

特约专栏

柔性热管的研究进展与展望

陶 鹏¹, 常 超¹, 郭怀新², 陈寰贝³, 尚 文¹, 邓 涛¹

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240)

(2. 南京电子器件研究所 微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室, 江苏 南京 210016)

(3. 南京电子器件研究所, 江苏 南京 210016)

摘 要: 现代电子设备的大功率化、高度集成化、微型化、柔性化发展趋势对先进的热管理材料和技术提出了迫切需求。基于气液相变的热管技术是一种高效的热管理手段, 然而传统的刚性热管满足不了复杂结构、狭小空间的微型电子元器件以及可折叠电子器件的高性能散热需要, 发展新型柔性热管技术有望克服上述问题, 具有重要意义。系统介绍了柔性热管的基础理论、结构设计、材料加工、器件制备等方面的研究进展, 以及其在航空航天、电子产品等领域的实际应用。基于柔性热管的发展历程和研究现状, 对该领域今后的研究和发展方向做出了展望。

关键词: 柔性热管; 气液相变; 热阻; 导热率

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)12-1025-08

Research Progress and Outlook of Flexible Heat Pipe

TAO Peng¹, CHANG Chao¹, GUO Huaixin², CHEN Huanbei³, SHANG Wen¹, DENG Tao¹

(1. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, School of Materials Science and Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory,
Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

(3. Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: The rapid development of modern electronics towards high power density, miniaturization and high integration raises more urgent requirement on exploring advanced thermal management materials and technologies. Based on vapor-liquid phase change heat transfer, heat pipe technology is an effective tool for thermal management. Conventional rigid heat pipes, however, cannot meet the thermal management needs for microelectronics with complex structure and small space. Thus, the development of flexible heat pipe technology, which has the potential to overcome the shortcomings of rigid heat pipes, carries important technological significance. This paper presents a systematic review of the recent progress in fundamental theory, structure design, materials processing and device fabrication technologies of flexible heat pipes, and introduces their applications in aerospace and electronic products. Based on the development history and current status, we provide an outlook on the research and development of flexible heat pipes in the future.

Key words: flexible heat pipe; vapor-liquid phase change; thermal resistance; thermal conductivity

1 前 言

随着科学技术的不断发展, 人们对电子系统的功能和运算速度的需求不断提高, 现代化的电子集成设备正

朝着微型化、集成化、高功率化的方向迅速迈进。根据摩尔定律, 集成电路上的电子元器件数目, 每隔 18~24 个月将会增加一倍。高集成化、高功率的电子器件在运行工作中势必产生大量的热量, 如不能及时对电子元器件进行有效的热管理, 将会严重影响电子元器件的工作稳定性、使用寿命, 甚至发生事故。通常电子元器件的工作温度在-5~85℃之间, 超过正常工作温度, 则会导致电子元器件工作稳定性下降、寿命减少, 从而导致整个系统的可靠性下降^[1]。有关研究表明, 电子元器件使用温度超过额定工作温度后, 每升高 10℃, 则会导致系

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0406100); 微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室开放基金项目(614280303020217)

第一作者: 陶鹏, 男, 1985 年生, 副研究员,

Email: taopeng@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.12.10

统的可靠性下降 50%^[2]。因此, 如何对电子元器件进行有效的热管理, 已经成为国内外专家学者广泛关注和重点研究的内容之一。

面对严峻的电子器件热管理问题, 依靠传统材料自身的导热进行散热已经难以满足当前高热流密度器件的散热需求。与之相比, 热管利用内部工质的气液相变传热, 其导热性能远远高于普通金属材料, 具有导热性能高、结构简单、均温性强、稳定性高等优点, 被视为解决高功率电子器件散热问题的最有效技术之一^[3]。但是, 除少量特殊材料制备的热管和波纹管热管外, 目前的热管大多数为刚性结构, 不能够自由弯曲, 或弯折后传热效率急剧降低。应用于电子器件散热时, 普通刚性热管的蒸发段与某些外形复杂的散热元件表面接触面积过小或出现接触表面不贴合现象, 严重影响了热管的传热效果。因此, 在面对形状结构复杂、散热空间狭小的微型电子元器件以及可折叠电子器件散热时, 刚性热管应用受到了极大限制。柔性热管利用自身可弯曲变形的特点, 可实现热管与某些外形复杂外形元件表面有效贴合, 并能够适应复杂的狭小安装空间, 尤其对相对移动的热源散热, 发挥着独特的作用。此外, 当前可折叠、可穿戴电子器件包括有机发光二极管 (OLED)、柔性电子显示器等迅猛发展, 要求其相应的散热材料不仅具有较高的导热性, 同时也需要兼具良好的机械柔韧性^[4, 5]。因此, 开发可弯曲变形的柔性热管技术, 已经成为当今电子散热领域发展的新趋势。

在工作原理上, 柔性热管的工作原理与普通刚性热管相似, 如图 1a 所示, 外部热量通过柔性热管的蒸发端输入到热管内部, 引发热管内部工质气化相变, 相变产生的气体迅速扩散到冷凝端冷凝成液体, 并释放出所携带的热量, 冷凝后的液体在柔性热管内部吸液芯的毛细力作用下重新送回到蒸发端, 从而完成整个传热传质循环。如图 1b 所示, 柔性热管通常由 3 部分组成: 蒸发端、冷凝端和绝热端 (柔性部分), 与普通热管的结构存在着一定的差异。其中, 柔性部分是柔性热管的核心技术之一, 一方面它连接着柔性热管的蒸发端与冷凝端, 实现热管内部气液循环, 另一方面基于柔性连接可实现热管的弯曲变形, 便于安装和自由地调节冷凝端和蒸发端的相对位置, 并且能够适应频繁振动或有相对运动条件下电子器件的散热。

2 柔性热管的研究现状

2.1 柔性热管设计与性能测试

柔性热管设计通常分为壳体材料、内部毛细结构、柔性连接、内部工质 4 个部分。壳体材料的作用是将柔

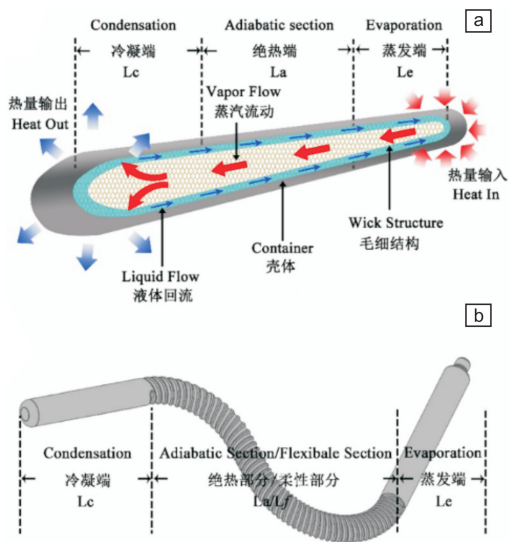


图 1 热管结构示意图(a), 柔性热管结构示意图(b)

Fig. 1 Schematics of conventional heat pipe (a) and flexible heat pipe (b)

性热管内部结构与外界环境隔开, 并连接外界热源, 外部热量通过壳体材料进入热管内部。柔性热管的壳体材料一般要求具有较强的机械强度, 能够承受一定的内部压力, 同时具有较好的导热率, 目前常见的壳体材料选用铜、铝或其他金属材料。内部毛细结构是热管稳定运行的关键部件, 一方面在热管内部形成易于蒸发的半月形液面, 另一方面为冷凝下来的液体提供足够大的毛细力, 促进冷凝液体回流至蒸发端。柔性热管的毛细结构要能够在热管发生柔性变形时保持良好的性能, 同时兼具耐腐蚀性、抗冲击能力等性能, 目前常选用金属丝网作为内部毛细结构^[6]。如图 2 所示, 为兼顾毛细吸液和工质的存储, 通常采用沟槽与金属丝网进行复合^[7]; 为增强其毛细吸液效果, 可对金属丝网表面进行化学处理, 在表面引入超浸润的微纳结构^[8]。柔性连接材料的作用是连接柔性热管的蒸发端与冷凝端, 实现柔性热管的自由弯曲。柔性热管连接材料需要具有良好的耐压性能以及弯曲性能, 目前多选用具有良好柔性变形性的金属波纹管、柔性有机聚合物等材料。内部工质是柔性热管传热的核心材料, 柔性热管依靠内部工质不断地在蒸发端、冷凝端的相变传热, 从而使热量源源不断地从热管的蒸发端传递到冷凝端。工质的选择主要取决于工质自身的导热性、比热容、相变点、腐蚀性等。根据柔性热管使用温度不同, 在常温环境下 (0~200 ℃), 一般选择水、液氨作为内部工质。在中高温领域 (大于 200 ℃), 多选用有机液体、液态金属为内部工质。

与普通刚性热管测试类似, 柔性热管需要进行启动测试、热阻测试、抗重力测试、耐压测试等。除此以外,

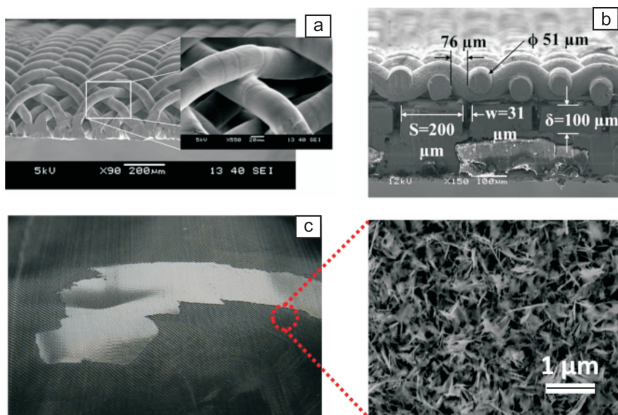


图 2 柔性热管毛细结构：(a) 未处理的铜网^[6]，(b) 混合型毛细结构^[7]，(c) 处理后的铜网^[8]

Fig. 2 Wick structures of flexible heat pipes: (a) untreated copper mesh^[6], (b) hybrid wick structure^[7], (c) as-treated copper mesh^[8]

需要对柔性热管进行弯曲测试、抗拉测试以及在不同弯曲变形下的热管传热性能测试。其中传热性能的测试表征与刚性热管类似，不同之处主要在于要考虑形变的影响。具体测试装置示意图如图 3 所示^[9]，一般在柔性热管进行一定程度的形变后，记录下有效的形变曲率半径(r_{eff})，在热管的蒸发端加入一定的热量 q ，柔性热管的冷凝端与恒温水浴相连，记录柔性热管蒸发端的温度(T_e)与冷凝端的温度(T_c)，根据公式(1)，可以计算出热管的热阻 R ：

$$R = \frac{T_e - T_c}{q} \quad (1)$$

依据计算出的热阻 R ，可以进一步计算出热管的有效导热率 k_{eff} ：

$$k_{\text{eff}} = \frac{L_{\text{eff}}}{RA} \quad (2)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{L_e}{2} + L_a + \frac{L_c}{2} \quad (3)$$

其中： A 表示热量输入的面积， L_e 、 L_a 、 L_c 分别表示蒸发端、绝热端（柔性部分）、冷凝端的长度。通过公式(1)~(3)可知，当输入功率不变时，蒸发端与冷凝端的温差越小，则柔性热管的热阻越小，有效导热系数越大，柔性热管的导热性能越高。

2.2 柔性热管分类

根据柔性热管的材质不同，柔性热管可以分为金属柔性热管、有机聚合物柔性热管以及金属-聚合物复合式柔性热管。

金属柔性热管主要包含两类：一类是利用金属本身的延展性实现柔性变形，另一类是利用金属波纹管作为

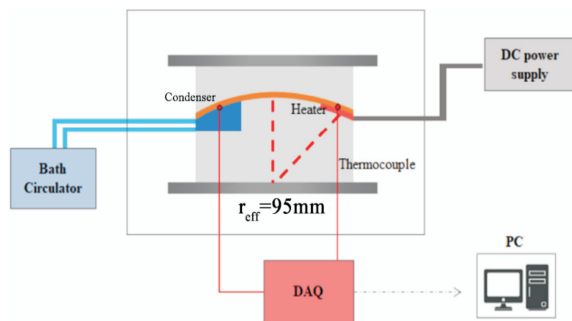


图 3 柔性热管导热性能测试示意图^[9]

Fig. 3 Schematic experimental setup for measuring heat-transfer performance of flexible heat pipes^[9]

柔性连接材料的热管。Lee 等^[9]报道了一种利用铜自身的延展性实现柔性弯曲的热管，该热管尺寸为 106 mm×36 mm×0.8 mm，采用铜为壳体材料，超亲水氧化铜铜网（孔径 75 μm）作为毛细结构。研究发现，热管水平放置时有效导热率为 1000 W/(m·K)，在垂直方向运行时有效导热率可达 3000 W/(m·K)，而热管在弯曲变形后，导热性能会下降 10%~20%。由于受金属自身延展性变形的限制，此类柔性热管变形量不大。如图 4 所示，利用可伸缩变形的金属波纹管制成的柔性热管可实现较大角度范围内的自由弯曲变形。金属波纹管是一种具有横向连续波纹曲线的薄壁圆柱壳体零件，能够自由收缩、弯曲变形，具有工作稳定可靠、结构紧凑等优点，其主要材质为不锈钢、碳钢、铝、铜等。金属波纹管柔性热管主要利用金属波纹管将柔性热管的蒸发端与冷凝端连接起来，目前报道的波纹管材质主要有黄铜、不锈钢、铝，工质通常选择为水、丙酮、液氨等。最早的金属波纹管式柔性热管是 1970 年 Bliss 等^[10]报道的铜制波纹管式柔性热管。该柔性热管采用水作为工质，内部毛细结构为不锈钢丝网，可实现 90°弯曲。同样利用铜制波纹管，美国的 Gernert 等^[11]报道了 4 种典型的适用于航空航天领域的柔性热管，采用水作为工质，烧结铜粉作为内部毛细结构，能够传输 27.5~125 W 的热量，并通过了冷热循环、增压、震动、弯曲等测试。Jaipurkar 等^[12, 13]报道了两种不同管径铜制波纹管柔性热管，热管外径分别为 10 和 6 mm，有效长度为 200 mm，分别能够传递 80 和 60 W 的热量。

我国早在 1978 年就有对柔性热管研究工作的相关报道^[14]。我国空间技术研究院研制了铝制波纹管 and 不锈钢波纹管两种不同材质的柔性热管，工质分别采用液氨和丙酮，采用不锈钢网作为内部毛细结构，有效长度为 400 mm，两种柔性热管都能传递 52 W 的热量，并发现随着柔性热管的弯曲变形，热管的最大传热量会下降。研究人员认为这与内部毛细结构的变形导致热管内部液

体回流能力降低有关。为了满足航天器散热需求，尤其是在可展开式、具有相对运动结构的设备内，中国空间技术研究院崔丽萍等^[15]报道了一种能在水平方向和反重力方向都能稳定运行的柔性热管。该热管采用 JR8L3 金属软管作为柔性连接材料，内部毛细结构采用不锈钢纤维毡条和不锈钢丝网混合结构，热管外径为 9 mm，有效长度为 355 mm。柔性热管在水平放置时热阻仅为 0.175 °C/W，而在反重力运行条件下，热阻为 0.39 °C/W。



图 4 金属波纹管柔性热管照片(a)，波纹管截面照片(b)^[12]
Fig. 4 Photographs of the flexible heat pipe connected with bellows (a) and cross-section of the bellows section(b)^[12]

利用金属作为壳体材料，金属柔性热管不仅具有较高的导热率、较低的热阻，而且可以达到较高的结构强度，能够承受比较大的内部压力，保证热管稳定运行。同时，金属柔性热管便于大规模生产加工，在实际应用中便于安装固定，因此，金属柔性热管具有良好的实用价值和应用前景。但是，受金属材料自身的延展性以及波纹管的形变的限制，金属柔性热管一般变形量较小。同时，采用金属管作为蒸发端和冷凝端往往约束了其与电子器件之间的有效接触，进而导致蒸发端和冷凝端热阻较大。特别是针对可折叠电子器件的热管理，需要进一步研发新型超薄型柔性平板热管，增强其与电子器件的接触，适应电子器件的微型化、高度集成化发展趋势^[16, 17]。此外，金属在多次变形时容易发生疲劳断裂，在某些场合需要对柔性热管进行绝缘性处理。

有机聚合物式柔性热管是指利用柔性有机聚合物为封装壳体材料的一类热管。与金属材料相比，有机聚合物具有良好的柔韧性、绝缘性、轻质等优点，可满足柔性可折叠电子器件、航空航天减重器件等特殊服役条件下的散热要求，当前报道的聚合物基热管通常选用硅橡胶、聚乙烯等作为热管的壳体材料。2012 年 Wu 等^[18]报道他们利用聚对苯二甲酸乙二酯 (polyethyleneterephthalate, PET) 作为壳体材料，通过添加铜网毛细结构并进行封装，制备了长度为 75 mm、厚度仅仅只有 1.8 mm 的柔性热管。如图 5a 所示，为了保持热管内部气体正常流动，防止热管在抽真空除气时发生坍塌，热管内部采用橡胶 (rubber) 作为支撑材料。如图 5b 所示，该

柔性热管在传递 26 W 热量时，蒸发端与冷凝端温差仅为 5 °C，热管最小热阻为 0.157 °C/W，最高有效导热系数为 13 261 W/(m · K)。由于受 PET 材料的限制，热管柔性变形范围不大，只能实现 45° 弯曲变形。Oshman 等^[6, 19, 20]利用液晶聚合物材料作为柔性热管的壳体材料，通过采用光刻技术，构筑了热管内部微槽道，并与铜网复合形成混合型毛细结构。该柔性热管尺寸只有 40 mm×40 mm×1.2 mm，但能够传递 40 W 的热量，在失重和超重的情况下仍然保持了良好传热性能，其最大有效导热率可达 1653 W/(m · K)。此外，采用 Impak 公司的 PAVVF4W 复合材料 (PET/PE/Al) 作为基体，铜网作为内部毛细结构，导热率可达铜导热率的 4.6 倍，但质量只有铜的 1/5。Hsieh 等^[21]报道了一种利用硅橡胶为壳体材料的柔性热管 (80 mm×20 mm×4 mm)。该热管采用热压成型技术，将硅橡胶置于模具内施加一定压力，加热升温到 270 °C 保持 3 min，冷却固化后得到所需样品。为增强柔性热管的导热性能，在热管的蒸发端与冷凝端嵌入铜片，内部毛细结构采用 4 层、孔径为 60 μm 的铜网，采用水作为工质。该热管利用硅橡胶的柔性可实现 90° 的弯曲变形，最小热阻为 5 °C/W，最大传热量为 12.7 W。此外，聚合物柔性热管还采用聚酰亚胺^[22, 23]、聚乙烯^[24]作为壳体材料，传热量在 2~16 W 之间。

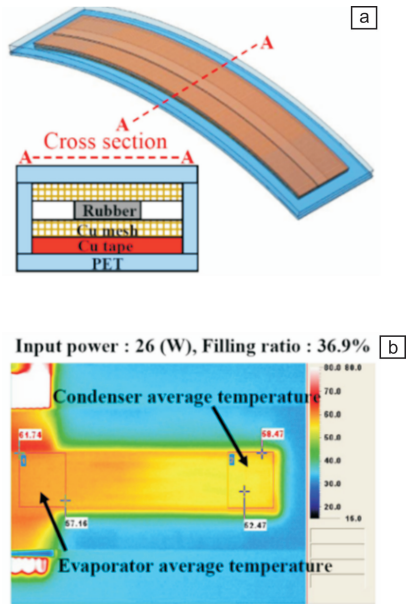


图 5 聚合物柔性热管结构示意图(a)，热管性能红外测试(b)^[18]
Fig. 5 Structure schematic of the polymer flexible heat pipe (a), IR image of the heat pipe at 26 W(b)^[18]

相对于金属型柔性热管，利用有机聚合物高弹性、柔性大的特性，有机聚合物柔性热管能够达到 90° 以上的弯曲变形，并且可以实现热管蒸发端与某些外形复杂的

电子元件表面有效贴合, 尤其适用于曲面热源散热、粗糙表面散热等复杂情况。但是, 由于有机物聚合物的导热率低、软化温度低、热膨胀系数大, 导致此类热管传热量小, 使用温度范围窄, 仅适用于发热功率低的电子器件。此外, 有机聚合物柔性热管在抽真空时容易坍塌, 导致有机物柔性热管内部负压较小, 传热性能较差。同时, 有机聚合物材料还存在着气密性问题, 制备封装的柔性热管的真空度难以长时间保持。因此, 有机聚合物柔性热管关键在于提高柔性聚合物的导热率、强度、柔韧性、气密性等性能。已有的研究结果表明: 通过开发新型聚合物材料以及在聚合物壳体材料中复合一定量的金属材料, 例如在聚酰亚胺表面覆铜^[25], 或者在聚合物材料基体中添加 Ag^[26]、BN^[27] 等纳米颗粒, 可以实现在不影响柔韧性的前提下提升导热性、气密性; 采用 MEMS 技术在聚合物热管中添加支撑柱等结构, 可以增强热管机械稳定性, 进而有效避免热管在抽真空过程中发生坍塌等问题^[28]; 对热管内表面进行适当化学修饰可以降低可能发生的聚合物材料与工质之间的物理化学作用, 从而保证热管性能的稳定性, 延长热管的工作寿命。

第 3 种柔性热管是金属与聚合物复合型热管, 在蒸发端与冷凝端采用金属材料, 在柔性连接部分采用聚合物。此类热管一方面利用金属材料良好的导热性能, 实现蒸发端与冷凝端迅速换热的效果; 另一方面, 利用聚合物材料良好的柔性, 实现热管的弯曲变形。目前此类柔性连接材料多选用聚氨酯、氟橡胶等。例如, 2015 年 Yang 等^[8, 29] 报道了一种利用聚氨酯材料作为柔性连接部分、铜作为蒸发端与冷凝端的复合柔性热管 (图 6)。该热管长 450 mm, 直径为 5 mm, 内部采用仿生亲水结构的纳米材料作为毛细材料, 水作为工质, 充液率为 20%~40%。该热管在传递 12 W 热量时热阻仅为 0.008 °C/W, 并且在弯曲 120° 时仍能够稳定运行。在此基础上, 该团队通过采用耐高温、高弹性、低热阻的氟橡胶作为柔性连接材料, 利用内置弹簧作为内部毛细材料的支撑结构, 最终实现热管能够完成在 180° 范围内的弯曲, 传热效果是同样尺度铜的 3 倍^[8]。除普通柔性热管以外, 其他形式的柔性热管也有相关报道。Qu 等^[30, 31] 报道了一种利用氟橡胶作为柔性连接材料, 沟槽型铜管作为蒸发端和冷凝端的柔性脉动热管。该热管能够弯曲成“N”型, 随着弯曲程度的加剧, 热管的启动温度逐渐提高, 热管的性能也随之下降。Zhou 等^[32] 报道了以铝作为蒸发端与冷凝端材料、聚氨酯管作为柔性连接部分的柔性环路热管。该柔性热管在传递 100 W 热量时, 热阻仅为 0.2 °C/W。

复合型柔性热管一方面解决了金属柔性热管弯曲变形小的缺点, 另一方面在蒸发端与冷凝端采用金属材料,

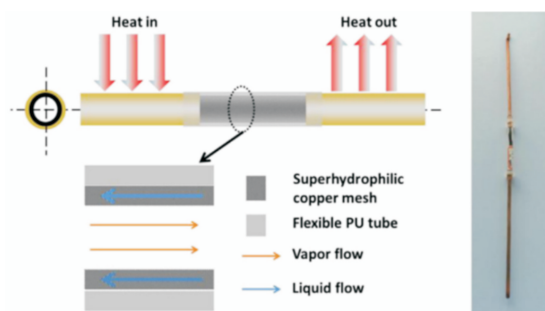


图 6 金属-聚合物复合柔性热管结构示意图和实物图^[29]

Fig. 6 Configuration schematic of metal-polymer composite flexible heat pipe and a photograph of the fabricated heat pipe^[29]

大大提高了柔性热管的传热性能。在加工工艺上, 复合型柔性热管的关键技术在于有机聚合物与金属材料的连接封装, 目前报道的复合型柔性热管多采用粘结和机械固定相结合的封装方法。此类封装方法强度较低, 仅仅满足传热量较低的情况。为实现大功率、集成化电子芯片的散热, 需要进一步提高有机聚合物与金属材料的连接特性, 如采用化学键合^[33]、机械密封^[34]、焊接连接^[35]等方法。此外, 当前报道的复合型柔性热管多为管状, 针对柔性电子器件以及狭窄空间的散热, 需要进一步开发平板状等其他形式的热管。

2.3 柔性热管传质理论分析

柔性热管的传热极限取决于内部毛细力的大小, 而柔性热管在发生变形时, 蒸汽在弯道处会受到更大的流动阻力, 因此需要柔性热管内部毛细结构提供更大的毛细压力, 保证热管正常工作。Oshman 等^[7] 对柔性热管的传热极限做出了理论上的分析, 假设存在最大毛细作用力 ($\Delta P_{c, \max}$)。当柔性热管稳定运行时, 最大毛细力需要克服液体压力损失 (ΔP_L)、气体压力损失 (ΔP_g)、蒸发端与冷凝端的相变损失 ($\Delta P_{ph, e}$, $\Delta P_{ph, c}$) 以及加速度引起的损失 ($\Delta P_{||}$):

$$\Delta P_{c, \max} \geq \Delta P_L + \Delta P_g + \Delta P_{ph, e} + \Delta P_{ph, c} + \Delta P_{||} \quad (4)$$

其中, 最大毛细力 $\Delta P_{c, \max}$ 可根据 Young-Laplace 公式计算:

$$\Delta P_{c, \max} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_c} \quad (5)$$

式中 σ 为工质的表面张力, θ 表示毛细材料的接触角, r_c 为毛细半径。

液体压力损失 ΔP_L 可以根据 Fahrgri^[36] 的公式计算得出:

$$\Delta P_L = \left(\frac{\mu_L L}{KA_w h_{fg} \rho_L} \right) q \quad (6)$$

其中 μ_L 为热管内工质的粘度, L 为热管的有效长度, K 毛细材料渗透率, A_w 为热管的横截面积, h_{fg} 为工质的汽

化潜热， q 为热管传递的功率。

当柔性热管发生柔性变形时，热管内蒸汽流动压力损失 ΔP_v 可以根据公式(7) 计算得出：

$$\Delta P_v = \left(\frac{C(f_v \cdot Re_v)\mu_v}{2r_{h,v}A_vh_{fg}\rho_v} \right) Lq + h_m \tag{7}$$

其中， C 为常数，取决于 Mach 数； f_v 为摩擦系数， Re_v 为气体的雷诺数， μ_v 为气体的粘度， $r_{h,v}$ 为气体的流道半径， A_v 为流道横截面积， h_m 为流过弯道的压力损失。当柔性热管不发生变形时， h_m 为 0；当柔性热管发生弯曲变形时， h_m 可由公式(8)和(9) 计算得出：

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \tag{8}$$

$$\zeta = \left[0.131 + 0.159 \left(\frac{D}{R} \right)^{3.5} \right] \frac{\alpha}{90^\circ} \tag{9}$$

其中 v 为气体的速度， g 为重力加速， D 为热管的内径， R 为热管的弯曲半径， α 为柔性热管的弯曲角度。通过公式(8)和(9) 可以看出，柔性热管的最大传热极限与热管弯曲角度和弯曲半径有关，即随着弯曲角度的增加、弯曲半径的减小，气体在热管内流动压力损失会增大，柔性热管的传热性能降低。

3 柔性热管的应用

鉴于柔性热管具有高导热率、可弯曲变形、轻质、稳定性高等优异的性能，其已经在航空航天、电子信息、国防科技等众多领域得到了广泛应用。图 7 为柔性热管应用于笔记本电脑和手机散热^[37]。

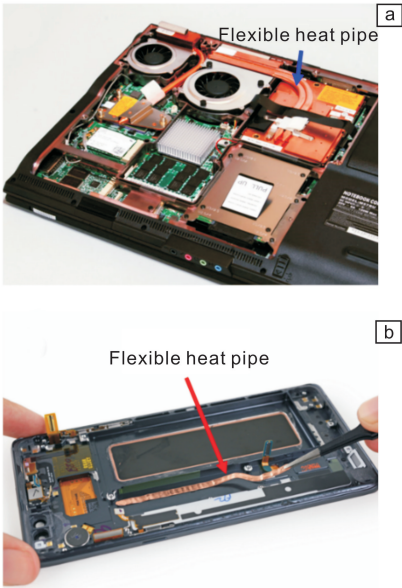


图 7 柔性热管在笔记本电脑(a) 和手机(b) 中的应用^[37]
Fig. 7 Application of flexible heat pipes in thermal management of laptop (a) and mobile phone (b) ^[37]

在航空航天领域，为了减轻飞行器的重量、节约成本、提高维护性，电子器件的集成度、微型化程度不断提升，对散热的需要也随之增加。柔性热管能够依靠内部毛细力完成液体回流，不需要额外的动力源，可在失重超重情况下自行驱动运行，具有很好的稳定性、可靠性，是当前解决航空航天领域高功率器件散热的一种重要技术。目前，美国的 Swales Aerospace 公司、Thermacore 公司已经开发出相关的柔性热管并应用于航天飞行器的热控(图 8 所示)。例如，在美国 Navy F/A-18 飞行器中，利用柔性热管技术，将飞行器中的副翼、后缘襟翼制动器内电子器件的热量及时传递到外部冷却^[11, 38]。副翼制动器内部的柔性热管长 73.66 cm，采用铜波纹管作为柔性连接材料，采用烧结铜粉作为内部毛细材料，热管在传递 44.5 W 的热量时蒸发端和冷凝端仅存在 4 ℃ 温差。在美国 F-14D 飞行器的电脑终端，同样利用柔性热管技术，将电子器件产热传递到外部散热。该柔性热管长 81.28 cm，在传输 125 W 热量时蒸发端与冷凝端温差仅仅 9.5 ℃。

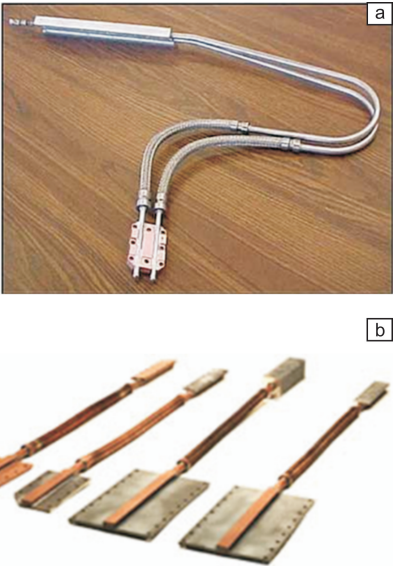


图 8 飞行器内的柔性热管^[11, 38]
Fig. 8 Photography of flexible heat pipes for aircrafts^[11, 38]

美国 Ball Aerospace and Technologies 公司^[39] 为了解决哈勃太空望远镜的电荷耦合器件(charged-coupled device, CCD) 散热问题，研制出一种以液氨为工质、不锈钢软管作为柔性连接材料的柔性热管。该热管满足在 -24 ℃ 下传递 30 W 热量的散热需求，并通过了微重力、疲劳、偏心等测试。

在大型天文望远镜中，焦面散热问题一直是制约天文望远镜发展的因素之一。由于在天文望远镜工作中，焦面需要前后移动和绕轴转动，一般的循环水冷却系统

需要配备循环水泵、循环管路, 这给实际应用维护造成诸多不便。对此, 张建成等^[40]提出将不锈钢柔性热管应用于天文望远镜的焦面散热上, 利用内部丙酮工质相变传热, 可将焦面产生的热量及时传送到镜筒外部, 并且柔性热管可随焦面运动, 无需外加冷却循环泵和循环管路, 降低了维护成本, 提升了系统的适应性。

除此之外, 柔性热管在消费电子, 尤其是解决具有相对运动的器件的散热问题中发挥着重要作用。在 Yang 等^[8]的研究中, 将柔性热管运用到可折叠式电子产品中, 柔性热管可传递 40 W 的热量, 传热性能是相同条件下铜管的 3 倍, 而且柔性热管的热响应速度快, 在 5 min 内即可达到稳定状态, 并能够维持均温性。中国台湾的研究人员报道了一种用于 LED 散热的聚合物柔性热管^[41], 该热管采用 FR4 聚合物作为热管的柔性壳体, 水作为工质。相对于普通金属热管, FR4 聚合物板可作为安装 LED 的基板, LED 直接与柔性热管外壳封装, 从而减少 LED 与热管之间的热阻, 提高 LED 的散热性能。研究表明, 采用柔性热管作为 LED 散热基板, 当传输功率为 16 W 时, 器件的热阻仅为 3.85 °C/W, 相对于无热管的普通封装, 该技术可使热阻减少 57%。

4 结 语

本文简要介绍了柔性热管的基本原理、制作工艺、研究进展和应用领域。相对于传统依靠固体导热方式进行散热, 柔性热管技术基于气液相变进行传热, 具有导热率高、质量轻、稳定性强、尺寸小、便于使用等优点, 能够克服常用刚性热管不易折叠变形或形变会导致传热性能大幅降低的缺点, 因此具有广阔的应用前景和潜在的商业价值。然而目前的柔性热管技术仍然存在许多问题, 在实际应用中面临诸多挑战, 未来的研究方向主要包括以下几个方面:

(1) 加强对柔性热管的传质传热的理论研究。目前基于经典传热学理论, 传统的刚性热管理论模型已经完善, 而对于柔性热管的理论还需要进一步探索, 尤其是柔性热管发生变形时, 热管内部传热传质机理尚未揭示, 对柔性热管的性能难以做出准确的预测。

(2) 优化柔性热管内部毛细结构的性能。目前的毛细结构多采用金属铜网或烧结铜粉, 毛细结构的亲水性能和机械性能较差。柔性热管在弯曲时内部毛细结构容易受损, 尤其是在剧烈反复弯折运行中, 内部毛细结构极易受到破坏, 从而导致柔性热管传热性能下降。在这方面, 可以借鉴柔性电子器件的制备与加工工艺, 通过采用电镀、原位化学生长、化学修饰、热处理等方法对毛细结构进一步强化, 增强内部毛细结构的性能。

(3) 提高有机聚合物柔性热管的适用范围。有机聚合物式柔性热管具有较好机械柔韧性, 但是由于有机聚合物适用范围有限, 导致其使用范围较小, 仅限于温度不高的小功率器件。因此, 需要研制新型耐高温、高强度、弯曲性好的有机聚合物, 也可以通过采用金属-聚合物复合材料作为壳体材料, 以满足大功率器件热管理的要求。

(4) 增强柔性热管在弯曲变形中的传热性能。柔性热管在弯曲过程时, 气体流动和液体回流都会受到损失, 尤其是在大弯曲率时, 柔性热管的传热性能急剧下降。因此, 需要新的优化设计, 如增大柔性热管内部气流空间、增强毛细结构的回流特性, 从而保证柔性热管在大范围弯曲条件下的稳定工作。

(5) 深入开展柔性热管稳定性、可靠性的研究。为了实现柔性热管能够在温度骤变、高温高压、逆重力等情况下的实际应用, 在柔性热管的设计时需要同时兼顾良好的机械柔韧性、较高的导热率、高强度、耐高温、耐疲劳、抗腐蚀等性质。特别是薄壁金属柔性热管的焊接、柔性材料与刚性材料的连接问题, 可考虑综合利用扩散焊接、激光焊接、钎焊、机械密封等方法, 增强柔性热管的结构稳定性, 从而推进柔性热管的实际应用。

(6) 电子器件向着柔性化、可折叠化、高集成化的趋势发展, 要求柔性热管向超薄化发展, 而柔性可穿戴电子器件的热管理也应该成为柔性热管一个重要应用领域。

参考文献 References

- [1] Hao Junjiao (郝俊娇), Pan Ri (潘 日), Zhou Gang (周 刚), et al. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展) [J], 2015, 34(05): 1220-1224.
- [2] Yao Shouguang (姚寿广), Ma Zhesu (马哲树), Luo Lin (罗 林), et al. *Journal of East China Shipbuilding Institute* (华东船舶工业学院学报) [J], 2003, 17(04): 9-12.
- [3] Faghri A. *Journal of Heat Transfer* [J], 2012, 134(12): 123001.
- [4] Bender V C, Marchesan T B, Alonso J M. *IEEE Industrial Electronics Magazine* [J], 2015, 9(2): 6-16.
- [5] Kim J, Kumar R, Bandodkar A J, et al. *Advanced Electronic Materials* [J], 2017, 3(1): 1600260.
- [6] Oshman C, Li Q, Liew L A, et al. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [J], 2012, 23(1): 015001.
- [7] Oshman C, Li Q, Liew L A, et al. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [J], 2012, 22(4): 045018.
- [8] Yang C, Chang C, Song C, et al. *Applied Thermal Engineering* [J], 2016, 95(25): 445-453.
- [9] Lee D, Chan B. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2018, 122: 306-314.

- [10] Bliss F, Clark E G, Stein B. Construction and Test of a Flexible Heat Pipe[C]// *Proceedings of ASME Space Systems and Thermal Technologies for the 70's*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1970, 92: 60.
- [11] Gernert N, Sarraf D, Steinberg M. *SAE Transactions*[J], 1991, 100(1): 2352–2360.
- [12] Jaipurkar T, Kant P, Khandekar S, et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 2017, 126(5): 1199–1208.
- [13] Narayan A, Jaipurkar T, Khandekar S, et al. Development and Testing of Flexible Heat Pipes [C]// *Proceedings of the International ISHMT-ASTFE Heat and Mass Transfer Conference*. Thiruvananthapuram: IHMTC, 2015: 781.
- [14] Yang Xianrong(杨显荣), Cao Liming(曹黎明). 柔性热管[C]// *Proceedings of the 2th Space Thermal Physics Conference*(第二届空间热物理会议论文集). 1978.
- [15] Cui Liping(崔丽萍), Mi Min(米 珉), Miao Jianyin(苗建印), et al. 柔性热管的传热实验研究与分析[C]// *Proceedings of the 11th Chinese Heat Pipe Conference*(第十一届全国热管会议论文集). Weihai: 2008: 293–298.
- [16] Tang H, Tang Y, Wan Z, et al. *Applied Energy*[J], 2018, 223(1): 383–400.
- [17] Chen X, Ye H, Fan X, et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 2016, 96(5): 1–17.
- [18] Shih W P, Wu G W, Chen S L. *Frontiers in Heat Pipes*[J], 2012, 3(2): 023003.
- [19] Oshman C, Shi B, Li C, et al. *Journal of Microelectromechanical Systems*[J], 2011, 20(2): 410–417.
- [20] Shi B, Wang Y B, Shan Y J. *Heat Transfer-Asian Research*[J], 2016, 45(8): 46–757.
- [21] Hsieh S S, Yang Y R. *Energy Conversion and Management*[J], 2013, 70: 10–19.
- [22] Tanaka K, Abe Y, Nakagawa M, et al. *Annals of the New York Academy of Sciences*[J], 2009, 1161(1): 554–561.
- [23] Lewis R, Liew L A, Xu S, et al. *Science Bulletin*[J], 2015, 60(7): 701–706.
- [24] Lim J, Kim S J. *Energy Conversion and Management*[J], 2018, 156(15): 358–364.
- [25] Liew L A, Lin C Y, Lewis R, et al. *Journal of Electronic Packaging*[J], 2017, 139(1): 011003.
- [26] Wang F, Zeng X, Yao Y, et al. *Scientific Reports*[J], 2016, 6: 19394.
- [27] Yuan C, Duan B, Li L, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2015, 7(23): 13000–13006.
- [28] Qu J, Wu H, Cheng P, et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2017, 110: 294–313.
- [29] Yang C, Song C, Shang W, et al. *Progress in Natural Science: Materials International*[J], 2015, 25(1): 51–57.
- [30] Qu J, Li X, Cui Y, et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2017, 107: 640–645.
- [31] Qu J, Wang C, Li X, et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 2018, 135(5): 1–9.
- [32] Zhou W, Ling W, Duan L, et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 2016, 94(5): 324–330.
- [33] Kang H, Jung S, Jeong S, et al. *Nature Communications*[J], 2015, 6: 6503.
- [34] Lambiase F, Di Ilio A. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 215: 12–19.
- [35] Patel A R, Dalwadi C G, Rana H G. *International Journal of Science Technology & Engineering*[J], 2016, 2(10): 702–706.
- [36] Faghri A. *Heat Pipe Science and Technology*[M]. Washington: Global Digital Press, 1995.
- [37] Tang Yong(汤 勇), Tang Heng(唐 恒), Wan Zhenping(万珍平), et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2017, 53(20): 131–144.
- [38] Wilson J, Guenin B. *Electronics Cooling*[J], 2005, 11(4): 1–17.
- [39] Schweickart R B, Buchko M M. Flexible Heat Pipes for CCD Cooling on the Advanced Camera for Surveys[C]// *Space Telescopes and Instruments V, Proceedings of SPIE*. Hawaii: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1998: 292–301.
- [40] Zhang Jiancheng(张建成), Yuan Zhulin(袁竹林). *Energy Research & Utilization*(能源研究与利用)[J], 1995, 2(2): 22–24.
- [41] Yang K S, Yang T Y, Tu C W, et al. *Energy Conversion and Management*[J], 2015, 100: 37–44.

(编辑 惠 琼)