

微型热管技术的研究现状与发展

朱高涛 刘卫华

(南京航空航天大学)

摘 要 微型热管(micro heat pipe, MHP)被广泛用于冷却航天、航空、军用武器、车辆、计算机等众多领域的电子设备,是有效冷却高热流密度电子器件的主要途径之一,已成为现代热管技术重要的发展方向和研究热点。目前对MHP的研究主要集中在管内流动及传热、传质的机制研究,新型高效结构形式的设计,制造工艺技术的改进等方面。较系统地总结近来MHP在理论、设计及制造工艺等方面的技术研究进展,综述其应用现状并分析其发展趋势。

关键词 微型热管 传热传质 电子设备冷却

The current status and development of micro heat pipe technique

Zhu Gaotao Liu Weihua

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT Micro heat pipe (MHP) is widely used to cool equipments of aerospace electronics, avionics, military electronics, automotive technologies, computers and so on. It is one of main approaches which can cool electronic components of high heat-fluxes effectively. At present, it becomes one of hotspots of modern heat pipe technology. Most of the studies are focused on the principle of heat and mass transfer and vapor-liquid flow in the MHP, novel design of high effective MHP structure, improvement of MHP manufacture technology and so on. In this paper, recent studies on MHP are summarized as four parts: theoretical analysis and experimental study of the MHP principle, design of new structure MHP, manufacture technology, application of MHP, and the development trend.

KEY WORDS micro heat pipe; heat and mass transfer; electronic equipments cooling

自1984年Cotter^[1]提出MHP的概念以来,人们对MHP进行了大量的理论和实验研究,并取得了一系列的研究成果和技术进步。如MHP的结构,就经历了从重力型、具有毛细芯的单根热管型到具有一束平行独立微槽道的平板热管型,再到内部槽道束通过蒸汽空间相互连通型等一系列变化,其目的就是要更好地为各种小面积、高热流密度元器件的散热提供更有效的手段。但是随着热管结构尺寸的减小,除毛细极限、沸腾极限等常规热管均具有的传热极限限制了MHP的传热能力之外,MHP还遇到了常规热管所没有的传热极限,比如蒸汽连续流动极限就限制了MHP在低温状态下

的工作等。正是由于MHP结构的特殊性,才使得有关MHP的理论研究、实验研究及制造工艺研究等有别于常规热管。笔者旨在着眼于MHP的特殊性,总结近期MHP在理论和实验研究、设计及制造工艺等方面的技术进展,分析其发展趋势,以明确今后工作方向。

1 MHP研究进展

1.1 MHP传热能力研究

MHP一般没有传统热管的毛细吸液芯,管内液体回流主要依靠槽道尖角区形成弯月面的毛细压差来提供动力。MHP尺寸的减小突出了薄液膜区的作用,轴向管壁热传导所占份额的增加使得

* 收稿日期:2005-03-01

通讯作者:刘卫华, E-mail: Liuwh@nuaa.edu.cn

MHP 传热极限的判定变得十分困难。因此,对 MHP 的理论和实验研究主要集中在其管内流动和传热机制上,目的就是精确确定其传热能力。

有关 MHP 传热能力的研究,从稳态模型计算到瞬态实验测定逐步深入^[2-9]。

Babin 等^[3]提出第一个有关 MHP 的简单数学模型,成为人们进一步研究的基础。Wu 和 Peterson^[4]建立第一个 MHP 瞬态数学模型,并对其性能进行模拟,得到较为令人满意的结果。Gemer 等^[5]提出 MHP 最大传热量计算的修正公式。Cao 和 Faghri^[7]通过理论计算证实了 MHP 的蒸汽连续流动极限,并给出蒸汽连续流动极限以及沸腾极限等极限的计算公式。Peterson^[8]和 Ma^[9]从不同角度进行了管内工质的复杂流动的研究,引入蒸发段最小弯月面半径的概念。

近年来,人们对 MHP 管内流动和传热机制的研究更加深入^[10-22],其研究方法一般都是在前人的基础上通过建立更加科学的数学模型,更全面地考虑各种因素对 MHP 传热能力的影响,得出其传热能力的大小。通常考虑的影响因素主要有:工质种类及充注量、气液界面剪切应力、固液接触角、MHP 尺寸大小以及结构形状等。

1999 年, Peterson 和 Ma^[10]研究一个长 57 mm, 银质、梯形截面的 MHP, 工质为高纯度的去离子水。他建立的数学模型中考虑了分离压力、粘性剪切应力、蒸汽温度和壁面温度分布上的热阻等因素, 用来描述 MHP 轴向温度分布及其对通过薄液膜微区域传热的影响。求解模型后得出结论: 蒸发段温降比冷凝段温降要大得多, 当传热量增大时, 冷凝段和蒸发段的温降显著增大。

2000 年, Sartre 等研究由铝板制成的、长 120 mm、加工了 19 道平行槽道的 MHP 阵列。槽道截面形状为正三角形, 边长 0.7 mm, 各槽道间距 0.2 mm。工质为氨水。建立的该 MHP 阵列理论模型中考虑了沿 MHP 长度方向的毛细流动、壁面的二维热传导和微区域的传热作用, 描述了接触角、浸润面积、干涸面积、壁面温度、热流密度分布以及 MHP 的最大传热量。得出结论: ① 在微区域内, 接触角随壁面过热而增大; ② 当忽略分离压力作用时, 接触角为一常量; ③ 浸润长度在蒸发段首末位置分别为 5 μm 和 105 μm ; ④ 微区域内有很高的传热率、最小的过热度; ⑤ 壁面温度沿 MHP 轴向下下降时, 壁面过热度 and 接触角相应降低; ⑥ 局部热流密度和局部传热系

数沿 MHP 轴下降等^[11]。

2003 年, Kim 等^[12]研究外径分别为 3 mm 和 4 mm 的管状 MHP, 建立 MHP 的传热传质数学模型, 模型考虑了气液界面的剪切应力、接触角以及充液量的影响。该模型采用一种创新的方法(改进的 Shah 法^[13])求解气液界面的剪切应力对 MHP 性能的影响, 并从数学模型的分析解中得到 MHP 的最大传热率和稳态下 MHP 的全部热阻、毛细半径的分布、稳态运行时液态和气态工质的压力分布等。为了验证模型的精确性, 他们进行了实验验证。同时他们还通过对模型的数值优化指导 MHP 的优化设计, 提高了 MHP 的传热性能。

2003 年, 范春利等^[16]通过对薄液膜蒸发传热以及热管壁面轴向导热的分析, 也对三角形截面 MHP 建立蒸发传热模型。模型考虑了气液界面的摩擦、薄液膜传热和接触角变化的影响。克服文献[11]模型中的某些缺点。利用模型分析热管蒸发段的温度分布、蒸发热流密度、弯月面半径和接触角的轴向分布, 得出: 薄液膜对 MHP 蒸发传热的作用远大于厚液膜, 接触角在蒸发段沿轴向逐渐变小; 对存在加工圆角的 MHP 进行传热计算时, 最小弯月面半径和加工圆角存在制约关系等结论。张丽春等^[2]则理论分析了等热流分布下的异性截面微型热管, 建立了管内的热质传递过程的数学模型。通过数值模拟求解气液交界面的毛细半径分布以及液体和蒸汽的压力分布, 得出 MHP 的传热极限以及此时的蒸发段最小毛细半径。结论是: 毛细半径、液体和蒸汽的管内轴向分布主要与传热量和气液界面剪切力有关, 减小剪切力将大大提高传热能力; 最大传热量随接触角的减小而增大, 随循环工质流量的增加而单调增大; 传热量的增加使更多的工质参与循环, 减小了冷凝段液体的堵塞长度等。

1.2 MHP 结构优化设计研究

对 MHP 管内流动和传热的机制研究就是要分析各种因素对 MHP 传热能力的影响, 从而确定其传热极限, 以指导对 MHP 的结构进行优化设计, 其目的就是要设法提高 MHP 的性能, 或使新型结构的 MHP 适用于特殊的工作条件。目前对 MHP 结构的优化设计主要体现在:

1.2.1 设计更合理的尺寸和更多的尖角以提供更大的毛细动力

S.W. Kang 等设计制作了星形和菱形槽道的 MHP, 进行理论计算和实验研究。在充液量和热流密

度变化的情况下,测试 MHP 的性能。由于更多的尖角和微型缝隙提供了更好的毛细动力,最好的热传导率分别可达 $277.9\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $289.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[23]。

范春利等通过实验比较了三种微槽道平板热管的性能,并研究了槽道结构、充液率、工质种类对微槽道平板热管性能的影响,得出:对深槽平板热管的最优充液率在 2.0 附近,以丙酮为工质的热管性能比以蒸馏水为工质的热管性能差,槽道的加深使热管具有更好的传热性能等^[24]结论。

1.2.2 设计气液分离的 MHP^[25-26]

S.W. Kang 等制造了一种放射状槽道结构的 MHP 阵列,尺寸大小为 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$,用于冷却电子设备。该 MHP 阵列采用三层硅板加工而成(图 1)。这种三层结构的设计通过分离气液两相流来减少粘性剪切应力。实验表明:在加入热量为 27 W 、充液率为 70%时,MHP 具有最好的性能。此时,蒸发温度比平板低 27% ^[25]。同时,他们将确定该 MHP 的传热极限,并进行优化设计以进一步提高其性能。

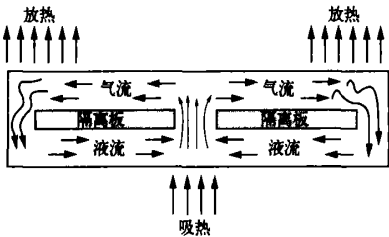


图 1 气液分离的 MHP 结构图

1.2.3 电液动力(electrohydrodynamic, EHD)MHP

传统的 MHP 由于液体回流时存在很大的粘性损失,很难有效地散发更高密度的热量。Z. Yu 等和 Zhiquan Yu 等为了解决这一问题提出了电液动力 MHP。Z. Yu 等^[27]研究结果表明:对 MHP 应用电场不仅增大了 MHP 的传热能力,而且在瞬态热载荷的情况下,能对热源进行积极热控制。Zhi-quan Yu 等^[28]在 Matlab Simulink 环境中建立电液动力 MHP 的温度控制模型,并进行了实验验证,结果表明使用这种 MHP 可以对冷却系统进行精确的温度控制。

1.2.4 圆盘槽道的 MHP

H. T. Chien 等研究了一种圆盘形状的 MHP,在直径和厚度分别为 9 mm 和 2 mm 的铝质圆盘上放射状地加工 20 道微槽道,槽道深 0.4 mm ,宽 0.35 mm ,成长方形。对这种 MHP 的测试表明,最佳充液量为 $15\sim 16\text{ }\mu\text{L}$,相比传统的无氧铜衬底封装平均降低了 40%的

热阻。由于其成本低,性能更好,并且适合大规模制造,有可能替代传统的封装方法^[29]。

1.2.5 新型陶瓷材料的 MHP

W. K. Jones 等^[30]针对冷却热量密度大于 $100\text{ W}/\text{cm}^3$ 的电子装置提出了一种新的散热方案。它采用新材料和新工艺直接将 MHP 集成安装在装置的 LTCC(low temperature cofire ceramic)陶瓷基底上。MHP 使用多孔芯或多孔芯与槽道芯相结合的方式,工质为水,并采用大面积热通道技术,降低陶瓷材料的热阻,其导热率从 $2.63\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 上升到 $250\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。对该 MHP 的初步测试数据表明,它能处理更高的热流密度和更大的热载荷,能在大于 $300\text{ W}/\text{cm}^3$ 的热量密度的场合下使用。

1.3 MHP 制造工艺研究^[25-26, 30-38]

因为 MHP 的结构尺寸很小,所以其制造工艺与传统热管有所不同。现代微加工技术的发展使 MHP 的加工技术日趋成熟。据报道,使用 MEMS(微电子机械系统)技术制作的 MHP 槽道当量直径可达 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。有关 MHP 的制造工艺研究开展的较多,综合而言,主要体现在 MHP 制造的四个方面,具体如下。

1.3.1 MHP 管壳加工

制造 MHP,首先要加工 MHP 管壳。一般来说加工管壁槽道有三种方法:冲压成型、机械刻画和化学蚀刻。冲压成型的最大优点是价格低廉,内芯结构尺寸大于 0.3 mm 的 MHP 一般使用该方法;槽道尺寸小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 时,可使用精确的微机械加工;各种化学蚀刻在制作很小槽道尺寸的情况下(小于 $30\text{ }\mu\text{m}$)和 MHP 阵列时使用的比较多。文献[33]报道了采用冲压成型制造一个外部直径大于 0.3 mm 的 MHP 的制造工艺;D. A. Beason 等^[35]介绍了使用 X 射线微加工技术(LIGA);C. P. Peterson 等^[36-37]则使用了化学蚀刻的方法。

1.3.2 清洗

清洗的基本步骤为:首先初步清洗掉加工碎片,再采用化学清洗方法去除油膜,然后洗涤溶媒和蚀刻剂等污渍,最后真空烘干,去除液化的气体。具体的清洗过程要依据实际情况而定,Manfred Groll 等^[38]给出了几组工质与管壳搭配的清洗方案。ShungWen kang 等^[25]在蚀刻完成之后,首先将三块模板放入 BOE 溶液中洗去残余氧化层,然后用 DI 水(工质)洗涤,再用硫酸、双氧水体积比为 3:1 的溶液清洗平板表面,然后再用 DI 水洗涤,

最后使用氮气吹干。

1.3.3 工质充注

典型的充注方法有五种^[38]：① 首先将 MHP 抽真空，然后再充注工质。ShungWen kang 等^[25]详细介绍了这种充注方法。② 液态充注，然后再汽化。首先在 MHP 中充入液态工质，然后再抽真空，使工质慢慢蒸发，充满整个 MHP。该方法的缺点是会损失一些工质，因此需要再充注。③ 固态充注，然后再升华。与第二种方法一样，不同的是先充入固态工质而让其在抽空过程中升华。④ 高精度充注蒸汽。该方法适用于使用低温工质的 MHP(阵列)，它可保证每一通道内的工质充注量和密度几乎相同。⑤ 吹出技术。这种方法最简单，但精度最差。

1.3.4 密封

密封的方法应根据 MHP 是否在填充室内充注、是单根管还是 MHP 阵列以及材料的延展性等情况来进行适当选择^[38]。通常采用焊接法和键合法。一般来说，延展性好的圆形 MHP 比较容易密封，在充注室外完成充注后将充注端钳紧，然后焊接即可。而 MHP 阵列的密封相对复杂，ShungWen kang 等^[25]采用了共晶键合的方法，C. P. Peterson 等^[36]采用的是紫外线键合的方法，而 S. Launay 等^[37]采用了分子键合的方法。

2 MHP 应用现状

2.1 在电子设备冷却中的应用

MHP 广泛用于电子设备冷却中，实际应用较多的是管状 MHP、平板 MHP 以及 MHP 阵列。不同结构形式的 MHP，其应用范围有所不同。

管状 MHP 作用主要是将热量从“点热源”收集，然后传至远处。其利用方法一般有两种，一种是把被冷却元器件直接贴装在 MHP 上作为蒸发端的加热器；另一种是把被冷却元器件装在平板上，而将 MHP 集成制造或嵌入平板内进行散热。管状 MHP 在电子设备冷却中的应用首推电脑内芯片的散热^[39]。MHP 在笔记本电脑中 CPU 上的安装方式以及散热方式随所需散热体功率的大小而定。目前采用的方式是：6 W 以下的散热量，MHP 安装在键盘以下，利用键盘板作为对外散热的手段，或者将 MHP 安装在机盒的底板上；当 CPU 的散热量达到 7~10 W 时，采用铰链式或强制对流式散热；而台式电脑、服务器、工作站中 CPU 需要散热的功率可达 50~100 W，单个 MHP

已不能完成这种散热任务，这时需采用多根 MHP。

平板 MHP 的主要作用有：拉平多排元器件的温度、冷却多排元器件和作元器件的安装平板等。它在冷却芯片级和印刷电路板(PCB)插件级的装置中使用较多^[19-23, 40-41]。从目前对平板 MHP 的研究情况来看，实验研究较多，理论分析模型尚未成熟，并且对数学模型中的一些系数的确定也没有统一，因此笔者认为这方面工作还有待深入。

MHP 阵列现在越来越多的被用于冷却芯片级、主板级等电子器件。一般都集成制造在电子器件的硅板衬底内，用来有效地扩散热量，消除“点热”区，降低板的温度梯度^[37, 42]。

2.2 在其他领域上的应用

Y. Cao^[44]提出了一种新型涡轮叶片冷却方法，它是将传统空气冷却技术与径向旋转微型高温热管相结合，冷却气体涡轮叶片。Jian Ling 等^[43]证实了这种旋转 MHP 的性能和可靠性，实验结果表明，这种热管的热传导性能很好，是金属铜导热率的 60~100 倍。

目前，美国正在开发一种使用金属箔片、聚合体材料的 MHP，它能植入人脑，通过快速冷却大脑的一小区域来抑制癫痫病的突然发作。另一项正在进行的研究就是使用皮下注射针头般大小的管状 MHP，它可在治疗温度允许的变化范围内保证恒温，这样就可以在以前不能治疗的身体部位通过升温处理来治疗癌变肿瘤。同时还正在开发可应用于冷却生物工程反应堆和分离生物材料的 MHP^[46]。

Yoshiaki Sawaki 等^[47]介绍了 MHP 在冷却汽车接线盒中的应用，实验证实使用 MHP 具有比其他措施更优越的性能。

G. P. Peterson^[48]开发了两种新型的 MHP，金属丝结 MHP 阵列和挠性聚合体 MHP。前者的导热率是固体铝的 30 倍，后者则有很好的挠性，潜在导热率比以往的 MHP 都要好。它们被应用在太空船的散热器上。Volodymyr Baturkin^[49]则提出了 MHP 在微型卫星上的散热应用，并指出：外径 1~6 mm，长到 100 mm 的 MHP，将在未来微型卫星上发挥重要作用。

3 MHP 技术发展趋势

综上所述，笔者认为，MHP 发展趋势将为：更大的传热能力，更小的尺寸，更广的应用范围，更高的有效性和可靠性。具体而言，通过开展对 MHP 工作机制的深入研究，加深对 MHP 中两相流、传

热传质机制的认识, 构建不同结构形状的 MHP 传热能力的计算模型, 掌握各种参数对 MHP 传热极限的影响, 以此指导并开发出新型高效结构形式的

MHP, 以满足更广的应用范围要求。可以预计, 不久的将来, MHP 不仅在电子设备冷却上, 而且会在空间技术和生物医学等众多领域发挥更大的作用。

参考文献

- [1] Cotter T P. Principles and prospects for micro heat pipes // Proc 5th Int Heat Pipe Conf. Tsukuba, 1985: 328-335.
- [2] 张丽春, 马同泽, 葛新石, 等. 热流分布的微型热管的传热分析 // 中国工程热物理学会第十届年会. 传热传质学. 419-423.
- [3] Babin B R, Peterson G P, Wu D. Analysis and testing of a micro heat pipe during steady-state operation // Proceedings of ASME/ AICHE National Heat Transfer Conference. Philadelphia, 1989: 89-HT-17.
- [4] Wu D, Peterson G P. Investigation of the transient characteristics of a micro heat pipe. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1991, 5(2): 129-134.
- [5] Gerner F M, Longtin J P. Flow limitations in micro heat pipe // Proc. 28th ASME national Heat Transfer Conf. San Diego, 1992.
- [6] Khrustalev D, Faghri A. Thermal analysis of a micro heat pipe. ASME J. Heat Transfer, 1994, 116(2): 189-198.
- [7] Cao Y, Faghri A. Micro/Miniature Heat Pipes and Operating Limitations. J. Enhanced Heat Transfer, 1994, 1(3): 265-274.
- [8] Peterson G P, Ma H B. Thermal Analysis of a Micro Heat Pipe. ASME. J. of Heat Transfer, 1996, 116: 731-739.
- [9] Ma H B, Peterson G P. The Minimum Meniscus Radius and Capillary Heat Transport Limit in Micro Heat Pipes. ASME. J. of Heat Transfer, 1998, 120: 227-233.
- [10] Peterson G P, Ma H B. Temperature Response of Heat Transport in a Micro Heat Pipe. ASME Journal of Heat Transfer, 1999, (121): 438-445.
- [11] Valerie S, Mohamed C Z, Monique L. Effect of Interfacial Phenomena on Evaporative Heat Transfer in Micro Heat Pipes. International Journal of Thermal Sciences, 2000, 39: 498-504.
- [12] Sung Jin Kim, Joung Ki Seo, Kyu Hyung Do. Analytical and experimental investigation on the operational characteristics and the thermal optimization of a miniature heat pipe with a grooved wick structure. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 2051-2063.
- [13] Séphane Launay, Valérie Sartre, Marcia B H. Et al. Investigation of a wire plate micro heat pipe array. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43: 499-507.
- [14] Ha R, Ma, Sheu T S. Capillary and Thermal Performance of Evaporating Liquid in Micro-Heatpipe // International Symposium on Nanoelectronic Circuits and Giga-scale Systems(INSCGS2004). 107-112.
- [15] Lanchao Lin, Amir Faghri. Heat transfer in micro region of a rotating miniature heat pipe. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42: 1363-1369.
- [16] 范春利, 曲伟, 杨立, 等. 电子器件冷却用微型热管的蒸发传热分析. 电子器件, 2003, 26(3): 260-263.
- [17] 李亭寒, 李劲东, 曹黎明, 等. 微型热管的稳态模化分析及其试验研究. 中国空间科学技术, 1997, (6): 22-27.
- [18] 张丽春, 葛新石, 马同泽, 等. 三角形微槽道内的流动和传热的初步研究 // 中国工程热物理学会传热传质学学术会议. 319-321.
- [19] 张丽春, 马同泽, 张正芳, 等. 微槽平板热管传热性能的实验研究. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 493-495.
- [20] 洪宇平, 李强, 宣益民. 小型平板热管的实验研究. 南京理工大学学报, 2001, 25(1): 32-35.
- [21] 宣益民, 洪宇平, 李强. 小型平板热管传热机理研究 // 中国工程热物理学会传热传质学学术会议. 199-201.
- [22] 范春利, 曲伟, 孙丰瑞, 等. 重力对微槽平板热管传热性能的影响. 热能动力工程, 2004, 19(1): 33-37.
- [23] ShungWen Kang, Derlin Huang. Fabrication of star grooves and rhombus grooves micro heat pipe. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12: 525-531.
- [24] 范春利, 曲伟, 孙丰瑞, 等. 三种微槽结构的平板热管的传热性能实验研究. 电子器件, 2003, 26(4): 357-360.
- [25] ShungWen Kang, Sheng Hong Tsai, Hong Chih Chen. Fabrication and test of radial grooved micro heat pipes. Applied Thermal Engineering, 2002, 22: 1559-1568.
- [26] Shung Wen Kang, Sheng Hong Tsai, Ming Han Ko. Metallic micro heat pipe heat spreader fabrication. Applied Thermal

- Engineering, 2004, 24: 299-309.
- [27] Yu Z, Hallinan K P, Bhagat W, et al. Electrohydrodynamically augmented micro heat pipes. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2002, 16 (2): 180-186.
- [28] Yu Zhiquan, Kevin P H, Reza A K. Temperature control of electrohydrodynamic micro heat pipes. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27: 867-875.
- [29] Chien Hsin-Tang, Lee Da-Sheng, Ding Pei-Pei, et al. Disk-Shaped Miniature Heat Pipe (DMHP) With Radiating Micro Grooves for a TO Can Laser Diode Package. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26 (3): 569-573.
- [30] Jones W K, Liu Yanqing, Gao Mingcong. Micro Heat Pipes in Low Temperature Cofire Ceramic (LTCC) Substrates. IEEE Transactions on components and packaging technologies, 2003, 26(1): 110-115.
- [31] Berre M, Le, Launay S, Sartre V, et al. Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 13: 436-441.
- [32] 邵健中. 一种微型热管的制作和性能. 真空电子技术, 1997, (6): 46-48.
- [33] Itoh A, Pohsek F. Development and application of micro heat pipe //Proc. 7th International Heat Pipe Conference. Minsk, Belarus(CIS), 1990: 295-310.
- [34] Plesch D, Bier W, Seidel D, et al. Miniature heat pipes for heat removal from microelectronic circuits. Micromechanical Sensors, Actuators and Systems ASME-DSC, 1991, 32: 303-314.
- [35] Benson D A, Mitchell R T, Tuck M R, et al. Micro-machined heat pipes in silicon MCM substrates //IEEE Multi-Chip Module Conference. Santa Cruz, California, 1996: 127-129.
- [36] Peterson C P. Investigation of micro heat pipes fabricated as an integral part of silicon wafers //Proc. 8th International Heat Pipe Conference. Beijing, 1992: 385-395.
- [37] Launay S, Sartre V, Lallemand M. Experimental study on silicon micro-heat pipe arrays. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 233-243.
- [38] Manfred Groll, Marcus Schneider, VaÉrie Sartre, et al. Thermal control of electronic equipment by heat pipes. Rev. Cén. Therm, 1998, 37: 323-352.
- [39] 姚寿广, 马哲树, 罗林, 等. 电子电器设备中高效热管散热技术的研究现状及发展. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2003, 17(4): 9-12.
- [40] Khrustalev D, Faghri A. Estimation of the maximum heat flux in the inverted meniscus type evaporator of a flat miniature heat pipe. Int. J. Heat Mass Transfer, 1996, 39(9): 1899-1909.
- [41] Hopkins R, Faghri A, Khrustalev D. Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves. J. Heat Transfer, 1999, 121: 102-109.
- [42] Berre M, Le Launay S, Sartre V, et al. Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics. J. Micromech. Microeng, 2003, 13: 436-441.
- [43] Mallik A K, Peterson G P, Weichold M H. Fabrication of vapor-deposited micro heat pipe arrays as an integral part of semiconductor devices. Journal of Microelectromechanical Systems, 1995, 4: 119-131.
- [44] Cao Y. Rotating Micro/Miniature Heat Pipes for Turbine Blade Cooling Applications //AFOSR Contractor and Grantee Meeting on Turbulence and Internal Flows. Atlanta, GA, 1996.
- [45] Ling Jian, Cao Yiding, Lopez Alex P. Experimental Investigations of Radially Rotating Miniature High-Temperature Heat Pipes. Journal of Heat Transfer, 2001, 123: 113-119.
- [46] Zhang Nengli. Innovative heat pipe systems using a new working fluid. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 2001, 28(8): 1025-1033.
- [47] Yoshiaki Sawaki, et al. A Junction Block Incorporating a Micro Heat-Pipe[J/OL]. Furukawa Review, 1999, 18: 19-26 [2004-6-9]. <http://www.furukawa.co.jp/review/fr018/fr18-04.pdf>.
- [48] Peterson G P. Novel Thermal Control Concepts Using Micro Heat Pipes- Spacecraft Thermal Control[J/OL]. [2004-6-9]. <http://www.stormingmedia.us/22/2230/A223004.html>.
- [49] Volodymyr Baturkin. Micro—satellites thermal control-concepts and components[J/OL]. [2004-6-9]. <http://www.i-aanet.org/symp/berlin/IAA-B4-0901.pdf>.