

DOI: 10.7652/xjtuxb201409017

3 mm 闭式脉动热管传热性能的实验研究

王学会, 袁晓蓉, 郑豪策, 阮一道, 韩晓红, 陈光明

(浙江大学制冷与低温研究所, 310027, 杭州)

摘要: 为了研究大管径脉动热管的传热性能,设计并搭建了一种闭式脉动热管传热性能的测试装置,管道内径为 3 mm,由此实验研究了该装置在加热功率为 0~90 W 范围内的传热性能,通过对冷凝段壁面温度波动特性进行分析,研究了不同加热方式对脉动热管传热性能的影响。结果表明:充液率为 27.5%~67.5%时,脉动热管具有较好的传热性能,加热功率为 90 W 时,各充液率下的热阻值均在 0.4 °C/W 以下;当加热段的输入功率变化(加热功率以波动的方式输入)时,脉动热管的热阻大于对应的以恒定功率加热时的热阻,两者之间的差值随着加热功率的增大而减小;加热功率突变且超过启动功率时,脉动热管很快启动,但达到稳定需要较长的时间,而采用渐进的加热方式时,脉动热管在短时间内即可达到稳定。加热功率较小时推荐采用较小的充液率,加热功率较大时充液率的选择应综合考虑工质的热容量和传热特性。

关键词: 脉动热管;传热;热阻;壁面温度波动特性

中图分类号: TB65 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X (2014)09-0101-06

Experimental Research on Heat Transfer Performance of 3 mm Closed Pulsating Heat Pipe

WANG Xuehui, YUAN Xiaorong, ZHENG Haoce, RUAN Yixiao,

HAN Xiaohong, CHEN Guangming

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To investigate the heat transfer performance of large diameter pulsating heat pipe (PHP), an experimental device for closed PHP with 3 mm inner diameter was designed and constructed. The heat transfer performance of PHP was investigated within heat power range of 0-90 W. The influence of different heating modes on the performance of PHP was tested by analyzing the fluctuation characteristics of wall temperatures in the condensation section. The experimental results indicate that the PHP well performs in a wide charge ratio range of 27.5%-67.5%, and the thermal resistances get less than 0.4 °C/W at all tested charge ratios. When the input heat power fluctuates, the thermal resistances of PHP get greater than those heated by constant heat power, and the difference between them decreases with the increasing heat power. If the heat power suddenly reaches beyond the starting power of the PHP, the PHP quickly starts up, but takes a long period to become stable. However, the PHP quickly tends to be stable for gradual heating-mode. The small charge ratio is suggested in the case of lower heat power, otherwise, both the heat capability of working fluid and heat transfer performance ought to be considered.

收稿日期: 2014-01-23。 作者简介: 王学会(1989—),男,博士生;韩晓蓉(通信作者),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176166);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QNA4014)。

网络出版时间: 2014-06-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140618.1138.001.html>

Keywords: pulsating heat pipe; heat transfer; thermal resistance; the fluctuation characteristics of wall temperature

随着电子行业的迅速发展,电子产品的物理尺寸越来越小而发热量却越来越大,热设计已成为电子行业发展中的一个难题^[1-2]。脉动热管作为一种新型高效的换热装置,于20世纪90年代由日本学者 Akachi 提出^[3],其用一根细长的管道通过弯折成几个“U”型弯头而制成。由于脉动热管具有传热高效、结构简单、可随意弯曲、没有运动部件等优点,所以受到了国内外研究学者的广泛关注。当脉动热管的蒸发段有热量输入时,蒸发段的气塞压力升高,邻近的气塞和液塞之间产生振荡,工质在管内振荡的同时把热量带到了冷凝段^[4]。脉动热管的内径必须非常小才能实现稳定的振荡,实际上脉动热管的直径必须满足 $D \leq 2(\sigma/[(\rho_l - \rho_g)g])^{1/2}$, 其中 σ 、 ρ_l 、 ρ_g 分别表示工质的表面张力系数、工作温度下的液相密度和气相密度^[5-6]。

目前,针对脉动热管已经开展了大量的实验研究。马永锡等结合实验结果分析了充液率、倾斜角度和加热水流量对脉动热管传热性能的影响^[7-8]。Liu 等通过研究变截面管道的脉动热管传热性能指出,变截面管道能够引入更多的压力波动,从而强化脉动热管的换热效果^[9-10]。Kim 等研究发现,当充液率为40%时,工质的振荡频率在0.1 Hz到1.5 Hz之间^[11]。Park 等研究表明,当充液率为60%时,工质压力的振荡幅值为最大的同时热阻值最低^[12]。Yang 等对比研究发现,2 mm的脉动热管在倾角为90°时的性能最好,而倾角对1 mm的脉动热管性能几乎没有影响^[13]。Charoensawan 等实验表明,在不同的蒸发段温度下,脉动热管的热阻值均随管径的增大而减小^[14]。Rittidech 等发现,当采用R123作为工质时,大管径脉动热管对应的热阻值要低于小管径脉动热管^[15]。

脉动热管研究主要是集中于小管径,内径值一般在2 mm及以下,而针对大管径的研究则鲜有文献报道。相比较来说,管径较大的脉动热管能够充注更多的工质,相同的情况下大管径的脉动热管具有更大的热容量,大功率工作时能够避免烧干现象。本文针对3 mm闭式脉动热管展开了实验研究,分析了充液率和不同加热方式对脉动热管性能的影响。

1 实验装置

本实验装置共包括脉动热管、加热、冷却和数据

采集4部分,该装置及工作原理如图1所示。脉动热管由外径为4 mm、内径为3 mm的铜管弯折而成,共有5个弯头,10个平行通道。加热段、绝热段、冷凝段的长度分别为100、160、90 mm。测试时,加热段通过采用直径为0.3 mm的镍铬电热丝加热来模拟发热元件的发热量,通过调节加热丝两端的电压值得到不同的加热功率。冷凝段的管道埋在加工有蛇形沟槽的铝板内部,铝板的沟槽与管道的冷凝段的布置相一致,在铝板的背面有4块均匀布置的半导体制冷片(型号为TEC1-12715)。由于半导体制冷片的制冷功率较大,半导体制冷片的冷却采用水冷头的方式,每个水冷头冷却2个半导体制冷片,冷凝段半导体制冷片布置如图2所示。为了尽可能减少各接触表面之间的接触热阻,管道与铝板的接触面、半导体制冷片与铝板的接触面、半导体制冷片与水冷头的接触面均涂有导热硅脂。在加热段和绝热段上包有耐热保温材料,以减少与周围环境的换热。实验过程中整个实验装置保持竖直。加热段和冷凝段的温度采集选用已标定T型热电偶,精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,在加热段均匀布置5个热电偶,在冷凝段布置4个热电偶(见图1)。加热段功率采用功率表记录,精度为0.5级,量程为250 W。实验数据最终经过Agilent34970A采集并连接到PC机上。实验工质为去离子水,为了防止管道内部

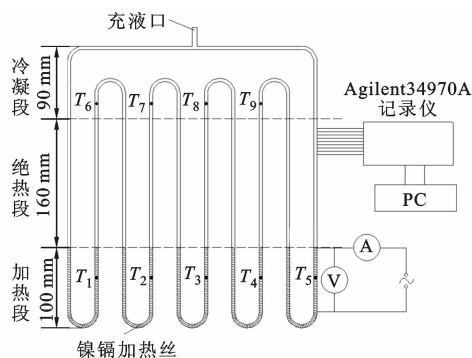


图1 脉动热管实验装置及工作原理

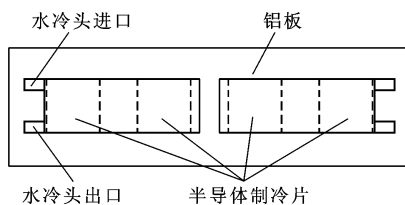


图2 冷凝段半导体制冷片布置

堵塞,实验前利用高压氮气吹 6 h,以带走管道内部的杂物,随后进行保压密封,当满足密封性要求时开始实验。

2 实验数据的计算与处理

实验装置的加热量通过功率表直接读取,冷却通过半导体制冷片实现,因此热量的平衡必须进行匹配。设加热功率为 P_e ,半导体制冷片的总功率为 P_c ,系统的漏热量为 P' ,制冷片的效率为 η ,则能量的匹配计算式为

$$P_c = (P_e - P')/\eta \tag{1}$$

同时,脉动热管的性能指标通过热阻值和当量导热系数来评价。热阻定义为

$$R = (T_e - T_c)/P_e \tag{2}$$

式中: T_e 和 T_c 分别表示蒸发段和冷凝段的平均温度,即

$$T_e = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5)/5 \tag{3}$$

$$T_c = (T_6 + T_7 + T_8 + T_9)/4 \tag{4}$$

实际上,计算所得热阻为脉动热管装置的整体热阻,包含管内工质传热热阻和铜管的导热热阻,2 个热阻之间并联。相对于工质传热热阻而言,铜管的导热热阻较大,该热阻对整体热阻的影响很小,因此可以近似认为计算热阻即为工质的传热热阻,计算热阻的变化规律可反映工质传热热阻的变化规律。

由式(3)、(4)可知,实验测得的数据精度分别为

$$T_e = T_e \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C} \tag{5}$$

$$T_c = T_c \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C} \tag{6}$$

$$P_e = P_e \pm 1.25\text{ W} \tag{7}$$

热阻的绝对误差可用下式计算

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial P} \right| \Delta P + \left| \frac{\partial R}{\partial T} \right| \Delta T \tag{8}$$

根据实验结果,本文分别计算了不同条件下的热阻误差,其相对误差均不超过 6.9%,各充液率下,30 W 以上加热功率对应的相对误差均小于 5%。

3 实验结果与讨论

3.1 充液率对性能的影响

充液率是指所充注的工质体积与管内总体积的比值。脉动热管两端的温差和热阻随加热功率的变化如图 3、图 4 所示。从图 4 可以看出:对于管径为 3 mm 的水脉动热管,充液率为 27.5% 时热阻值最低,对应的传热性能最好;当充液率在 37.5%~67.5% 范围内时区分并不明显,且都保持较好的传

热性能,在加热功率为 90 W 时热阻值均降低到 0.4 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 以下。从图 4 还可以看出,对于不同的加热功率范围,最优的充液率不尽相同,当采用最优充液率时工质的热容量与加热功率产生的推动力相匹配。在较低的加热功率下,充液率增加,脉动热管的启动更加困难,热阻偏大;在较高的加热功率下,充液率对热阻的影响较小,各个充液率对应的热阻相差不大。这是因为,当充液率较小时,内部工质的状态是气相多、液相少,在较低的功率下很容易启动,而在较高的功率下,由于内部工质较少,单位时间内传递的热量受限;当充液率较大时,推动工质循环流动需要更大的脉动力,这个脉动力与加热功率直接相关,只有当加热功率较高时才能实现工质振荡。因此,在较低加热功率下,推荐采用较小的充液率;在较高加热功率下,应综合考虑工质的热容量和传热特性的影响。

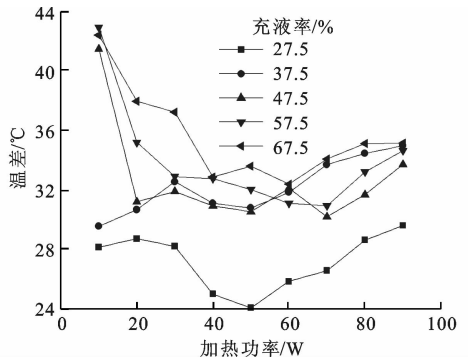


图 3 脉动热管两端温差随加热功率的变化

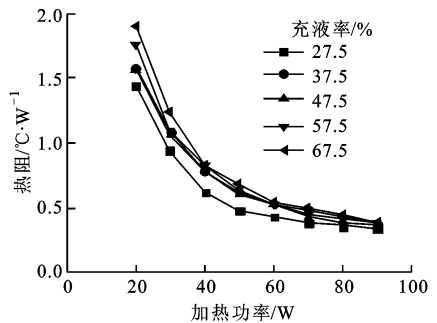


图 4 脉动热管热阻随加热功率的变化

另外,热阻随着加热功率的增大而减小,且减小的幅度越来越小,最后趋于平缓。为了突出大管径脉动热管的传热特点,将实验数据与文献[16] (管径、实验条件与本文相近)进行了对比。本文实验中充液率为 37.5% 时,文献[16]中弯头数为 4,充液率为 40%,管径为 2.2 mm,对比结果如图 5 所示。当加热功率较小(约小于 45 W)时,大管径脉动热管的性能比小管径脉动热管略差。这可能是大管径脉动

热管中充注有更多的工质,推动工质的振荡需要更大的推动力,同时由于管径增大,体积力的影响(如重力)增大,表面力(如表面张力)的影响减小,液塞和气塞在振荡过程中的稳定性减弱,使得工质回流困难。当加热功率较大(大于45 W)时,大管径脉动热管的传热能力比小管径脉动热管略好。这可能是当热流密度较大时,蒸发段的工质沸腾比较剧烈,管径较大,浮力的作用增强,气泡更容易从蒸发段脱离,进而更好地推动工质的循环振荡,同时由于大管径脉动热管的气塞和液塞界面处的换热面积比较大,因此传热能力较强。从对比结果来看,在不同的加热功率范围,大管径脉动热管与小管径脉动热管各自具有优势,而大管径脉动热管充注工质量大,蒸发端工质沸腾时浮力的作用较强,这在高热流密度时具有一定的优势。后续的实验研究将进一步揭示这2种管径脉动热管的优势。

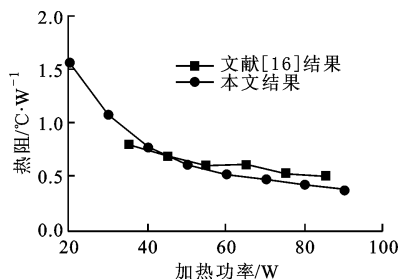


图5 文献[16]与本文实验结果对比

3.2 加热方式对启动性能的影响

3.2.1 突变加热方式对壁面温度波动性能的影响
脉动热管的启动性能可以通过对启动过程的壁面温度波动特点的分析来评定。实验过程中发现,对于本文脉动热管装置,在加热功率为10 W时未启动,而在加热功率为20 W时启动。为了探究加热方式对启动性能的影响,针对充液率为37.5%的脉动热管采用了2种不同的加热方式:①先将加热功率调整到10 W,待脉动热管两端的温度都稳定以后再把加热功率提高到20 W(渐变式加热);②直接把加热功率提高到20 W(突变式加热)。以冷凝段的温度波动为例,实验结果如图6、图7所示。从图6可以看出,采用渐变式加热时温度的振荡可以分为3个阶段:在第1阶段,加热段和冷凝段温度平稳上升,此时脉动热管并未启动;在第2阶段,加热功率突然达到20 W时热管响应很快,温度开始出现明显的波动,该波动不稳定,属于过渡阶段;在第3阶段,温度波动呈现出一定的规律,波动的中间温度较稳定,已经处于加热功率20 W时的稳定状态。为了进行对比,将突变式加热下的壁面温度波动也分为3个

阶段:①壁面温度近似线性增加(此阶段时间较短,图7中未显现),此时热管还未启动,壁面的温度过热度上升很快;②壁面温度开始波动,当壁面的温度过热度增加到一定值时,热管启动,但此时温度波动具有明显的间歇性,一次波动结束以后需要一段时间的积累才能开始下一次波动,此阶段工质温度仍然在逐渐上升;③壁面温度稳定波动,此时工作情况大致与渐变式加热波动情况相同。

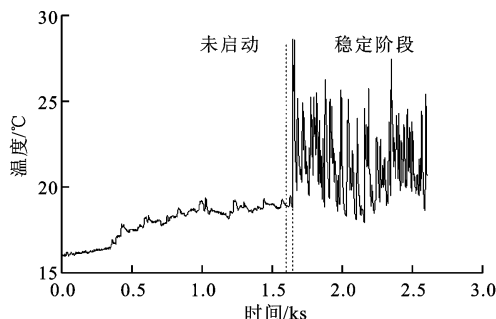


图6 渐变式加热冷凝段温度波动

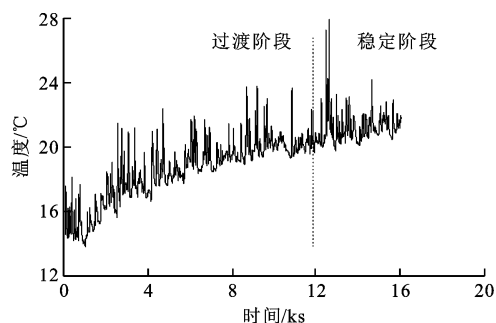
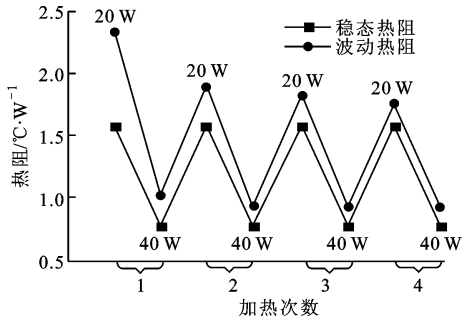


图7 突变式加热冷凝段温度波动

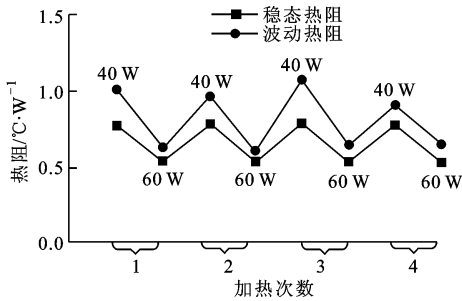
通过以上比较分析可以看出:当采用突变式加热时,脉动热管响应很快,直接从未启动跳转到启动状态,但是由于未经过足够的能量积累,此时的温度波动具有明显的间歇性,同时从未启动到稳定工作状态经历的时间较长;当采用渐变式加热时,脉动热管从未启动到稳定工作状态的反应时间缩短。这是因为虽然在10 W时热管未启动,但是此阶段工质仍然集聚了相当的能量。

3.2.2 波动加热方式对脉动热管性能的影响
实际工作中,电子元器件发热功率是随时间变化的。因此,除了探究脉动热管稳态工作性能之外,还要探究波动加热下脉动热管的性能变化特点。在本实验装置的基础上,通过记录波动工况下脉动热管壁面的温度波动,探究了脉动热管在波动工况下的传热性能。实验中脉动热管的充液率为37.5%,加热功率分3组,分别为20/40 W、40/60 W、60/80 W,每组加热4次,每个加热功率下加热时间为20 min,

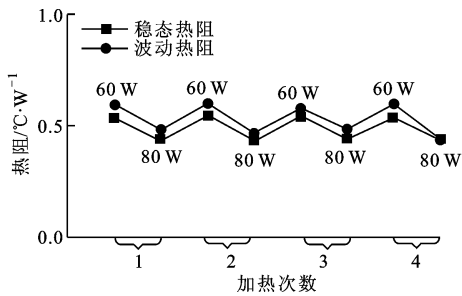
实验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,脉动热管在波动功率下的热阻均大于稳态工作时的热阻,在较低加热功率下两者之间的差值较大,在较高加热功率下差值较小。



(a) 加热功率为 20/40 W



(b) 加热功率为 40/60 W



(c) 加热功率为 60/80 W

图 8 3 种波动加热方式脉动热管的热阻变化

4 结 论

本文研究了充液率对大管径脉动热管传热性能的影响,同时通过记录、分析脉动热管工作过程中壁面温度的波动情况,研究了不同的加热方式对传热性能的影响。实验结果表明,大管径脉动热管的传热规律与小管径(2 mm 以下)相似,大管径脉动热管同样具备小管径的优势——结构简单、传热系数高、启动响应快等。考虑到大管径脉动热管能够充注更多的工质,在较高的热流密度下能有效避免烧干现象,因此具有较好的应用前景。本文主要结论如下。

(1)对于 3 mm 管径的脉动热管,当充液率为 27.5% 时热阻最低,传热性能最好。当充液率在 37.5%~67.5% 范围内时热阻区分并不明显,传热性能保持良好,加热功率为 90 W 时热阻均降低到 0.4℃/W 以下。

(2)对于不同的加热功率范围,最优的充液率也不相同。较低加热功率时充液率应较小,较大加热功率时充液率应当综合考虑工质的热容量和传热特性。

(3)采用突变式加热时,脉动热管响应很快,直接从未启动状态跳转到启动状态,但是由于未经过足够的能量积累,使得从未启动到稳定工作状态所经历的时间较长。采用渐进式加热时,脉动热管从未启动到稳定工作状态的反应时间明显缩短。

(4)脉动热管在波动功率下的热阻大于稳态工作时的热阻,较低加热功率下两者之间的差值较大,在较高加热功率下差值较小。

参考文献:

[1] GARIMELLA S V, FLEISCHER A S, MURTHY J Y, et al. Thermal challenges in next-generation electronic systems [J]. IEEE Trans on Components and Packaging Technologies, 2008, 31(4): 801-815.

[2] 韩晓红, 闵旭伟, 李鹏. 一种利用气泡泵效应重力辅助回路热管的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(3): 9-14.

HAN Xiaohong, MIN Xuwei, LI Peng. Experimental study on an thermosyphon loop with bubble pump effect [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(3): 9-14.

[3] AKACHI H, KANAGAW A. Structure of a heat pipe: USA, US4921041[P]. 1990-05-01.

[4] XIAO L, CAO Y. Recent advances in pulsating heat pipes and its derivatives [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2012, 19(3): 213-231.

[5] SHAFFI M B, FAGHRI A, ZHANG Y W. Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes [J]. Journal of Heat Transfer, 2001, 123(6): 1159-1172.

[6] HOSODA M, NISHIO S, SHIRAKASHI R. Study of meandering closed-loop heat-transport device (vapor-plug propagation phenomena) [J]. JSME International Journal: Series B Fluids and Thermal Engineering, 1999, 42(4): 737-744.

[7] 马永锡, 张红. 低于临界通道弯数振荡热管的传热特性 [J]. 北京化工大学学报: 自然科学, 2005, 32(4): 87-90.

- MA Yongxi, ZHANG Hong. Heat transfer characteristics of oscillating heat pipes with under-critical turns [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2005, 32(4): 87-90.
- [8] 马永锡, 张红. 振荡热管当量导热系数的理论推导与分析 [J]. 化学工程, 2006, 34(10): 17-20.
- MA Yongxi, ZHANG Hong. Theoretical deduction and analysis of equivalent thermal conductivity of oscillating heat pipes [J]. Chemical Engineering, 2006, 34(10): 17-20.
- [9] LIU S, LI J T, DONG X Y, et al. Experimental study of flow patterns and improved configurations for pulsating heat pipes [J]. Journal of Thermal Science, 2007, 16(1): 56-62.
- [10] CAI Q, CHEN C L, ASFIA J F. Heat transfer enhancement of planar heat pipe device [C]//2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2006: 153-158.
- [11] KIM J S, BUI N H, JUNG H S, et al. The study on pressure oscillation and heat transfer characteristics of oscillating capillary tube heat pipe [J]. KSME International Journal, 2003, 17(10): 1533-1542.
- [12] PARK Y, TANSSEN M R, NINE M J, et al. Characterizing pressure fluctuation into single-loop oscillating heat pipe [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(9): 2578-2583.
- [13] YANG H H, KHANDEKAR S, GROLL M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(1): 49-59.
- [14] CHAROENSAWAN P, TERDTON P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5): 460-466.
- [15] RITTIDECH S, TERDTON P, MURAKAMI M, et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(4): 497-510.
- [16] MOHAMMADI M, MOHAMMADI M, SHAFII M B. Experimental investigation of a pulsating heat pipe using ferro fluid (magnetic nanofluid) [J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(1): 014504.

(编辑 苗凌)

(上接第42页)

- [7] CRIMINISI A, PEREZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [8] TANG Feng, YING Yiting, WANG Jin, et al. A novel texture synthesis based algorithm for object removal in photographs [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005: 248-258.
- [9] PATWARDHAN K A, SAPIRO G, BERTALMIO M. Video inpainting under constrained camera motion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 545-553.
- [10] 谷伊, 韩军. 基于样本的图像修补方法在视频修复中的应用 [J]. 应用科学学报, 2010, 28(2): 163-169.
- GU Yi, HAN Jun. Video restoration using exemplar-based inpainting [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(2): 163-169.
- [11] TENG Qizhi, YANG Dan, XU Zhi, et al. Training image analysis for three-dimensional reconstruction of porous media [J]. Journal of Southeast University, 2012, 28(4): 415-421.
- [12] VAN DEN ELSEN P A, MAINTZ J B A, POL E J D, et al. Automatic registration of CT and MR brain images using correlation of geometrical features [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1995, 14(2): 384-396.
- [13] JARVIS R A. A perspective on range finding techniques for computer vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983(2): 122-139.
- [14] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.

(编辑 赵炜)