管热阻随加热功率的变化曲线,加热功率 40 W 以下时,3 种冷热段长度比热管的热阻变化差别较小;在 40 W 以上加热功率时,3 根热管热阻开始出现较大差别,其中 14:12 热管的传热性能最优,热阻最低( $0.6215\text{ }^\circ\text{C}/\text{W} \sim 0.0178\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ ),其次是 12:14 型,16.5:9.5 热管的热阻最大( $0.5569\text{ }^\circ\text{C}/\text{W} \sim 0.0521\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ )。

原因在于:在风冷方式下,因风冷却能力的限制,冷却段稍长于加热段更利于水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体脉动热管传热和传导性能的强化。但冷却段过长(16.5:9.5),管内冷却速度加快,而加热段减小,使热段工质气化速度减慢,推动力不足,工质流动换热变弱;不利于管内工质的流动和热量传递,从而降低了热管的传热性能。

## 2.3 充液率对热管传热性能的影响

笔者研究充液率对热管传热性能的影响,通过试验测试了 30%、50%、70% 这 3 种充液率下脉动热管在相同 8 弯头等高结构、4.5% 磁性液体质量浓度、14:12 冷热段长度比和无外磁场作用下,脉动热管稳定运行时传热性能随加热功率的变化情况。测量结果如图 3 所示。

由图 3 传热热阻随加热功率的变化曲线可知:50% 热管的热阻一直最小,其次为 30% 热管,最差的是 70% 热管( $1.127\text{ }^\circ\text{C}/\text{W} \sim 0.0803\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ )。另外,加热功率低于 100 W 时,充液率对脉动热管传热热阻的影响较明显,而随着功率继续上升影响逐渐缩小。

原因在于:充液率较大的热管,内部工质运动需要

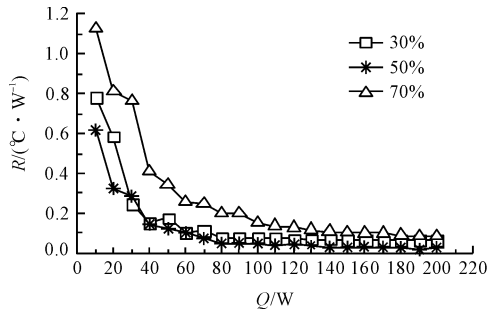


图3 充液率对热管传热热阻

更大的推动力,但因相变空间受限,限制了工质的汽化,汽化产生的推动力减小。充液率较小利于工质的汽化,但工质流动质量流量随充液率的减小而降低,从而限制了工质传热功率的增大,因此50%充液率热管表现出更好的传热性能。

#### 2.4 结构型式对热管传热性能的影响

笔者研究结构型式对热管传热性能的影响,通过试验测试了在确定管长下3种结构(8弯头等高,12弯头渐高,14弯头高低)型式脉动热管,在相同4.5%磁性液体质量浓度、50%充液率、14:12冷热段长度比和无外磁场作用下,脉动热管稳定运行时传热性能随加热功率的变化情况。测量结果如图4所示。

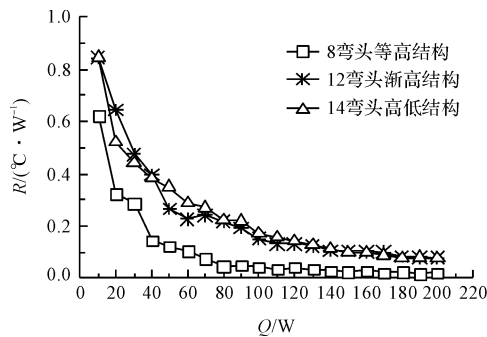


图4 结构对热管传热热阻的影响

由图4传热热阻随加热功率的变化曲线可知:不等高结构对脉动热管传热流动的强化作用小于脉动热管弯头数增加对传热流动的阻碍作用,且弯头数增加得越多,传热性能下降得越明显,8弯头等高型热管的热阻(0.621 5 °C/W ~ 0.017 8 °C/W)明显低于12弯头(0.833 4 °C/W ~ 0.078 7 °C/W)和14弯头非等高结构热管(0.843 6 °C/W ~ 0.076 7 °C/W)。

原因在于:虽然不等高结构可以增加相邻管之间的重力不平衡势差,利于工质的在相邻管间的流动,但其作用远低于弯头产生的局部阻力对流动的阻碍。因此较少弯头更利于工质的流动,且提高了热管传热性能。另外,随加热功率的增加,两种非等高结构脉动热管的热阻相对于等高结构热管的热阻的增幅减小。

#### 2.5 外加磁场对磁性液体脉动热管性能影响

基于水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体在磁场作用下会显现磁性等特性,笔者研究磁场强度及磁力线与工质流动方向所呈角度对热管传热性能的影响,通过试验测试放置于无磁场、16.5 Mt 磁场强度(磁力线方向与工质流动方向所呈角度为  $90^\circ$ )和16.5 Mt 磁场强度(磁力线方向与工质流动方向所呈角度为  $60^\circ$ )的脉动热管,在8弯头等高型结构、4.5%磁性液体质量浓度、14:12冷热段长度比,50%充液率条件下,脉动热管稳定运行时传热性能随加热功率的变化情况。测量结果如图5所示。

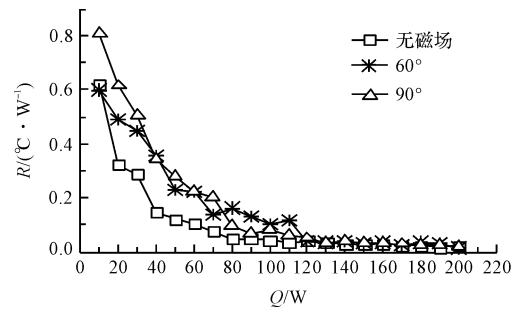


图5 磁场对脉动热管传热热阻的影响

由图5可以知:当加热功率低于120 W时,热管的传热性能受外磁场的影响作用较明显,传热性能都有一定程度的恶化;同时由16.5 Mt ( $60^\circ$ )条件下热阻范围(0.014 3 °C/W ~ 0.598 °C/W),16.5 Mt ( $90^\circ$ )条件下热阻范围(0.8 °C/W ~ 0.021 °C/W)可以得出:磁力线方向与管内工质流动方向呈  $90^\circ$ 时,热管的传热性能较倾斜放置磁场( $60^\circ$ )的性能差,高加热功率时( $\geq 120$  W),磁场对其影响作用减小。

原因在于:由于中低功率下,外加磁场使热管内  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体工质的物性产生了变化,使得  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体磁化增加了工质的黏度,同时,在磁场的作用下磁性液体在热管内壁产生聚集,磁性流体和固体壁间有相对运动时产生更大的摩擦力,磁场与流动方向所呈角度越大,摩擦力越大,导致工质流动阻力的增大,影响了传热性能,同时脉动热管温度迅速上升,由于高温对磁性物体有消磁的特性,温度越高消磁能力越强,使得外加磁场的影响不断减弱。

### 3 结束语

本文针对水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体脉动热管传热性能进行了实验研究。研究结果如下:

(1)1.5%、3%和4.5%质量浓度的磁性液体的传热性能优于纯水热管,4.5%浓度热管的传热性能和热

导率最优,但 9% 和 12% 浓度热管的传热性能较纯水热管差,最佳磁性液体质量浓度为 4.5%,其最小热阻可达  $0.0177\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ ,对应的热导率为  $129\text{ }109\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,是铜管热导率的 340 倍,水脉动热管的 10 倍左右;

(2) 风冷方式下,40 W 以上加热功率下,冷却段略长于加热段的 14:12 型热管的传热性能较好;

(3) 30%、50% 和 70% 充液率下,充液率对热管传热性能的影响在中小功率时更明显,50% 充液率热管的传热性能和热导率最优,200 W 时,50% 热管的热导率是 30% 热管的 3.5 倍,是 70% 热管的 5 倍;

(4) 不对称结构对脉动热管的传热性能强化作用小于弯头数增加对脉动热管传热性能的阻碍作用,弯头数越多,热管的传热性能越差,8 弯头等高型热管的热性能优于两种非对称结构热管;

(5) 加热功率  $\leq 120\text{ W}$  时,外加磁场后热管的传热性能受其影响明显,磁场方向与管内工质流动方向角度越大传热性能越差;加热功率  $\geq 120\text{ W}$ ,磁场及其角度对其影响作用减小。

#### 参考文献 (References):

- [1] AKACHI H. Structure of a heat pipe [P]. US :4921041 A, 1990.
- [2] AKACHI H. Structure of micro-heat pipe [P]. US:5219020, 1993.
- [3] BURBAN G, AYEL V, ALEXANDRE A, et al. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 94-103.
- [4] CLEMENT J, WANG X. Experimental investigation of pulsating heat pipe performance with regard to fuel cell cooling application [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 268-274.
- [5] MA H B, WILSON C, BORGMAYER B, et al. Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(14): 1431161-1431163.
- [6] 纪林林. 纳米流体的制备及其在脉动热管中的应用 [D]. 南京:南京理工大学能源与动力工程学院, 2014.
- [7] LI Q, XUAN Y, WANG J. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2006, 30(2): 109-116.
- [8] FINLAYSON B A. Convective instability of ferromagnetic fluids [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 40(4): 148-150.
- [9] NEURINGER J L, ROSENSWEIG R E. Ferro hydrodynamics [J]. *Physics of Fluids*, 2004, 7(12): 1927-1937.
- [10] 王晨, 胡军, 罗伟, 等. 磁性液体的研究进展 [J]. *金属功能材料*, 2003, 10(4): 35-38.
- [11] 廖平, 李德才, 崔海蓉, 等. 磁性液体加速度传感器初步研究 [J]. *功能材料*, 2004, 35(z1): 573-576.
- [12] 尹荔松, 沈辉, 张进修. 磁性液体的特性及其在选矿中的应用 [J]. *矿冶工程*, 2002, 22(3): 51-53.
- [13] 李德才, 兰惠清, 白晓旭. 磁性液体爬坡装置 [P]. CN: 2689369, 2005.
- [14] 李德才, 程艳红. 磁性液体奇异的传热特性 [J]. *北京交通大学学报*, 2016, 40(4): 99-107.
- [15] 徐国英, 李凌志, 张小松, 等. 太阳能集热用导热油纳米流体的稳定性及中温集热特性 [J]. *流体机械*, 2015(4): 57-60, 32.
- [16] 罗孝学, 章学来, 华维三, 等. 应用于相变蓄热的脉动热管换热器在不同倾角下放热性能的试验研究 [J]. *流体机械*, 2017(7): 62-67.
- [17] 陈小潭. 磁流体脉动热管流动与传热特性的理论研究 [D]. 南京:南京理工大学能源与动力工程学院, 2015.
- [18] 邱晟华, 何永清, 毕勤成. 充灌磁性液体的脉动热管试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(7): 6-8.

[编辑:李 辉]

#### 本文引用格式:

唐正男, 苏磊. 水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体脉动热管传热性能实验研究 [J]. *机电工程*, 2018, 35(12): 1319 - 1323.

TANG Zheng-nan, SU Lei. Heat transfer performance of pulsating heat pipe with water based  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  fluid [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(12): 1319 - 1323.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>