

文章编号:0253-4339(2019)05-0032-06  
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.032

# 多支管并联的分离型热管回路传热特性实验研究

罗 云<sup>1</sup> 王 文<sup>1</sup> 胡院林<sup>1</sup> 余 欣<sup>1</sup> 叶 成<sup>2</sup>

(1 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240; 2 上海核工程研究设计院 上海 200233)

**摘 要** 基于分离式重力热管在冷却 50 ℃ 左右水池中的应用背景,本文实验研究了 7 根并联支管换热形成的分离型热管回路,主要研究以 R134a 为热管工质的热管散热能力及充液率对热管系统工作性能的影响,得到实验的最佳充液率为 42.3%。在此基础上对比分析了并联各支管的流动与传热性能差异,结果表明,水池加热功率在 780 ~2 560 W 实验范围内时,水池温度、管内蒸发温度和管内传热系数均随水池加热功率的增加而增加;并联蒸发管和冷凝管的流量分配均出现不均匀现象,且并联各支管间传热性能存在一定的差异性,其中在充液率为 42.3%、水池加热功率为 1 680 W 时,蒸发段支管 1 的最大传热系数是支管 7 的 1.68 倍。

**关键词** 分离型热管;传热系数;并联支管;充液率

**中图分类号**:TK172.4; TK124 **文献标识码**:A

## Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Separated Heat Pipe Loop with Multi-parallel Branches

Luo Yun<sup>1</sup> Wang Wen<sup>1</sup> Hu Yuanlin<sup>1</sup> Yu Xin<sup>1</sup> Ye Cheng<sup>2</sup>

(1.College of Mechanic and Power Engineer, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China;2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai, 200233, China)

**Abstract** An outline of the working principle of separated heat pipe loop and its application potential in refrigeration and air conditioning area has been provided herein. A heat pipe loop with seven parallel branches was investigated experimentally for the performance of fuel pool cooling, along with the impact of the liquid filling ratio in the heat pipe loop with R134a as working fluid. Experimental results showed an optimal liquid filling ratio in the heat pipe loop of approximately 42.3%; accordingly, the pool temperature, evaporation temperature in the tube, and heat transfer coefficient increased with a higher temperature inside the water tank within the heating power range of 780~2 560 W. The flow distribution of branches in both evaporation and condensation sections was uneven with a certain difference in heat transfer performance among the parallel branches. The largest heat transfer coefficient was found in the No.1 branch pipe of the evaporation section, which was 1.68 times that of the No.7, with 42.3% liquid filling ratio and 1 680 W heating power.

**Keywords** separated heat pipe; coefficient of heat transfer; parallel branches; liquid filling ratio

分离型热管可在有一定距离的蒸发段和冷凝段之间形成高效热虹吸热传递,主要由蒸发段、冷凝段和绝热部分等组成<sup>[1]</sup>。运行过程中热流体在蒸发段内受热上升并向冷凝段转移;从冷凝段冷凝的液体在重力作用下回到蒸发段,形成一个循环<sup>[2]</sup>,工质在蒸发段吸热,冷凝段放热,从而实现热量的高效传输<sup>[3]</sup>。分离型热管已广泛应用于工业余热回收、制冷与空调系统、太阳能热水系统、微电子冷却系统及核电站乏燃料水池等<sup>[4-7]</sup>领域。在实际应用中,考虑到结构的紧凑、安装的方便及灵活布置等问题,常采用联箱式换热结构。

目前关于分离式热管的传热流动特性的研究较多。易冲冲等<sup>[8-9]</sup>实验研究了分别以氨和 R134a 为工质的单管回路,结果表明 R134a 的热管回路传热能力略差于氨,但系统稳定性更好。M. M. Rahman 等<sup>[10]</sup>实验研究了微型并联传热支管管内工质和蒸发段热流密度对并联系统工作性能的影响,结果表明,在相同热流下使用乙醇工质得到的支管外表面温度最低。刘姗姗等<sup>[11]</sup>实验研究了 7 根由石英玻璃制成的并联换热管,并以甲醇为工质,研究了热管内的复

基金项目:科技部重大专项(2015ZX06004002)资助项目。(The project was supported by Key Special Project of the Ministry of Science and Technology(No. 2015ZX06004002).)

收稿日期:2018-08-06;修回日期:2018-10-11

杂气液两相流型及加热温度和充液率对热管内部整体传热性能的影响,结果表明,加热温度越高,管内流型波动越大,系统越难稳定,且以蒸发段体积计算最佳充液率约为 90%。

近年来,关于分离式热管在制冷与空调领域中的应用研究<sup>[12]</sup>也日益增多。金鑫等<sup>[13-14]</sup>以 R134a 为工质,实验研究了传热温差对热管系统性能的影响,同时开发了分离式热管基站,结果表明使用微通道分离式热管基站能使节电率达到 44.7%;陶洁<sup>[15]</sup>实验研究了水流量、高差等对分离式热管型空调 EER 的影响,结果表明当蒸发段和冷凝段温差大于 5℃、且高度差大于 100 mm 时热管才能正常启动工作;方贵银等<sup>[16]</sup>建立了分离式热管蓄冷空调实验装置,并研究了其充冷性能,结果表明使用分离式热管蓄冷空调的能效比高于常规蓄冷空调系统,也更加稳定。

多管并联换热器内的流动阻力损失和两相流动的特点等导致其在工作过程中会存在换热不均,并联支管换热器内的流量分配均匀性和整体工作性能受工作介质种类、充液率、联箱结构、工质流速及热负荷等多因素影响。

现有文献关于分离型热管并联支管间换热不均匀性的研究较少,充液率受工作状态、工质、热管结构参数的影响较大,本文通过 U 型联箱连结 7 根并联支管换热形成的回路,实验研究了以 R134a<sup>[9]</sup>为工质的热管系统在不同充液率和水池散热量下的传热特性,对各支管间不均匀性进行了分析。

### 1 实验系统介绍

分离式热管回路系统原理如图 1 所示,蒸发段和冷凝段均由 7 根并联换热支管组成。在蒸发段每根支管上均匀布置 9 个温度测点,每个测点间距为 100 mm;冷凝段每根支管沿工质流动方向布置 3 个测点位置,测点间距为 300 mm,每个测点位置布置 2 个热电偶,分别位于各支管上部和下部。整个实验回路共布置 5 个压力测点,分别位于上联箱、上升管入口和出口、下降管入口和出口。

实验中蒸发段和冷凝段支管均采用  $\phi 12\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  的无缝不锈钢,联箱和其它连接管路均采用  $\phi 25\text{ mm}\times 3\text{ mm}$  无缝不锈钢管,部分结构的尺寸如图 2 所示。蒸发段换热支管外肋片厚度为 0.2 mm,肋高为 5 mm。

对于每个稳定的工况,水池对热管的加热功率等于冷凝侧的换热量:

$$Q_c = m_c c_p (\bar{T}_{\text{out}} - \bar{T}_{\text{in}}) \quad (1)$$

式中:  $m_c$  为冷源水的质量流量,kg/s;  $c_p$  为水的

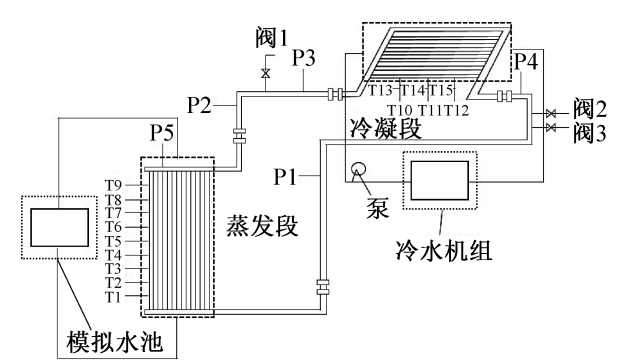


图 1 分离型热管实验系统原理

Fig.1 The principle of the separated heat pipe experimental system

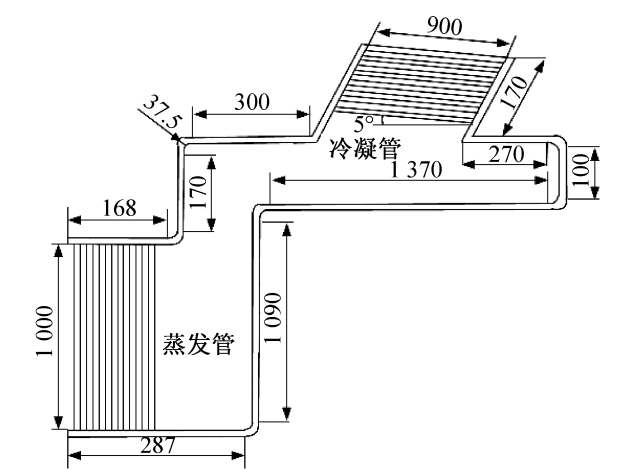


图 2 分离型热管实验系统结构尺寸(单位:mm)

Fig.2 The structural dimensions of the separated type heat pipe test system

定压比热容, J/(kg·K);  $\bar{T}_{\text{in}}$  和  $\bar{T}_{\text{out}}$  分别为冷源水的进、出口平均温度, K。

假设蒸发段各支管表面的热流密度均匀,且将管壁处理成平板导热,则管内局部表面传热系数为:

$$\alpha_e^j = \frac{Q_e}{A_e (T_w^j - T_e) - \frac{\delta}{\lambda} Q_e} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_e^j$  为对应测点处管内传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $Q_e$  为传热量, W;  $A_e$  为传热面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_w^j$  和  $T_e$  分别为对应测点管壁温度和管内温度, K;  $\lambda$  为不锈钢管的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\delta$  为管壁厚度, m。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 充液量对蒸发段支管传热性能的影响

实验采用 R134a 作为热管工质进行了 7 次充注,充液量分别为 585.0、726.8、806.0、889.0、986.7、1 082.3 和 1 192.0 g,以整个并联热管回路容积为基数,所对应的系统充液率分别为 25.1%、31.1%、

34.5%、38.1%、42.3%、46.4%、51.1%。

充液率为 25.1% 和 51.1% 时,热管回路循环难以建立,导致模拟水池温度不断上升,如图 3 所示。当充液量过小,蒸发段工质液位过低,管内气相换热区域过多,水池中的热量无法被及时带走,导致水池温度不断上升;当充液量过大,蒸发段和冷凝段难以保证处于高效的两相换热区域,热管传热能力较低<sup>[17]</sup>。

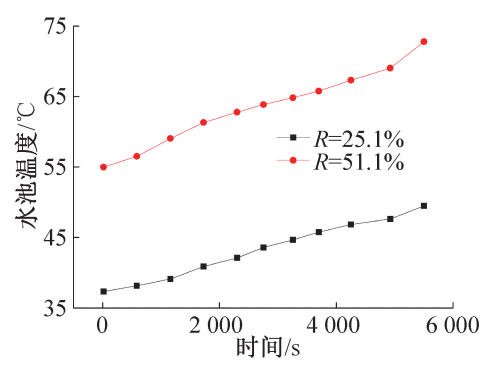


图 3 充液率为 25.1% 和 31.1% 时水池温度变化

Fig.3 Pool temperature changes with time at liquid filling ratio of 25.1% and 31.1% respectively

图 4 所示为不同充液率下的热管工作性能。图 4(a) 所示为水池发热功率为 1 680 W、冷凝温度为 20℃ 时,模拟水池和管内蒸发温度随系统充液率的变化。水池温度随充液率的增大而先减小后增大,蒸发温度整体变化趋势较小。水池温度的变化表明热管的传热能力在不同充液率下有所不同。

因蒸发段各支管间流动与传热的不均匀性,以中间支管 4 作为整理数据的基准<sup>[18]</sup>。最佳充液率应为相变传热所占比例最大时,当外部工况相同时可以传热系数作为指标<sup>[17]</sup>。图 4(b) 所示为支管的局部传热系数随充液率的变化。由图可知,分离式热管存在一个最佳充液率,约为 42.3%。当充液率为 31.1% 时,管内表面传热系数沿程变化较小,因在该充液率和加热功率下,冷凝液在进入蒸发段各支管前已在联箱内达到饱和且以饱和状态分配到各支管。

本文得到的最佳充液率稳定在约 42.3%,与易冲冲等<sup>[8]</sup>的实验结果有部分重叠,但其实验工质为氨,最佳充液率区间随工况变化浮动较大,这与文献<sup>[9]</sup>的结论一致。

## 2.2 加热功率对蒸发段支管传热性能影响

当充液率为 42.3% 时,水池内分离式蒸发段并联支管在不同加热功率下的工作性能如图 5 所示。由图 5(a) 可知,水池温度和管内蒸发温度均随加热功率的上升而增加。因为加热功率越大,热管的循环工质量增多,热管与池水所需的传热温差需保持

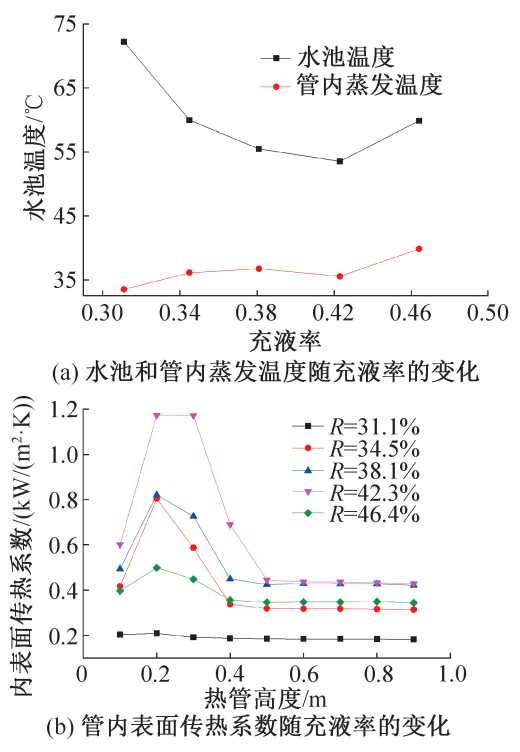


图 4 不同充液率下的热管工作性能

Fig.4 Heat pipe work performance under different filling ratios

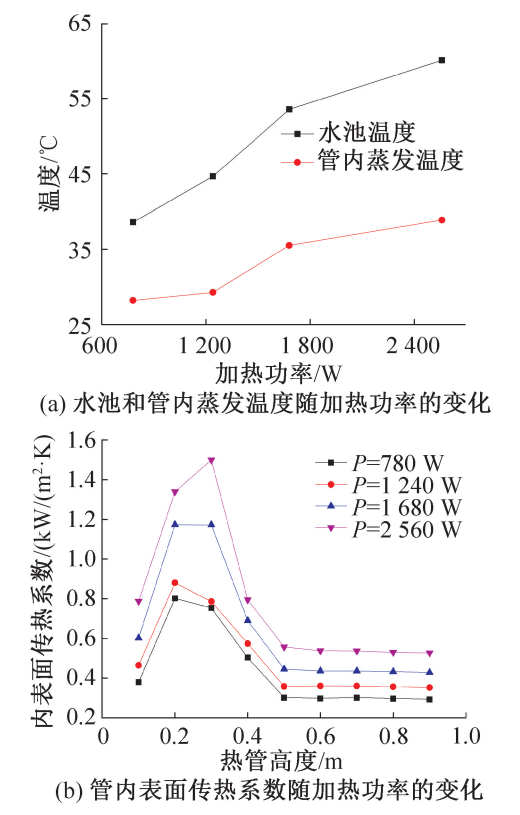


图 5 不同加热功率下的热管工作性能

Fig.5 Heat pipe work performance under different heating power

环工质量增多,热管与池水所需的传热温差需保持

在合理水平。图 5(b)所示为以中间支管 4 数据获得的管内表面传热系数随水池加热功率的变化。可知沿程的内表面传热系数随加热功率的增大而增大,高热流密度将导致蒸发段管内沸腾形式更加剧烈<sup>[17]</sup>。

### 2.3 蒸发段并联支管传热性能对比

图 6 所示为当充液率为 42.3 %、水池内加热功率为 1 680 W 时,蒸发段各支管壁温和内表面传热系数随其高度的变化。由图 6(a)可知,各支管壁温呈现先减小后增大的趋势,且壁温开始上升的高度不同。支管底部工质主要为单相液体区,随着流动换热进行,管内工质达到两相状态,对流换热能力较强;在换热支管顶部,当管内气体体积分数达到某一临界值时,单相换热特征明显,管内换热能力下降。

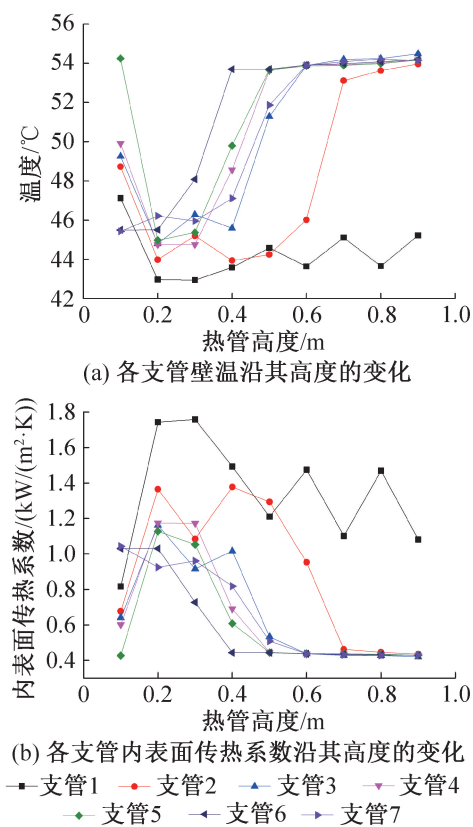


图 6 蒸发段各支管传热性能对比

Fig.6 Comparison of heat transfer performance in parallel evaporating sections

支管 1 沿程温度维持较低水平且无明显上升,主要因支管 1 的进出口分别接近进出口联箱的进口和出口,所以支管 1 的进出口两端压差较大,管内流量充沛,易于维持较长的两相区域。支管 2 壁温上升的位置明显高于支管 3~7,原因与支管 1 相似,两相液面位置较高。支管 3~7 内的壁温沿程变化差异较

小,因进口联箱的后半段工质流量逐渐减少,使各支管间的入口压力和质量流量差异较小。

由图 6(b)可知,各支管的内表面传热系数在其高度方向上整体均呈先增大后减小的趋势,且各支管间传热性能不一致。支管 1 换热能力最强,其内表面最大传热系数为 1 758.7 W/(m²·K),支管 2 次之,而支管 7 管内的最大传热系数仅为 1 043.8 W/(m²·K)。出现差异的原因与各支管内流量分配相关,因此各支管内的制冷剂出口干度、换热能力等存在差异性。

### 2.4 冷凝段并联支管传热性能的分析

图 7 所示为充液率为 42.3 %、水池加热功率为 1 680 W 时,冷凝段各支管壁温的变化。由图 7(a)可知,各支管上侧的壁温沿程变化较小且有微小上升趋势,而下侧的壁温沿程变化相对较大,且沿工质流动方向逐渐减小。因在该充液率下,冷凝段各水平支管内上方多为气体区,气体本身与管壁换热能力较低,但部分壁面为冷凝换热面。由于重力作用,冷凝液膜主要分布在各水平支管的下侧,故下侧与管壁换热较多,温度下降较快。

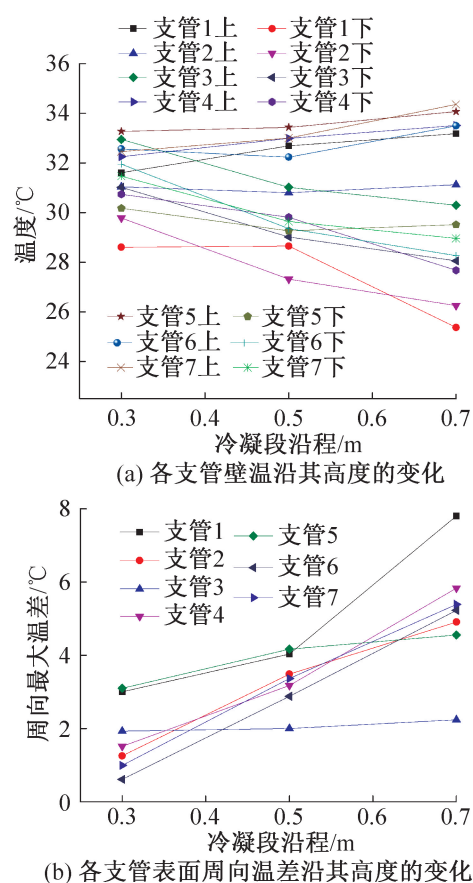


图 7 冷凝段各支管传热性能分析

Fig.7 Analysis of heat transfer performance of condenser section heat pipes



由图 7(b)可知,随冷凝液膜的厚度逐渐增加,周向温差沿工质的流动方向越来越大。冷凝段各支管的周向温差也存在明显差异,支管 1 的沿程周向温差最大,因其流量较大;支管 2、3 的下侧壁温下降也相对较快,但周向温差变小,主要因进入到支管 2、3 的蒸汽含湿量相对支管 1 较大,有更多的换热面冷凝换热占主导,故周向温差减小。支管 4~7 的壁温差异性较小,因冷凝段支管分配特性,各支管间的进口压力和流量差异减小。

### 3 结论

本文以被加热的水池为模拟热源,实验研究了以 R134a 为热管工质,且蒸发段和冷凝段均有 7 根并联换热支管的分离式热管,得到如下结论:

1) 在实验工作条件下(冷凝温度为 20℃,管壁热流密度为 4~15 kW/m<sup>2</sup>),系统最佳充液率为 42.3%;在此充液率下,水池加热功率从 780 W 增至 2 560 W 时,水池温度、热管蒸发温度和管内传热系数均随水池发热功率的升高而增大。

2) 当充液率为 42.3%,水池加热功率为 1 680 W 时,蒸发段各支管的局部换热能力整体沿其高度先增大后减小;并联各支管的流量分配出现不均匀现象,且换热能力存在较大差异,其中最靠近冷凝液来流方向的支管 1 质量流量最大,换热能力最强,邻近的支管 2 次之。

3) 当充液率为 42.3%,水池加热功率为 1 680 W 时,冷凝段并联各支管的周向温差沿工质流动方向逐渐增大;同蒸发段类似,冷凝段各支管内的流量分配和换热能力存在差异性,其中靠近蒸汽来流方向的支管 1 质量流量较大,换热能力较强。

### 参考文献

[1] KOSA L', JOBB M, NEMEC P, et al. Gravitation heat pipe and influence of working conditions[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 832(6):192-199.

[2] 刘效洲,惠世恩,徐通模,等.分离式热管换热器的工作原理及其在电厂余热回收中的应用[J]. 热能动力工程, 2001,16(4): 375-376. (LIU Xiaozhou, HUI Shien, XU Tongmo, et al. Working principle of separated heat pipe heat exchanger and its application in waste heat recovery of power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001,16(4): 375-376.)

[3] 蔡卫东. 热管技术研究进展及其在制冷空调行业中的应用[J]. 制冷与空调(四川),2003,3(3):31-36. (CAI Weidong. Progress of theoretical research and application investigation on heat pipe technology and its application in

refrigeration and air-conditioning[J]. Refrigeration & Air-condition, 2003,3(3):31-36.)

[4] JEONG Y S, BANG I C. Hybrid heat pipe based passive cooling device for spent nuclear fuel dry storage cask[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,96:277-285.

[5] JEONG Y S, KIM K M, KIM I G, et al. Hybrid heat pipe based passive in-core cooling system for advanced nuclear power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90(4):609-618.

[6] 岳镇宇,陈焕新,钟昌. R134a 汽车空调回热系统热力学性能参数的优化分析[J]. 制冷学报,2016,37(5):26-32. (YUE Zhenyu, CHEN Huanxin, ZHONG Chang. Optimization of thermodynamic properties of R134 a vehicle air conditioning system with internal heat exchanger[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(5):26-32.)

[7] PANDA K K, DULERA I V, BASAK A. Numerical simulation of high temperature sodium heat pipe for passive heat removal in nuclear reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017,323(6):376-385.

[8] 易冲冲,王文,王博杰,等.分离型热管单管回路传热特性实验研究[J]. 热能动力工程,2014,29(6):633-638. (YI Chongchong, WANG Wen, WANG Bojie, et al. Experimental study of the heat transfer characteristics of the single tube loop of a separate type heat pipe[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014,29(6): 633-638.)

[9] 胡院林,王博杰,易冲冲,等.以 R134a 为工质的分离式热管换热性能分析[J]. 低温与超导,2014,42(12):1-5. (HU Yuanlin, WANG Bojie, YI Chongchong, et al. Experimental research on heat transfer of separated heat pipe using R134a[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014,42(12): 1-5.)

[10] RAHMAN M M, SAHA M, BHUIYA M M K, et al. Heat transfer characteristics of a parallel miniature heat pipe system[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 79(4):1-8.

[11] 刘姗姗,张志刚,齐航.并联分离式热管内传热特性的试验研究[J]. 流体机械,2017,45(6):56-60. (LIU Shanshan, ZHANG Zhigang, QI Hang. Experiment study on heat transfer characteristics of parallel and separated type heat pipe[J]. Fluid Machinery, 2017,45(6): 56-60.)

[12] 胡张保,张志伟,金听祥,等.分离式热管在机房空调系统中应用研究进展[J]. 低温与超导,2015,35(1):64-68. (HU Zhangbao, ZHANG Zhiwei, JIN Tingxiang, et al. Review of research on the application of separated type heat pipe in air conditioner for computer and data processing rooms[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2015,35(1): 64-68.)

(下转第 51 页)

[22] 家用制冷器具冷藏冷冻箱:GB/T 8059.2—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996. (Household refrigerating appliances refrigerator freezer; GB/T 8059.2—1995 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.)

[23] BJÖRK E, PALM B. Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator. Part II: steady state conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(8): 866–871.

[24] 吴业正. 小型制冷装置设计指导 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (WU Yezheng. Design guidance for small refrigerating equipment [M]. Beijing: China Machine

(上接第 36 页)

[13] 金鑫, 瞿晓华, 祁照岗, 等. 微通道型分离式热管传热性能实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(3): 15–19. (JIN Xin, QU Xiaohua, QI Zhaogang, et al. Experimental investigation on heat transfer of microchannel separate heat pipe [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(3): 15–19.)

[14] 金鑫, 瞿晓华, 施骏业, 等. 微通道型分离式热管基站节能特性实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(6): 32–37. (JIN Xin, QU Xiaohua, SHI Junye, et al. Research on the performance of telecommunication base station with separated heat pipe [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(6): 32–37.)

[15] 陶洁. 分离式热管型空调工作特性研究的试验研究[J]. 制冷, 2013, 32(3): 14–16. (TAO Jie. Experimental research of characteristics of separate heat pipe air conditioning units [J]. Refrigeration, 2013, 32(3): 14–16.)

[16] 方贵银, 张曼, 吴双茂, 等. 分离式热管蓄冷空调系统充冷性能实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 46–50. (FANG Guiyin, ZHANG Man, WU Shuangmao, et al. Experimental study on charging performance of cool storage air-conditioning system with separated-type heat pipe [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 46–50.)

[17] 陈岚, 苏俊林, 伍贻文. 分离式热管充液率实验研究

Press.)

通信作者简介

陈琪, 男, 博士, 副教授, 浙江大学制冷与低温研究所, (0571) 87951738, E-mail: zjuchenqi@zju.edu.cn。研究方向: 节能与低品位能源利用、流体热物性。

About the corresponding author

Chen Qi, male, Ph. D., associate professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, +86 571–87951738, E-mail: zjuchenqi@zju.edu.cn. Research fields: energy-saving and utilization of low-grade heat, physical properties of fluids.

[J]. 上海理工大学学报, 2003, 25(3): 285–288. (CHEN Lan, SU Junlin, WU Yiwen. Experimental study on the working fluid filling rates of a special separate type heat pipe [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2003, 25(3): 285–288.)

[18] 唐志伟, 师明星, 韩雅芳, 等. 分离式热管换热器传热特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(7): 1190–1192. (TANG Zhiwei, SHI Mingxing, HAN Yafang, et al. Experimental study to heat transfer characteristics of separated heat pipes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(7): 1190–1192.)

通信作者简介

王文, 男, 教授, 上海交通大学机械与动力工程学院, 13641977909, E-mail: wenwang@sjtu.edu.cn。研究方向: 分离式热管技术。

About the corresponding author

Wang Wen, male, professor, School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, +86 13641977909, E-mail: wenwang@sjtu.edu.cn. Research fields: thermosyphon heat pipe technology.