

轴流风扇冲击射流下泡沫铝热沉的换热特性

邝九杰^{1,2}, 隋丹^{1,2}, 金东范¹, 卢天健¹, 徐明龙¹

(1. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对电子元器件的冷却问题, 实验研究了孔隙率为 0.92、孔密度不同的 3 种通孔泡沫铝热沉在轴流风扇冲击射流下的换热特性. 测量了表征热沉整体换热性能的热阻、表面温差等参数, 并与传统翅片式热沉的相应结果进行了比较分析. 结果表明: 泡沫铝热沉能使加热模块表面温度的分布明显变得均匀, 更有利于延长电子元器件的使用寿命, 而且泡沫铝热沉可在保持整体换热性能与翅片式热沉相当的条件下, 使散热装置的体积和质量均减少约 50%. 此外, 结果也显示出泡沫铝热沉在电子元器件冷却应用上有进一步优化的潜质.

关键词: 泡沫铝热沉; 电子元器件冷却; 轴流风扇; 冲击射流冷却

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0006-05

Open-Celled Aluminum Foam Heat Sinks for Electronics Cooling with Axial Fan Impinging Flow

KUANG Jiuji^{1,2}, SUI Dan^{1,2}, KIM Tongbeum¹, LU Tianjian¹, XU Minglong¹

(1. MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The heat transfer performance of open-celled aluminum foam heat sinks under axial fan impinging cooling flow is experimentally studied. Three open-celled aluminum foam samples with different pore sizes and identical porosity ($\epsilon=0.92$) were tested. The overall thermal resistance and temperature difference on the base plate of the heat sink were measured and compared with those of the conventional plain-fin heat sink. The results obtained show that, with only 50% of the total volume and weight of the conventional fin heat sink, the aluminum foam heat sink can achieve a similar cooling performance and more uniform temperature distribution on the heated base plate. The aluminum foam heat sink has further potential for optimization in terms of foam thickness, pore density and porosity, leading to a further enhancement of its overall heat dissipation performance under axial fan impinging cooling for power electronics.

Keywords: aluminum foam heat sink; electronic cooling; axial flow fan; impingement cooling

在各种散热装置中, 将传统翅片作为扩展表面的热沉与轴流风扇结合, 由于其较低的制造成本和相对可靠的换热性能, 在电子元器件的冷却中应用广泛, 如在中央处理器(CPU)冷却中的应用^[1-2]. 但是, 随着电子元器件越来越趋向高性能、高密集度发展, 相伴随的 CPU 散热量也在以每 3 年翻一番的速

度增长, 从而也导致传统翅片式热沉的体积及质量都在不断地成倍增加. 如何设计出具有高散热性能、小体积、轻质量的新型散热器, 从而满足人们对高性能电子产品的不断需求, 是一项挑战.

近年来, 包括泡沫和点阵材料的超轻金属材料, 由于其独特的综合性能, 已发展成为很有前景的散

热、承载、吸波等多功能材料。与翅片式热沉相比,金属泡沫热沉具有更高的比表面积,可达到 $2\,000\sim 10\,000\text{ m}^{-1}$,而前者只有 $300\sim 600\text{ m}^{-1}$;以高导热率材料(如铝、铜等)构建的三维网状结构,能够快速将热量传递到冷却工质中,从而达到强化换热的效果;此外,金属泡沫内部的不规则流道可进一步增强冲击气流的扰动,达到强化换热的效果。

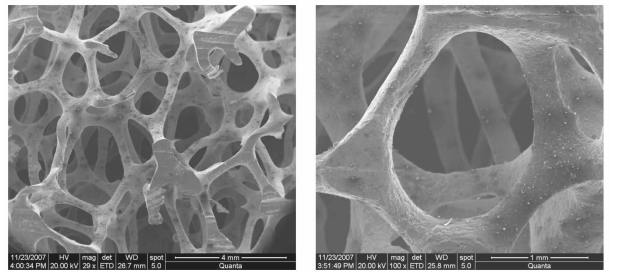
现有文献多针对泡沫金属在管槽流^[3-4]和圆管射流冲击下^[5-9]的换热行为开展研究。在管槽流中,铝泡沫的换热性能与传统的翅片式热沉相比可提高 28% 甚至更高^[3-4]。此外,Shih 等^[6]、Kim 等^[7]和 Jeng 等^[8-9]分别开展了圆管冲击射流下泡沫铝热沉换热行为的实验研究,重点考虑了孔密度、泡沫厚度、喷射间距和雷诺数对泡沫铝热沉换热性能的影响。然而,在实际应用中,多采用轴流风扇提供旋转射流来冷却电子元器件,而风扇的周期旋转使其外流场具有相当复杂的流动结构。隋丹等^[10-11]研究了轴流风扇冲击平板的流场和散热情况,发现轴流风扇产生的旋转射流与常规的射流存在很大差别:① 位于风扇中心处的电机占据整个流通面积的 25%,致使风扇气流的直接冲击点远离平板中心部位,从而严重影响了风扇轮毂下部(即 CPU 所在位置)的冲击冷却效果;② 与常规射流产生的稳定气流相比,轴流风扇的旋转叶片所产生的气流更加不稳定且具有周期性;③ 常规射流中存在势流核心区,在短距离射流中,该区域对喷射面的换热效果有很大影响,而在轴流风扇冲击射流中不存在势流核心区。因此,有必要在轴流风扇产生的旋转射流冲击情况下,对金属泡沫、翅片等热沉的散热效果进行具体研究。目前,有关这方面的实验和理论研究,国内外尚未见公开文献发表。本文将泡沫铝热沉与轴流风扇提供的旋转射流结合,实验研究具有不同孔密度泡沫铝热沉的整体和局部换热特性,并与传统的翅片式热沉的相关结果进行比较分析。

1 实 验

1.1 泡沫铝热沉

实验测试了 3 个宏观尺寸和孔隙率 ϵ 相同、孔密度 β 不同的通孔泡沫铝试件。所用试件为美国 ERG 公司生产的 Duocel 通孔泡沫铝样品,材料为 6101 型铝合金。由于样品尺寸限制,实验测量的泡沫铝尺寸为 $85\text{ mm}\times 35\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,分别采用镍焊焊接在 3 mm 厚的相同材质的铝合金基板上。表 1 列出了试样的几何参数,其中孔径、棱径和 β 由材

料的扫描电镜(SEM)图像得到。图 1 所示为试样 P-2 的 SEM 图像,展示了围绕网状杆结构的高度曲折的三维流道。同时,实验测量了奔腾 4 CPU 上常用的一款翅片式热沉(DeepcoolTM)的换热性能,并与泡沫铝热沉的性能进行了比较。



(a)整体孔结构 $\times 29$ (b)局部孔结构 $\times 100$

图 1 多孔材料的扫描电镜照片

表 1 通孔泡沫铝试样的几何参数

样品	相对密度	ϵ	孔径/ mm	β / m^{-1}	棱径/ mm
P-1	0.087	0.913	3.0	335	0.40
P-2	0.088	0.912	2.3	435	0.32
P-3	0.077	0.923	1.8	550	0.25

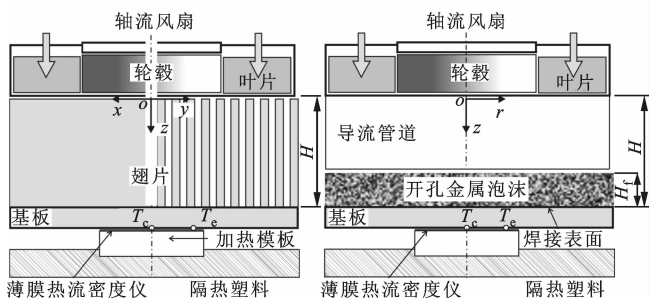
1.2 实验装置

图 2 给出了实验测试系统的示意图,主要包括提供旋转射流的轴流风扇,具有不同扩展表面的散热器(翅片(图 2a)和泡沫铝(图 2b))和用来模拟 CPU 模块的加热装置。采用常规的用于 CPU 冷却的商用风扇,由直流电源带动,在电源输入为 12 V 的情况下,轴流风扇的转速为 $2\,520\text{ r/min}$ 。采用尺寸为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的加热模块来模拟 CPU 散热,如图 2 所示。采用薄膜热电偶测量加热模块的表面温度(一方面有利于测量的准确性,另一方面可减少由热电偶厚度引入的接触热阻);采用置于热源和热沉之间的热流密度传感膜测量通过基板的平均热流密度 q'' 。为了减少接触热阻,采用导热系数为 $3.1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的硅脂来连接加热模块和热沉。在距离风扇出口上游 $3D(D$ 为轴流风扇直径)处放置 T 型热电偶以测量风扇入口温度(本文选为环境温度 T_a),并采用采集频率为 10 Hz 的温度采集仪(IQtechTM)将数据导入 PC 电脑进行温度读取。

为了评估热沉换热特性,将整体热阻 R_θ 定义为

$$R_\theta = (T_c - T_a)/Q_{\text{net}} \tag{1}$$

$$Q_{\text{net}} = q'' A \tag{2}$$



(a)轴流风扇冲击翅片热沉 (b)轴流风扇冲击泡沫铝热沉

图2 实验测试系统示意图

式中: Q_{net} 为通过热沉基板的净热流量(W),由薄膜热流密度仪测量得到; T_c 为加热模块表面中心处的温度; A 为加热模块与基板的接触面积。

为了进一步测量热沉表面温度分布在射流冲击冷却下的不均匀性,实验测量了加热模块中心处和边缘处的温度差

$$\Delta T = T_c - T_e \quad (3)$$

式中: T_e 为加热模块边缘处的温度值,其具体测量位置见图2。

本文采用 Coleman 等^[12] 给出的评估方法对实验测量参数进行了误差评估。实验中直接测量的参数有 T 、 q'' 和 A , 其中测量 T 所用热电偶的误差控制在 0.2°C 以内, 测量过程中温差的不确定度约为 0.6% 。当 q'' 为 $(3\,730 \pm 40) \text{ W/m}^2$ 时, 其不确定度为 1.0% 。由于多次精确测量, A 的误差可以忽略不计, 则方程(1)定义的热阻的不确定度为 5.6% 。需要指出的是, 此处只考虑了随机误差, 分析认为系统误差通过仔细测量可达到最小。

2 实验数据与分析

为了分析泡沫铝热沉的换热特性, 实验测量了其总体换热热阻、基板温差分布等参数, 并把结果与传统翅片热沉的相关实验结果进行了比较。

2.1 总体换热性能

将泡沫铝应用于换热主要是因为其内部棱边和孔隙组成的三维通道能促进流体混合和内部热扩散, 且能大幅提高换热比表面积, 但其压降也随之明显增加, 因此有必要将泡沫铝热沉的换热行为与其他的紧凑型热沉进行比较。

给定喷射间距 $H/D = 0.5$ 和风扇转速 $N = 2\,520 \text{ r/min}$, 图3给出了3种不同孔密度的泡沫铝热沉的 R_0 随 q'' 的变化关系, 并与翅片式热沉的相关实验数据进行比较。随着 q'' 不断增加, 热沉的整体热阻呈现上升趋势; 当 q'' 继续增加并超过 12 kW/m^2

时, 热阻逐渐趋于定值。因此, 本文在随后的研究中取 $q'' = 20 \text{ kW/m}^2$, 从而方便评测其他参数对热沉性能的影响。

从图3可知, 与翅片式热沉相比, 泡沫铝热沉换热性能没有显著的改善。这一结果似乎令人失望, 但也说明在同样的冷却条件下, 泡沫铝热沉比翅片式热沉具有更高的动量耗散。然而, 实验所用的泡沫铝厚度 (12.7 mm) 远低于翅片式热沉的厚度 (27 mm), 其质量也远小于后者。Mahdi 等^[13] 的实验结果表明, 在流动方向上增加泡沫的厚度可有效提高换热效果。例如, 高度为 25.4 mm 的泡沫铝比高度为 12.7 mm 的泡沫铝的换热效果提高将近 40% , 因此增加泡沫铝的厚度将会显著改善换热器的整体冷却效果。值得指出的是, 随着泡沫厚度的增加, 多孔材料的换热面积增加, 同时总流阻也增大。换热面积的增加有利于提高热沉换热性能, 而流阻的增大将增加泡沫内流体的动量耗散, 不利于换热性能的提高, 因此存在最优泡沫热沉厚度。当泡沫铝热沉采用最优厚度时, 其在轴流风扇冲击射流下的换热性能有望进一步提高, 我们将在后续的研究工作中对泡沫铝的最优厚度进行实验和理论研究。

设计一个综合性能好的散热器, 可通过以下两个方面实现: ①在散热器体积(和质量)、轴流风扇和噪声一定的情况下, 设计一个冷却性能更好的散热器; ②在轴流风扇、噪声要求和冷却性能一定的情况下, 设计一种更紧凑(轻且小)的散热器。本文主要考虑后者, 即相当的换热效果下, 如何设计并实现比传统的散热装置更轻巧的泡沫铝热沉。

隋丹等^[10] 针对轴流风扇冲击加热平板的实验研究表明, 减少喷射间距可以提高冲击平板的换热效果, 这与文献[6, 8]的结论一致, 因此我们推测, 既然轴流风扇与泡沫热沉之间还存在一定的空间(图2b), 减少喷射间距应该能够进一步提高实验所用泡沫铝热沉的换热效果。

图4给出了 $q'' = 20 \text{ kW/m}^2$ 和 $N = 2\,520 \text{ r/min}$ 时泡沫铝热沉的 R_0 与 H/D 之间的关系。从图中可知, 通过减小喷射间距, 泡沫铝热沉的热阻可减小到与翅片式热沉相当甚至更小的值。泡沫铝热沉试件 P-2 的总体热阻对喷射间距的变化尤为敏感, 当 H/D 缩至 0.18 时, 其热阻比传统翅片的热阻约减少了 7% 。需要特别指出的是, 相对于翅片式热沉, 泡沫铝热沉的总体积和总质量均减少了约 50% 。

通过改变冲击距离来研究对多孔材料热沉的冷却性能的影响, 发现随着冲击距离的缩短, 不同孔密

度的泡沫金属热沉的热阻逐渐降低,从而表明采用泡沫金属充当散热热沉不仅可以从冷却性能、热沉质量方面给予强化和改善,还可以减小散热装置的体积,从而迎合电子设备向高性能高集成度方向发展的要求.此外,还可以在本文研究基础上对泡沫金属热沉进行整体结构及材质等方面进行优化设计,从而达到最佳的散热效果.

为了分析泡沫孔密度对热沉热阻的影响,从图 4 中取相应的数据,得到如图 5 所示的泡沫孔密度与热沉热阻之间的变化关系.从图中可知,在 $H/D=0.5, 0.18$ 时,孔密度对泡沫铝热沉的换热效果有一定的影响,孔密度为 435 m^{-1} 的泡沫铝热沉具有相对较好的冷却效果.这种现象可以解释如下:随着泡沫铝材料孔密度的增加,泡沫铝的比表面积增大,流阻也相应增大.比表面积的提高有利于热量散失,从而提高热沉的换热性能,因此孔密度为 435 m^{-1} 的泡沫铝热沉的热阻较孔密度为 335 m^{-1} 的热沉小.但是,随着孔密度的进一步增大,泡沫铝材料内流体动量耗散增加,从而弱化换热.当流阻的影响超过比表面积的增加所带来的影响时,换热性能随着孔密度的增加反而减小,因此孔密度为 550 m^{-1} 时泡沫铝的热阻比孔密度为 435 m^{-1} 的热沉大.与存在最优厚度一样,泡沫铝热沉同样存在最优的孔密度,使得换热效果达到最佳.

2.2 表面温度分布

实验测量了加热模块在中心处和边缘处两个不同位置的温度 T_c 和 T_e (图 2),以分析散热不均匀导致的加热模块表面温度分布的不均匀.除了影响电子元器件的可靠度,温度分布的不均匀将导致电子元器件内的热变形和热应力.

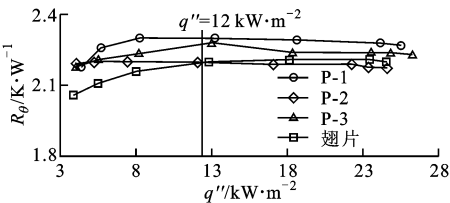


图 3 R_θ 与 q'' 的变化关系

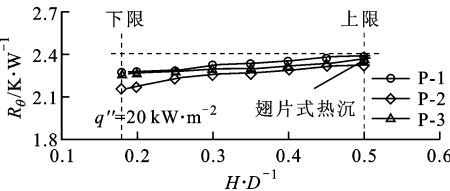


图 4 H/D 对 R_θ 的影响

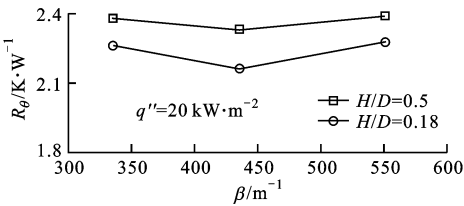


图 5 β 对 R_θ 的影响

图 6 给出了 $H/D=0.5$ 和 $N=2\ 520\text{ r/min}$ 时泡沫铝热沉和翅片式热沉中加热模块表面温差随热流密度变化的关系.由图可知,在轴流风扇的冲击射流下,随着加热块所释放热量的增加,其表面温差逐渐增大,温度均匀性逐渐恶化.但是,比较翅片式热沉与泡沫铝热沉,发现后者的加热块表面温差远小于前者.这归因于金属泡沫内部的三维网络结构可以扩散更多的热量且有利于流体的混合扰动,特别是在风扇电机下部,使用泡沫铝热沉更有利于提高该区域(CPU 所在位置)的冷却效果,减少加热块表面温度分布的不均匀性,从而提高电子元器件的可靠性和使用寿命.

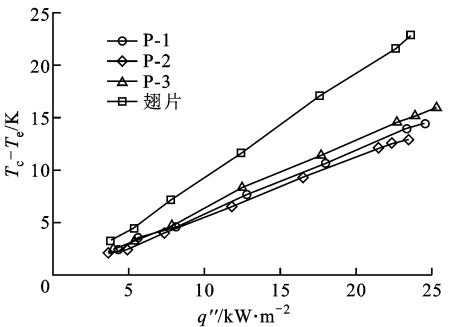


图 6 加热模块表面温差与 q'' 的关系

3 结 论

在轴流风扇冲击射流下,实验分析了高孔隙率通孔泡沫铝热沉的散热性能,并将结果与传统的翅片式热沉进行了比较,所得结论如下.

(1) 给定 $H/D=0.5$ 和泡沫高度为 12.7 mm 时,泡沫铝热沉的总体散热效果与翅片式热沉相当,泡沫铝热沉的散热性能主要取决于其拓扑结构.

(2) 与传统翅片式热沉相比,在保持整体换热性能相当的前提下,可通过减小喷射间距使得泡沫铝热沉的总体积和总质量都减少约 50% .

(3) 与传统翅片式热沉相比,泡沫铝热沉独特的三维网状结构可使加热模块表面的温度分布更均匀,从而提高电子元器件的可靠性和使用寿命.

参考文献:

- [1] CHU R C, SIMONS R E, ELLSWORTH M J, et al. Review of cooling technologies for computer products [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2004, 4(4): 568-585.
- [2] SAINI M, WEBB R L. Heat rejection limits of air cooled plane fin heat sinks for computer cooling[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(1): 71-79.
- [3] KIM S Y, PAEK J W, KANG B H. Thermal performance of aluminum-foam heat sinks by forced air cooling[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(1): 262-267.
- [4] KIM S Y, KANG B H, KIM J H. Forced convection from aluminum foam materials in an asymmetrically heated channel[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44: 1451-1454.
- [5] HSIEH W H, WU J Y, SHIH W H, et al. Experimental investigation of heat-transfer characteristics of aluminum-foam heat sinks[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2004, 47: 5149-5157.
- [6] SHIH W H, CHIU W C, HSIEH W H. Height effect on heat-transfer characteristics of aluminum-foam heat sinks [J]. J Heat Transfer, 2006, 128: 530-537.
- [7] KIM S Y, LEE M H, LEE K S. Heat removal by aluminum-foam heat sinks in a multi-air jet impingement [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(1): 142-148.
- [8] JENG T M, TZENG S C. Forced convection of metallic foam heat sink under laminar slot jet confined by parallel wall[J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(5): 484-495.
- [9] JENG T M, TZENG S C, LIU T C. Heat transfer behavior in a rotating aluminum foam heat sink with a circular impinging jet[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2008, 51: 1205-1215.
- [10] SUI D, KIM T, XU M L, et al. Flow and heat transfer characteristics of impinging axial fan flows on a uniformly heated flat plate[J]. Int J of Transport Phenomena, 2008, 10(4): 353-363.
- [11] SUI D, KIM T, WANG S S, et al. Exit flow behavior of axial fan flows with/without impingement [J]. ASME J Fluids Eng, 2009, 131(6): 061103.
- [12] COLEMAN H W, STEELE W G. Experimentation and uncertainty analysis for engineers[M]. 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [13] MAHDI H, LOPEZ J P, FLUENTES A, et al. Thermal performance of aluminum-foam CPU heat exchangers[J]. Int J Energy RES, 2006, 30: 851-860.

(编辑 荆树蓉)