



均热板热阻性能的研究现状

黎小辉¹, 邓凯江^{1,2*}, 罗达强^{2*}, 张瑞坤^{3*}

(1. 佛山大学机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528225; 2. 佛山通宝精密合金股份有限公司, 广东 佛山 528131;
3. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009)

摘要: 随着电子产品更新换代速度的加快, 对其性能的需求日益提升, 因此推动了电子产品向微型化、高性能化方向发展。然而, 微型化与高性能化通常伴随着热流密度的急剧增加, 给散热设计带来了前所未有的挑战。在实际应用中, 若电子产品产生的热量无法被及时有效地导出, 不仅会显著降低其工作效能, 极端情况下还会导致设备损坏。所以, 高效散热技术成为了电子产品持续发展的关键瓶颈之一。近年来, 均热板散热技术的应用已成为解决微型化电子产品高效散热问题的重要途径。为此, 深入剖析了均热板散热技术的现状与发展趋势, 详尽阐述其结构、工作原理及传热效能, 构建全面框架体系。热阻性能作为衡量均热板散热效率的核心指标, 其计算方法的解析对于实现高散热效率至关重要。为全面理解并提升均热板的热阻性能, 系统阐述了影响热阻性能的两因素: 一是组成成分, 主要包括吸液芯、外壳材料与工质, 其中吸液芯类型与性能的研究是分析的重点; 二是均热板工作时的外部环境条件, 如热源特性、倾角、冷却条件等。这些外部因素的变化对均热板的热阻性能具有显著影响。最后, 基于均热板的结构特性和技术发展趋势, 展望了未来发展方向。(专精特新·特殊环境材料服役行为专辑十五之四)

关键词: 3C 电子产品; 散热技术; 均热板; 传热性能; 热阻; 吸液芯; 工质; 研究进展

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2025)03-0439-12

引文格式: 黎小辉, 邓凯江, 罗达强, 等. 均热板热阻性能的研究现状[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(3): 439-450.

LI Xiaohui, DENG Kaijiang, LUO Daqiang, et al. Research Status of Thermal Resistance Performance of Vapor Chamber[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(3): 439-450.

0 引言

随着电子科技的快速发展, 电子产品以前所未有的速度向高性能和微型化的方向迈进。作为电子产品核心部件的电子芯片, 经历了重大技术变革, 其中最为显著的特征是晶体管数量的急剧增长。1971年, 第一代Intel处理器问世, 其内部集成了2 300个晶体管。而仅在数代产品的迭代后, 第五代Intel处理器的晶体管数量已增至13亿^[1], 这一增长突显了半导体技术的快速进步。5G通信技术的发展将芯片设计推向了新的高度。华为的5G麒麟990芯片, 在1.13 cm²紧凑空间集成了103亿个晶体管^[2], 不仅在数量上有所增加, 更在处理速度、能效比和集成度上实现了质的飞跃。

随着电子产品内部元件的密集化, 单位体积内的热流密度和工作温度显著增加。热流密度是指单位时间内通过单位面积的热量。当电子芯片平均热流密度达到500 W·cm⁻²的阈值时, 局部热点区域的热流密度可能超过1 000 W·cm⁻²^[3], 凸显了散热管理的紧迫需求。一些超大规模集成电路的热流密度已高达10³—10⁴ W·cm⁻², 这进一步加剧了散热的挑战^[1]。当电子产品的工作温度超过设计的安全阈值时, 其性能和稳定性都会受到影响, 从而缩短产品的使用寿命。若电子产品长期在高温下工作且缺乏有效的散热机制, 可能会遭受不可逆的损害, 如材料老化、性能衰退乃至完全失效^[4-6]。因此, 开发高效可靠的散热策略是电子产品技术进步与市场应用的关键。

收稿日期: 2024-09-25

基金项目: 广东省科技厅科技计划项目(2022A0505050081; 2023A0505030002); 广东省自然资源厅海洋经济发展专项(粤自然资合[2024]32号)

作者简介: 黎小辉, 博士, 教授, 研究方向为金属材料加工与先进制造。E-mail: lixiaohui@fosu.edu.cn。

通信作者: 邓凯江, 硕士研究生, 研究方向为双金属材料、机器学习。E-mail: 19860810336@163.com;

张瑞坤, 硕士, 副研究员, 研究方向为先进金属材料。E-mail: as_zrk@126.com;

罗达强, 本科, 助理工程师, 研究方向为双金属材料。E-mail: ldq@fepac.com。

键挑战。

常见的散热技术主要包括风冷^[7]、液冷^[8]、热电散热^[9]、热管散热^[10]及均热板散热^[11]等。风冷散热技术因结构简单、成本低廉,在多种产品中得到广泛应用,但其传热系数较低,通常在 $2\text{--}25\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ 之间,难以满足高性能设备的散热需求^[12]。液冷技术具有出色的散热性能和良好的环境适应性,但管道安装的复杂性和液体泄漏的风险限制了其应用。热电散热技术具备高灵敏度、稳定性和精确温度控制($\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$)的优势,适用于对温度控制精度要求极高的场合,但其灵活性和制冷效率较低,在大规模应用的普及中受到制约。热管和均热板散热技术通过工质相变实现高效传热,具有高散热效率和良好的结构适应性。均热板采用二维传热机制,提供更均匀的散热效果,尤其适用于高集成度电子产品^[13]。因此,许多高端电子产品选择均热板作为散热系统的核心组件。随着电子产品散热需求的增加,开发更高效的均热板技术成为推动散热技术创新的关键。通过深入研究均热板的传热性能,不断优化其设计与材料选择,可提高传热效率与稳定性,为电子产品提供更可靠的散热解决方案。

本文结合近年来的研究成果,详细阐述了均热板的结构和工作原理,介绍了均热板的四个关键的传热性能,并综述了热阻性能的研究现状。针对吸液芯、工质、壳体材料以及工作时外部环境等影响热阻性能的因素进行了深入探讨,最后展望了均热板的发展趋势。

1 均热板的结构及工作原理

均热板是一种利用相变传热机制实现快速降温的高效传热元件,主要由外壳、工质、吸液芯和支撑柱组成(见图1)。外壳的主要功能是密封内部结构,为相变传热提供稳定且密闭的环境。工质通过其相变潜热,在均热板内部循环流动,带走大量热量,达到散热目的。吸液芯不仅提供流动通道,还促进工质循环,确保高效传热。支撑柱则支撑整个均热板结构,并为工质回流提供通道。制造均热板的流程包括:首先,设计并布置吸液芯和支撑柱;随后,将它们与外壳进行初步焊接,形成密闭空间;接着,对该密闭空间抽真空,形成真空腔体后向均热板内部注入工质;最后,对均热板进行彻底密封,确保其在使用中能够维持稳定的真空状态和工作性能。

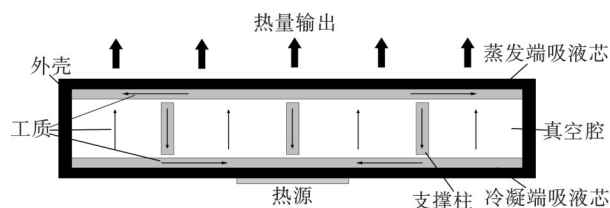


图1 均热板的基本结构

Figure 1 Basic structure of vapor chamber

在实际应用中,均热板的蒸发端紧贴热源,热源释放的热量通过蒸发端的外壳传递给内部的液态工质。吸收热量后,工质在均热板内发生液-气相变,变成高温气态,并迅速扩散至整个密封空间,流向冷凝端。在冷凝端,气态工质遇冷释放热量,发生气-液相变,冷凝为液态。这一过程中释放的热量通过冷凝端传递到均热板外部。液态工质在吸液芯与支撑柱的引导下回流至蒸发端,完成一个循环。这个过程持续进行,直至热源温度不足以维持气液相变为止。

2 传热性能

均热板的散热能力主要取决于其传热性能,关键指标包括均温性、临界热流密度、启动性能和热阻^[11]。深入分析这些指标有助于理解均热板的工作状态,从而准确评估其散热效率。

2.1 均温性

均温性是评价均热板均匀分散热量的关键指标,通常通过冷凝面最大温差与最高温度的比值来衡量。较小的最大温差意味着更优的均温性能,有助于避免局部过热。均热板的均温性能可通过冷凝面温度直观反映,但接触式测量可能存在误差。Li等^[14]利用红外热成像技术,通过非接触方式实时监测冷凝面的温度分布,准确计算均温性能。为深入研究并改进均热板的均温性能,Patankar等^[15]建立了超薄均热板的三维传热模型,模拟热量传递、气液相变和蒸汽流动等复杂过程。研究结果表明,增加冷凝端侧壁和吸液芯中心区域的热阻,同时减少真空腔热阻,能显著提升均温性能。并基于这一发现,设计了具有离散沟槽的双孔式冷凝吸液芯。这种设计比基准吸液芯具有更好的均温性能,峰值平均温差最低可达4 K,均温性能提高了37%(见图2)。因此,构建有效的传热模型对吸液芯设计至关重要。

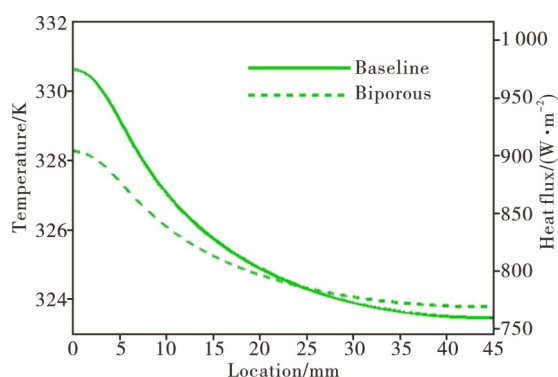


图2 双孔式冷凝吸液芯的均热板冷凝面温度与热流密度^[15]

Figure 2 The condensation surface temperature and heat flux of the biporous condenser-side wick

2.2 临界热流密度

热流密度,又称热通量,反映了热量传递的速率。临界热流密度是核态沸腾到过渡沸腾的转折点,在此点热流密度达到峰值,同时伴随着加热面温

度的急剧上升。对于均热板,临界热流密度可通过计算其在正常工作状态下能承受的最大热负荷与热源面积的比值来确定。当均热板达到这一临界值时,可能会出现烧干现象,即内部工质蒸发速度远超回流速度,导致蒸发端工质耗尽,进而中断工作循环使均热板失效^[16-17]。在不同的空间条件下,工质的沸腾临界状态会受到影响。若将未密闭有限空间内工质沸腾传热的理论模型直接用于分析超薄有限密闭空间内的沸腾过程,可能存在偏差。Li等^[18]通过观察工质在未密闭空间和密闭空间内的沸腾过程,发现空间厚度的限制显著影响工质的沸腾传热特性,并提出了有限密闭空间工质传热理论,绘制了蒸发端工质沸腾换热示意图(见图3)。为准确预测临界热流密度并防止烧干现象,需合理设计观测模型和设备。Liu等^[19]开发了一种临界热流密度可视化装置,结合透明绝热板、可调节加热设备和温度传感设备,实现了沸腾过程的可视化。这一装置可直接观测工质的相变传热过程,为深入研究工质临界沸腾现象提供了关键的实验条件。

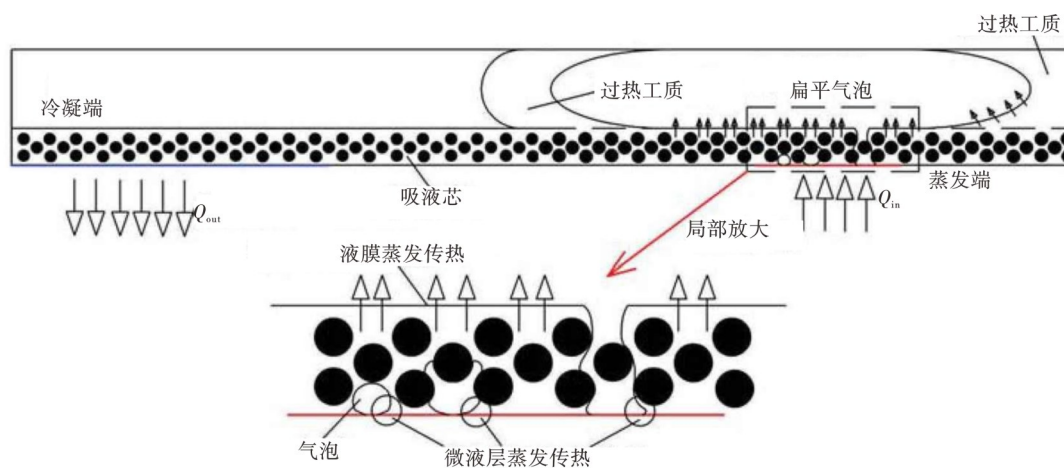


图3 有限密闭空间蒸发端工质沸腾传热原理示意图^[18]

Figure 3 Principle of boiling heat transfer in evaporation section of the limited confined space

2.3 启动性能

启动性能是指均热板从开始加热到达到稳定工作状态所需的时间,反映了均热板对热源变化的响应速度。响应速度越快,达到稳定工作状态所需时间越短,启动性能越好。优异的启动性能能有效防止电子设备在散热过程中因瞬态过热而受到损害,对温度敏感的设备尤为重要。Wang等^[20]制备了不同结构和充液率的均热板,通过水浴加热法测试其瞬态启动性能,即通过将均热板迅速浸入热水中模拟瞬间热冲击。采用K型温度传热热电偶采集瞬态

启动性能的温度,T1表示距离热源较近的检测点温度,T2表示距离热源较远的检查点温度。实验结果表明,在3D螺旋编织丝网和单层平织丝网烧结的复合吸液芯结构下,充液率为40%时,均热板表现出最佳启动性能(见图4)。Ren等^[21]的研究指出,热源的面积、位置和数量对均热板的启动性能有不同程度的影响。总体而言,增加热源面积会显著降低均热板的启动性能。随着充液率的提高,启动时间相应增加,这表明高充液率可能会削弱均热板的启动性能。对于高充液率的均热板,热源面积的增加对启动性能的影响比低充液率更显著。

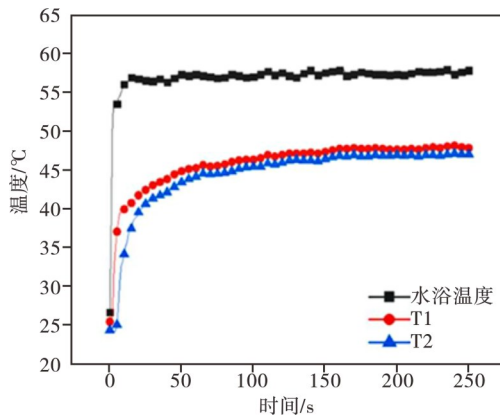


图4 充液率为40%时复合吸液芯均热板的启动性能^[20]

Figure 4 Start-up performance of vapor chamber with composite wick at 40 % filling ratio

2.4 热阻

热阻是评价均热板散热效能的重要参数,受多种因素影响。因此,深入分析均热板的热阻并采取改进措施至关重要。均热板的总热阻越小,其传热系数越高,表明其散热能力越强。

均热板的总热阻是指加热元件产生的热量在通过相变传热过程转移至冷却部分时遇到的全部热阻。总热阻可细分为五个部分:接触热阻、蒸发端热阻、内部热阻、冷凝端热阻和外部冷却部分的对流热阻^[22]。总热阻可通过热源和冷却部分之间的温差与输入功率的比值来计算,如式(1)所示。

$$R = \frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{Q} \quad (1)$$

其中, R 为均热板的总热阻, T_{hot} 为均热板蒸发端的平均温度, T_{cold} 为均热板冷凝端的平均温度, Q 为输入功率^[23]。

针对不同类型的均热板,研究者对总热阻进行不同的分类与分析。Li等^[24]在计算出均热板的总热阻后,进一步分析了其中的扩散热阻 R_s 和对流热

阻 R_c 。这两种热阻相应的计算式(2)和式(3)如下。

$$R_s = \frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{ave}}}{Q} \quad (2)$$

$$R_c = \frac{T_{\text{ave}} - T_{\text{cold}}}{Q} \quad (3)$$

其中, T_{ave} 为均热板蒸发端内部表面的平均温度。均热板的扩散热阻 R_s 是指热量从热源转移到均热板时,在小面积区域向大面积区域扩散过程中遇到的热阻。而对流热阻 R_c 则是指热量在均热板内部经冷凝端并最终转移到外部的过程中所遇到的热阻。Attia等^[25]将总热阻分为结温热阻、内部热阻和冷凝端热阻。具体而言,结温热阻是指热量从热源传递到蒸发端内部时所遇到的热阻;内部热阻是指热量在蒸发端内部表面与冷凝端内部表面之间传递时遇到的热阻;冷凝端热阻则是指热量从冷凝端内部表面传递至外部时所遇到的热阻。

总热阻的分类旨在研究各部分热阻对总热阻的贡献及其影响因素,以探索降低热阻的有效策略。通过构建热阻模型并分析其参数,可以确定优化均热板传热性能的方法。为深入分析均热板的热阻特性,Jason等^[22]开发了一种热阻预测模型。该模型依据均热板的尺寸、材料和操作条件来预测热阻,并综合了扩散子模型、一维子模型和有效厚度子模型,对热阻进行了全面分析(见图5)。实验结果证实了模型在明确各部分热阻对均热板性能影响方面的有效性。Dan等^[26]通过分析壳体热阻、吸液芯热阻与工质工作过程中的热阻等热阻条件,设计并建立了一种多热源准动态模型。为了验证模型的准确性,制备了一款铝制均热板,发现吸液芯厚度与均热板厚度的最佳比例约为0.57。Chang等^[27]设计了一种基于各向同性导热系数的测量实验方法用于研究超薄均热板的传热性能,采用结构相同但厚度不同的三种均热板进行验证,并提出了一套评估超薄均热板热阻的关联式,为超薄均热板的导热系数与热阻的测量提供开拓性的研究方向。

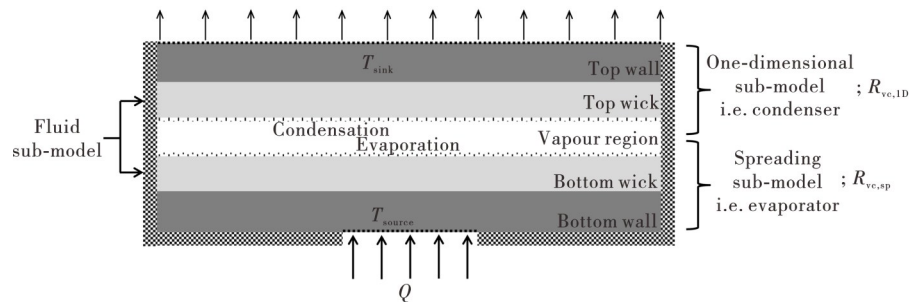


图5 均热板的热阻模型^[22]

Figure 5 Thermal resistance model of vapor chamber

综上所述,均热板的传热性能可通过表面温度与热量来体现,但其内部的运行情况难以直接观测。因此,通过建立模型来分析传热性能尤为重要。随着电子产品与均热板向微型化发展,传统传热性能模型不再完全适用于超薄空间下的均热板。为有效分析不同厚度与结构的均热板,建立适用于这些条件的传热性能模型已成为当前研究的重要方向之一。

3 影响热阻的因素

均热板在工作时的热阻受多种因素影响,如吸液芯、工质、外壳材料和外部环境条件等。为有效降低均热板热阻,提升其传热性能,从多角度研究不同因素对均热板热阻的影响。

3.1 吸液芯

吸液芯在均热板中的作用是为工质提供工作通道,并加速工质的蒸发、冷凝和回流。在实际运行中,若工质不能及时回流,会导致内部发生烧干现象,热阻急剧上升,影响均热板正常工作。面对高热流密度的电子设备,现有的均热板技术仍难以完全避免烧干现象。为了提升工质回流效率,需要设计更合理的吸液芯结构。不同吸液芯结构对工质流动与热阻的影响各异。优化吸液芯结构的策略包括改进传统吸液芯结构、设计复合吸液芯以及开发新型吸液芯。

3.1.1 传统吸液芯

目前,传统吸液芯主要有三种结构:丝网型吸液芯^[28]、烧结型吸液芯^[29]和沟槽型吸液芯^[30]。三种结构的吸液芯各有特点,但都难以满足实际应用需求。因此,研究者们在传统吸液芯的基础上改进其结构以提高工作效率。

Xu等^[31]模拟植物网状叶脉,设计了一种粉末烧结吸液芯,该吸液芯以多边形结构支撑并提供工质回流通道(见图6(a))。这种设计增加了工质的回流通道,促进了工质循环,最大承受热流密度可达 $130 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。Wang等^[32]研究了不同粒径和形状的铜粉对粉末烧结吸液芯毛细力和渗透率的影响,并改进出一种新的烧结型吸液芯结构。该吸液芯在热源区使用 $75 \mu\text{m}$ 的非球形铜粉,在回流区使用 $110 \mu\text{m}$ 的球形铜粉(见图6(b))。这种设计能更好地平衡毛细力和渗透率,同时显著降低热阻。Xia等^[33]设计了一种径向梯度孔径吸液芯,由三种不同孔径的铝粉烧结而成,孔径由大到小、由内到外梯度排布,将吸液芯填满均热板的蒸汽流动空间(见图6(c))。这种梯度排布减少了从外向内的毛细力,加快了液态工质向均热板中心热源区的流动,有效促进了工质流动并降低了热阻。Huang等^[34]开发了一种由四个螺旋编织网格和一个底部网格复合而成的丝网吸液芯(见图6(d))。螺旋编织网格不仅促进了

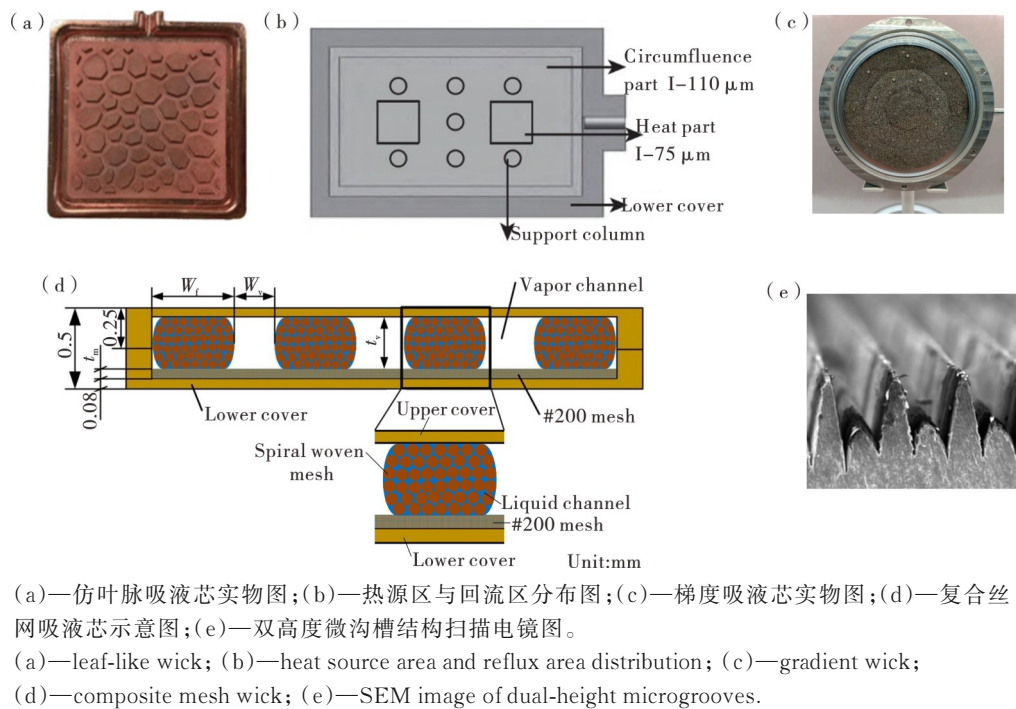


图6 吸液芯结构^[31-35]

Figure 6 Wick structure

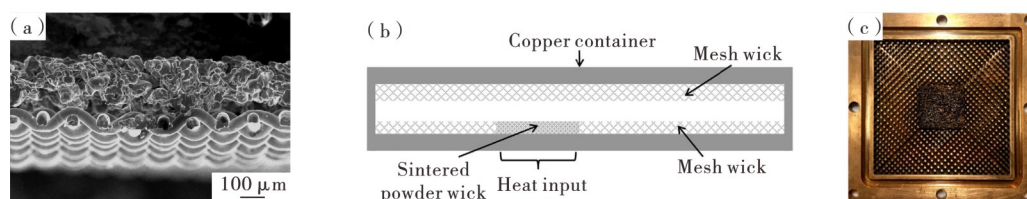
工质回流,还起到支撑作用,有效提高了均热板的热导率。Jiang等^[35]利用激光技术构建了一种双高度微沟槽结构(见图6(e)),无需化学改性即可提高毛细性能和蒸发传热性能,具有显著优势。对于沟槽吸液芯,除改进沟槽结构外,沟槽的数量、尺寸和形状都会对热阻造成影响^[36-37]。

3.1.2 复合吸液芯

复合吸液芯在传统吸液芯的基础上进行了优化,融合了多种吸液芯结构的优点,以提升均热板的性能。Li等^[38]设计了一种烧结铜粉-丝网复合的吸液芯,用于蒸发端。该吸液芯上层采用铜粉烧结,并结合下层200目铜网复合而成(见图7(a))。这种结构增加了蒸发端表面积,提供了更多的流动通道,促进了工质的快速回流。在相同条件下,与泡沫铜吸液芯的均热板相比,热阻降低了37.67%。Velardo等^[39]研究了一种烧结-丝网复合吸液芯,与上述结构不同,该复合吸液芯的热源区采用铜粉烧结技术,回流区采用60目丝网,其结构如图7(b)所示。此设计旨在利用铜粉烧结的高导热系数增强热量传递,

同时借助丝网结构的高渗透率降低液体压力损失。实验结果表明,使用该吸液芯的均热板热阻最低可达 $0.08 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

Zhou等^[40]开发了一种丝网-沟槽复合结构,其制备过程首先进行丝网烧结,接着将烧结后的丝网浸泡在树脂中,待树脂固化后,使用激光加工微槽,最终形成丝网-沟槽复合吸液芯。这种结构具有超亲水性与强大的毛细力,有效解决了微沟槽毛细力不足的问题。Jiang等^[41]研制出一种铜粉烧结-沟槽吸液芯,该吸液芯通过在沟槽表面上烧结铜粉制成。实验结果发现,当沟槽数为55时,均热板表现出最低热阻,为 $0.024 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。随着铜粉粒径增大与吸液芯孔隙率提升,均热板的换热能力显著增强,表明毛细管极限是影响均热板散热性能的主要因素。Wang等^[42]设计了径向槽和交叉槽两种沟槽结构,并在沟槽中填充高孔隙率的泡沫铜以促进工质蒸发(见图7(c))。实验结果表明,不同沟槽结构对均热板热阻产生不同程度的影响。在高热负荷条件下,交叉槽结构展现出比径向槽更好的散热性能。



(a)—烧结-丝网吸液芯电镜图;(b)—烧结-丝网吸液芯结构示意图;(c)—烧结-径向槽吸液芯实物图。
(a)—SEM images of sintering-mesh wick; (b)—structure schematic of sintering-mesh wick; (c)—photo of sintering-radial groove wick.

图7 复合吸液芯结构^[38-39, 42]

Figure 7 Composite wick structure

3.1.3 新型吸液芯

新型吸液芯为提升均热板性能而设计,采用创新结构以取代传统吸液芯,旨在提高传热性能并降低热阻。Zhou等^[43]基于叶脉分形结构的高传导特

性,设计了一种仿叶脉结构的新型均热板,外壳为铝合金,内部填充棉花,其结构如图8所示。该设计利用棉花的强毛细力在均热板内部形成工质流动通道,替代传统吸液芯。实验结果表明,按纹理排布的

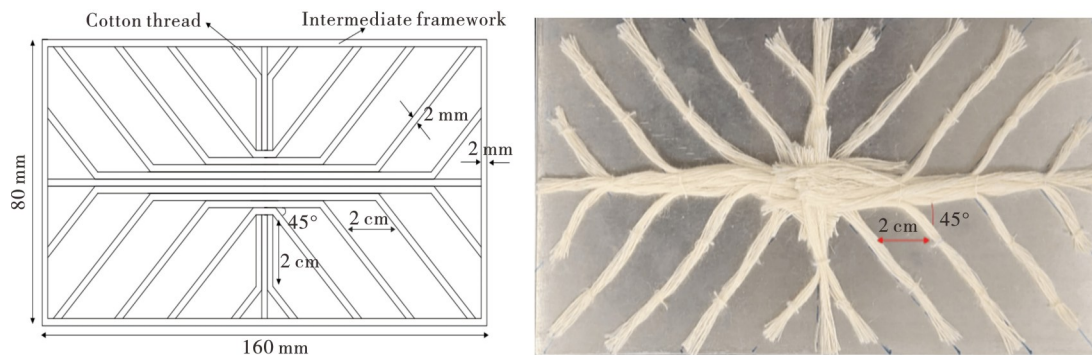


图8 仿叶形结构^[43]

Figure 8 Leaf-like structure

棉花结构均热板热阻低于随机排布的均热板热阻。Jiao等^[44]开发了一种新型均热板,冷凝端采用超疏水纳米花簇状结构替代吸液芯,蒸发端则使用泡沫铜烧结吸液芯。这种疏水结构促进了冷凝端工质液滴的回流。与纯铜均热板相比,新型均热板在相同条件下的传热效率提高了2.78倍,热阻最低可达 $0.146\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 。Gu等^[45]基于仿生学原理,设计了一种TPMS-gyroid仿生复合多孔吸液芯,并将其应用于蒸发端。该结构包含大量微孔,能够提供更多的气化核位点,从而增强毛细管性能。在热负荷为120 W、冷却水温度为308.15 K的条件下,该均热板的热阻最小值可达 $0.034\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 。Cheng等^[46]开发了一种石墨铝固态均热板,选用6061铝合金作为顶层和底层材料,中间层则采用高导热的石墨铝。这种均热板的导热系数高达 $290\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,虽然其导热性能不如相变均热板,但其固态结构的设计有效克服了重力等外部环境对均热板性能的不利影响。

综上所述,改进吸液芯结构对于降低均热板热阻和提高传热性能至关重要。传统吸液芯可通过优化材料选择、尺寸和结构排布来增强性能。复合吸液芯可通过重新组合不同结构来实现更高的效率。新型吸液芯的设计重点在于提升散热效率和环境适应能力,通过创新结构来替代现有吸液芯。改进后的吸液芯通过提升热性能或加速工质相变传热的过程来减少热阻。毛细力和渗透率是影响吸液芯性能的关键因素。毛细力是均热板内部工质循环的主要驱动力,毛细力越强,工质回流速度越快,蒸发端越不易烧干。而吸液芯的渗透率决定了工质流动时的摩擦阻力,渗透率越高,工质流动阻力越小,摩擦损失也越低^[47]。因此,通过提高吸液芯的毛细力和渗透率,可以加速工质的蒸发、冷凝和回流过程,从而有效降低热阻。

3.2 工质

工质是均热板的核心组成部分,其主要功能是通过相变传热转移热量。均热板的相变传热是指工质在气相与液相的转化过程中,将加热区的热量传递到冷凝面,实现散热。工质的属性对均热板的热阻具有重要影响。在选择工质时,首先需要考虑均热板外壳与工质的相容性。若工质与外壳材料不相容,可能导致运行过程中产生不凝性气体,阻碍相变传热,甚至导致堵塞,从而增加热阻^[48]。其次,工质的热性能也是影响均热板热阻的关键因素,不同工质在相变传热中的适用温度范围也有所差异^[49]。均热板常用的工质包括去离子水、丙酮、甲醇与乙醇

等,这些材料具备良好的热物理特性,其热物性列于表1。由于工质在不同环境条件下的表现可能有所不同,因此工质的选择还应考虑均热板的几何参数和操作条件^[50]。

表1 部分常见工质的热物性^[51]

Table 1 Thermal physical properties of some common working fluids

工质	熔点($1\times 10^5\text{ Pa}$)/K	沸点($1\times 10^5\text{ Pa}$)/K	适用温度范围/K
水	273.1	373.1	283—560
甲醇	175.1	337.8	283—403
乙醇	158.7	351.5	273—403
丙酮	180	329.4	273—393

除工质本身的属性外,工质的充液率也会影响均热板的热阻。低充液率意味着均热板的极限热流密度降低,过低的充液率会使大部分工质处于蒸汽状态,容易破坏气液平衡,引发烧干现象,增加热阻。而高充液率同样会降低均热板的传热效率,这是因为均热板内部过多的工质会阻碍蒸汽流动,影响均热板正常工作,在超薄均热板中,这种堵塞现象会更显著^[31, 52]。选择合适的充液率有助于保持气液平衡,促进有效相变传热,实现最佳散热效果。因此,每种均热板都存在一个最佳充液率。

3.3 外壳

外壳是密封工质和吸液芯等结构的关键部件,其导热性能对热阻有显著影响。选择材料时需考虑外壳与工质之间的化学反应与物理相容性,以防止腐蚀和溶解。为降低热阻,通常选择导热系数高的材料作为外壳。表2列出了一些常见高导热系数的金属材料。银虽然导热性能优异,但成本较高。铜导热系数较高,且机械加工性能优良,广泛应用于电子散热领域^[13]。铝的导热系数较低,但因其密度小、质量轻的特性常应用于航空航天领域^[53]。除了单一材料,复合材料也表现出良好的导热效果。Duan等^[54]设计的铜铝复合板材,导热系数达264

表2 部分外壳材料的导热系数^[53]

Table 2 Thermal conductivity of some envelope materials

外壳材料	导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
银	409.38
铜	379.14
铝	227.95
镍	82.57
碳钢	48.85

$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, 在 120 W 的加热功率下, 热阻最低可达 $0.092^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

3.4 外部环境条件

热阻除了受均热板组成成分影响外, 还受热源、倾角、冷却条件等外部环境条件的影响。

3.4.1 热源

热源的热负荷、分布、数量与面积均会影响均热板热阻^[21, 47]。其中热负荷大小对均热板热阻的影响更为显著。在实际应用中, 热阻随热负荷增加呈现出 V 型变化趋势(见图 9)^[55]。在达到临界热流密度前, 热阻随热负荷增加而降低。这是因为工质在未开始工作时, 液体表面相对静止, 液膜较厚。随着热负荷的增加, 工质液膜逐渐变薄, 相变传热过程变得更加容易, 热阻降低。然而, 当热负荷继续增加并超过临界热流密度时, 烧干现象会导致热阻上升, 形成

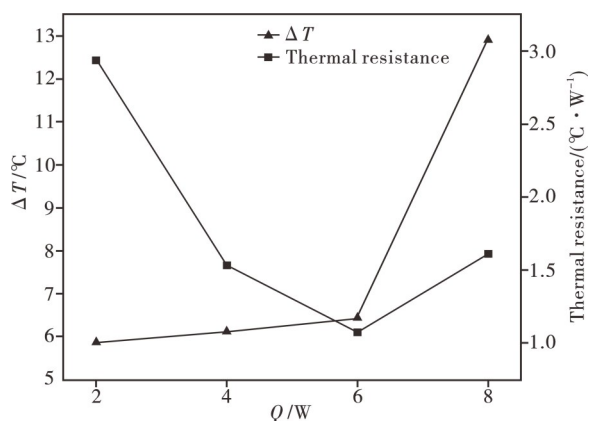


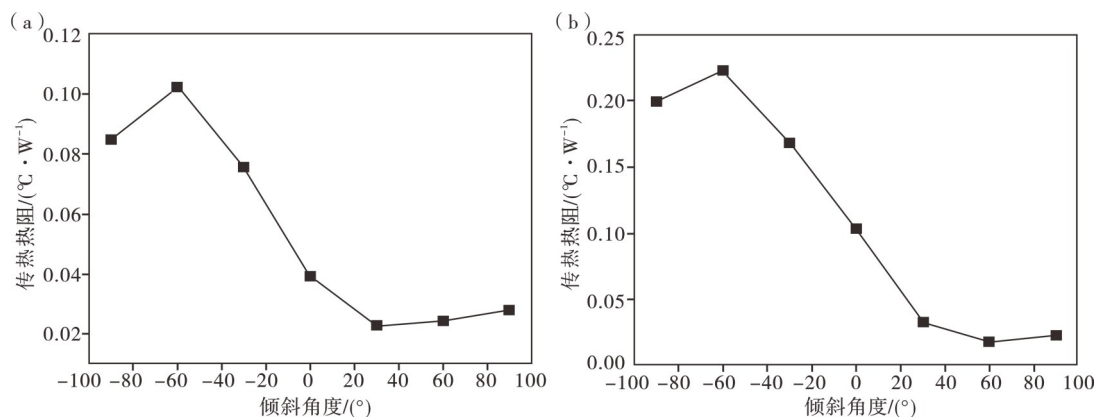
图 9 均热板温差和热阻的变化曲线^[55]

Figure 9 Variation of temperature difference and thermal resistance

V 型趋势。另有研究表明, 在达到临界热流密度之前, 热阻对热负荷变化不敏感。这可能是因为均热板的启动性能强, 达到平衡状态的时间很短, 因此难以观测到热阻的变化^[11]。随着电子产品微型化趋势的发展, 多热源情况也随之涌现。Kim 等^[56]提出一种用于研究不同热源和热负荷条件下传热特性的分析模型。通过该模型, 研究者们发现多热源的存在会影响均热板内部的压力与温度分布, 从而改变工质的流动方式。同时, 可采用控制变量的方式改变吸液芯等影响热阻的条件来寻找多热源条件下传热性能最好的均热板结构。

3.4.2 倾角

在实际应用中, 均热板不仅可能在水平方向上工作, 还可能倾斜, 如在手机和汽车电池等设备上的应用。不同倾斜角度下, 重力会影响工质的分布与流动, 从而影响相变传热过程, 甚至可能导致局部烧干。Zhao 等^[57]将热源置于非蒸发端中心, 实验结果发现当热负荷低于 25 W 时不同倾角的热阻变化不大, 而当热负荷大于 25 W 时, 90° 倾斜角度的热阻最小。Li 等^[18]研究了某品牌冰箱中均热板倾角与热阻的关系, 发现随着热负荷增加, 最小热阻出现在更大的正倾角位置(见图 10)。当热负荷为 97.51 W 时, 最小热阻出现在 30° 正倾角位置, 而当热负荷增至 138.46 W 时, 最小热阻出现在 60° 正倾角位置。这表明热负荷的变化会影响倾角对热阻的影响。此外, 均热板的毛细性能可以在一定程度上减轻倾角对热阻的影响^[58]。因此, 若均热板的毛细性能足够强, 并同时考虑热负荷、充液率与热源分布等因素, 可以减少倾角对热阻的不利影响, 甚至提升传热性能。



(a) — $Q_m = 97.51 \text{ W}$; (b) — $Q_m = 138.46 \text{ W}$ 。

图 10 热阻随热负荷以及倾角改变的变化曲线^[18]

Figure 10 Variation of thermal resistance with the change of heat load and inclination angle

3.4.3 冷却条件

为了加快相变传热中的冷凝回流,通常会结合其他冷却技术,如风冷、散热鳍片和液冷等。Zhou等^[59]采用射流冲击空气冷却技术来降低均热板的热量。该装置通过空气射流冲击带走热量,促进工质冷凝,降低热阻,热流密度耗散能力最高可达589 W(见图11)。除了自然风冷和射流冲击风冷,增加散热鳍片可以扩大接触面积,提高风冷效率^[60]。Li等^[38]在蒸发端布置冷却水装置,促进工质冷凝回流,发现冷却水温度的升高有助于缩小冷凝端与蒸发端的温差,但过高的温度则不利于散热。Yi等^[61]设计了集成阵列喷雾冲击均热板,将喷雾冲击与均热板相结合,提高了临界热流密度。因此,优化冷凝端的散热条件可以有效降低热阻,提升散热性能。而在实际应用中,鉴于电子器件的小型化趋势,风冷散热会更为常见。

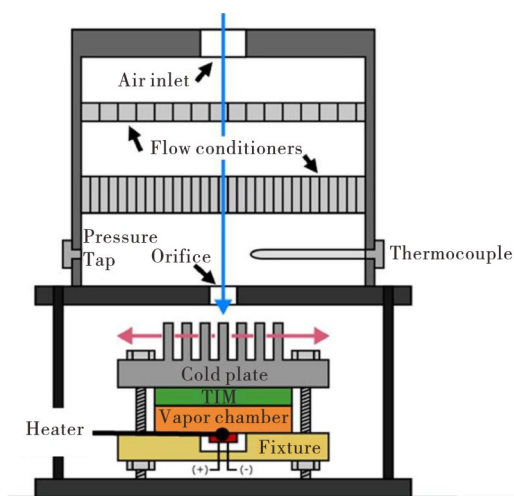


图11 空气射流冲击装置的原理图^[59]

Figure 11 The schematic diagram of the air jet impingement apparatus

4 结语与展望

均热板作为一种新型散热技术,具备良好的均温性能、高散热效率和强大的结构适应性。相比其他散热技术,二维相变的均热板在解决电子产品散热问题上表现出显著优势。目前,关于超薄均热板内部传热性能的研究相对不足。通过增加对比试验,完善传热理论及构建可视化物理模型,可以深入探究在空间受限条件下均热板的传热性能。此外,分析热阻的影响因素后发现,优化吸液芯结构、选用导热性能更好的外壳材料及高效热工质,能有效降低均热板的热阻并提升散热性能。同时,根据均热

板在实际应用中的外部环境条件,合理选择均热板类型、工质、外壳材料、布置和冷却条件,可实现更优的散热效果。

然而,面对当今电子产品微型化的需求,均热板的结构与性能研究仍需不断完善。未来对均热板的研究与应用可以重点关注以下几个方面:(1)设计更精确的传热模型。由于目前对超薄均热板的传热性能研究较少,且工质相变在更薄的环境中可能难以形成有效流动通道等问题,因此需要建立更符合实际应用状况的理论模型,以便更清晰地了解超薄环境下的热阻数据,从而有针对性地设计均热板。(2)开发高性能的吸液芯结构。目前,吸液芯的结构主要基于传统设计,但这些传统结构的性能难以满足高效散热的需求。通过对近年来研究方向的梳理可以发现,优化传统结构、设计复合吸液芯与开发新型吸液芯等方式,均能有效降低均热板的热阻。(3)加强对均热板实际工作环境的研究。均热板的传热性能在不同的外部条件下会呈现出不同的工作效果。因此,可以针对电子产品的具体使用环境条件来设计均热板,以充分利用环境的正面影响,从而提高其工作效率。

参考文献:

- [1] HE Z, YAN Y, ZHANG Z. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review [J]. Energy, 2021, 216: 119223.
- [2] 陈恭, 汤勇, 张仕伟, 等. 超薄均热板的研究现状及发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 197-212.
- [3] 刘芳, 杨志鹏, 袁卫星, 等. 电子芯片散热技术的研究现状及发展前景 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(23): 163-169.
- [4] XING W, XU Y, SONG C, et al. Recent advances in thermal interface materials for thermal management of high-power electronics [J]. Nanomaterials, 2022, 12(19): 3365.
- [5] 李广义, 张俊洪, 高键鑫. 大功率电力电子器件散热研究综述 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(11): 8-14.
- [6] CHEN C, LI F, WANG X, et al. Improvement of flow and heat transfer performance of manifold microchannel with porous fins [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 206: 118129.
- [7] 张梁娟, 胡柯峰. 某风冷冷板散热性能仿真及试验研究 [J]. 机械设计, 2019, 36(S2): 223-226.
- [8] HE W, ZHANG J, GUO R, et al. Performance analysis and structural optimization of a finned liquid-

- cooling radiator for chip heat dissipation [J]. *Applied Energy*, 2022, 327: 120048.
- [9] ELGHOOLOO A, BASRAWI F, IBRAHIM T K, et al. A review on heat sink for thermo-electric power generation: Classifications and parameters affecting performance [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 134: 260-277.
- [10] TANG H, TANG Y, WAN Z, et al. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling [J]. *Applied Energy*, 2018, 223: 383-400.
- [11] XIE D, SUN Y, WANG G, et al. Significant factors affecting heat transfer performance of vapor chamber and strategies to promote it: A critical review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 175: 121132.
- [12] 汤勇, 孙亚隆, 郭志军, 等. 电机散热系统的研究现状与发展趋势 [J]. *中国机械工程*, 2021, 32(10): 1135-1150.
- [13] 郝剑, 朱崧, 吴胜, 等. 均热板的研究现状及应用前景 [J]. *铜业工程*, 2023, (6): 104-116.
- [14] 黎子曦. 超薄均热板制造工艺及其传热性能分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [15] PATANKAR G, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. Patterning the condenser-side wick in ultra-thin vapor chamber heat spreaders to improve skin temperature uniformity of mobile devices [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 927-936.
- [16] ZHOU F, ZHOU J, HUAI X. Advancements and challenges in ultra-thin vapor chambers for high-efficiency electronic thermal management: A comprehensive review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 214: 124453.
- [17] 邓文昊, 谭跃龙, 方俊露. 多孔吸液芯均热板的现状研究 [J]. *上海节能*, 2024, (1): 92-104.
- [18] 李聪. 基于不同热负荷的超薄均热板传热传质特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [19] 刘旺玉, 何芋钢, 黄光文, 等. 一种用于超薄均热板临界热流密度研究的可视化实验装置: CN202022576924.X[P]. 2021-09-21.
- [20] 王志威. 超薄均热板设计制造及气液两相流可视化研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [21] 任博. 不同热源环境下铝制均热板传热性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [22] VELARDO J, SINGH R, LONG P T, et al. A model based on analytical spreading relations for predicting the thermal performance of vapour chambers in thermal management solutions [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 185: 108077.
- [23] BULUT M, KANDLIKAR S G, SOZBIR N. A review of vapor chambers [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2018, 40(19): 1551-1573.
- [24] LI H, CHIANG M, LEE C, et al. Thermal performance of plate-fin vapor chamber heat sinks [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37(7): 731-738.
- [25] ATTIA A A A, EL-ASSAL B T A. Experimental investigation of vapor chamber with different working fluids at different charge ratios [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2012, 3(3): 289-297.
- [26] DAN D, LI W, ZHANG Y, et al. A quasi-dynamic model and thermal analysis for vapor chambers with multiple heat sources based on thermal resistance network model [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 35: 102110.
- [27] CHANG S W, CHIANG K F, CAI W L. Thermal performance evaluation of thin vapor chamber [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 220-230.
- [28] KUMAR C S, KRISHNAN S. Experimental studies on heat transfer characteristics of SS304 screen mesh wick heat pipe [J]. *Thermal Science*, 2017, 21(2): 497-502.
- [29] BYON C, KIM S J. The effect of the particle size distribution and packing structure on the permeability of sintered porous wicks [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 61: 499-504.
- [30] MING Z, ZHONGLIANG L, GUOYUAN M. The experimental and numerical investigation of a grooved vapor chamber [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(2-3): 422-430.
- [31] 徐增光, 彭毅, 焦会馨. 仿叶脉均热板的传热性能实验研究 [J]. *航天器环境工程*, 2023, 40(3): 226-232.
- [32] 王宙, 银了飞, 丁艺, 等. 具有梯度结构吸液芯的均热板传热特性 [J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(2): 532-539.
- [33] XIA Y, YAO F, WANG M. Experimental investigation on thermal performance of vapor chambers with diffident wick structures [J]. *Energies*, 2023, 16(18): 6464.
- [34] HUANG G, LIU W, LUO Y, et al. A novel ultra-thin vapor chamber for heat dissipation in ultra-thin portable electronic devices [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167: 114726.
- [35] JIANG H, SUN X, WANG X, et al. A dual-height wick to improve capillary performance of vapor chambers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024,

- 241: 122371.
- [36] WANG Q, ZHAO H, XU Z, et al. Influence of groove parameters on the thermal hydraulic performance of a composite porous vapor chamber: A numerical study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 172: 115149.
- [37] WANG Q, WU Z, XU Z, et al. Optimization of the coupling groove parameters of composite porous vapor chamber [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 205: 118007.
- [38] LI Y, ZHOU W, LI Z, et al. Experimental analysis of thin vapor chamber with composite wick structure under different cooling conditions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 471-484.
- [39] VELARDO J, DATE A, SINGH R, et al. Experimental investigation of a vapour chamber heat spreader with hybrid wick structure [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 140: 28-35.
- [40] ZHOU Z, WU B, XU J, et al. Novel for the resistance welding of laminated wire mesh microgroove composite wicks with enhanced capillary performance [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 48: 102386.
- [41] JIANG L L, TANG Y, WU H Y, et al. Fabrication and thermal performance of grooved-sintered wick heat pipe [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21 (2): 668-676.
- [42] WANG M, CUI W, HOU Y. Thermal spreading resistance of grooved vapor chamber heat spreader [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 361-368.
- [43] ZHOU Z, WANG X, ZHOU Y. Performance study of a leaf-vein-like structured vapor chamber [J]. *Materials*, 2023, 16(12): 4482.
- [44] 焦会馨. 具有超疏水表面的均热板传热性能研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [45] GU Z, YANG K, LIU H, et al. Enhancing heat transfer performance of aluminum-based vapor chamber with a novel bionic wick structure fabricated using additive manufacturing [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 247: 123076.
- [46] 程皓月, 严波, 刘芬芬, 等. 基于石墨铝的固态均热板及其传热性能试验研究 [J]. *稀有金属*, 2022, 46 (11): 1429-1538.
- [47] 卞乃浦. 梯度型吸液芯均热板的传热特性研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2022.
- [48] 许圣华. 高温热管结构材料与工质相容性的分析研究 [J]. *节能技术*, 1999, (6): 6-8.
- [49] 刘豪杰, 秦凯文, 魏强林, 等. 不同热管工质对热管冷却反应堆堆芯物理参数的影响与分析 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(8): 3289-3294.
- [50] PATANKAR G, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. Working-fluid selection for minimized thermal resistance in ultra-thin vapor chambers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 648-654.
- [51] 钱华俊, 韩爽. 均热板的应用 [J]. *能源研究与利用*, 2021, (1): 36-43.
- [52] WIRIYASART S, NAPHON P. Fill ratio effects on vapor chamber thermal resistance with different configuration structures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 164-171.
- [53] 王智勇. 超薄不锈钢均热板制造工艺及其传热性能分析 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
- [54] 段龙华. 铜铝复合板材均热板的制造及其性能表征 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [55] HE G, SHENG Y, YE G, et al. Heat transfer performance analysis of an ultra-thin aluminum vapor chamber with serrated microgrooves [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 229: 120604.
- [56] KIM S, KANG S, PARK S, et al. Comparison of maximum heat transfer rate of thin vapor chambers with different wicks under multiple heat sources and sinks [J]. *Energies*, 2024, 17(13): 3330.
- [57] ZHAO J, HAN J, ZHOU C, et al. Design and experimental study of a novel vapor chamber for proton exchange membrane fuel cell cooling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 220: 124949.
- [58] TSAI M C, KANG S W, PAIVA K V D. Experimental studies of thermal resistance in a vapor chamber heat spreader [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 56(1-2): 38-44.
- [59] LOHAN D J, JOSHI S N, DEDE E M, et al. Experimental investigation of post and vented vapor chamber designs for high heat flux dissipation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 222: 125116.
- [60] LI H, CHIANG M. Effects of shield on thermal-fluid performance of vapor chamber heat sink [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(7-8): 1410-1419.
- [61] YI L, CHEN C, DUAN F, et al. Power consumption and thermal performance of integrated spray and jet array cooling vapor chambers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119266.

Research Status of Thermal Resistance Performance of Vapor Chamber

LI Xiaohui¹, DENG Kaijiang^{1,2*}, LUO Daqiang^{2*}, ZHANG Ruikun^{3*}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528225, China; 2. Foshan Tongbao Electrical Precision Alloy Co., Ltd., Foshan 528131, China; 3. Ansteel Research Institute Co., Ltd, Anshan 114009, China)

Abstract: With the accelerated replacement of electronic products, the demand for performance has also increased. This trend has significantly promoted the development of electronic products toward miniaturization and high performance. However, miniaturization and high performance are often accompanied by a sharp increase in the heat flux, which brings unprecedented challenges to thermal design. In practice, if the heat flux generated by electronic products cannot be dissipated promptly, it will not only lead to a significant decline in its performance, but may also lead to equipment damage in extreme cases. Therefore, efficient heat-dissipation technology has become a key bottleneck for the sustainable development of electronic products. In recent years, the applications of vapor chamber technology has become an important way to solve the problem of efficient heat dissipation in miniaturized electronic products. The purpose of this study is to analyze the current status and development trends of vapor chamber technology and to construct a comprehensive framework system by elaborating its structure, working principle, and heat transfer efficiency. In particular, the calculation method of thermal resistance, as a core indicator of the heat dissipation efficiency of a vapor chamber, is crucial for achieving high heat dissipation efficiency. To comprehensively understand and improve the thermal resistance performance of the vapor chamber, this study provides a systematic review of the factors affecting thermal resistance performance. These factors can be broadly categorized into two main groups. The first group is the composition of the vapor chamber, which mainly includes the wick, envelope material, and working medium. Among them, the wick, as a key structure affecting the thermal resistance, will be the focus of this paper, which examines current research status of its type and performance. The second group comprises the external environmental conditions during the work of the vapor chamber, such as the heat source characteristics, inclination angle and cooling conditions. Changes in these external factors significantly impact the thermal resistance of the plate. Therefore, their research is indispensable. Finally, based on the structural characteristics of the vapor chamber and the current technological development trends, future development directions are discussed.

Keywords: 3C electronic products; heat dissipation technology; vapor chamber; heat transfer performance; thermal resistance; wick; working fluid; research progress