

烧结泡沫铜均热板的实验研究

杨雄, 彭毅*

(贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 文中对烧结泡沫铜吸液芯的均热板传热性能实验进行了研究。蒸发端采用孔径大小为 0.15mm、冷凝端采用孔径大小为 0.50mm 的泡沫铜组合成均热板吸液芯, 使用无水乙醇作为工作流体, 测试了不同充液量、不同工况下的均热板的热阻与传热性能, 测得烧结泡沫铜吸液芯均热板的最佳充液率为 0.15g 时均热板具有较好的传热性能, 最大热输入功率为 45W, 最小热阻 0.123°C/W。

关键词: 烧结泡沫铜; 充液量; 均热板

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0044-03

引言

近年来, 便携式电子设备向高性能、轻量化、薄型化方向发展, 5G 网络也正朝着网络多元化、宽带化、综合化、智能化的方向发展, 使得移动数据流量的需求量急剧增加。5G 的出现不仅使网络的功率和频谱效率大幅度提高, 还使得电子设备与服务器的热管理问题日趋严重, 与此同时, 电子设备运行中产生的热量也将直接影响电子产品的性能和可靠性。试验已经证明, 电子元器件温度每升高 2°C, 可靠性下降 10%; 温升 50°C 时的寿命只有温升 25°C 时的 1/6^[1]。随着集成电路芯片和电子元器件体积的不断缩小, 其功率密度会快速增加, 散热成为电子设备亟需解决的问题。散热设备只有向着轻超薄化、智能化和多功能化的方向发展才能满足当前的需求。超薄均热板是未来解决电子设备散热问题的新型方式, 随着芯片功率密度的不断提升, 超薄均热板已经广泛应用在 CPU、NP 等大功耗器件的散热上^[2]。因此, 有必要在减小超薄均热板厚度的同时还要增加超薄均热板的极限功率, 以满足小型化电子产品的散热要求。

Som^[3]等采用碳酸盐烧结金属泡沫吸液芯制备均热板进行相应的实验研究, 结果表明在输入功率不变的情况下, 吸液芯支撑柱数量的增加会降低热管的热阻。改变输入功率时, 每增加一根吸液芯支撑柱可将热阻降低 1.7~2.1%。而增加两个吸液芯支撑柱会使热阻降低 2.4~3.2%。Ng 等人^[4]在吸液芯上涂覆碳纳米管 (CNTs) 涂层改变吸液芯结构的超亲水特性和快速渗水特性, 能有效的提升均热板的传热性能于吸液芯的传热系数。随着均热板厚度的不断减小, 均热板内吸液芯结构的设计与优化已经不能满足要求, 一部分学者开始研究均热板相变工质、蒸汽腔厚度以及均热板超薄化后的传热性能。陈等^[5]研究了一种采用编织铜网作为吸液芯的平板热管, 使用去离子水、无水乙醇、纳米流体 (铜颗粒或氧化铜颗粒) 三种液体作为均热板工质, 研究对编制铜网作为

吸液芯时不同工质下的传热性能。结果表明, 纳米流体对编制铜网吸液芯的传热性能影响最大。Naphon 等^[6]使用制冷剂 R141b 作为工质, 测试了烧结均热板在硬盘散热中的性能, 结果表明充液率在 20% 时硬盘表面温度最低, 且在一定工况下, 制冷剂 R141b 工质比水工质的传热性能更优秀, 温差更小。Li 等^[7]制备出了一种具有粉末烧结-多尺度结构微槽道复合吸液芯, 通过粉末烧结提升吸液芯的毛细压力, 微槽道提升工质的运输效率相结合的复合方式, 使得均热板吸液芯的毛细性能得到了大幅度提升, 传热性能也有所改善。

目前, 对不同类型的热管、均热板进行了广泛的研究, 很大学者提出了各种各样的吸液芯结构。但当前多孔介质材料—泡沫铜作为吸液芯的研究较少。均热板的吸液芯结构、厚度、蒸汽空间的大小都会影响到均热板的最大传热能力。基于之前学者都是将吸液芯作为工质流体的贮存和回流, 还预留出一部分腔体空间为工质相变提供场所, 造成均热板厚度较大。因此, 文中提出了一种新型泡沫铜均热板, 使用烧结泡沫铜作为均热板吸液芯, 使用泡沫铜孔隙作为腔体, 该孔隙不仅用于工作液体回流, 而且还用于蒸汽流动通道, 因此不需要独立的蒸汽空间和额外的支撑结构。最后, 烧结制备了泡沫铜均热板, 并且测试了不同热流密度下、不同充液量均热板的传热性能和热阻, 实验结果表明本设计均热板能够有效提升传热性能, 降低传热热阻。

一、烧结泡沫铜均热板的制备

本研究烧结的泡沫铜均热板由一个蒸发端盖板, 蒸发端吸液芯、冷凝端吸液芯、冷凝端盖板组成。均热板的蒸发端 (图 3 (a)、(c)) 尺寸是 100mm×100mm×1mm, 冷凝端 (图 3 (b)) 100mm×100mm×1mm, 在蒸发端中心区域热源上方, 通过数控机床加工了 80mm×80mm×2mm 的凹槽 (图 3 (c)), 填充了 80mm×80mm×1mm 的泡沫铜吸液芯, 本次使用泡沫铜

收稿日期: 2022-02-14

作者简介: 杨雄 (1996-), 男, 贵州大学机械工程学院, 硕士生, 主要从事传热传质、流体分析领域的科学研究。

通讯作者: 彭毅, 贵州大学机械工程学院。

基金项目: 贵州省教育厅科技项目 (黔教合 KY 字[2021]058); 国家自然科学基金项目 (52065011)。

采用真空烧结法制备而成,此次采用了孔径大小为 0.15mm、0.50mm 泡沫铜组合,周围的光滑区域是一个 20mm×20mm 的方形框架,在其上面加工有 16 个 Φ4mm 的通孔,用来安装螺栓密封蒸发端和冷凝端的两块铜板,冷凝端由 100mm×100mm×1mm 的铜板加工而成。均热板外壳版加工完成后,使用丙酮、乙醇、去离子水作为清洗剂,配合超声波清洗机依次清洗,去除多余的机加工油等污染物,清洗工序完成后,需要对铜材进行烘干,防止表面水分残留,本研究使用真空干燥箱中干燥。外壳板所有工序处理结束以后,使用环氧树脂和螺栓进行蒸发端壳板、泡沫铜组合、冷凝端壳板进行密封。烧结泡沫铜均热板模型如图 1 所示,其实物图如图 2 所示。

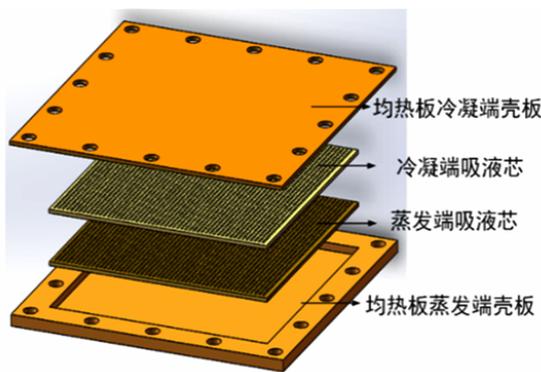


图 1 烧结泡沫铜均热板模型图

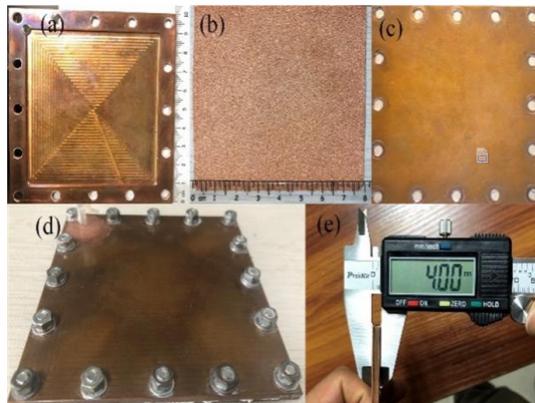


图 2 烧结泡沫铜均热板实物图

均热板的充液量和真空度是影响传热性能的关键因素,对于具有相同吸液芯结构的均热板,不同的充液量和真空度会造成很大的性能差异。本研究中为了得到相同吸液芯结构下不同充液量的实验条件,即需要进行多次充液,将充液端口采用塑料气管-扎条密封。为了得到传热性能最优的无蒸汽空间均热板,本研究采用了无水乙醇作为工作流体,研究了 0.05、0.15、0.25g 不同充液量对均热板传热性能的影响。

二、实验平台的搭建及测量

1. 实验平台

实验装置由四部分组成:加热模块、风冷却模块、数据采集模块、气压升降模块。加热模块由铜块、加热棒、交流电源调压器 (APS-1001D) 和功率显示仪 (PZ9902U) 组

成。使用铝块加热作为热源模拟输入,铝块底座加工有三个钻孔,加热棒嵌入在底座的钻孔中。铝块的加热面积有 20×20mm²、40×40mm² 两种类型。冷却模块包括散热面积为 80×80mm² 的铝块散热翅片、风扇。数据采集模块包括计算机、数据采集卡 (PS2016-DAQ) 和安装在 12 个温度采集点的 12 个 K 型热电偶,其绝对误差为 ±0.02%,用于温度测量。这些测量点的具体位置和数量如图 3b 所示,其中,热源 T₀,蒸发端 T₁-T₄,冷凝端 T₅-T₉,室温 T₁₀,气压升降模块包括了气压泵、气压表、控制阀、升降台。为了降低各接触部分的接触热阻,在接触面之间涂上导热系数大于 1.93W/(m·k) 的导热硅脂 (HY510)。考虑到输入的加热功率很小,整个测试设备都用保温棉包裹。利用数值模拟对无蒸汽空间均热板运行过程中的热损失进行了估算,发现使用隔热棉可以将热损失率控制在 10% 以下。

最初将加热功率设置为 10 W,并且每当测试点的温度达到稳态时,加热功率就以 5 W 的增量递增,该状态定义为在 30s 内每个测试点的温度变化小于 0.2℃ 的状态。测量烧结泡沫铜均热板的最大传热功率作为加热铝块的最大输出功率,以使蒸发段和冷凝段之间的稳态温差保持在 10℃ 以下。实验装置示意图如图 3 所示。

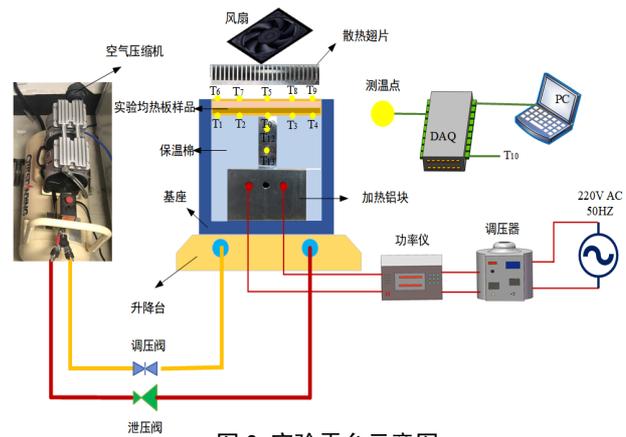


图 3 实验平台示意图

2. 烧结泡沫铜热阻分析

蒸发端的平均温度 T_{ev} , 冷凝端端平均温度 T_{av} , 加热铝块的温差 ΔT 如下:

$$T_{ev} = \frac{1}{4}(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \quad (1)$$

$$T_{av} = \frac{1}{5}(T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9) \quad (2)$$

$$\Delta T = T_{13} - T_{12} \quad (3)$$

加热铝块的热通量由下式计算得到:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta H} \quad (4)$$

则,实际的输入功率为:

$$P = q \cdot A_{heat} \quad (5)$$

式中, λ 是铝的导热系数; ΔH 是两个测量点之间的高度差; A_{heat} 是铝块的加热横截面积。

无蒸汽空间均热板的热阻 R_{vc} 表示为:

$$R_{vc} = (T_{ev} - T_{av})$$

其中 P 是输入功率; A 是均热板的横截面积。

3. 不确定度分析

测试中的不确定性主要来自加热和温度采集模块。加热模块的最大测量不确定度与可调直流电源有关, 可调交流电源的电流精度为 0.5%, 电压精度为 0.1%, 功率输出精度为 0.6%。实验系统中所用的 K 型热电偶精度为 $\pm 0.1K$, 不确定度为 $\pm 0.75\%$ 。因此, 可以根据 Kline 和 McClintock^[8] 描述的方法计算出蒸发和冷凝段温度, 温度差, 热阻和有效导热率的相对测量误差:

$$\frac{E(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \times E_{xi} \right)^2} \quad (7)$$

其中 y 是独立变量 x_i 的给定函数; E (y) 是测量误差; E_{xi} 是自变量上的最大测量误差。因此, 计算出热阻的最大相对测量不确定度为 8.34%, 实验不确定度控制在 10% 以内, 因此实验结果可靠。

三、实验结果分析

1. 烧结泡沫铜均热板蒸发端的温度分布

图 4 显示, 工质为无水乙醇时, 在不同的热流密度下, 烧结泡沫铜均热板在充液量为 0.05、0.15、0.25g 时冷凝端的温度分布。图 4 (a-c) 是加热面积为 $20mm \times 20mm$ 时三种充液量的温度分布图, 图 4 (d-f) 是加热面积为 $40mm \times 40mm$ 时三种充液量下的温度分布。在五个测温点中, 六种测试情况下均出现了 T5 温度达到最高, 原因是 T5 测温点位于冷凝端正中央, 均热板的一维热阻最小, 致使 T5 温度大于周围四个点温度, 也更为接近热源温度。由图我们还可以看出充液量为 0.15g 时, 均热板冷凝端均温性达到最佳, 热流密度为 $2.82W/cm^2$ 时热源输入功率达到最大值 45W。

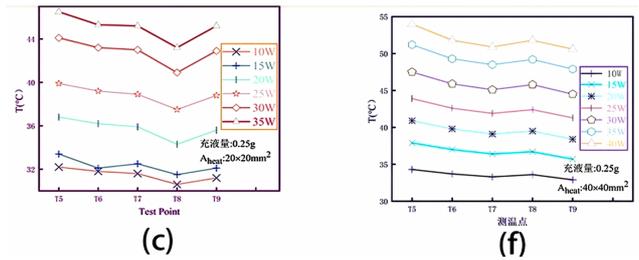
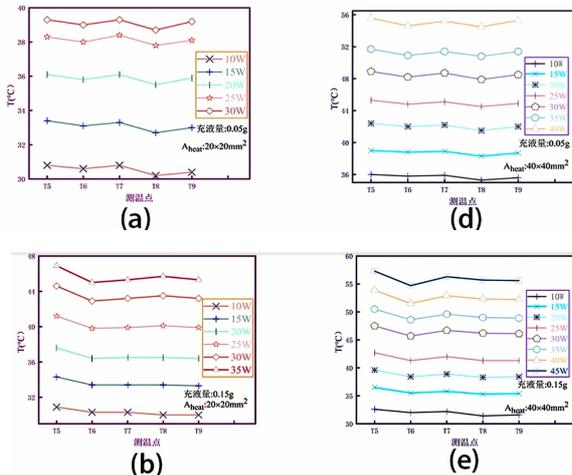


图 4 不同热流密度下冷凝端温度分布图

2. 烧结泡沫铜均热板的热阻

图 5 实验结果显示:

(1) 在加热面积是 $20mm \times 20mm$ 和 $40mm \times 40mm$ 时, 两种加热情况下都一致显示出在充液量为 0.15g 时热阻达到最低, 包括启动热阻, 达到了 $0.126W/^\circ C$ 。这与上面分析的均热板冷凝端温度均匀分布相吻合, 温度分布越均匀, 热阻越低。

(2) 不同之处在于, 加热面积是 $20mm \times 20mm$ 时, 充液量是 0.05g 是热阻值最大, 主要是由于加热面积小, 充液量较少, 加热过程迅速导致蒸发端工质蒸干, 工质断开循环。加热面积是 $40mm \times 40mm$ 时, 充液量是 0.25g 时热阻值达到最大, 主要是由于加热面积较大, 热流密度较小, 且烧结泡沫铜孔隙占比较小, 充液量较多, 阻塞泡沫铜孔隙空间, 造成工质在蒸发端且沸腾较慢。

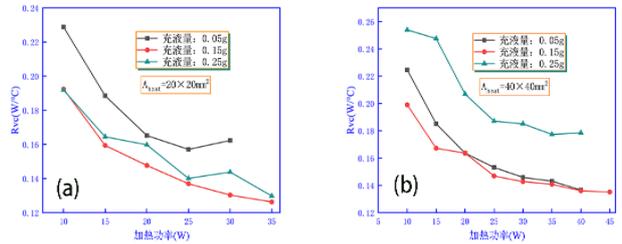


图 5 不同热流密度下均热板热阻

四、结论

文中对烧结泡沫铜均热板均温性以及热阻进行了相关的实验研究, 提出了泡沫铜均热板的相关制备方法与测试方法, 提高了均热板的传热性能。

实验结果表明, 在工质为无水乙醇的不同充液量下, 烧结泡沫铜的最佳充液量是 0.15g, 并且在热流密度是 $8.75W/cm^2$ 时热阻达到了最低值— $0.126W/^\circ C$ 。无水乙醇充液量为 0.15g 时, 均热板均温性达到最佳, 且最大输入功率达到了 45W。因此, 从上述实验结果表明文中均热板的设计制造有效, 可为今后烧结泡沫铜均热板制备与传热性能测试提供工程价值和理论参考。

参考文献

[1] 常春国. 结构设计在电子设备中的重要性研究[J]. 电子质量, 2009, (12): 48-49.
 [2] Naphon P., Wongwises S.. On the thermal cooling of central processing unit of the PCs with vapor chamber [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, (8). (下转第 58 页)

的色度显著降低。主要原因是随着臭氧催化剂投加量的增加,废水中可以产生更多的 OH^\cdot , 不仅提高了臭氧催化氧化的反应效率, 还使得系统内流体状态发生改变, 增加了气、液、固三相的碰撞面积^[8], 进一步提高了 OH^\cdot 的利用率, 加速了有机物的降解。而当催化剂投加量由 30g/L 提高到 40 g/L 后, COD 去除率趋于稳定, COD 去除率甚至下降了 1.0%。这是由于过量的催化剂沉积在活性位点上, 从而阻止了有机成分在催化剂上的吸附, 不利于 OH^\cdot 与 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 与废水的充分接触。所以本实验确定最佳臭氧催化剂投加量为 30g/L。

(4) 过硫酸钠投加量

在进水 COD 分别为 138.8mg/L, 初始 pH 值 8.1 为原水 pH 值, 臭氧催化剂投加量为 30g/L, 臭氧接触时间为 60 min 的条件下, 考察过硫酸钠投加量对 COD 去除率的影响, 结果见图 5。

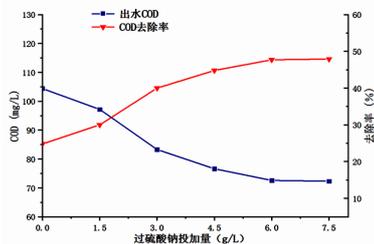


图 5 过硫酸钠投加量对 COD 去除率的影响

由图 5 可知, 随着过硫酸钠投加量的不断增加, COD 去除率逐渐提高, 当过硫酸钠投加量增加到 6 g/L 时, COD 去除率达到 47.7%, 而当投加量大于 6g/L 后, 有机物降解效果趋于平缓。当过硫酸钠投加量从 6g/L 增加至 7.5 g/L 时, COD 去除率仅增加 0.2%。这是由于臭氧催化氧化产生大量 OH^\cdot , 使得废水中的 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 活化, 生成氧化性更强的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$, $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 与 OH^\cdot 协同降解变性淀粉废水中的难降解有机物, 大大提升了 COD 的去除效果。而过硫酸钠投加过多时, 产生的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 会相互淬灭^[9], 使得 COD 去除效果不再提高。所以, 综合考虑本实验过硫酸钠最佳投加量为 6g/L。

三、结论

1. 相较于单独臭氧催化与单独 SPS 处理, 臭氧/SPS 催化氧化法对变性淀粉废水有着更为有效的处理效果。臭氧在碱性条件下产生的大量 OH^\cdot 可以活化 SPS, 使其形成氧化

能力更强的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$, 两者协同处理变性淀粉废水效果更佳。

2. 臭氧/SPS 催化氧化法可有效去除变性淀粉废水中的难降解有机物, 在臭氧接触时间为 60 min、初始 pH 值为原水 pH 值、臭氧催化剂投加量为 30 g/L、过硫酸钠投加量为 6 g/L 的实验条件下, COD 去除率达到 48.7%。由此可见, 臭氧/SPS 催化氧化法在变性淀粉废水处理方面有较好的应用前景。

参考文献

- [1] L.Kaur, J.Singh, 'Starch: Modified Starches', in Encyclopedia of Food and Health, ed.by Benjamin Caballero, Paul M.Finglas and Fidel Toldr á (Oxford: Academic Press, 2016: 152-159.
- [2] Hasan, K S, et al. Vibratory shear enhanced membrane process and its application in starch wastewater recycle[J]. Songklan akarin Journal of Science and Technology, 2002, 24 (Suppl).
- [3] 杜福彦. 工业废水处理中芬顿工艺的应用[J]. 化学工程与装备, 2019, (1): 282-284.
- [4] 任斌, 金政伟, 李瑞龙等. 臭氧催化氧化降解煤化工高盐废水有机物研究[J]. 工业用水与废水, 2020, 51 (6): 29-32, 53.
- [5] 韩帅. 过硫酸盐高级氧化技术研究新进展[J]. 中国化工贸易, 2021, (20): 84-85.
- [6] 押玉荣, 陈金杰, 韩墨菲等. Mn-Al₂O₃/O₃ 催化氧化深度处理制药废水[J]. 中国给水排水, 2019, 35 (3): 106-110.
- [7] BOCZKAJ, GRZEGORZ, FERNANDES, ANDRE. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: A review[J]. Chemical engineering journal, 2017, 320: 608-633.
- [8] Hu E., Wu X., Shang S., et al. Catalytic ozonation of simulated textile dyeing wastewater using mesoporous carbon aerogel supported copper oxide catalyst [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112 (1): 4710-4718.
- [9] LI, B., LI, L., LIN, K., et al. Removal of 1, 1, 1-trichloroethane from aqueous solution by a sono-activated persulfate process[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2013, 20 (3): 855-863.

(上接第 46 页)

- [3] Somasundaram D., Mani A.. Experimental investigation of thermal performance of metal foam wicked flat heat pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, (82).
- [4] Ng E.C.J., Chen K.T., Wang X. Anomalous enhanced thermal performance of carbon-nanotubes coated micro heat pipe[J]. Energy, 2014, (214).
- [5] Chen Y.J., Wang P.Y., Liu Z.H.. Heat transfer characteristics of a new type of copper wire-bonded flat heat pipe using nanofluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, (12): 548-559.

- [6] Naphon P., Wiriyaart P, S., Study on the vapor chamber with refrigerant R-141b as working fluid for HDD cooling[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, (9): 1449-1452.
- [7] Li Q.F., Lan Z., Chun J.. Fabrication and capillary characterization of multi-scale micro-grooved wicks with sintered copper powder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021 (121).
- [8] Luo L.Z., Huang B., Bai X.Y.. Temperature uniformity improvement of a proton exchange membrane fuel cell stack with ultra-thin vapor chambers[J]. Applied Energy, 2020, (270).