

热管启动性能研究进展

黄生云, 郭航, 叶芳

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要:热管作为一种高效的被动式传热元件,以其自身独特的优势在化工、航天、能源和动力等领域中得到了广泛应用。热管启动性能既是热管的重要技术参数,也是热管瞬态特性的组成部分。对近 10 年来关于常规热管、温控热管、小型/微型热管、环路热管、脉动热管的启动性能研究进行了综述,并对影响热管启动性能的因素开展了分析和讨论。

关键词:热管;启动性能;瞬态

中图分类号:TK172.4

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)07-0027-04

Advances in study of start-up performance of heat pipes

HUANG Sheng-yun, GUO Hang, YE Fang

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Heat pipes are passive heat transfer devices with high thermal conductivity. Due to their own advantages, heat pipes are widely used in chemical industry, aerospace, energy and power engineering, etc. Start-up performance is not only an important technical parameter for heat pipes, but also one of characteristics of transient state of heat pipes. Studies on start-up performance of conventional heat pipes, temperature controlled heat pipes, miniature/micro heat pipes, loop heat pipes and pulsating heat pipes in the past decade are reviewed. Influencing factors of start-up performance of heat pipes are also analyzed and discussed.

Key words: heat pipes; start-up performance; transient state

热管是非常灵活高效的传热元件,它们的导热系数可达 $10^3 \sim 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,广泛应用于化工、能源、动力、航天领域的换热装置中。由于可以较好地实现冷、热源的多样化^[1]以及解决高热流密度散热问题^[2-5],热管近年来作为一种高效传热元件的应用日益广泛。热管的工作过程可以概括性地描述为:启动过程—稳定工作过程—卸车过程。从热管整体工作过程来看,启动过程对热管能否快速准确进入正常稳定工作模式起着决定性作用^[6]。进入 21 世纪以来,许多研究机构研究了不同类型热管的启动性能,取得了一批新成果。本文将就近 10 年来在对常规热管、温控热管、小型/微型热管、环路热管、脉动热管等的启动性能方面的研究成果进行回顾、分析和讨论。

1 常规热管启动性能研究

具有金属烧结芯的常规热管是很好的传热元件。有芯热管的一个很重要的特点是:凭借封闭管内的的工作介质反复发生相变(蒸发、冷凝),热管可以

在小温差的条件下传输大量的热。而且不受热传输方向的限制,蒸发端以及凝结端可以互换,改变热传输方向^[5]。

赵蔚琳等^[6]通过对 7 根结构参数不同、充液量不同的高温钠热管进行实验研究,分析了蒸发段长度的变化及充液量的变化对高温钠热管启动过程的影响。实验结果表明,蒸发段的长度变化对钠热管启动过程有很大影响。蒸发段长度太短,将导致钠热管启动失败。在蒸发段的长度一定时,充液量不同对启动过程也有影响:充液量过多、过少都将严重地影响高温钠热管的顺利启动,出现不正常的启动。实验所用的直径为 2 mm、长 1 000 mm 的钠热管,当蒸发段长度为 580 mm 且充有 78 ~ 90 g 的工质时,其启动运行工作为最佳。

2 温控热管启动性能研究

与常规热管不同,温控热管管内除了充有工作液体外,还充有一定量的不凝性气体。利用气体的压缩性来改变冷凝段的传热面积,在温度变化不大

收稿日期:2009-03-03

基金项目:北京市优秀人才培养资助项目(20081D0501500167)

作者简介:黄生云(1982-),男,硕士生;郭航(1970-),男,博士,教授,主要从事动力工程及工程热物理方面的研究,通讯联系人,010-67391612-8311, hangguo@bjut.edu.cn。

的情况下较大地改变热管的传热量,从而实现温度控制^[7]。

为了使热管的传热功率能够随热源负荷的变化而自动变化,并且能够应用在大功率换热场合,袁竹林等^[7]新提出一种分离式温控热管(图 1),并对该温控热管的启动过程进行了实验研究。实验所用热管的工作液体为蒸馏水,不凝性气体为氮气,充入不凝性气体的量通过充气压力来控制。实验结果表明,在实验范围内,充气压力越高,启动时间就越短。实验还把温控热管的启动过程和常规热管进行了比较,温控热管的温升曲线和常规热管有很大不同。在启动阶段,温控热管工作温度呈指数上升趋势,而常规热管的工作温度则上升得较为缓慢。研究者分析其中的原因,认为是由于不凝性气体占据了温控热管冷凝段的一部分,致使温控热管的放热能力较常规热管差,因此在相同加热条件下,温控热管有较多的热量来提高自身温度,所以启动快。充气压力越高,不凝性气体占据冷凝段的面积就越大,使冷凝放热系数变得更小,因此启动过程就越快。

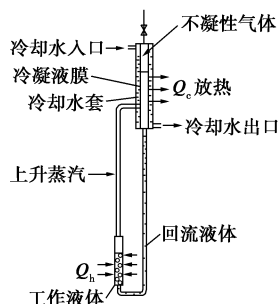


图 1 分离式温控热管示意图^[7]

3 小型/微型热管的启动性能研究

小型热管(mHP)/微型热管(μ HP)的传热热流密度很高,其中微型热管的最大传热热流密度可望达到 10^7 W/m^2 ^[8],是电子芯片冷却的很有前途的传热元件。微型热管的液体通道为水力直径非常小的微槽道。微型热管的水力直径在 $10 \sim 500 \mu\text{m}$,小型热管的水力直径在 $2 \sim 4 \text{ mm}$ ^[8]。

陶汉中等^[9]对小型铜-水轴向微槽道热管在水平或负倾角工况下,低温度状态启动过程中发生的启动滞后现象(蒸发段某个位置的温度明显高于其他轴向位置,局部温度梯度增加)进行了实验研究和理论分析。研究者使用非连续流动判据努森数 K_n 来分析启动滞后现象。当管内蒸汽温度在 20°C 附近、 K_n 大于 0.01 时,蒸汽进入不连续流动区,与微

槽道侧壁面之间产生了速度滑移和温度突跃,导致蒸汽与壁面产生了明显的温度差,发生启动滞后现象。随着热管内温度的升高, K_n 逐渐下降,蒸汽逐渐进入连续流动区,速度滑移和温度突跃消失,蒸汽与壁面之间换热状况改善,壁面温度回落,热管正常启动。另外研究者还指出,槽道吸液芯的几何结构、热管充液量、热管初始状态的气液分布状况以及热管使用角度、初始温度、输入功率等情况也与这种启动滞后现象的发生有关。

4 环路热管的启动性能研究

环路热管(LHP)除了具有常规热管的许多优点外,还由于其独特的毛细结构,可以在超远距离上有效地传输热量(在重力情况下,传输距离在任意方向上都可达好几米,而在水平方向上可达好几十米)。环路热管的概念还可以使其具有柔性布置的特点。环路热管主要应用于太空技术,随后在电子设备和计算机冷却中也有很吸引人的应用^[5,10]。其运行原理如图 2 所示。

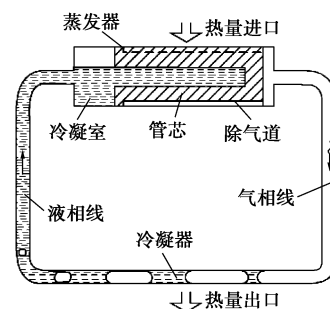


图 2 环路热管原理示意图^[10]

环路热管的启动是一个较为复杂的动态过程,而作为被动传热部件,一个最基本的要求就是无论在何种情况下,加热负荷后,环路热管都必须能正常启动。又由于不同的启动也会影响环路热管的稳态运行,因此对其启动的研究十分重要^[11]。许多机构对环路热管的启动进行了大量研究。

Zhang 等^[12]研究了环路热管在地面实验时的启动特性,首次提出了在启动阶段环路“压力回升”是导致储液器饱和和温度上升的主要原因,并且还首次观察并描述了一种在反重力工作情况下由 2 种启动方式复合而成的奇特启动现象;研究和讨论了蒸发器的气液分布、反重力工作高度、启动热载荷、热沉温度对环路热管启动性能的影响,其中热载荷大有利于启动,而未完全绝热时小热载荷下热沉温度不影响启动。

Chernysheva等^[13]用数值模拟的方法研究圆柱形蒸发器环路热管在启动阶段的传热传质特性,确定工质在蒸汽槽道内开始沸腾时所需的条件。研究考虑了最难的启动方式(蒸汽槽道内充满液体,液体主干道内却没有液体),在这种启动方式下,环路热管只有在蒸汽槽道出现蒸汽并且蒸汽从液体中释放时才能成功启动。数值模拟结果表明,外部因素对蒸发器在启动阶段的传热过程有很大的影响,在这些因素中,最重要的是储液器和环境的传热情况以及提供给蒸发器的热载荷。工质的热物性和材料的结构也影响启动时蒸发器的温度分布、最小启动热载荷以及启动时间。数值模拟结果还表明,为了达到蒸汽槽道内液体沸腾时所需的最小过热度,存在一个最小热载荷,而这个值是环路热管所应着重考虑的一个运行条件。

Chen等^[14]对用来电子冷却的小型环路热管在不同方位(水平和4个垂直方向)、不同热沉温度下的启动性能进行了一系列测试。测试所用的小型环路热管在很低的输入热流(5 W)时就能启动。在很多情况下都在液体管线发现了较大的温度振荡,但蒸发器的温度振荡却非常小。方位在很大程度上影响了小型环路热管的运行特性,所测试的小型环路热管在水平方位时的性能最优。

Nagano等^[15]测试了具有2个蒸发器和2个冷凝器的小型环路热管的启动特性。小型环路热管启动性能的测试通过改变1个或2个蒸发器的热载荷、冷凝器的热沉温度以及使用或不使用储液器温度控制来进行。超过90次的测试是在水平方位下进行的,小型环路热管在这些测试中全都能成功启动。测试表明,热载荷在1~100 W范围时,小型环路热管都能较易启动。小型环路热管不需要较大的过热度,输入热流就能很快循环,而采用储液器温度控制后,启动则更有效也更具有可现性。

Singh等^[16]对平板型蒸发器小型环路热管在高热载荷和低热载荷下的启动性能进行了详细研究。无论输入高热载荷(75 W)还是低热载荷(5 W),小型环路热管都能进入稳定工作状态,但是启动时间随着输入热载荷的减少而增加。小型环路热管在非常低的输入热载荷下启动时,蒸发器和冷凝器之间存在较大的温差。实验还研究了小型环路热管在2种不同热载荷输入模式(随机模式和渐进模式,渐进模式热载荷每次的改变量为5 W)下的启动性能。研究发现,小型环路热管对输入热载荷的改变能迅速地做出反应,并都能在2~3 min内达到稳态。

5 脉动热管的启动性能研究

脉动热管(PHP)是一种在电子冷却中非常有希望的新型传热元件,但是与常规热管相比,脉动热管具有更为复杂的运行特性。脉动热管的启动过程是一个不稳定的动态传热传质过程,对此过程的实验研究以及机理认识对电子设备启动过程的稳定性有重要意义^[5,17-18]。

徐荣吉等^[17]采用控制恒定热流温度和冷凝温度的实验方法,系统研究了平板开槽型脉动热管的启动特性。实验表明存在最佳充灌率50%,最佳倾斜角度 50° 以及最佳加热功率28.5 W,使脉动热管迅速启动,并使广义热阻在脉动热管达到稳定状态后最小。脉动热管的启动性能受冷却水流量的影响较小。

Khandekar等^[18]在对脉动热管准稳态的可视化实验研究中观察到了脉动热管在同一输入热载荷的情况下出现了2种不同的启动方式——渐进式和突进式。在渐进式启动方式下,输入热流后,工质需要很长的时间(大约1000 s)才开始振荡。在蒸发器和冷凝器的温差还没达到足够使液体工质发生移动前,蒸发器温度平稳地上升。更热更轻的工质在管内的上浮、气泡在蒸发器和冷凝器的生成和破灭都有助于启动,它们使冷凝器温度急剧上升,同时使蒸发器的温度下降。当工质、压力和温度发生振荡时,启动完成。在突进式启动方式下,启动现象跟渐进式启动很相似,但是启动时间极短,工质在输入热流后直接开始振荡。研究者认为脉动热管的启动是渐进式还是突进式,非常有可能是由初始状态时工质在毛细管内的两相空间分布所决定的。研究者建议进行更多的实验来理解脉动热管对启动方式的选取。

Xu等^[19]对以内径为2 mm的毛细铜管做成的脉动热管的启动性能进行了实验研究。实验观察到了2种启动方式:热载荷较低时(10 W),在启动阶段,观察不到任何温度振荡现象,管内工质没有发生移动,输入的热流转化为毛细管和工质的内能。随着启动的完成,管内温度会出现突降。脉动热管在低热载荷下启动需要明显的过热度(10℃)。热载荷较高时(25 W),脉动热管的启动分2个阶段:第一阶段与在低热载荷下的启动相似,但没有温度过热现象;在第二阶段,管内出现工质的脉动,可以检测到温度振荡现象,但管内温度依然随着时间上升,但上升的幅度比第一阶段要缓。启动完成,脉动热管

进入稳定的温度振荡期。

曲伟等^[20]通过建立脉动热管启动和运行的物理和数学模型,研究了尺度效应对脉动热管启动和运行的影响。研究发现,毛细管的壁面粗糙度决定了产生气泡所需要的过热度。在采用甲醇为工质的条件下,壁面的粗糙半径大于 $2\ \mu\text{m}$ 容易产生气泡。脉动热管的启动和运行受已有气泡形状的强烈影响,球形小气泡比较大的长气泡更容易使壁面产生新的蒸汽泡并使脉动热管容易运行。脉动热管可以通过对加热段内壁面粗糙度的设计、尺度和工质的匹配等方式来优化设计。

6 研究状况、不足及前景

热管的启动性能是热管瞬态特性的重要组成部分,热管启动性能的好坏决定着热管能否顺利地进入所需的稳定工作状态,也制约着热管的实际应用,热管启动性能的研究有重要的现实意义。

常规热管的启动性能研究主要是研究结构参数(蒸发段长度、径长比)、工质种类、充液率、倾角等因素对启动性能的影响。而非常规热管,因为热管结构本身的独特性和复杂性,则更多的是着重研究热管的不同启动方式、不同热载荷大小和模式对热管启动性能的影响。

热管的启动过程涉及带两相流问题,影响因素也比较多,现阶段的研究还是集中在实验研究,还未能形成有效的理论。

随着对热管启动现象的进一步深刻的本质的认识,人们将建立热管启动的有效的理论,指导热管的设计和改进工作。

7 结论

介绍了近年来不同类型热管的启动性能研究的进展。

(1) 常规热管的蒸发段长度和充液量对启动有很大的影响,存在一个使热管顺利启动的最佳蒸发段长度和最佳充液率。

(2) 温控热管的充气压力影响启动的时间。在实验范围内,充气压力越高,启动时间越短。

(3) 小型微槽道热管在低温度状态启动过程中发生的启动滞后现象的原因与槽道吸液芯的几何结构、热管充液量、热管初始状态的气液分布状况以及热管使用角度、初始温度、输入功率等情况有关。

(4) 环路热管的蒸发器和储液器的气液分布、启

动热载荷、储液器与环境的换热情况严重影响启动性能。小型环路热管在较高热载荷和较低热载荷下都能启动,但启动时间随着热载荷的减少而增加。

(5) 脉动热管在高热载荷和低热载荷下呈现出 2 种不同的启动方式,而在相同热载荷下则可能会由于管内工质在初始状态的两相分布不同而出现 2 种不同的启动方式。存在使脉动热管顺利启动的最佳充灌率、倾斜角度、加热功率。尺度效应决定了产生气泡所需要的过热度,强烈影响脉动热管的启动。

随着高热流密度问题在工程发展中日益突出和新的传热散热问题的出现,在不同的条件下也会提出新型的热管。有必要研究热管在不同条件下的启动性能和研究新型热管的启动性能,以使热管顺利进入稳定工作状态。

参考文献

- [1] 马宝仁. 热管技术在集中供热中的应用与发展[J]. 区域供热, 2008, 20(6): 33 - 37.
- [2] 吴宝宗. 热管技术研究[J]. 煤矿安全, 2004, 35(6): 41 - 42.
- [3] 余莉, 韩玉, 曹业玲. 电子设备散热用平板式热管的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 627 - 631.
- [4] 马哲树, 姚寿广, 明晓. 热管冷板启动性能和均温性能的试验研究[J]. 自然杂志, 2004, 16(6): 122 - 123.
- [5] Vasiliev L L. Heat pipes in modern heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(1): 1 - 19.
- [6] 赵蔚琳, 庄骏, 张红. 蒸发段长度与充液量对高温钠热管启动过程的影响[J]. 化工机械, 2004, 30(5): 259 - 262.
- [7] 袁竹林, 赵孝保. 新型温控热管运行特性及启动过程实验研究[J]. 热能动力工程, 2004, 17(3): 231 - 235.
- [8] Vasiliev L L. Micro and miniature heat pipes-electronic component coolers[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(4): 266 - 273.
- [9] 陶汉中, 张红, 庄骏. 微槽道热管低温启动滞后现象的分析[J]. 热科学与技术, 2007, 6(2): 124 - 130.
- [10] Maydanik Y F. Loop heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5/6): 635 - 657.
- [11] 丁汀, 张红星, 苗建印. 环路热管启动性能实验与分析[J]. 航天器工程, 2006, 15(1): 25 - 30.
- [12] Zhang H X, Lin G P, Ding T, et al. Experimental study on start-up characteristics of loop heat pipes[J]. Science in China Ser E Engineering & Materials Science, 2005, 48(2): 131 - 144.
- [13] Chernysheva M A, Maydanik Y F. Numerical simulation of transient heat and mass transfer in a cylindrical evaporator of a loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51 (17/18): 4204 - 4215.
- [14] Chen Y M, Groll M, Mertz R, et al. Steady-state and transient performance of a miniature loop heat pipe[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, New York: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 183 - 189.

(下转第 32 页)

中 Zr 的摩尔分数不超过 20%，但是与单独的 CeO_2 相比，其性能已得到了很大提高，当用作三效催化剂的助剂时，贵金属及氧化物都因 ZrO_2 的引入而更稳定^[9]；第二代 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 复合氧化物(2nd generation CZ)产生于 1996 年，溶于 CeO_2 晶格中 Zr 的摩尔分数可超过 20%， CeO_2 和 ZrO_2 可以相互溶解得相当完美，从而进一步提高了其性能；第三代 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 基复合氧化物(3rd generation CZ)产生于 1998 年，基于扩散障碍理论(如图 1)，在第二代 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 复合氧化物中加入了 Al_2O_3 以后形成的^[10]。如图 1 所示， Al_2O_3 分布 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 颗粒周围，形成了扩散障碍层，抑制了高温条件下复合氧化物粒子的聚结和长大，从而提高了其热稳定性能。

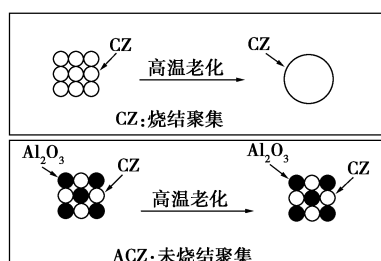


图 1 扩散障碍示意图

从 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 和 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在不同焙烧温度下的比表面积及晶粒大小^[6]可以看到，不论是以何种方式引入 Al_2O_3 ，添加 Al_2O_3 后的 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 复合氧化物的比表面积明显增大，晶粒尺寸减小，有效抑制了颗粒烧结。

2 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 储氧材料的制备方法

目前，文献已报道的 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料制备方法有浸渍法^[11-13]、共沉淀法^[6,14-15]、溶胶-凝胶法^[16]、微乳液法^[17]和机械混合法^[18]等。

2.1 浸渍法

该法一般是将铈和锆的可溶性盐配成溶液，再浸渍到 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 或 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上。虽然浸渍法工艺简单，但组分分布不均匀，由于铈锆铝之间的相互作用

较弱，易得到不同的富铈、富锆及氧化铝物相峰，导致储氧性能较差。

一般地，浸渍法常见于稀土对 Al_2O_3 载体的改性方面。Yao 等^[11]将一定比例的 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$ 混合盐溶液共浸渍到比表面为 $100\text{ m}^2/\text{g}$ 的 Al_2O_3 上，在 120°C 烘干后， 400°C 焙烧 4 h 制得新鲜样品。研究表明， $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 的加入明显提高了 Al_2O_3 高温热稳定性，其中铈锆比为 1 的样品在 $1\ 000^\circ\text{C}$ 焙烧 4 h 后比表面为 $51\text{ m}^2/\text{g}$ ，但物相中同时出现了富铈、富锆及氧化铝的晶相峰，储氧性能较差。专利^[19]也公开了一种采取浸渍法制备铈基储氧材料的方法，即通过浸渍方式将氧化铈及氧化铈稳定剂浸渍在大面积的氧化铝上，在 900°C 的条件下煅烧 10 h 后，所制备的铈基储氧材料最好比表面积为 $30\text{ m}^2/\text{g}$ 左右。物相的 X 射线衍射图呈现出 CeO_2 和 Al_2O_3 的衍射峰，但未介绍材料的储氧性能。

2.2 共沉淀法

共沉淀法主要用 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 等沉淀 Ce^{3+} 、 Zr^{4+} 和 Al^{3+} ，反应过程可以利用 H_2O_2 作为氧化剂来促进 $\text{Ce}(\text{OH})_3$ 向 $\text{Ce}(\text{OH})_4$ 转化，最后得到的黄色沉淀抽滤，在不同的温度下进行焙烧即可制得所需样品。虽然共沉淀法工艺简单，但影响 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料性能的因素有很多，如沉淀剂、pH、氧化物组成、反应前后的处理过程等。

李红梅^[14]以 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 和 ZrOCO_3 为原料，与碱性溶液(碳酸铵、氨水、碳酸铵-氨水)进行并流法沉淀，考察了沉淀剂对 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料性能的影响。其中以碳酸铵-氨水作沉淀剂所得 $\text{Ce}_{0.5}\text{Zr}_{0.15}\text{Y}_{0.075}\text{La}_{0.075}\text{Al}_{0.2}\text{O}_2$ 样品在老化前后具有比较大的比表面积和孔容，该新鲜样品的比表面积为 $149.8\text{ m}^2/\text{g}$ ，储氧量为 $513\ \mu\text{mol}/\text{g}$ ，经 $1\ 000^\circ\text{C}$ 老化后的比表面积为 $53\text{ m}^2/\text{g}$ ，表现出较好的织构性能和抗老化性能。这主要是由于以碳酸铵-氨水为混合沉淀剂时，所得的沉淀粒子已经不是单纯的氢氧化物或碳酸盐，而是某种复盐沉淀，导致粒子界面张力

(上接第 30 页)

- [15] Nagano H, Ku J. Start-up behavior of a miniature loop heat pipe with multiple evaporators and multiple condensers[C]//Collection of Technical Papers-45th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2007: 14486-14494.
- [16] Singh R, Akbarzadeh A, Mochizuki M. Operational characteristics of a miniature loop heat pipe with flat evaporator[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(11): 1504-1515.

- [17] 徐荣吉, 王瑞祥, 丛伟. 脉动热管启动过程的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 530-533.
- [18] Khandekar S, Gautam A P, Sharma P K. Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(3): 535-546.
- [19] Xu J L, Zhang X M. Start-up and steady thermal oscillation of a pulsating heat pipe[J]. Heat Mass Transfer, 2005, 41(8): 685-684.
- [20] 曲伟, 周岩, 马鸿斌. 尺度效应对脉动热管启动和运行的影响[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 140-142. ■