

点阵结构散热特性及其轻量化评价

胡建军^{1,2,*}, 窦若尘², 张欣¹, 姚静², 孔祥东²

(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 秦皇岛 066044; 2. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066044)

摘 要: 航空电静液驱动执行器(EHA)作为航空舵面控制的核心部件,对高功重比的追求要求对其部件进行高效散热与轻量化综合设计。基于此,通过实验方法对4种典型轻量化点阵结构的散热特性进行研究,得到了不同点阵散热模块的温度分布特性,为点阵结构散热与轻量化性能评价提供可靠数据。针对点阵结构散热特性,提出点阵结构散热轻量化系数评价指标,用以定量评估不同散热点阵结构的轻量化特性。根据构建的评价指标对4种点阵结构进行评价,结果表明:OT点阵结构散热性能与轻量化综合特性最优。与翅片结构相比,OT点阵结构散热系数为翅片的1.2倍,但其散热轻量化系数仅约为翅片的1/3。研究结果为综合考虑散热和轻量化要求的点阵结构筛选提供了参考。

关 键 词: 点阵结构; 散热; 轻量化; 实验研究; 评价

中图分类号: TH122; TK124

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)10-3299-08

航空电静液驱动执行器(electro-hydrostatic actuator, EHA)将机械、电气、液压、测试和控制等高度集成,作为未来大型客机和先进战机飞行舵面控制的核心部件,是实现其智能驱动的关键,高功重比是衡量航空EHA的关键技术指标之一^[1-6]。因此,亟需探讨航空EHA轻量化设计及制造新原理、新方法和新技术。同时,航空EHA工作于高压、高速、高频、重载工况,易引起系统温度升高,造成航空EHA动态性能恶化、可靠性降低、寿命缩短。因此,研究高效散热结构也成为亟需解决的关键问题。

三维点阵结构因具有轻质和散热优^[7-10]等功能特性一直受到广泛的关注。针对点阵结构散热性能, Khaderi等^[11]对Gyroid点阵进行了等截面模型简化,并计算了其等效导热系数; Shen等^[12]通过数值模拟表明,用点阵结构代替传统的翅片,具有更好的散热能力和相似的压降; Son等^[13]对增材制造(additive manufacturing, AM)制作的四面体晶格通道进行了实验和数值研究,通过对摩擦系数和努塞

尔数的实验测量,验证了该方法的有效性,并研究了孔隙度对性能的影响; Liang等^[14]通过实验对体心立方(body-centered cubic, BCC)点阵结构和Kagome点阵结构的流体与端壁之间的传热进行了分析,实验结果证明了这2种点阵结构的端壁换热性能优于针形翅片结构; Takezawa^[15]和 Vaissier^[16]等分别通过理论推导出点阵具有高效各向同性导热系数的最佳点阵结构胞元和一种最大化点阵结构比表面积设计方法,以此提高点阵结构散热性能。

此外,针对点阵结构的轻量化特性, Cheng^[17]和张龙^[18]等均采用拓扑优化方法对点阵结构进行轻量化设计; Valdevit等^[19]基于力学和导热性能对多种点阵结构进行优化设计,得到六边形结构的综合性能最优; Moon等^[20]以承载能力和轻量化为目标,对比了Kagome、金字塔和钻石型点阵,指出Kagome型点阵性能最优,并将其应用在无人机机翼; Xu等^[21]以轻量化和提高隔音性能为目标,采用遗传算法对金字塔点阵进行了优化,并研究了材

收稿日期: 2023-09-06; 录用日期: 2024-02-23; 网络出版时间: 2024-04-04 07:23

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240403.0916.001

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51890881); 河北省自然科学基金(2020203028); 中央引导地方科技发展资金项目(226Z1902G)

*通信作者. E-mail: kewei729@163.com

引用格式: 胡建军, 窦若尘, 张欣, 等. 点阵结构散热特性及其轻量化评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(10): 3299-3306.

HU J J, DOU R C, ZHANG X, et al. Heat dissipation characteristics and lightweight evaluation of lattice structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(10): 3299-3306 (in Chinese).

料、上下面板厚度对性能的影响。

综上所述,目前基于简单点阵结构的散热理论分析与点阵结构设计较多,但将点阵结构散热性能与轻量化特性相结合,并对轻量化特性量化分析的研究很少。因此,本文通过实验对几种点阵结构的散热性能进行探究,并提出散热轻量化系数为点阵结构的筛选与应用提供理论依据。

1 点阵设计及加工

1.1 点阵结构设计

三维点阵结构的几何特征具有复杂性,其几何特征可由杆径、胞元长度、胞元宽度、胞元高度及杆件倾角表示。本文重点研究图 1 所示的 4 种典型正六面体空间内由若干杆与节点组成的点阵结构,故其几何特征主要为杆径与胞元长度。

点阵散热结构建模方法分为基本单元法和拓扑优化法,采用基本单元法对以上 4 种点阵胞元进行建模。如图 2 所示,以立方体点阵散热模块模型为例,模型由若干点阵胞元和基板 2 部分组成,为排除边界散热的影响,基板尺寸选为 100 mm×100 mm×2 mm。

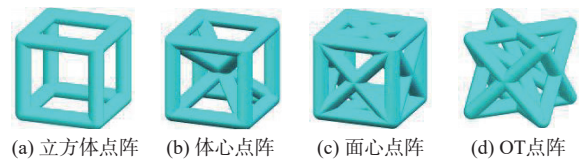


图 1 4 种正六面体点阵胞元
Fig. 1 Four kinds of regular hexahedral lattice cells

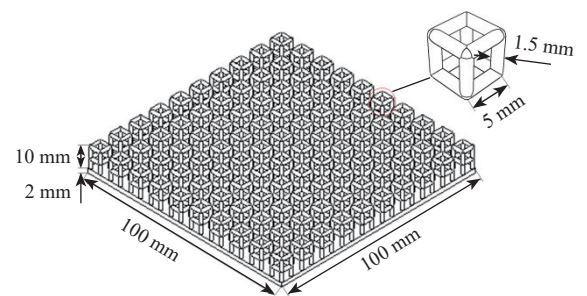


图 2 立方体点阵散热模块模型
Fig. 2 Cube lattice heat dissipation module model

为比较点阵结构与传统翅片结构的散热性能,增加了翅片结构散热作为实验对照组。翅片模型基板尺寸与点阵散热模块基板尺寸相同,翅片的尺寸参数取自现有 EHA 电机壳体翅片参数,高度为 10 mm,宽度为 3 mm,间距为 3 mm。

受限于 3D 打印工艺精度的约束,本文中点阵结构的最小杆径取 0.5 mm,其他参数参考翅片结构确定,同时,为避免点阵结构的孔隙率过小,调整点阵结构的胞元长度为 5 mm,点阵层数为 2 层,点阵

结构总高度为 10 mm。

1.2 3D 打印模型

实验所选材料为铝合金 AlSi10Mg,采用选区激光熔化工艺制造,其成形机理为:在金属粉床上,激光热源按照给定的扫描路径熔化特定区域的粉末材料,成形一层后工作台下降指定高度,同时铺置新的粉末,如此往复直到成形结束^[22]。4 种点阵散热模块及翅片散热模块的 3D 打印件如图 3 所示。

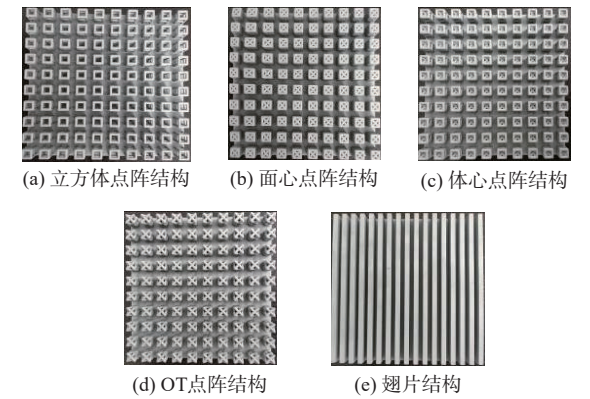


图 3 散热模块 3D 打印实物图
Fig. 3 3D printed physical drawing of heat dissipation structure

2 实验系统

实验系统由点阵结构散热性能实验装置及数据采集系统共同组成。

2.1 实验方案

为探究点阵结构的散热及轻量化性能,针对点阵胞元类型、点阵胞元杆径及出口风速对点阵散热模块散热性能影响进行实验研究。采用控制变量的方法,分别改变点阵类型、杆径及出口风速完成第 1~3 组实验,具体实验工况如表 1 所示。通过测量基板温度、加热板电压与电流等参数,得到散热系数、热阻等参数,进而得到点阵结构散热轻量化

表 1 点阵结构散热性能实验工况				
Table 1 Working condition of lattice structure heat dissipation characteristic experiment				
分组	出口风速/(m·s ⁻¹)	加热功率/W	杆径/mm	点阵类型
第1组	5	35	1.5	立方体点阵
	5	35	1.5	体心点阵
	5	35	1.5	面心点阵
	5	35	1.5	OT点阵
	5	35	3(翅厚)	翅片
第2组	5	35	0.5	OT点阵
	5	35	1	OT点阵
	5	35	1.5	OT点阵
第3组	1	35	1.5	OT点阵
	3	35	1.5	OT点阵
	5	35	1.5	OT点阵

化性能指标。

实验前对实验装置进行了密闭性测试和加热均匀性测试,测试结果表明装置满足实验要求。实验中,当温度波动小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持 200 s 后认为达到稳态,可以进行实验数据读取和分析。

2.2 实验装置

实验系统原理如图4所示,点阵结构散热性能实验系统如图5所示,其中,风机提供空气循环动力,通过调频装置对入口流量进行调节。加热板的加热功率通过调压器调节电压来实现,并通过万用表测量的电流和电压来计算加热功率。

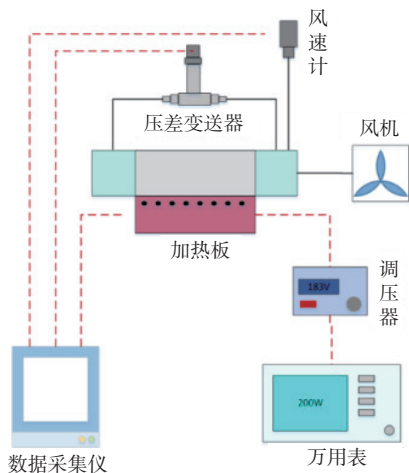
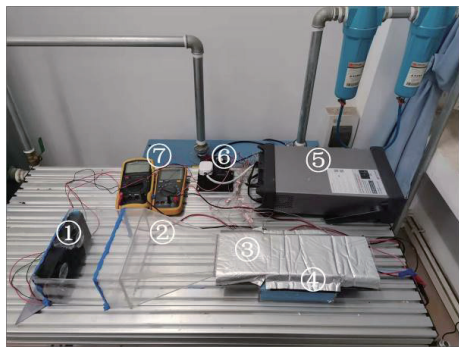


图4 点阵结构散热性能实验系统原理

Fig. 4 Schematic diagram of lattice structure heat dissipation characteristic experiment system

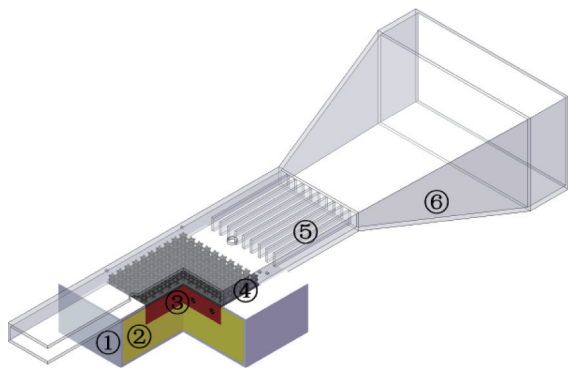


①. 风机; ②. 通风管道; ③. 保温棉; ④. 加热板壳体;
⑤. 安捷伦数据采集仪; ⑥. 调压器; ⑦. 万用表。

图5 点阵结构散热性能实验台

Fig. 5 Lattice structure heat dissipation characteristic experiment bench

图6为主要实验段内部结构示意图。轴流风机出口的流动比较复杂,为保证流量分配均匀,风机采用抽吸的方式提供动力。点阵基板与加热板上表面紧密相连,中间均匀涂抹一层1 mm厚度的导热硅脂(导热系数为 $2.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)。为保证加热组件产生的热量全部通过点阵结构散热性能结构,



①. 加热板壳体; ②. 泡沫保温板; ③. 加热板; ④. 点阵散热板;
⑤. 整流板; ⑥. 通风管道。

图 6 主要实验段结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of main experimental sections

设计加热板体积为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 20\text{ mm}$, 其周围除与散热结构接触的上表面均覆盖一层厚度为 30 mm 的高密度 XPS 挤塑板作为保温层, 在加热板周围布置一层厚度为 3 mm 的泡沫保温板, 同时, 在主要实验段的通风管道外包裹一层保温棉作为保温层, 减少热量损失。空气在进入通风管道后, 先进入由若干平行板组成的整流段, 使通过点阵散热模块的空气均匀稳定, 减少湍流度。

根据 EHA 散热需求换算,选取加热板功率为 25 W、35 W 和 45 W。

假设通风管道出口风速 v 为 $0 \sim 6 \text{ m/s}$, 已知出口矩形面积 S 为 $100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 则体积流量为

$$Q = Sv \quad (1)$$

由式(1)可得点阵结构散热性能实验所需流量为 $0 \sim 0.36 \text{ m}^3/\text{min}$ 。风机的额定功率应略有富余,因此,选择额定电压为 12 V 、额定电流为 1 A 的轴流风机,在预实验中,风机可保证提供实验所需的风速。

2.3 数据采集

图 7 为实验装置与数据采集系统之间的连接图, 其中, 测量仪器的型号及参数如表 2 所示。实验中, 采用 omage K 型热电偶测温。实验设置 12 个热电偶测点, 通过热电偶胶水将 omage K 型热电偶的测温端固定在点阵基板表面, 按 2 个正交方向布置, 反映点阵基板整体温度分布特征。其中, 测点 I 和 O 分别用于测量实验通风管道的进出口空气温度, 安装在进出口管中心位置。测点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 测量点阵基板沿风速方向温度, 将热电偶均匀安装点阵基板表面中线上。测量点 a 、 b 、 c 、 d 、 e 测量点阵基板垂直空气流动方向温度变化, 将热电偶均匀安装在点阵基板表面垂直于空气流动方向的中线上。

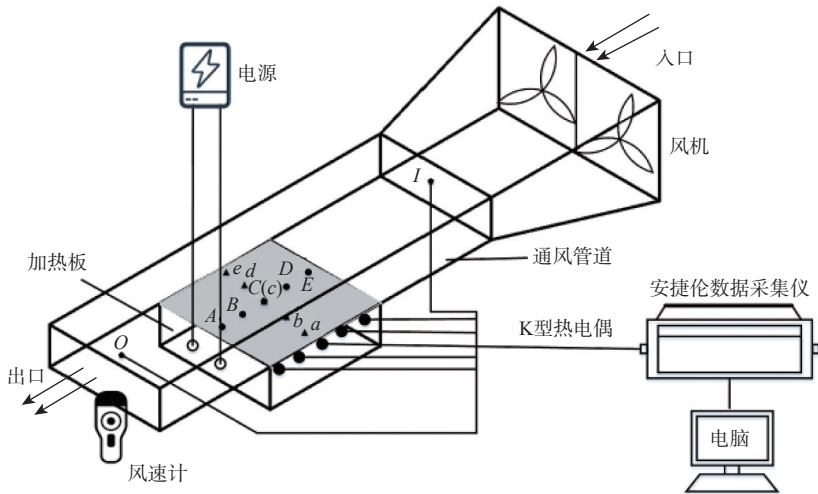


图 7 点阵结构散热性能实验数据采集系统

Fig. 7 Data acquisition system for lattice structure heat dissipation characteristic experiment

表 2 测量仪器型号及参数		
Table 2 Measuring instrument model and parameters		
设备	型号	参数
安捷伦数据采集仪	34972A	精度: 0.004%
欧米伽热线风速计	HHF-SD1	工作温度0~50 ℃; 分辨率: 0.1 ℃; 精度: 0.8 ℃
数字万用表	Fluke 101	精度: ±(1%+1)
热电偶	K-Type	测温范围: -200~260 ℃; 精度: 0.75%

加热板采用电加热方式, 加热功率通过分别测量加热板电流 I_t 与电压 U 检测, 实际加热板加热功率 P 的计算公式为

$$P = UI_t \quad (2)$$

温度信号由安捷伦数据采集仪实时采集, 采集时间间隔设定为 5 s。点阵散热模块的热阻 R 为点阵散热模块与周围环境的温差 ΔT 与加热板加热功率的比值, 其计算公式为

$$R = \Delta T / P \quad (3)$$

管道出口风速由风速计每 10 min 记录一次, 并在进口截面处多点测量取平均值。环境温度、加热板输出电压和电流用数字万用表每 10 min 记录一次。

2.4 误差分析

实验过程中存在不可避免的系统误差, 温度测量采用的 K 型热电偶精度为 0.75%, 风速误差小于 1%, 数字万用表误差小于 1%。安捷伦数据采集仪误差较小, 可忽略不计。因此, 可根据式(4)计算总误差 W_Y 为 1.6%。

$$W_Y = \left[\left(\frac{\partial Y_1}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_2}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial Y_n}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: Y 为实验中变量的变化范围; x_i 为变量的实际测量值; w_i 为测量仪器 i 的准确度等级。

3 结果与分析

3.1 点阵散热模块温度分布特性

以杆径为 1.5 mm 的 OT 点阵散热模块为例, 分析点阵散热模块总体温度分布特性。

为观察点阵散热模块底板温度随时间的瞬时变化情况, 绘制了加热功率为 35 W、风速为 5 m/s 时, 点阵散热模块基板各测温点温度随时间的变化情况, 如图 8 所示。随着加热板不断提供热量, 各点温度均不断升高, 最终达到稳定状态。可以看出, 测温点 1 温度最低, 测温点 5 温度最高且沿着空气流动方向, 相邻 2 个测温点间温差逐渐减小, 这是因为沿着空气流动方向点阵散热模块与空气的温差逐渐减小, 使得后方测温点位置的换热效果较差。

为反映点阵散热模块基板稳态温度的分布特点, 绘制了上述 OT 点阵结构散热性能实验各测温点稳态温度沿不同轴向的分布情况, 如图 9 所示。基板温度沿不同方向存在明显的分布差异性, 在空气流动方向上, 温度一直呈现上升并逐渐减缓的趋势, 这是由于流体与底板之间的换热温差沿此方向逐渐减小导致。在垂直于空气流动方向上, 温度沿

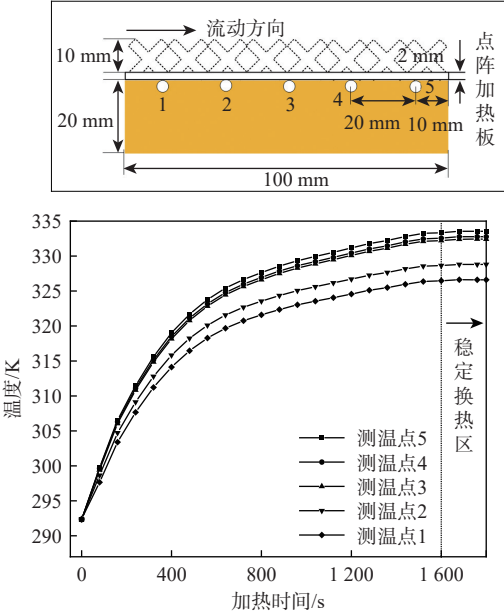


图 8 点阵底板温度随时间变化情况

Fig. 8 Temperature change of lattice bottom plate with time

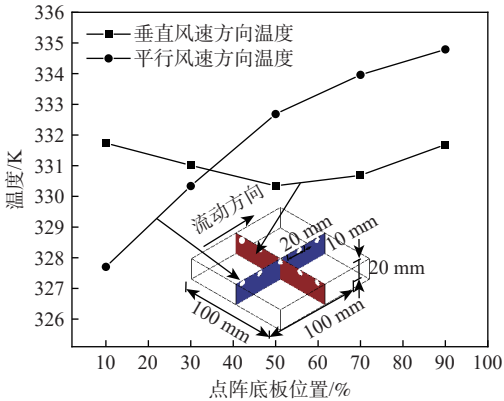


图 9 点阵底板不同方向稳态温度分布情况

Fig. 9 Steady state temperature distribution of lattice bottom plate in different directions

中心位置 (50% 处) 呈对称分布, 主要原因是流动在此方向也是对称的, 同时受边界因素影响, 点阵散热模块两边所处流道流速较低, 因此, 两边温度略高。对比 2 个方向的温度变化, 沿流动方向的温度变化差值约为 7.4 ℃, 沿垂直流动方向的温度变化差值约为 1.5 ℃。由此可知, 点阵散热模块在垂直于流动方向上具有良好的温度分布均匀性, 从而证明, 点阵散热模块大小选取合适, 可以部分排除边界散热影响。

3.2 点阵结构散热轻量化系数定义

本文中, 点阵结构与壳体为增材制造一体成形, 材质相同 (导热系数相同), 内部边界条件可视为恒定热流密度, 因此, 散热过程仅受点阵结构参数、外表面对流换热系数及环境温度影响。同时, 在温度不高的散热场合, 其热辐射可以忽略。因

此, 可推导其对流换热系数 k 为

$$k = \frac{A_z}{S_j \Delta T} \tag{5}$$

其中: A_z 为总散热功率; S_j 为点阵散热模块 (点阵或翅片及基板) 与流体接触的对流换热面积; ΔT 为散热达到稳定后, 点阵散热模块基板平均温度与空气平均温度的差值。

本文引入点阵结构散热, 希望增大散热面积强化散热, 同时还具备轻量化的优点。因此, 参照汽车轻量化指标设计思路^[23], 将汽车质量替换为点阵体积 (也可折算成质量), 将车身的扭转刚度替换为点阵表面对流换热系数, 将车身脚印面积替换为点阵结构与基板的接触面积, 构造出散热轻量化系数 L 如下:

$$L = \frac{V}{k S_d} \tag{6}$$

式中: V 为散热结构 (点阵或翅片) 总体积; S_d 为散热结构与基板的接触面积。

点阵结构散热轻量化系数可以综合评价点阵结构的散热性能与轻量化特性, 为点阵结构的选取提供依据。

3.3 点阵结构散热的轻量化评价

点阵散热模块的散热方式为强迫对流换热, 其中, 风速对换热效果有明显影响。为分析风速对点阵散热模块散热性能的影响, 图 10 给出 OT 点阵结构及翅片在加热功率为 35 W、出口风速分别为 1, 3, 5 m/s 条件下的热阻。图中: r 为点阵结构的杆件半径。可以看出, 点阵散热模块与翅片散热模块的热阻随风速增大而减小。在风速较小为 1 m/s 时, 翅片与点阵散热模块的热阻相近, 翅片略小于点阵结构, 热阻差值约为 0.1 K/W。而随着风速的增大, 点阵散热模块热阻逐渐小于翅片的热阻, 差值增大至约 0.35 K/W。这是因为随着风速的增大, 对流换热能力也随之增强, 点阵结构的特殊空隙形状增大

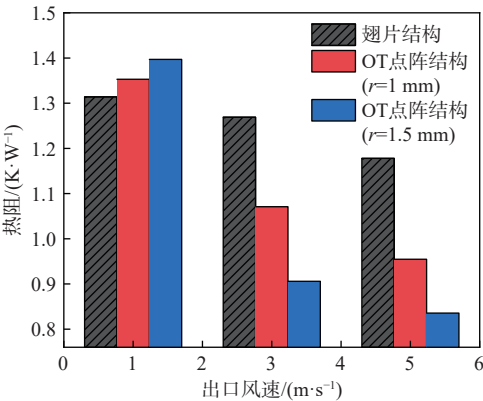


图 10 热阻随风速变化情况

Fig. 10 Thermal resistance changes with wind speed

了当量散热面积,同时,点阵杆柱对空气流动存在扰动,从而进一步强化散热,因此,随着风速的增加,点阵散热模块热阻减小更明显。对于不同杆径的 OT 点阵散热模块,杆径为 1.5 mm 的点阵散热模块散热面积远大于杆径为 1 mm 的点阵散热模块,故其散热热阻也更小。

杆径作为点阵结构的重要参数之一,其大小决定了点阵结构的孔隙率。孔隙率可定义为点阵结构中孔隙的体积与点阵结构所占包络体积的比值。本文中,散热结构(点阵和翅片)所占包络体积取为相同,则孔隙率与散热结构实际体积呈负相关关系,即在散热轻量化系数 L 指标中隐含了孔隙率因素,体积越小,孔隙率越大。在加热功率为 35 W、出口风速为 5 m/s 的条件下,对点阵胞元大小为 5 mm、杆径分别为 0.5,1,1.5 mm 的 OT 点阵散热模块进行实验研究,结果如图 11 所示。可以看出,点阵散热模块的散热系数和散热轻量化系数都随杆径的增大而增大,但增幅变化却不相同。散热系数增幅由 61.5% 减小为 3.3%,散热轻量化系数增幅由 18.6% 增大为 40%,这是因为随着杆径的增大,改变的点阵散热模块的散热性能影响参数包括散热面积和孔隙率。其中,散热面积随杆径增大而增大,故对点阵散热模块散热效果起正向作用。点阵结构孔隙率随着杆径增大逐渐减小,孔隙率的减小会导致空气的渗透率变低,从而降低点阵散热模块的对流换热效果,故对点阵散热模块散热效果起负向作用。综上所述,当杆径过小时,点阵结构较轻,但其散热性能较差。反之,当杆径过大时,散热性能虽然增强,但其整体质量又过大,点阵结构杆径的选取受散热面积和孔隙率的双重影响。以上分析表明,利用散热轻量化系数可以为杆径的选取提供理论依据。

图 12 给出了不同类型点阵结构的散热系数与

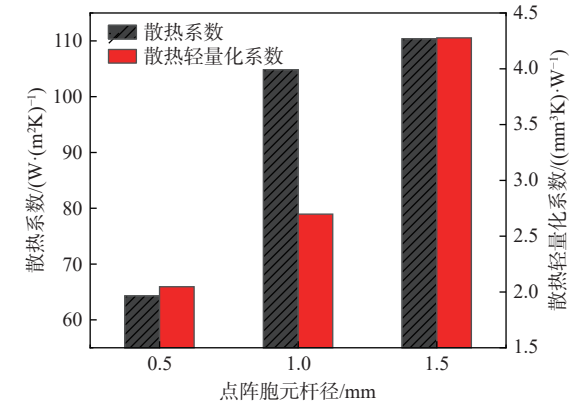


图 11 点阵结构散热性能及轻量化特性随杆径变化
Fig. 11 Heat dissipation performance and lightweight characteristics of lattice structure change with rod diameter

散热轻量化系数。可以看出,在 5 种散热结构中,按散热系数比较为: OT 点阵结构>体心点阵结构>翅片结构>立方体点阵结构>面心点阵结构。究其原因: OT 点阵结构相较于翅片结构增大了散热面积,同时由于其杆柱搭建的空隙的存在,增强了空气扰动,OT 点阵结构相较于翅片结构散热能力更强,OT 点阵结构散热模块散热系数为翅片的 1.2 倍。面心点阵结构散热系数小于翅片结构的原因在于:面心点阵结构杆柱的分布导致空气渗透率相较于其他点阵结构更低,散热效果相对较差。而对于立方体点阵结构,其杆柱与加热板的接触面积较小,且相较于其他点阵结构散热面积较小,导致其散热效果较差。按散热轻量化系数比较,OT 点阵结构<立方体点阵结构<体心点阵结构<面心点阵结构<翅片结构。可以看出,4 种点阵结构平均散热轻量化系数相较于翅片结构可减小 61%,且在几种点阵结构中,OT 点阵结构散热轻量化系数最小,仅约为翅片结构散热轻量化系数的 1/3。综上所述,OT 点阵结构具有最大散热系数 110 W/(m²K)及最小的散热轻量化系数 $4.2\times10^{-6} m^3K/W$,其是在本文研究的几种点阵结构中,综合考虑散热能力及轻量化条件下的最优结构。

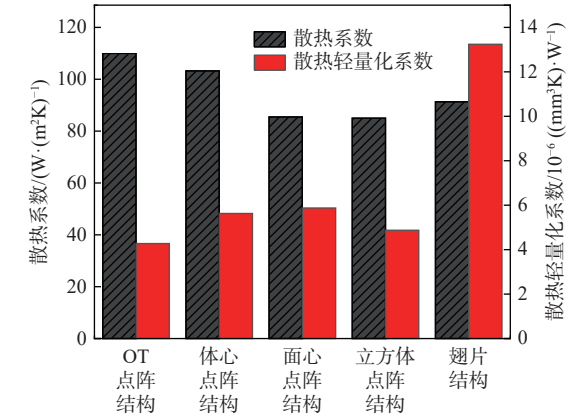


图 12 不同类型点阵结构散热性能及轻量化特性

Fig. 12 Heat dissipation performance and lightweight characteristics of different types of lattice structure

4 结 论

本文采用实验研究了轻量化点阵结构的散热性能,比较点阵结构散热性能随参数变化情况及其轻量化特性。

1) 得到点阵散热模块底板的温度分布特性,其温度在各个方向分布情况与经验相符,为后续研究的可靠性提供依据。

2) 研究表明,点阵结构相较于翅片散热性能受风速影响更为显著,增大风速时,点阵结构散热性能有明显提升,在具有高风速的对流换热工况下,

更适合应用点阵结构。

3) 提出散热轻量化系数, 并对各类型点阵结构散热轻量化性能进行量化评价, 结果表明, OT 点阵结构作为最优散热结构, 其散热系数为翅片结构的 1.2 倍, 散热轻量化系数为翅片结构的 1/3。

4) 研究表明, 轻量化点阵结构的散热性能受散热面积和孔隙率的双重影响, 依据散热轻量化系数对点阵杆径的选取要综合考虑 2 个因素, 根据具体需求选出合适的杆径大小。

参考文献 (References)

[1] 许巍, 赵俊伟, 袁本立, 等. 飞行器热防护与利用一体化系统实验与模拟[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 555-563.

XU W, ZHAO J W, YUAN B L, et al. Experiment and simulation on aircraft thermal protection and utilization integrated system[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 555-563(in Chinese).

[2] 朱喜华, 李颖晖, 刘聪, 等. 基于自适应核主元分析的 EHA 系统传感器故障检测[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 838-845.

ZHU X H, LI Y H, LIU C, et al. Sensor fault detection for EHA system based on adaptive kernel principal component analysis[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(6): 838-845(in Chinese).

[3] 李永欣, 郭长春, 李凯伦, 等. SLM 制备的小长径比四棱锥点阵填充轻量化研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(24): 132-138.

LI Y X, GUO C C, LI K L, et al. Filling lightweight research on pyramid lattice with small slenderness ratio fabricated by SLM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(24): 132-138(in Chinese).

[4] 王伟, 袁雷, 王晓巍. 飞机增材制造制件的宏观结构轻量化分析[J]. 飞机设计, 2015, 35(3): 24-28.

WANG W, YUAN L, WANG X W. Macro-structural lightweight analysis for aircraft parts made by additive manufacturing technology[J]. Aircraft Design, 2015, 35(3): 24-28(in Chinese).

[5] LIAN W L, NIU W J, LIN L J. A passive cooling design for an aircraft electromechanical actuator by using heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 116248.

[6] OENLER C D. Fluid flow and heat transfer simulation of an electro hydraulic actuator[D]. Delft: Delft University of Technology, 2016.

[7] 白晓辉, 刘存良, 孟宪龙, 等. 八面体桁架结构在内冷通道中的流动传热特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 286-295.

BAI X H, LIU C L, MENG X L, et al. Flow and heat transfer characteristics of octet truss structure in internal cooling channel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7): 286-295(in Chinese).

[8] 邓昊宇, 王春洁. 三维点阵结构等效热分析与优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(6): 1122-1128.

DENG H Y, WANG C J. Equivalent thermal analysis and optimization method for three-dimensional lattice structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(6): 1122-1128(in Chinese).

[9] EKADE P, KRISHNAN S. Fluid flow and heat transfer characteristics of octet truss lattice geometry[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 137: 253-261.

[10] 易长炎, 柏龙, 陈晓红, 等. 金属三维点阵结构拓扑构型研究及应

用现状综述[J]. 功能材料, 2017, 48(10): 10055-10065.

YI C Y, BAI L, CHEN X H, et al. Review on the metal three-dimensional lattice topology configurations research and application status[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(10): 10055-10065(in Chinese).

[11] KHADERI S N, DESHPANDE V S, FLECK N A. The stiffness and strength of the gyroid lattice[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(23-24): 3866-3877.

[12] SHEN B B, LI Y, YAN H B, et al. Heat transfer enhancement of wedge-shaped channels by replacing pin fins with Kagome lattice structures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 88-101.

[13] SON K N, WEIBEL J A, KUMARESAN V, et al. Design of multi-functional lattice-frame materials for compact heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 619-629.

[14] LIANG D, CHEN W, JU Y C, et al. Comparing endwall heat transfer among staggered pin fin, Kagome and body centered cubic arrays[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 185: 116306.

[15] TAKEZAWA A, KOBASHI M, KOIZUMI Y, et al. Porous metal produced by selective laser melting with effective isotropic thermal conductivity close to the Hashin-Shtrikman bound[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 564-572.

[16] VAISSIER B, PERNOT J P, CHOUGRANI L, et al. Parametric design of graded truss lattice structures for enhanced thermal dissipation[J]. Computer-Aided Design, 2019, 115: 1-12.

[17] CHENG L, LIU J K, LIANG X, et al. Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 332: 408-439.

[18] 张龙, 李昂, 赵云鹏, 等. 一种全封闭蒙皮点阵支撑结构的优化设计与试验验证[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 35-42.

ZHANG L, LI A, ZHAO Y P, et al. Optimal design and experimental verification of an enclosed skin lattice support structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 35-42(in Chinese).

[19] VALDEVIT L, HUTCHINSON J W, EVANS A G. Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(18-19): 5105-5124.

[20] MOON S K, TAN Y E, HWANG J, et al. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2014, 1(3): 223-228.

[21] XU X, JIANG Y, LEE H P. Engineering optimization multi-objective optimal design of sandwich panels using a genetic algorithm multi-objective optimal design of sandwich panels using a genetic algorithm[J]. Engineering Optimization, 2017, 49(10): 1665-1684.

[22] 侯伟, 陈静, 储松林, 等. 选区激光熔化成形 $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ 组织与拉伸性能的各向异性研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 67-77.

HOU W, CHEN J, CHU S L, et al. Anisotropy of microstructure and tensile properties of $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 67-77(in Chinese).

[23] 姚再起, 马芳武, 刘强, 等. 汽车轻量化评价方法研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(1): 36-39.

YAO Z Q, MA F W, LIU Q, et al. Evaluation methods of vehicle lightweight[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(1): 36-39(in Chinese).

Heat dissipation characteristics and lightweight evaluation of lattice structure

HU Jianjun^{1, 2, *}, DOU Ruochen², ZHANG Xin¹, YAO Jing², KONG Xiangdong²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066044, China;
2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066044, China)

Abstract: As the core component of aviation rudder control, the pursuit of a high power-to-weight ratio for an electro-hydrostatic actuator (EHA) requires efficient heat dissipation and a lightweight integrated design for its components. Reliable data for assessing lattice structure heat dissipation and lightweight performance is provided by this paper’s experimental study of the heat dissipation properties of four common lightweight lattice structures and the temperature distribution properties of various lattice heat dissipation modules. Based on the heat dissipation characteristics of lattice structures, an evaluation index of the heat dissipation lightweight coefficient of lattice structures is proposed to quantitatively evaluate the lightweight characteristics of different heat dissipation lattice structures. The four types of lattice structures are assessed using the evaluation index developed in this research, and the findings indicate that the OT lattice structure has the best combined lightweight and heat dissipation performance. Compared with the fin structure, the heat dissipation coefficient of the OT lattice structure is 1.2 times that of the fin, but its heat dissipation lightweight coefficient is only about 1/3 of that of the fin. This study provides a theoretical basis for the screening of the lattice structure considering both heat dissipation and lightweight.

Keywords: lattice structure; heat dissipation; lightweight; experimental research; evaluation

Received: 2023-09-06; **Accepted:** 2024-02-23; **Published Online:** 2024-04-04 07:23
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240403.0916.001
Foundation items: The General Program (Major Research Plan) of National Natural Science Foundation of China (51890881); Natural Science Foundation of Hebei Province (2020203028); Central Guiding Local Science and Technology Development Fund Projects (226Z1902G)

* **Corresponding author.** E-mail: kewei729@163.com