

三维点阵结构拓扑开发研究进展 及其对流传热性能对比*

丁 一¹, 吴威涛¹, 封 锋¹, 李书磊², 闫宏斌¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院 特种动力技术教育部重点实验室, 南京 210094;
2. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘要: 系统综述了国内外三维点阵结构拓扑开发的研究现状, 分别在等流量、等压降和等泵功条件下对比了其总体传热与散热性能. 在模型验证的基础上, 针对 12 种具有相同特征尺寸和孔隙率的点阵结构, 分别在 6 种不同点阵材质、两种不同取向下开展了数值模拟与性能对比. 结果表明: 点阵拓扑、点阵材质及运行工况对其传热和散热性能优劣具有显著影响; 不同条件下, 性能最优的点阵不尽相同. 在等流量下, A 向节点偏移 X 点阵和 A 向八叉树点阵的传热性能最优, A 向节点偏移 X 点阵的散热性能最优. 在等压降下, A 向节点偏移 X 点阵和 B 向节点偏移 X 点阵的传热性能最优, B 向立方点阵和 B 向节点偏移 X 点阵的散热性能最优. 在等泵功下, A 向节点偏移 X 点阵和 B 向矩形杆金字塔点阵的传热性能最优, B 向节点偏移 X 点阵和 B 向矩形杆金字塔点阵的散热性能最优. 在固定孔隙率和特征尺寸下构建了现有点阵结构的传热与散热性能数据库, 可作为新型点阵拓扑开发的比较基准, 同时, 可为不同工程设计中点阵结构的选型提供指导.

关键词: 周期性多孔材料; 对流传热; 压降; 性能对比

中图分类号: O35; V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450184

Topology Review and Convective Heat Transfer Comparison of 3D Lattice Structures

DING Yi¹, WU Weitao¹, FENG Feng¹, LI Shulei², YAN Hongbin¹

(1. *Key Laboratory of Special Engine Technology, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P.R.China;*
2. *School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P.R.China*)

Abstract: The topologies of 3D lattice structures were reviewed and their overall heat transfer and heat dissipation performances compared, under the fixed mass flow rate, pressure drop and pumping power conditions, respectively. In total 12 lattice structures, with 6 different materials and in 2 orientations, were compared. The conjugate heat transfer in the lattice structures was solved with validated numerical models. Numerical results

* 收稿日期: 2024-06-21; 修订日期: 2024-07-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费(309231B8801)

作者简介: 丁一(2000—), 男, 硕士生(E-mail: dingyivip@njust.edu.cn);

闫宏斌(1988—), 男, 副教授, 硕士生导师(通讯作者. E-mail: hbyan@njust.edu.cn).

引用格式: 丁一, 吴威涛, 封锋, 李书磊, 闫宏斌. 三维点阵结构拓扑开发研究进展及其对流传热性能对比[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(8): 1001-1023.

indicate that, the lattice topology, the lattice material and the operating conditions significantly affect the heat transfer and cooling performances. The optimal lattice differs under different comparison conditions. Under the fixed mass flow rate condition, the shifted X-lattice in orientation A and the octet lattice in orientation A exhibit the best heat transfer performance; the shifted X-lattice in orientation A also has the best cooling performance. Under the fixed pressure drop condition, the shifted X-lattices in both orientations A and B exhibit the best heat transfer performance; while the cubic lattice in orientation B and the shifted X-lattice in orientation B show the best cooling performance. Under the fixed pumping power condition, the shifted X-lattice in orientation A and the rectangular pyramid lattice in orientation B exhibit the best heat transfer performance; the shifted X-lattice in orientation B and the rectangular pyramid lattice in orientation B show the best cooling performance. The heat transfer and cooling performance database under a given lattice porosity and A characteristic length was presented as the benchmark for performance comparison of newly developed lattice structures. In addition, the database can benefit various engineering designs in selecting the appropriate lattice structures.

Key words: periodic cellular material; convective heat transfer; pressure drop; performance comparison

0 引言

高性能换热器与热沉是保障高超声速飞行器热防护系统、航空航天动力装置、高功率密度电子元器件等可靠运行的重要部件^[1]. 扩展表面的创新设计是其传热强化的通用方法, 扩展表面不仅能显著增大传热面积; 同时, 可通过扰流提高换热面上的对流传热系数. 与板翅、扰流柱等具有简单空间构型的传统扩展表面相比, 开孔多孔材料具有更为复杂的三维形貌^[2], 比表面积更大; 此外, 通过孔隙结构的创新设计可显著改变流动特性, 进一步强化换热面对流传热^[3].

开孔多孔材料主要包括随机多孔材料和周期性多孔材料^[4]. 以金属泡沫为代表^[5-6], 随机多孔材料具有随机分布的孔隙, 其固体骨架为薄壁结构、缺陷较多且孔隙结构单一; 尽管具有较好的传热性能, 但其流动阻力较大, 比强度和比刚度较低^[7]. 相较于随机多孔材料, 周期性多孔材料由空间周期分布的规则单元胞组成, 具有更高的比强度和比刚度; 孔隙尺度可在宽广的范围内调控, 拓扑可设计性强; 在具有优良对流传热性能的同时, 流动阻力较小. 作为典型代表的三维点阵结构在如图 1 所示的承载散热一体化换热器^[8]、航空母舰燃气偏流板冷却^[9]、高超声速飞行器主动热防护^[10]、超燃冲压发动机再生冷却^[11]、燃气涡轮叶片内部冷却^[12]及盘式制动器冷却^[13-14]等方面具有广阔的应用前景.

发展之初, 点阵结构主要通过熔模铸造、钣金冲压、组装钎焊等传统方法制备. 近年来, 随着选择性激光烧结、电子束熔化、分层实体制造等增材制造技术的发展, 以及新型增材制造技术的不断涌现^[15-16], 三维点阵结构设计的灵活性不断提高, 成本也逐渐降低. 发展至今, 目前文献中报道的三维点阵结构主要包括如图 2 所示的立方点阵 (CL)、面心立方点阵 (FCCL)、体心立方点阵 (BCCL)、八叉树点阵 (OL)、正十四面体点阵 (TL)、Kagome 点阵 (KL)、圆杆和矩形杆四面体点阵 (CTL/RTL)、圆杆和矩形杆金字塔点阵 (CPL/RPL)、X 点阵 (XL) 与节点偏移 X 点阵 (SXL) 等, 图中 OA 、 OB 即 A 向、 B 向, 后同.

传热性能是此类承载散热一体化点阵结构的重要性能之一. 近 20 年来, 学术界对如图 2 所示的点阵结构开展了大量研究, 涵盖总体传热与阻力特性表征、层流和湍流流动与传热机理分析、机理驱动的拓扑优化与新型拓扑开发、应用探索四个方面^[17-25]. 然而, 不同研究中点阵结构单元胞的尺寸、单元胞层数、孔隙率、流动 Reynolds 数、固体材料种类、流体种类等均不尽相同, 基于研究结果无法系统且公平地判断现有点阵的性能优劣. 为此, 前期综述^[3]统一以铝为固体材料, 在固定芯体孔隙率、单元胞层数和芯体高度的前提下, 对图 2 中 12 种点阵结构的进出口效应、传热特性与机理、阻力特性以及等流量和等泵功条件下的传热性能进行了系统对比, 阐明了现有点阵结构的性能优劣, 为该领域的发展奠定了重要基础. 然而, 前期研究并未对其在热管理应用场景下的散热性能进行对比; 此外, 不同的工程应用需要采用不同材质的点阵结构, 前期研究并未考虑.

鉴于上述的研究现状, 本文在前期研究的基础上, 进一步拓展了性能比较的范围, 考虑导热系数为 $0.2 \sim 398 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的多种固体材料, 分别在等流量、等压降和等泵功条件下, 系统比较了现有点阵结构的传热与

散热性能, 可为特定工程中点阵结构的选型提供重要参考, 同时可为新型点阵拓扑的开发奠定重要的性能比较基准。

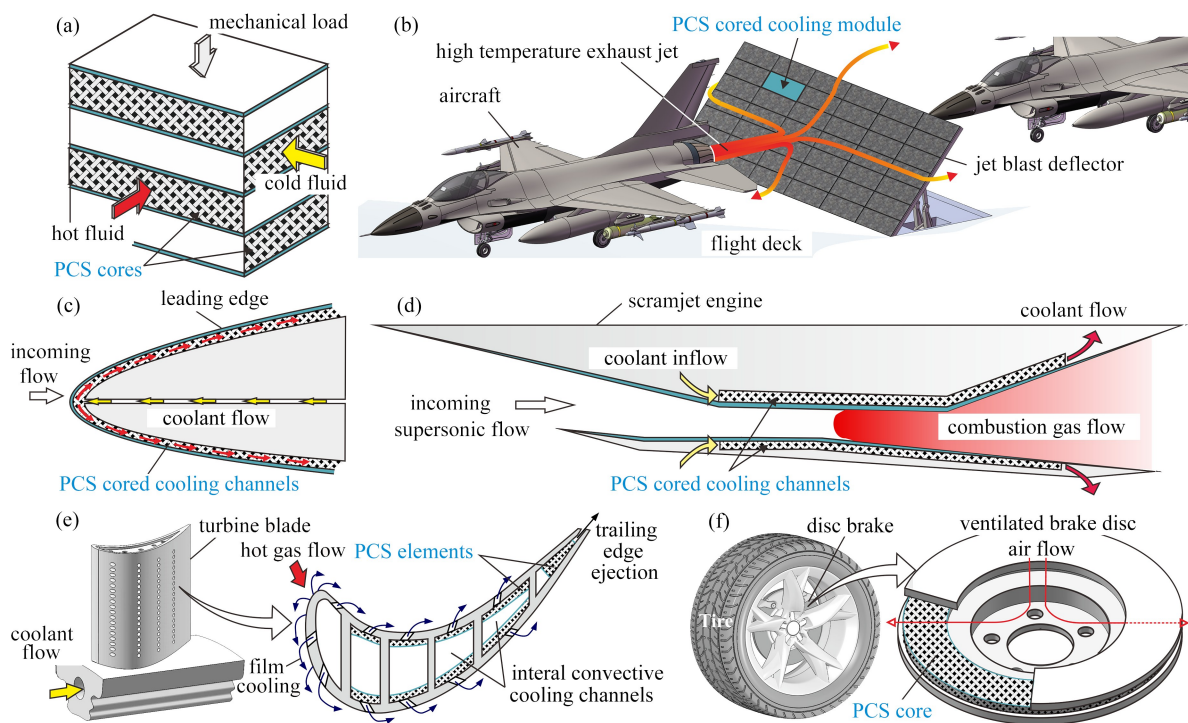


图 1 点阵结构在对流换热与热管理领域的潜在应用

Fig. 1 Potential applications of lattice structures in the fields of convective heat transfer and thermal management

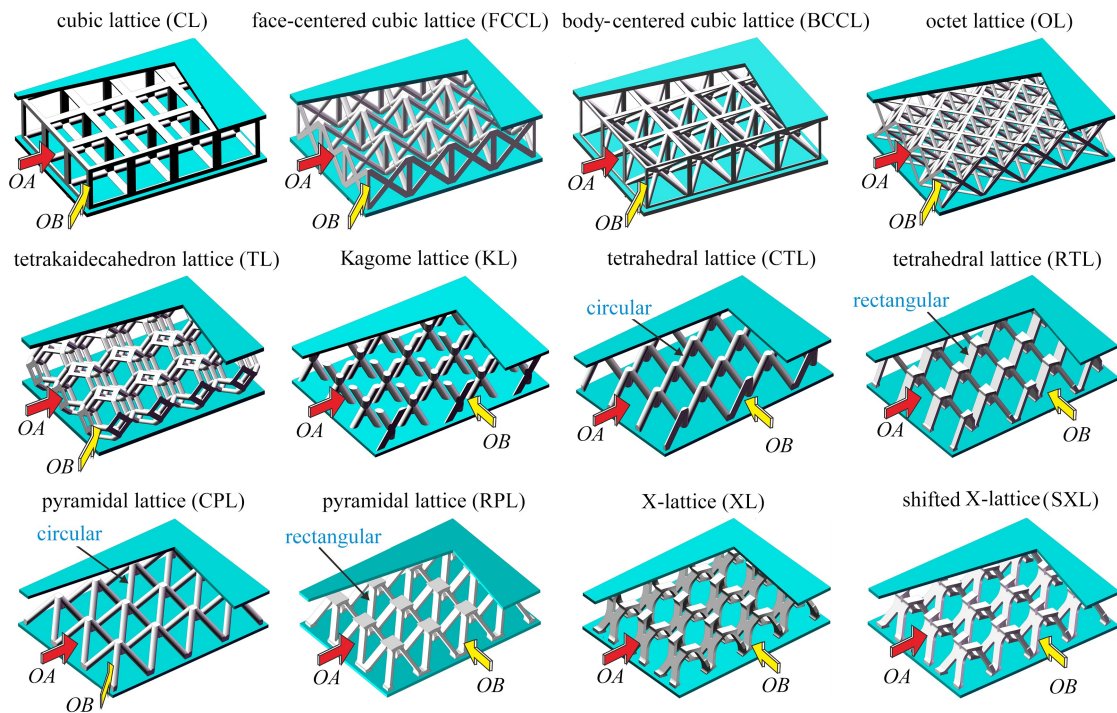


图 2 文献目前报道的三维周期性点阵结构

Fig. 2 Schematic illustration of the 3D periodic lattice structures reported in the literatures

注 为了解释图中的颜色, 读者可以参考本文的电子网页版本, 后同。

1 数值模型及其验证

针对如图2所示的三维周期性点阵结构,本文通过合理的假设,建立其湍流流动与传热数值模型,将所得数值结果与文献报道的实验结果作对比,验证模型的计算精度。

1.1 点阵结构的形貌参数

图2所示的点阵结构具有圆截面杆件或矩形截面杆件,其形貌参数分别如图3和图4所示.为了公平地比较其性能,所有点阵结构的芯体高度(H)均定为9.66 mm,芯体孔隙率(ε)均定为92.18%,上下基板厚度(t_s)均定为0.9 mm.鉴于工程设计需要不同材质的点阵结构,本文考虑了工程中常用的树脂、陶瓷、不锈钢、碳钢、铝和铜6种材料,其导热系数分别为 $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[26], $1.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[27], $11.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[28], $42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[13], $236 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[29]和 $398 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[30],以对比不同固体材料导热系数下上述12种点阵结构的传热性能.鉴于此类点阵具有各向异性拓扑,针对每种点阵结构,均选取堵塞率较大和较小的A向和B向开展对比研究。

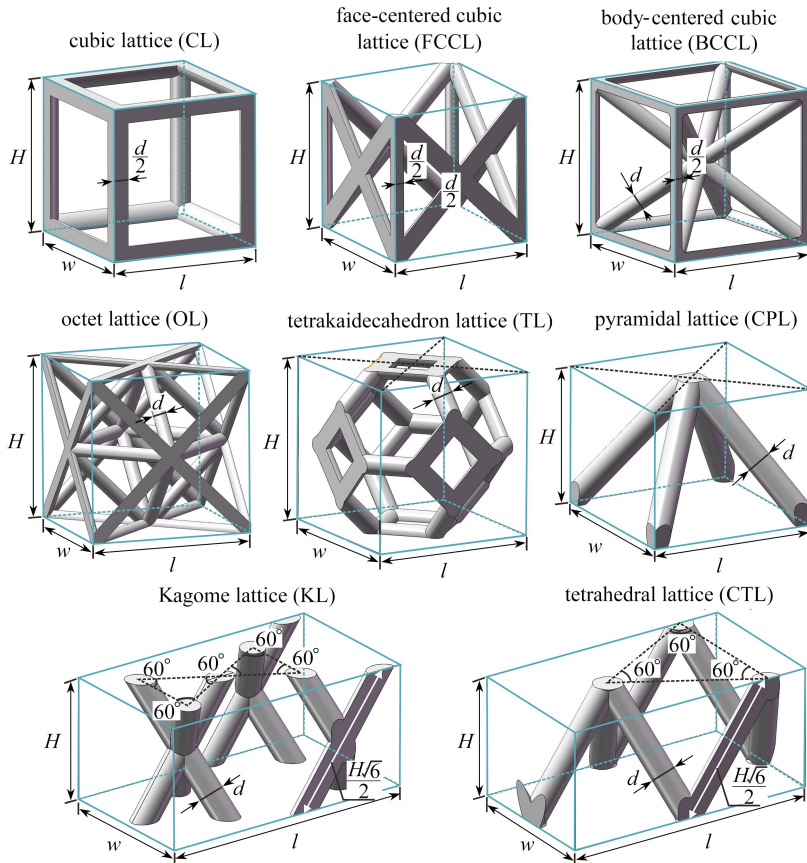


图3 具有圆截面杆件的点阵结构形貌参数示意图

Fig. 3 Schematic illustration of morphology parameters of lattice structures with circular ligaments

表1和表2分别给出了图3和图4所示点阵结构的形貌参数.相同孔隙率下,点阵结构形貌的变化显著改变了芯体与基板的传热面积.图5对比了12种点阵结构的传热面积,图中传热面积密度定义为单元胞内特定部位润湿面积与单元胞总体积之比.对于圆截面杆件点阵结构,芯体的传热面积密度($\rho_{SA,c}$)随杆件直径的增大而减小,因而八叉树点阵芯体的传热面积最大,Kagome和四面体点阵芯体的传热面积最小;此外,杆件与基板接触面的差异致使基板传热面积密度($\rho_{SA,e}$)存在一定的差异.对于矩形截面杆件点阵结构,其芯体和基板的有效传热面积均相近.综合而言,八叉树点阵的总传热面积最大,立方点阵的总传热面积最小。

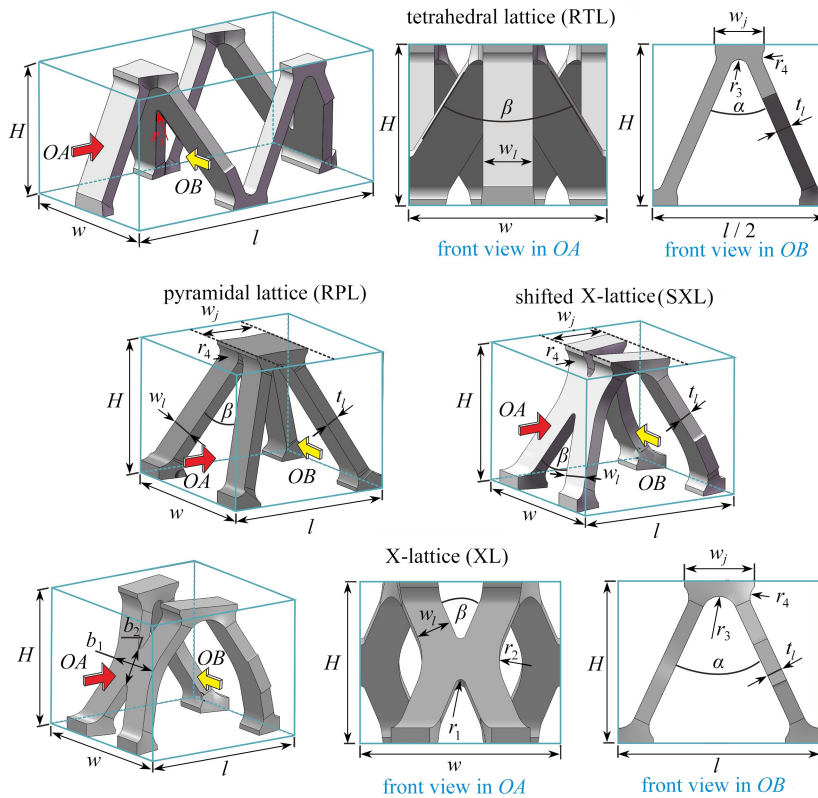


图 4 具有矩形截面杆件的点阵结构形貌参数示意图

Fig. 4 Schematic illustration of morphology parameters of lattice structures with rectangular ligaments

表 1 具有圆截面杆件的点阵结构几何参数

Table 1 Morphological parameters of lattice structures with circular ligaments

parameter	value							
	CL	FCCL	BCCL	OL	TL	KL	CTL	CPL
d / mm	1.872	1.271	1.032	0.788	1.124	1.927	1.927	1.746
H / mm	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66
l / mm	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66	20.49	20.49	12.0
t_s / mm	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
w / mm	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66	11.83	11.83	12.00
$\varepsilon / \%$	92.18	92.18	92.18	92.18	92.18	92.18	92.18	92.18

表 2 具有矩形截面杆件的点阵结构几何参数

Table 2 Morphological parameters of lattice structures with rectangular ligaments

parameter	value				parameter	value			
	RTL	RPL	XL	SXL		RTL	RPL	XL	SXL
b_1 / mm	-	-	2.70	2.70	t_1 / mm	0.91	0.91	0.91	0.91
b_2 / mm	-	-	2.31	2.31	t_s / mm	0.90	0.90	0.90	0.90
H / mm	9.66	9.66	9.66	9.66	w / mm	11.83	12.00	12.00	12.00
l / mm	20.49	12.00	12.00	12.00	w_j / mm	2.95	4.15	4.15	4.15
r_1 / mm	0.30	0.30	0.30	0.30	w_l / mm	3.00	2.16	2.16	2.16
r_2 / mm	2.00	4.30	4.30	4.30	$\alpha / (^\circ)$	47	50	50	50
r_3 / mm	0.55	1.05	1.05	1.05	$\beta / (^\circ)$	58.53	42	42	42
r_4 / mm	0.80	1.00	1.00	1.00	$\varepsilon / \%$	92.18	92.18	92.18	92.18

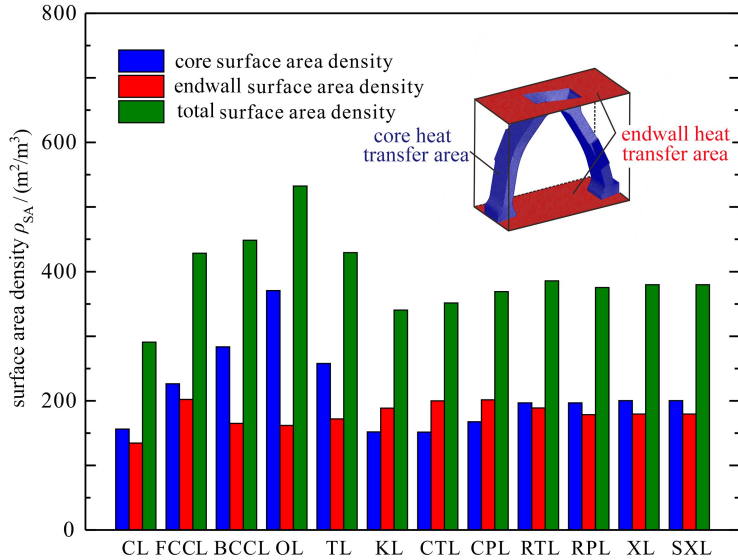


图5 本文所对比12种点阵结构的传热面积

Fig. 5 Heat transfer areas of 12 lattice structures compared in this paper

1.2 计算域、控制方程及边界条件

如图2—4所示,对于本文所考虑的点阵结构,其A向和B向的流动与传热具有周期性或对称性的特点。因此,在垂直于主流方向,仅选取半列或者一列单元胞及其周围的流体作为计算域,沿流动方向包含10个单元胞。以八叉树点阵为例,其计算域如图6所示:在点阵上游包含长度(L_i)为10 mm的发展段,以方便施加入口边界条件;在点阵下游,包含长度(L_e)为60 mm的发展段,以避免出口回流影响数值计算的稳定性。

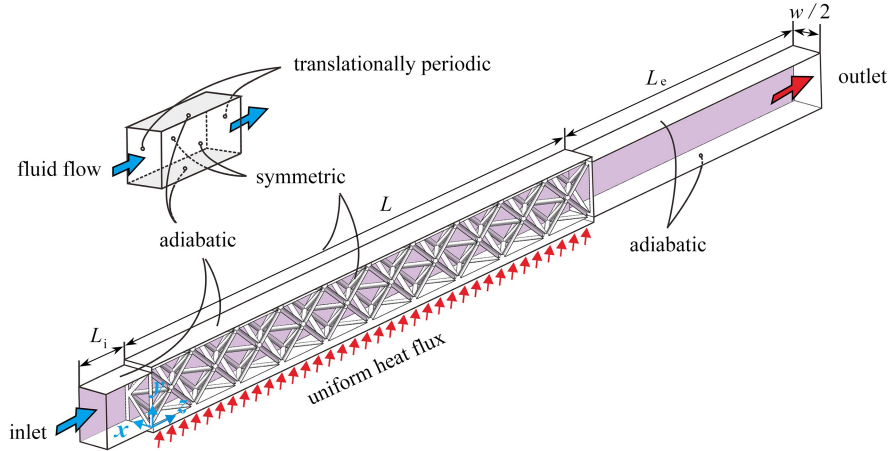


图6 点阵结构导热与对流耦合传热计算域及边界条件

Fig. 6 Calculation domains and boundary conditions of thermal and convective conjugate heat transfer of lattice structures

本文稳态数值模拟所考虑的工况参数如表3所示,流体工质为空气。表中 Reynolds 数范围根据文献中可用于验证数值模型的实验工况确定。鉴于本文点阵通道沿流向的长度较小且热负荷较小,压降和温升引起的空气物性参数变化较小。因此,假设空气为常物性不可压流体,其热物性参数汇总于表3。在本文所考虑的 Reynolds 数范围内,流动为湍流,采用性能优越的 SST $k-\omega$ 湍流模型。其控制方程包括连续方程、动量方程、流体和固体的能量方程、湍动能方程和湍流频率方程,鉴于文献[31-32]已经对方程做了详细阐述,本文不再赘述。

为了准确获得计算域入口的边界条件,首先计算两无限大平行平板间充分发展湍流流动,其数值模型如图6所示。在该计算域入口和出口施加平移周期边界条件,并根据 Reynolds 数给定空气的质量流量,对称面

采用对称边界条件,壁面采用绝热无滑移边界条件;继而将计算所得速度场、湍动能场及湍流频率场施加于点阵计算域入口,入口空气温度设为 25 °C.点阵计算域出口设置表压为 0 Pa,所有变量满足局部单向化条件;对称面施加对称边界条件,周期面施加平移周期边界条件且设置压降为 0 Pa;在下基板外表面施加恒定的热流 ($q'' = 10\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$);流固界面施加热流密度连续、温度连续、速度无滑移约束;其余壁面均设为绝热无滑移边界。

表 3 本文数值模拟所采用的工况参数与热物性参数

Table 3 Operating conditions and thermo-physical properties used in numerical simulation

parameter	value
air density $\rho_f / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1.184
air dynamic viscosity $\mu_f \times 10^5 / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.849 2
air thermal conductivity $k_f / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.026 1
air specific heat capacity $c_{pf} / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 004
solid thermal conductivity $k_s / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	236
heat flux $q'' / (\text{W}/\text{m}^2)$	10 000
inlet air temperature $T_{f,in} / ^\circ\text{C}$	25
Reynolds number Re_H	2 692~11 087

1.3 数值方法

鉴于本文所研究点阵结构拓扑与形貌的复杂性,采用混合网格技术进行空间离散化,主体采用四面体网格,网格增长率不高于 1.2;在无滑移壁面附近采用 10 层三棱柱网格,第一层网格的高度约为 0.01 mm,使壁面无量纲距离 $y^+ < 1$,满足 SST $k-\omega$ 模型对近壁区网格的要求,充分发挥该模型的性能优势.图 7 以八叉树点阵为代表,给出了通过 ANSYS ICEM CFD 生成的网格,网格单元总数为 2 369 万.文献[13,31,33-34]针对具有圆截面杆件或矩形截面杆件的四面体点阵、Kagome 点阵、X 点阵、金字塔点阵、节点偏移 X 点阵等开展了系统的网格独立性验证;本文网格参数设置均参考文献中的设置进行.事实上,本文采用了比文献中更密的计算网格,以确保网格独立性.各模型所采用的网格数量见表 4.

本文采用基于有限容积法的 ANSYS CFX 求解上述导热与对流耦合传热问题,控制方程中的对流项采用二阶迎风格式离散,扩散项采用二阶中心差分格式离散.在迭代求解过程中,监测总压降和加热面平均温度等特性参数,同时监测各物理量的全局不平衡率;在 200 次迭代前后,若特性参数相对变化小于 0.1%且所有物理量的全局不平衡率小于 0.1%,则认为迭代收敛。

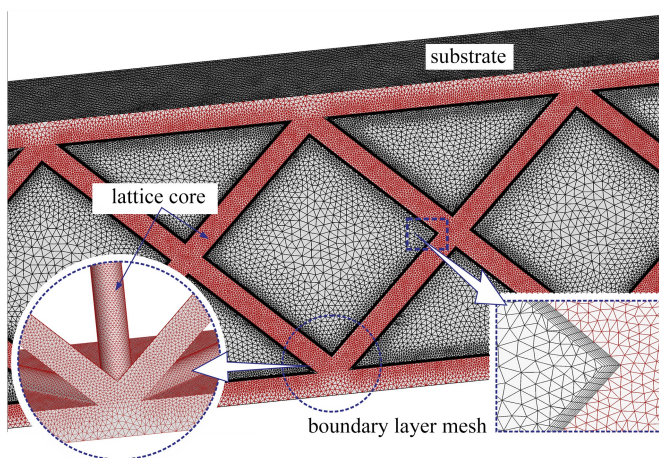


图 7 本文数值模拟所采用的代表性计算网格(以八叉树点阵为例)

Fig. 7 A representative mesh used in numerical simulation
(with the octet lattice as an example)

表4 24个数值模型总网格数统计表

Table 4 Statistics of the meshes generated for the 24 numerical models

PCS	total number of elements		PCS	total number of elements	
	OA	OB		OA	OB
CL	11 761 825	23 978 300	CTL	22 242 132	48 769 106
FCCL	19 669 169	39 259 294	CPL	27 112 651	53 354 748
BCCL	20 654 487	41 704 475	RTL	22 373 833	31 553 690
OL	23 690 031	13 271 641	RPL	25 810 821	25 232 115
TL	19 525 317	38 512 603	XL	25 165 166	50 420 874
KL	21 348 441	47 000 798	SXL	24 923 744	53 660 065

1.4 性能参数定义及数据处理

本文所研究的点阵芯体具有相同的孔隙率和高度,但其单元胞具有不同的宽度,为了合理且公平地比较不同点阵的传热性能,Reynolds数 Re_H 以芯体高度为特征长度,其定义为^[3]

$$Re_H = \frac{\rho_f V_m H}{\mu_f}, \quad (1)$$

式中, V_m 为点阵结构上游发展段空气的平均流速.对于本文所研究的不同点阵,当 Reynolds 数相同时,单位宽度点阵结构内的空气质量流量亦相同.

点阵结构的总体传热性能由基板和芯体表面的局部传热性能共同决定;此外,对于绝大多数工程应用而言,沿流动方向需布置足够数量的点阵单元胞,因而对应于充分发展流动的总体传热性能对比更具工程指导意义.因此,定义以芯体高度为特征长度的总体 Nusselt 数 Nu_H 为^[3]

$$Nu_H = \frac{1}{5} \sum_{j=5}^9 Nu_{\text{overall},j}, \quad (2)$$

式中, j 为单元胞序号,沿流动方向递增.对于本文所对比的 12 种点阵结构,前期研究表明^[3],进出口效应对第 5~9 个单元胞总体传热的影响可忽略不计,因而本文选取第 5~9 个单元胞性能参数的平均值作为各点阵结构总体传热性能的评价指标.式(2)中各单元胞的总体 Nusselt 数 $Nu_{\text{overall},j}$ 定义为^[3]

$$Nu_{\text{overall},j} = \frac{h_{\text{overall},j} H}{k_f}, \quad (3)$$

其中, $h_{\text{overall},j}$ 为第 j 个单元胞的总体传热系数,综合了基板与芯体的贡献,定义为^[3]

$$h_{\text{overall},j} = \frac{\rho_f V_m H c_{p,f} (T_{o,j} - T_{i,j})}{l} \left/ \left(T_{w,j} - \frac{T_{o,j} + T_{i,j}}{2} \right) \right., \quad (4)$$

式中 $T_{i,j}$ 和 $T_{o,j}$ 分别为第 j 个单元胞入口和出口截面质量流量加权的流体平均温度, $T_{w,j}$ 为第 j 个单元胞基板内表面的平均温度.

为了对比不同点阵结构的压降特性,与总体 Nusselt 数的定义类似,定义以芯体高度为特征长度的总体阻力系数 f_H 为^[3]

$$f_H = \frac{1}{5} \sum_{j=5}^9 f_j, \quad (5)$$

其中,各单元胞的阻力系数 f_j 定义为^[3]

$$f_j = \frac{\Delta p_j}{l} H \frac{1}{0.5 \rho_f V_m^2}, \quad (6)$$

式中, Δp_j 为流体流经第 j 个单元胞时质量流量加权平均的总压降.

为了开展等压降和等泵功条件下的性能对比,压降 Δp 和泵功 P 的推导如下:

$$\Delta p = f_H \frac{L}{H} \frac{\rho_f V_m^2}{2} = f_H \frac{L}{H} \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{\mu_f Re_H}{\rho_f H} \right)^2 = \frac{\mu_f^2 L}{2 \rho_f H^3} (f_H Re_H^2), \quad (7)$$

$$P = \left(f_H \frac{L}{H} \frac{\rho_f V_m^2}{2} \right) (V_m H) = \frac{1}{2} f_H L \rho_f \left(\frac{\mu_f Re_H}{\rho_f H} \right)^3 = \frac{1}{2} \frac{L \mu_f^3}{\rho_f^2 H^3} (f_H Re_H^3). \quad (8)$$

进而可得无量纲压降 $\overline{\Delta p}$ 和无量纲泵功 \bar{P} 分别为

$$\overline{\Delta p} = \Delta p / \left(\frac{\mu_f^2 L}{2 \rho_f H^3} \right) = f_H Re_H^2, \quad (9)$$

$$\bar{P} = \frac{P/L}{\frac{1}{2} \rho_f \left(\frac{\nu_f}{H} \right)^3} = f_H Re_H^3, \quad (10)$$

式中, ν_f 为空气的运动黏度.

为评价不同点阵结构热沉的散热性能,假定在热沉下基板施加恒定的热流密度 q'' ,则其最大热阻 R_{\max} 为

$$R_{\max} = \frac{T_{w,\max} - T_{f,\text{in}}}{q''} = \frac{T_{w,\text{outlet}} - T_{f,\text{in}}}{q''}, \quad (11)$$

式中, $T_{w,\max}$ 为下基板的最高温度,近似等于出口处单元胞下基板的平均温度,即 $T_{w,\text{outlet}}$; $T_{f,\text{in}}$ 是热沉入口空气温度.根据能量守恒定律,热沉出口空气温度 $T_{f,\text{outlet}}$ 为

$$T_{f,\text{outlet}} = T_{f,\text{in}} + \frac{Lq''}{\rho_f V_m H c_{pf}}, \quad (12)$$

其中, L 为热沉总长度.根据热沉出口单元胞总体传热系数 h_{outlet} 的定义, $T_{w,\text{outlet}}$ 可计算为

$$T_{w,\text{outlet}} = T_{f,\text{outlet}} + \frac{q''}{h_{\text{outlet}}}. \quad (13)$$

联立式(11)–(13),可得

$$R_{\max} = \frac{1}{h_{\text{outlet}}} + \frac{L}{\rho_f U_m H c_{pf}}. \quad (14)$$

对式(14)进行无量纲化处理,可得无量纲热阻 \bar{R} 为

$$\bar{R} = \frac{R_{\max}}{H/k_f} = \frac{1}{Nu_{\text{outlet}}} + \frac{L}{H} \frac{1}{Pr_f Re_H}. \quad (15)$$

根据文献[3],总体 Nusselt 数可拟合为 Reynolds 数的指数函数,则给定 Reynolds 数,无量纲热阻为

$$\bar{R} = \frac{R_{\max}}{H/k_f} = \frac{1}{C Re_H^n} + \frac{L}{H} \frac{1}{Pr_f Re_H}, \quad (16)$$

其中, C 和 n 为传热关联式的拟合系数,可由数值结果拟合获得.式(16)右端两项分别为对流热阻和温升热阻.同理,总体阻力系数亦可拟合为 Reynolds 数的指数函数,则无量纲压降与 Reynolds 数间具有如下关系:

$$\overline{\Delta p} = f Re_H^2 = D Re_H^{m+2} \Rightarrow Re_H = \left(\frac{\overline{\Delta p}}{D} \right)^{1/(m+2)}, \quad (17)$$

其中, D 和 m 为阻力关联式的拟合系数,可由数值结果拟合获得.此时热阻可表示为

$$\bar{R} = \frac{R_{\max}}{H/k_f} = \frac{1}{c} \left(\frac{\overline{\Delta p}}{D} \right)^{-n/(m+2)} + \frac{L}{H} \frac{1}{Pr_f} \left(\frac{\overline{\Delta p}}{D} \right)^{-1/(m+2)}. \quad (18)$$

同理,给定泵功,无量纲热阻可表示为

$$\bar{R} = \frac{R_{\max}}{H/k_f} = \frac{1}{C} \left(\frac{\bar{P}}{D} \right)^{-n/(m+3)} + \frac{L}{H} \frac{1}{Pr_f} \left(\frac{\bar{P}}{D} \right)^{-1/(m+3)}. \quad (19)$$

1.5 模型验证

为了验证数值模型的计算精度,根据文献[35-38]中针对四面体点阵、Kagome点阵和X点阵的实验测试工况,开展了相应的数值模拟.图8对比了数值模拟和实验测量所得总体 Nusselt 数和阻力系数.由图可知,数值结果与实验结果吻合良好,相对误差小于 13%,验证了数值模型的合理性.

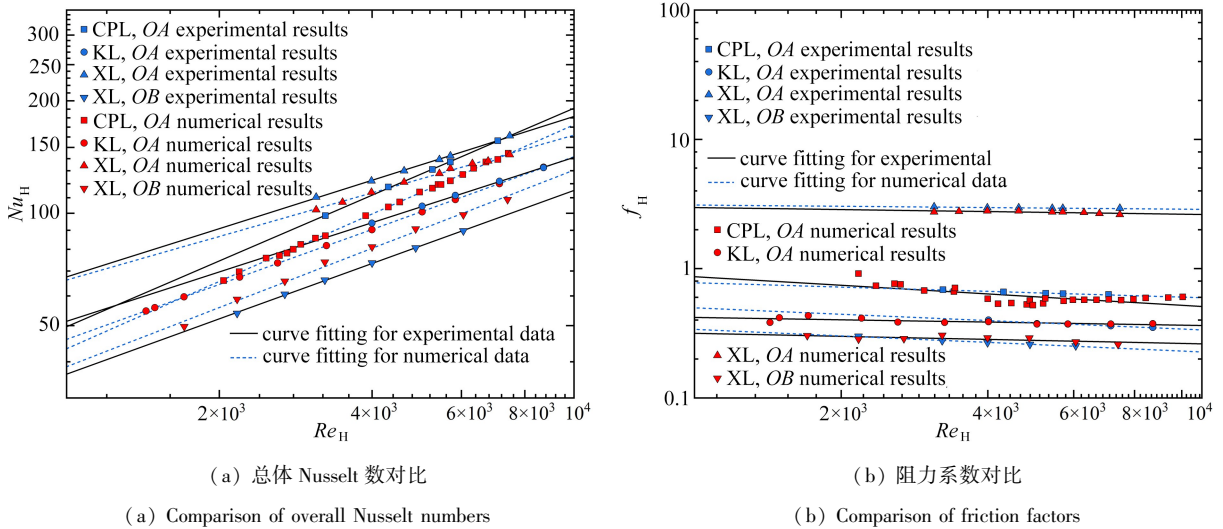


图8 本文数值模拟与文献中实验测量所得总体 Nusselt 数与阻力系数对比

Fig. 8 Comparison of the overall Nusselt numbers and friction factors between numerical simulation in this paper and experimental data in the literatures

2 等流量下的总体传热、散热性能与压降特性

基于上述数值模型与方法,对 12 种点阵结构开展了系统的性能对比,考虑到各点阵拓扑的各向异性特点,每个点阵结构选取如图 2 所示的 A 和 B 两个方向开展研究.文献[3]研究表明,总体 Nusselt 数和阻力系数均可拟合为 Reynolds 数的指数函数,且拟合误差不超过 $\pm 2.6\%$.由于本文考虑 24 个数值模型,每个模型考虑 6 种材料,计算量大;因此,仅针对 $Re_H = 2\ 692$ 和 $Re_H = 11\ 087$ 两个 Reynolds 数开展了数值模拟,借此获得拟合系数,其他 Reynolds 数下的值通过拟合公式计算获得.根据工程设计需求,分别在等流量、等压降和等泵功条件下开展系统的性能对比.此外,由于点阵结构既可用于换热器,又可用于热沉,因而在每一工况下,开展分类讨论.本段先对等流量下的总体传热、散热性能与压降特性进行研究.

根据前述 Reynolds 数的定义,当 Reynolds 数相同时,质量流量亦相同.图 9 给出了不同 Reynolds 数、不同固体材料下 12 种点阵的总体 Nusselt 数.由图可知:在本文所考虑的 Reynolds 数范围内,当点阵结构的材料为树脂、陶瓷、不锈钢、碳钢和铝时,A 向节点偏移 X 点阵的总体传热性能最优;当点阵结构的材料为铜时,在较低 Reynolds 数下,A 向八叉树点阵的总体传热性能最优,而在较高 Reynolds 数下,A 向节点偏移 X 点阵的总体传热性能最优.此外,当点阵的材质为树脂和陶瓷时,B 向矩形杆金字塔点阵和 B 向节点偏移 X 点阵的总体传热性能最差;当点阵为其他材质时,A 向立方点阵的传热性能最差.定量分析表明,对于 6 种材质的点阵结构,最优点阵的 Nusselt 数比最差点阵的 Nusselt 数分别高 198%~348%,208%~298%,155%~214%,152%~221%,175%~253%和 183%~281%.由此可见,通过拓扑创新,可显著提高点阵结构的传热性能;当不考虑压降时,推荐使用 A 向节点偏移 X 点阵和 A 向八叉树点阵.

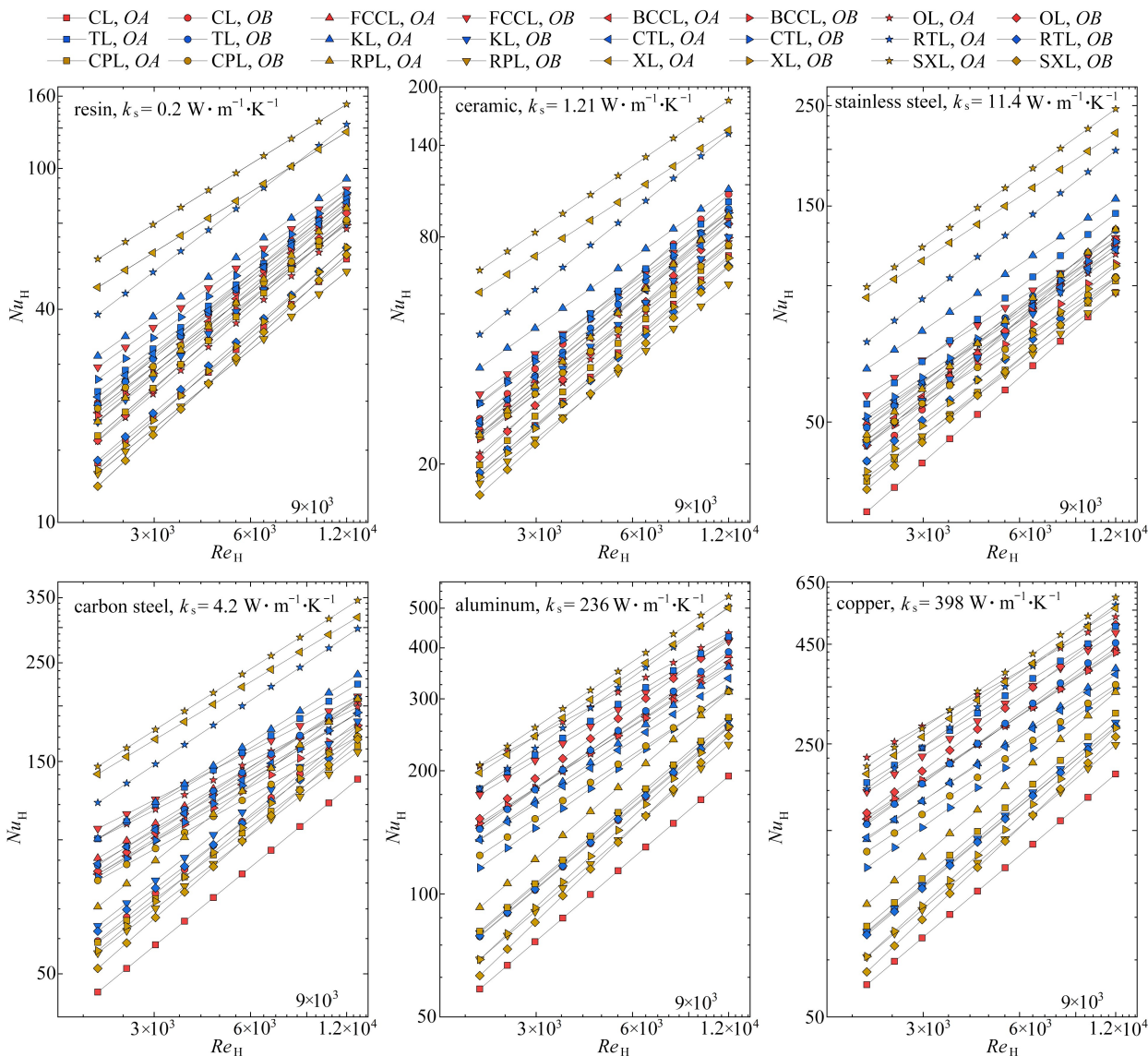


图 9 不同材料点阵结构在等流量条件下的总体传热性能对比

Fig. 9 Overall heat transfer performance comparison between lattice structures with different materials under fixed flow rate conditions

图 10 给出了两个代表性 Reynolds 数下总体 Nusselt 数随固体材料导热系数的变化规律,对于所有点阵结构,随着材料导热系数的增大,点阵芯体内的温度梯度逐渐减小,点阵芯体的肋效率逐渐增大,但增长率逐渐减小,因此,总体传热随导热系数单调递增,但增长率逐渐减小,由于不同点阵芯体表面的对流传热系数和比表面积不同,其增长率也不尽相同;对流传热系数和比表面积越大,总体传热对导热系数越敏感,由图 5 可知,八叉树点阵具有最高的芯体比表面积且其表面的对流传热系数较高^[3],因而其总体传热随导热系数增大的变化率较高。

由于空气被视为常物性流体,固体材料变化不影响阻力系数.不同 Reynolds 数下的阻力系数如图 11 所示.由图可知,在本文所研究的 Reynolds 数范围内,流动为湍流,因而阻力系数对于 Reynolds 数不敏感,阻力系数主要由点阵的拓扑结构和流动方向决定,A 向矩形杆四面体点阵的阻力系数最大,B 向矩形杆金字塔点阵的阻力系数最小,前者的阻力系数约为后者的 26~29 倍。

在点阵结构的热管理应用中,由式(15)表明,散热性能与总体 Nusselt 数、热沉长度及 Reynolds 数有关,

无法仅基于总体传热性能评估散热性能,因此,本文针对恒热流条件下两种不同长度热沉的散热性能开展了对比分析.图 12(a)对比了等流量条件下热沉的散热性能,其中热沉长度为 120 mm.随着 Reynolds 数和导热系数的增大,对流热阻和温升热阻均逐渐减小,因而无量纲热阻逐渐减小.总体而言, A 向节点偏移 X 点阵的热阻最小.当点阵材料为树脂和陶瓷时, B 向矩形杆金字塔点阵热阻最大;当点阵材料为不锈钢时,低 Reynolds 数下, A 向立方点阵热阻最大;高 Reynolds 数下, B 向矩形杆金字塔点阵热阻最大.对于其他点阵, A 向立方点阵热阻最大.定量分析表明,对于 6 种材质的点阵结构,最小热阻比最大热阻分别低约 66%, 65%, 54%, 50%, 50% 和 50%.

图 12(b)给出了热沉长度为 1 200 mm 时各热沉的散热性能.由式(15)可知,随着热沉长度的增加,温升热阻逐渐增大,不同点阵芯体热沉间散热性能的差别逐渐减小,此时,总热阻主要由温升热阻支配. A 向节点偏移 X 点阵仍具有最小的热阻.固体材料为树脂、陶瓷和不锈钢时, B 向矩形杆金字塔点阵的热阻最大.固体材料为碳钢、铝和铜时, A 向立方点阵的热阻最大.定量分析表明,对于 6 种材质的点阵结构,最小热阻比最大热阻分别低 37%~39%, 31%~37%, 16%~25%, 14%~19%, 12%~16% 和 12%~15%.

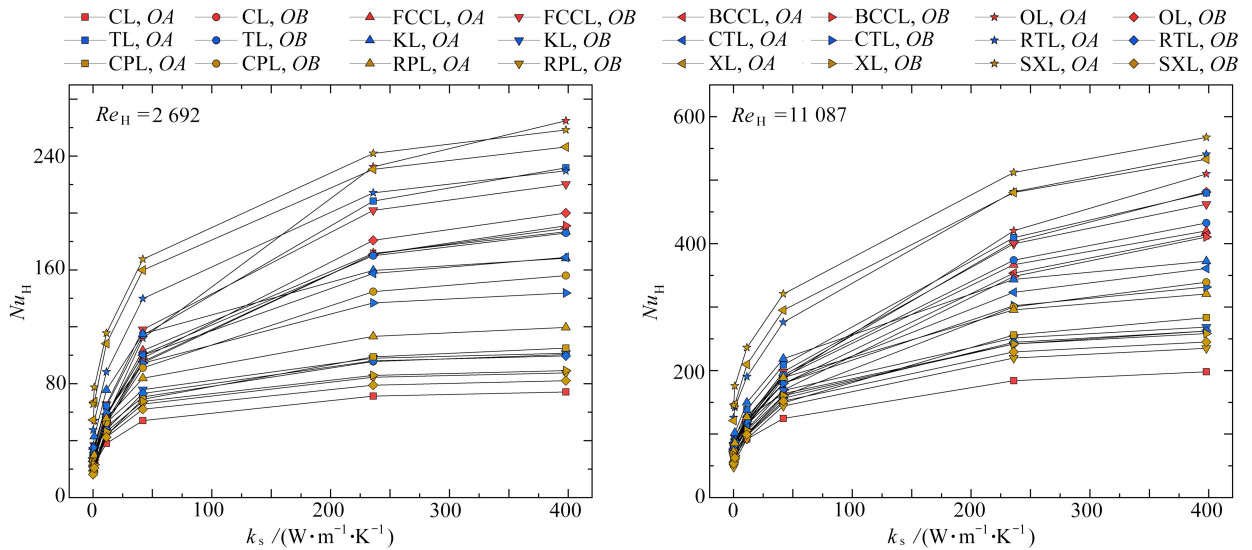


图 10 固体材料导热系数对点阵结构总体传热性能的影响

Fig. 10 Effects of thermal conductivities of lattice structure materials on the overall heat transfer performances

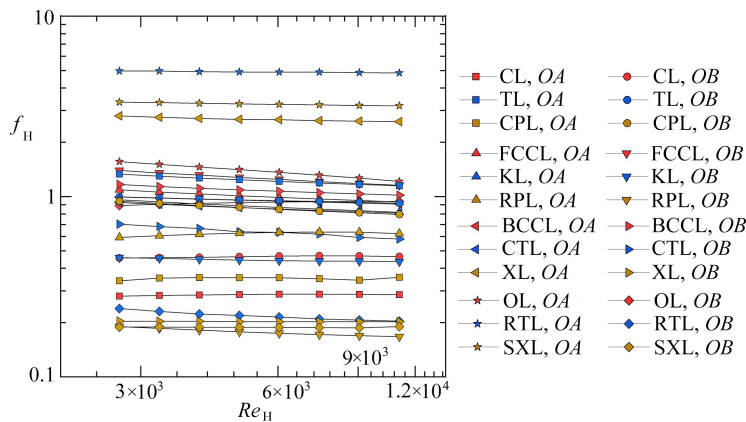
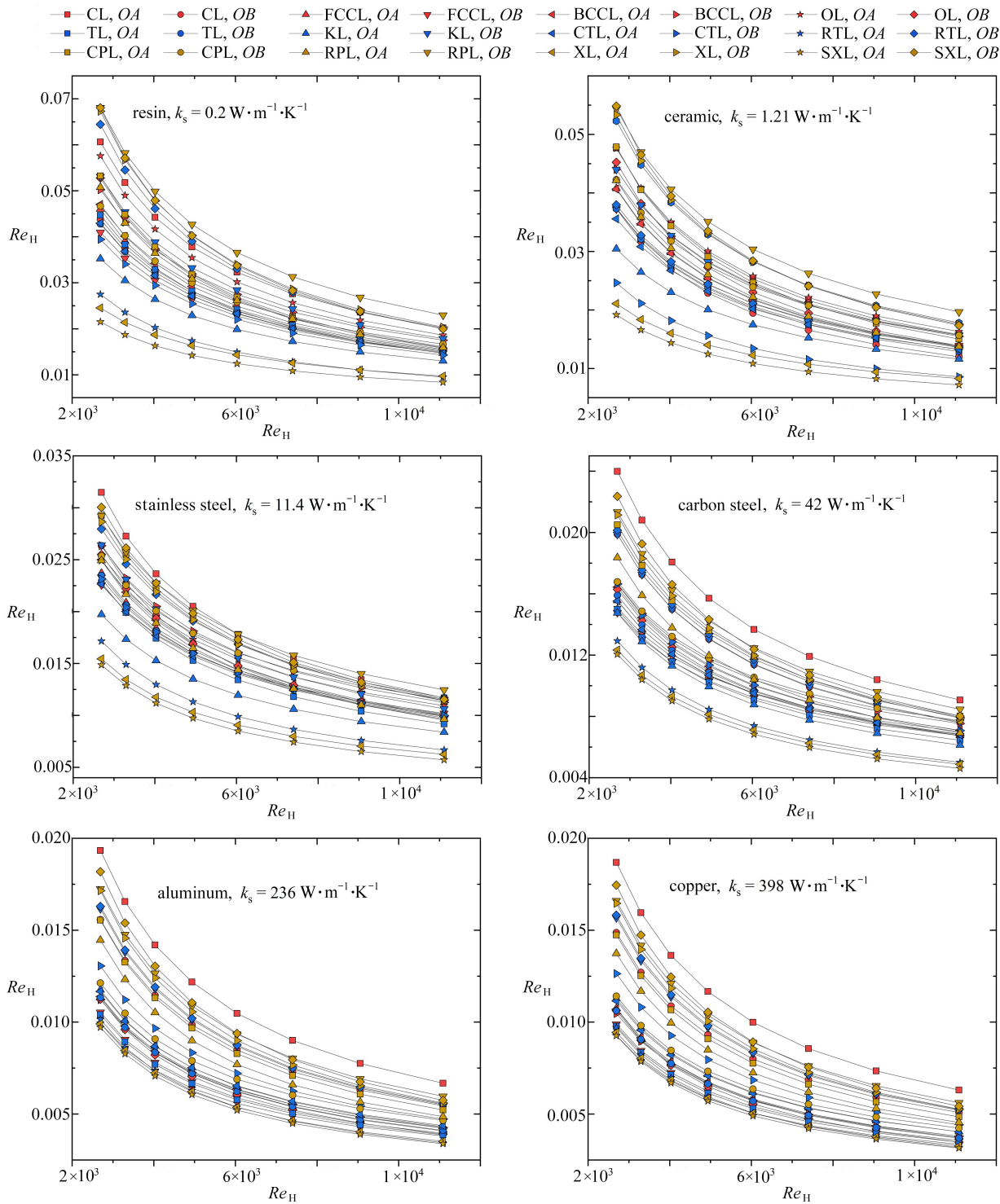


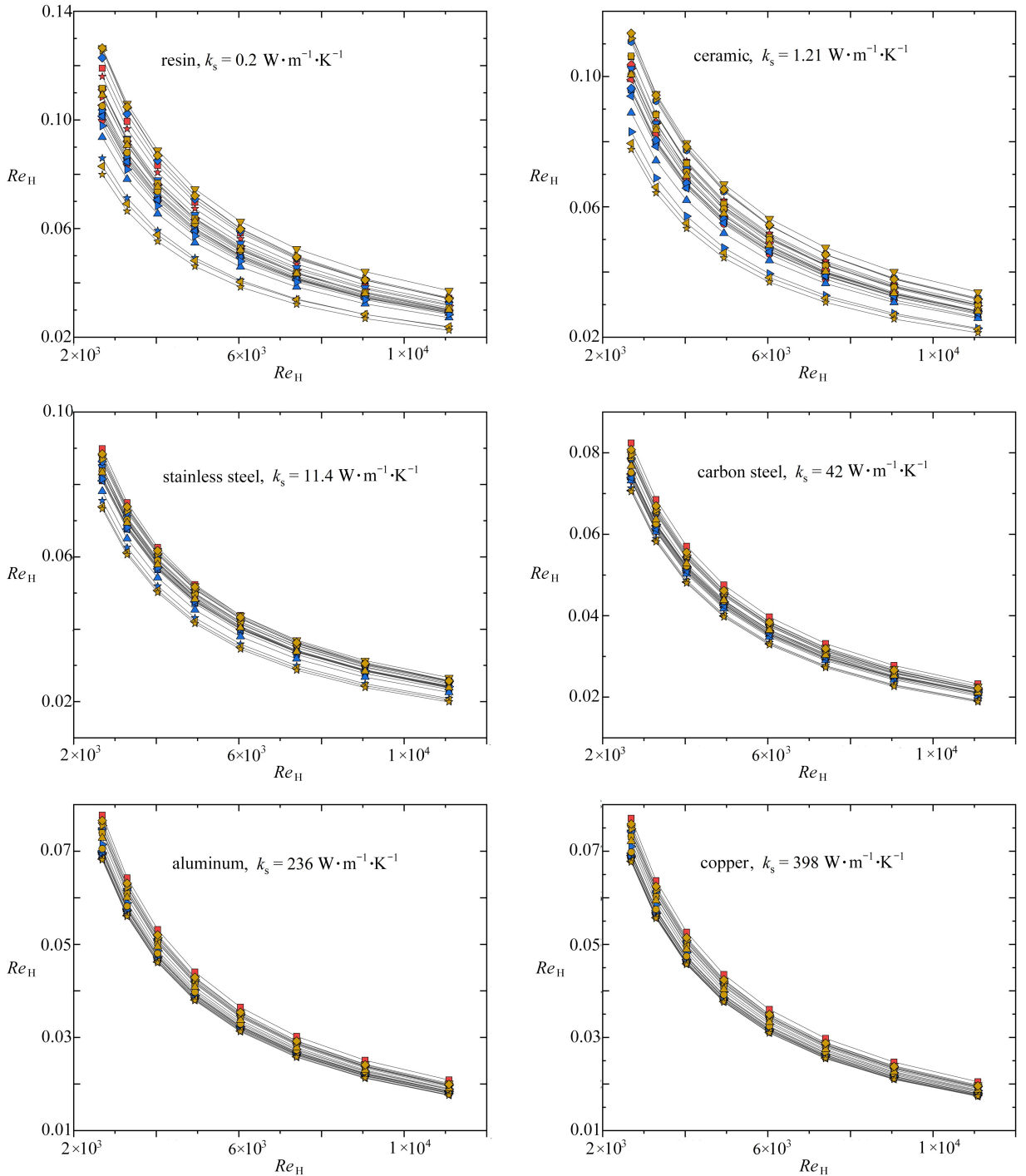
图 11 等流量下的总体阻力特性对比

Fig. 11 Overall resistance characteristics comparison under fixed flow rate conditions



(a) 热沉长度 $L = 120 \text{ mm}$

(a) Heat sink length $L = 120 \text{ mm}$



(b) 热沉长度 $L = 1\ 200\ \text{mm}$

(b) Heat sink length $L = 1\ 200\ \text{mm}$

图 12 等流量下点阵结构热沉的无量纲热阻对比

Fig. 12 Dimensionless thermal resistance comparison of lattice structures in heat sink under fixed flow rate conditions

3 等压降下的总体传热与散热性能

图 13 给出了总体 Nusselt 数随压降的变化规律。当点阵材料为树脂时,低压降下 A 向节点偏移 X 点阵总体传热性能最好,高压降下 B 向节点偏移 X 点阵总体传热性能最好; A 向八叉树点阵的总体传热性能最差。

点阵材料为陶瓷时, 低压降下 A 向节点偏移 X 点阵总体传热性能最好, 高压降下 B 向立方点阵总体传热性能最好; A 向八叉树点阵总体传热性能最差. 点阵结构材料为不锈钢时, 低压降下 A 向 X 点阵总体传热性能最好, A 向立方点阵最差; 高压降下 A 向节点偏移 X 点阵总体传热性能最好, B 向圆杆金字塔点阵最差. 点阵结构材料为碳钢时, 低压降下 A 向 X 点阵总体传热性能最好, A 向立方点阵最差; 高压降下 B 向节点偏移 X 点阵总体传热性能最好, B 向圆杆金字塔点阵最差. 点阵结构材料为铝和铜时, 低压降下 A 向八叉树点阵总体传热性能最好, 高压降下 B 向节点偏移 X 点阵总体传热性能最好; A 向立方点阵总体传热性能最差. 定量分析表明, 对于 6 种材质的点阵结构, 最优点阵的总体 Nusselt 数比最差点阵的总体 Nusselt 数分别高 81% ~ 374%, 86% ~ 279%, 68% ~ 101%, 90% ~ 118%, 68% ~ 199% 和 66% ~ 203%. 值得注意的是, 部分点阵由于阻力系数较小, 低压降下总体传热性能很差, 但在高压降下总体传热性能占优势, 对应流体流量却很大, 在工程设计中, 应综合考虑流量、压降和传热性能.

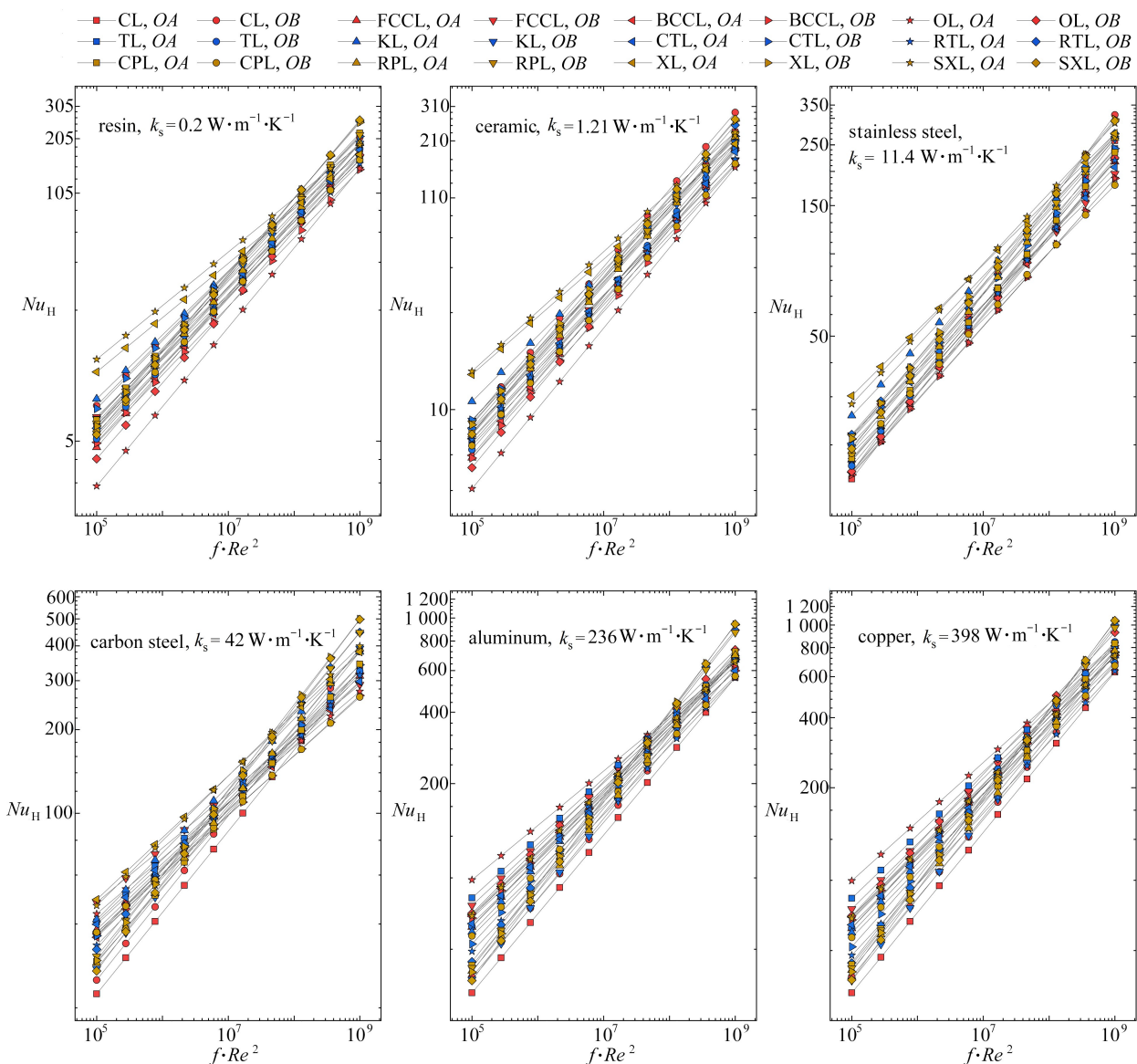
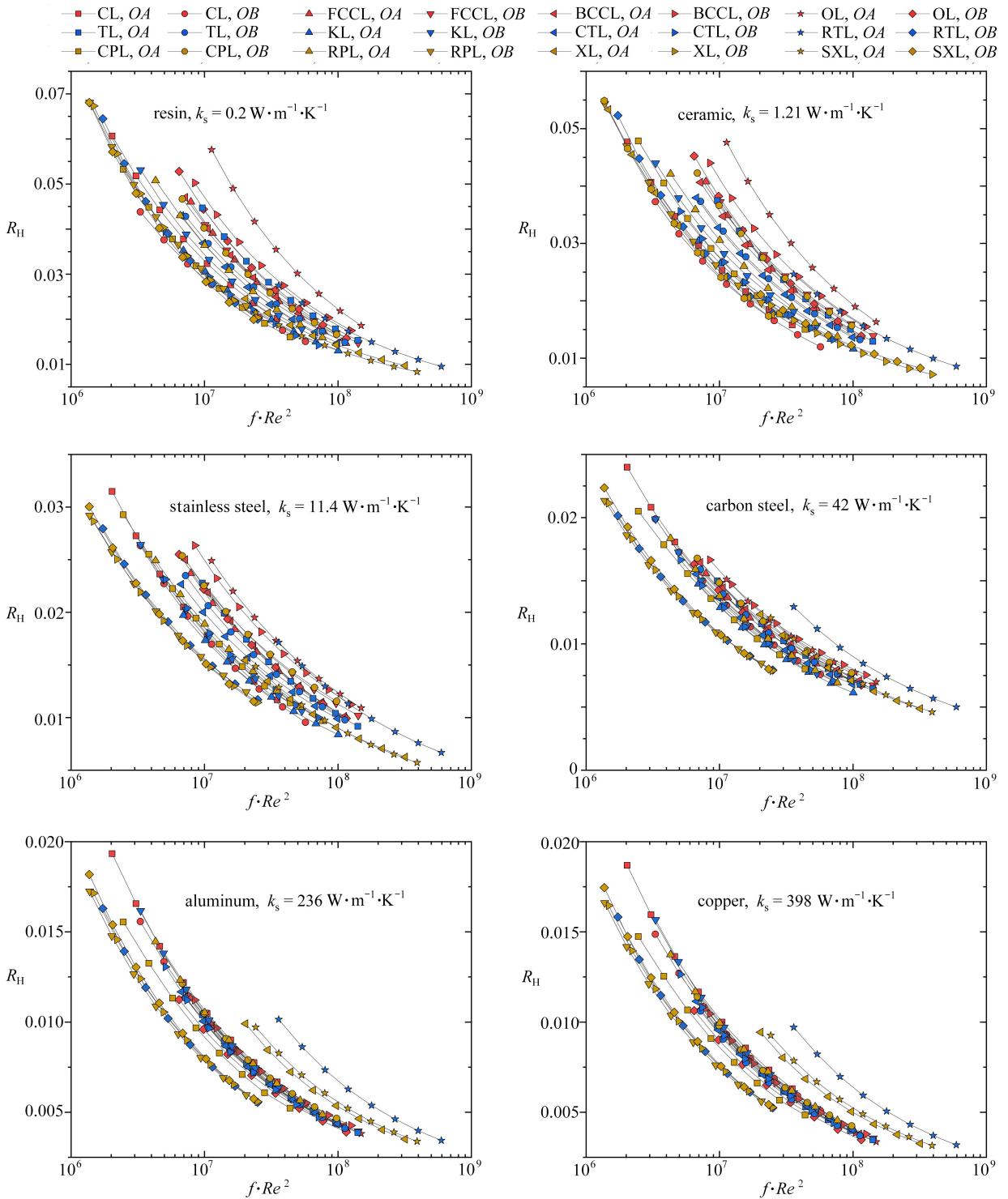


图 13 不同材料点阵结构在等压降条件下的总体传热性能对比

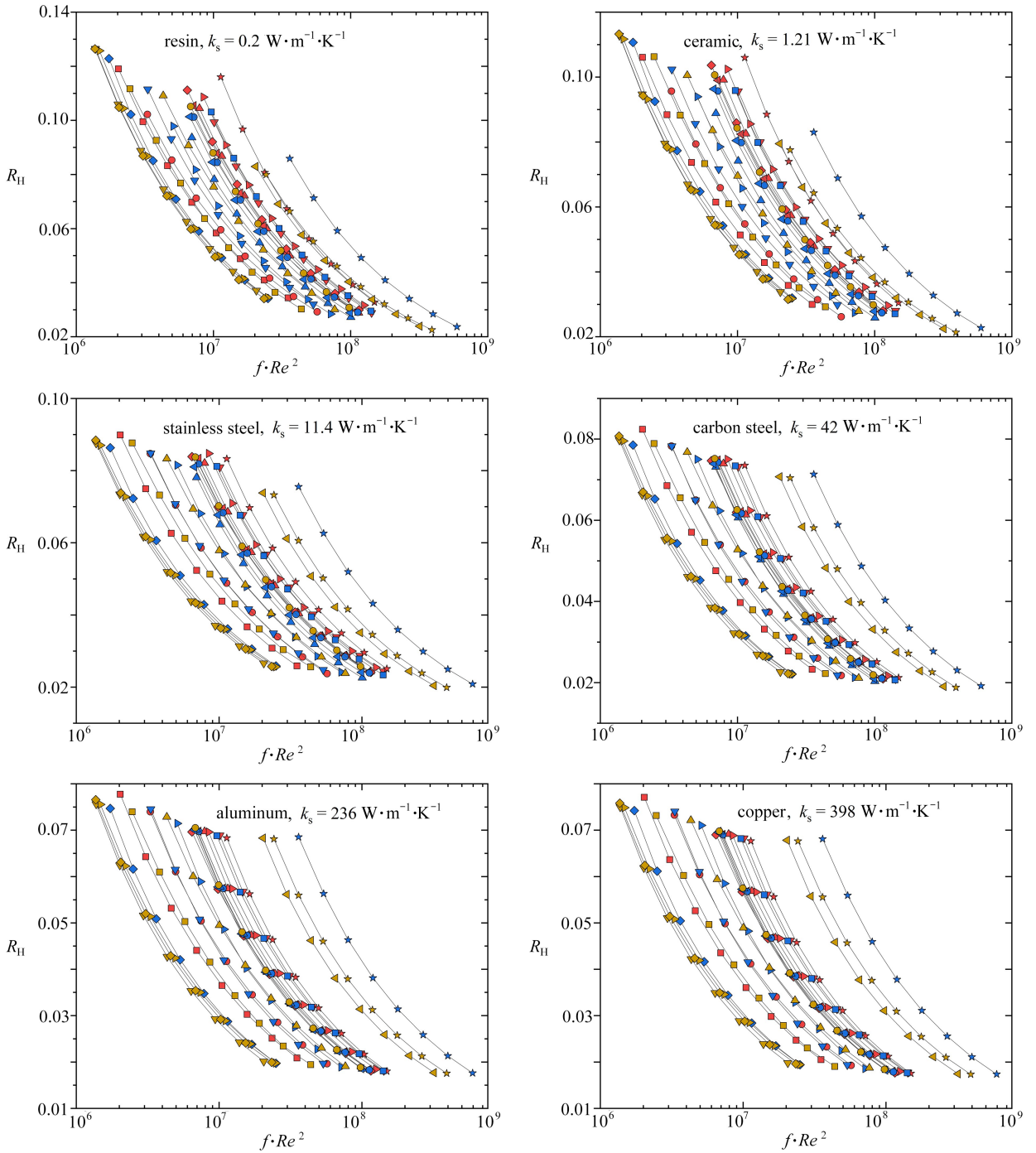
Fig. 13 Overall heat transfer performance comparison of lattice structures with different materials under fixed pressure drop conditions

图 14(a) 对比了等压降条件下热沉的散热性能, 其中热沉长度为 120 mm. 随着固体材料导热系数的升高, 不同点阵无量纲压降的重合度降低. 因此, 我们主要根据图中变化趋势进行性能对比.



(a) 热沉长度 $L = 120$ mm

(a) Heat sink length $L = 120$ mm



(b) 热沉长度 $L = 1\ 200\ \text{mm}$

(b) Heat sink length $L = 1\ 200\ \text{mm}$

图 14 等压降下点阵结构热沉的无量纲热阻对比

Fig. 14 Dimensionless thermal resistance comparison of lattice structures in heat sink under fixed pressure drop conditions

由图 14(a)可知,针对导热系数由小到大的 6 种材料,热阻最小的点阵分别是 B 向立方点阵和 B 向节点偏移 X 点阵、 B 向立方点阵、 B 向节点偏移 X 点阵和 B 向矩形杆金字塔点阵、 B 向节点偏移 X 点阵和 B 向矩形杆金字塔点阵、 B 向矩形杆金字塔点阵、 B 向矩形杆金字塔点阵.点阵材料为树脂、陶瓷和不锈钢时, A 向八叉树点阵的热阻最大,点阵材料为碳钢、铝和铜时, A 向矩形杆四面体点阵的热阻最大.

图 14(b) 给出了热沉长度为 1 200 mm 时各热沉的散热性能.当点阵结构材料为树脂和陶瓷时, B 向节点偏移 X 点阵的热阻最小;对于其他点阵, B 向矩形杆金字塔点阵的热阻最小.6 种点阵材料下, A 向矩形杆四面体点阵的热阻均最大.

4 等泵功下的总体传热与散热性能

图 15 给出了总体 Nusselt 数随泵功的变化规律.当点阵材料为树脂、陶瓷、不锈钢和碳钢时, A 向节点偏移 X 点阵总体传热性能最好.当点阵材料为铝和铜时,低泵功下, A 向八叉树点阵总体传热性能最好,高泵功下, B 向八叉树点阵总体传热性能最好.6 种点阵材料下, A 向立方点阵的总体传热性能均最差.定量分析表明,对于 6 种材质的点阵结构,最优点阵的总体 Nusselt 数比最差点阵的总体 Nusselt 数分别高 49%~146%, 38%~123%, 51%~112%, 55%~126%, 57%~186% 和 75%~201%.

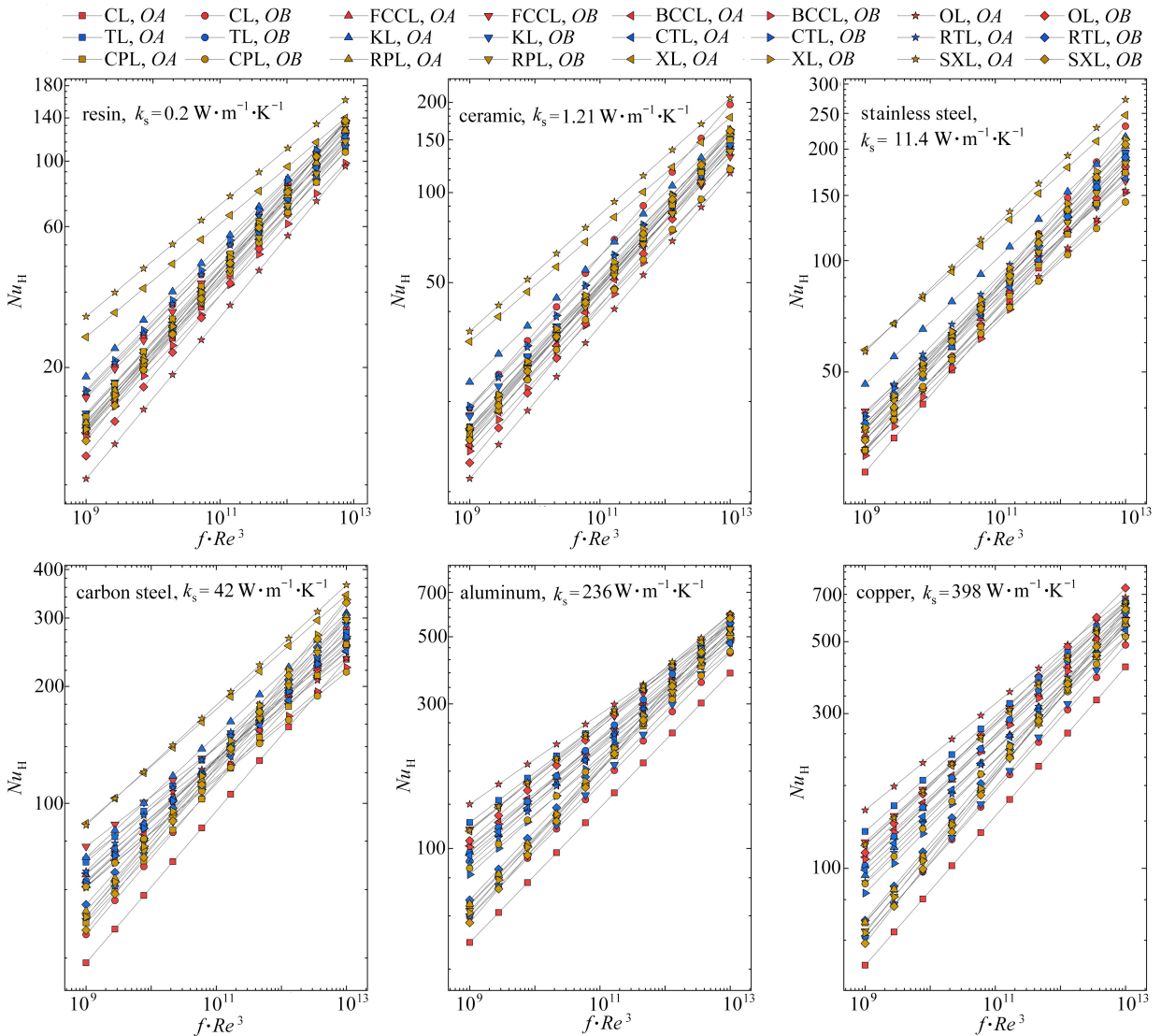
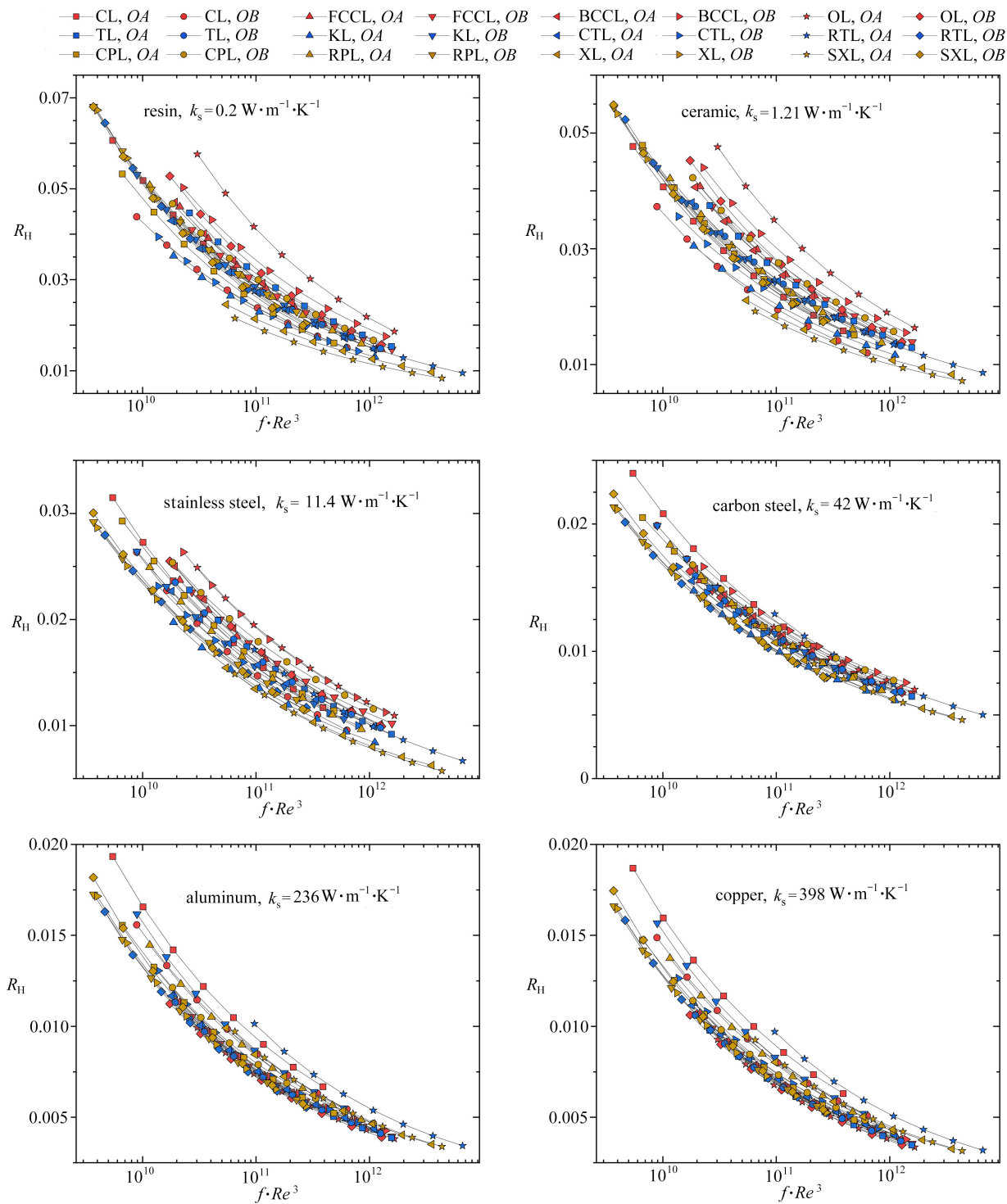


图 15 不同材料点阵结构在等泵功条件下的总体传热性能对比

Fig. 15 Overall heat transfer performance comparison of lattice structures with different materials under fixed pumping power conditions

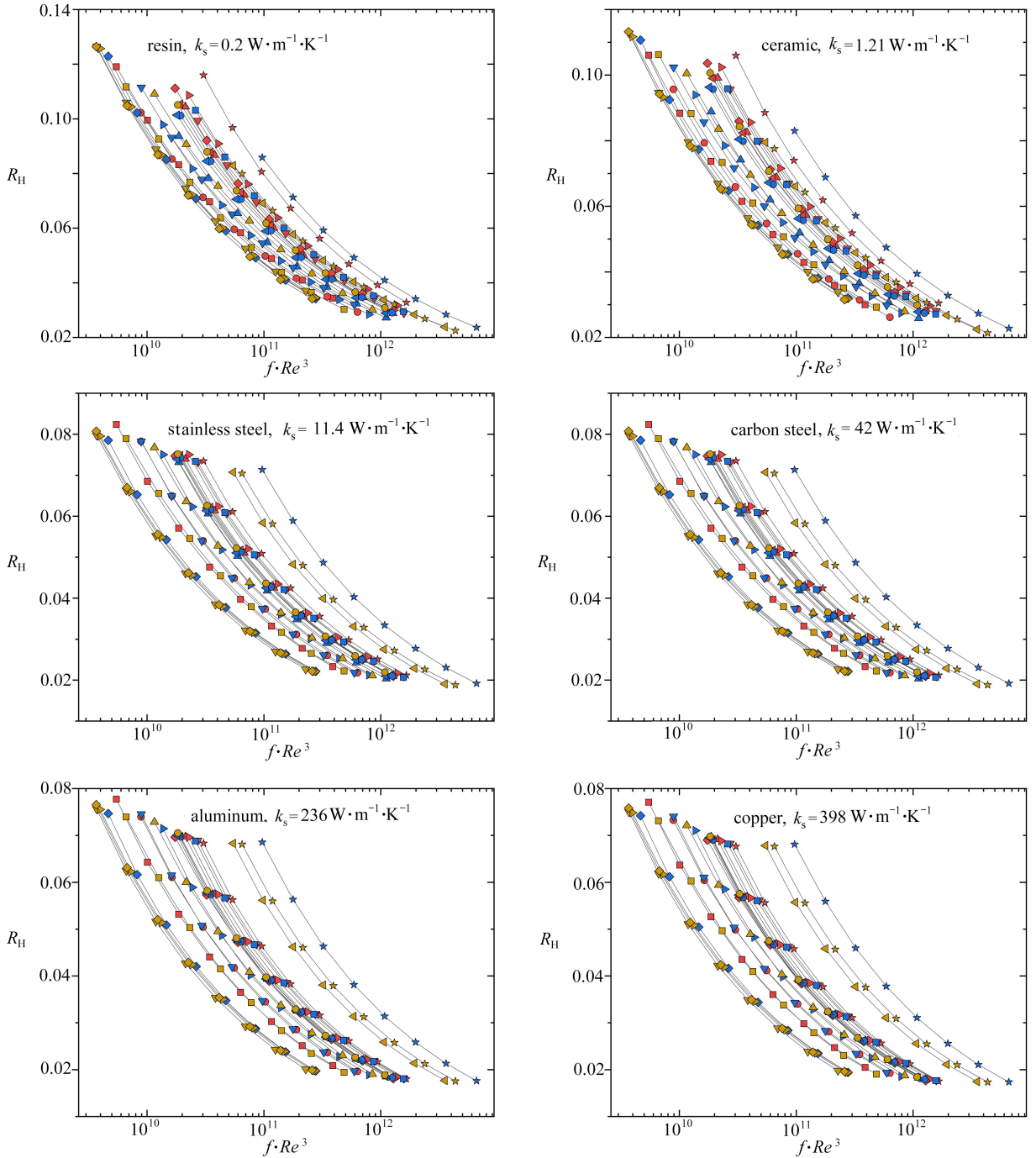
值得注意的是,当固体材料为树脂和陶瓷时, A 向八叉树点阵的总体传热性能最差;但当固体材料为铝和铜且泵功不高时,其总体传热性能跃升至最好.可见,在等泵功条件下,点阵材料导热系数对总体传热性能的影响非常显著.

图 16(a)对比了等泵功条件下热沉的散热性能,其中热沉长度为 120 mm.6 种固体材料下,导热系数由小到大,热阻最小的点阵结构分别是:A 向节点偏移 X 点阵、A 向节点偏移 X 点阵、A 向节点偏移 X 点阵、B 向矩形杆四面体点阵、B 向矩形杆四面体点阵、B 向八叉树点阵.A 向八叉树点阵和 A 向矩形杆四面体点阵的热阻最大。



(a) 热沉长度 $L = 120 \text{ mm}$

(a) Heat sink length $L = 120 \text{ mm}$



(b) 热沉长度 $L = 1\ 200\ \text{mm}$

(b) Heat sink length $L = 1\ 200\ \text{mm}$

图 16 等泵功下点阵结构热沉的无量纲热阻对比

Fig. 16 Dimensionless thermal resistance comparison of lattice structures in heat sink under fixed pumping power conditions

值得注意的是,在等压降和等泵功条件下,固体材料导热系数越大,线条的分布越密集.因此,固体材料导热系数越大,点阵结构的热阻差别越小.

图 16(b) 给出了热沉长度为 $1\ 200\ \text{mm}$ 时各热沉的散热性能.当点阵材料为树脂和陶瓷时, B 向节点偏移 X 点阵的热阻最小;其余点阵材料下, B 向矩形杆金字塔点阵的热阻最小.6 种点阵材料下, A 向矩形杆四

面体点阵热阻均最大,该结论与等压降的对比结果一致,由此可见,热沉长度为 1 200 mm 时,等压降和等泵功条件下,点阵的总体散热性能优劣差别不大。

5 结 论

本文系统综述了文献中报道的三维点阵结构,并对其总体传热特性、流动阻力特性及散热性能进行了系统的比较,得到的主要结论如下:

1) 在等流量条件下,综合传热性能与散热性能,推荐使用 A 向节点偏移 X 点阵和 A 向八叉树点阵。传热性能对比表明:对于 6 种材质的点阵结构,最优点阵的 Nusselt 数比最差点阵的 Nusselt 数分别高 198%~348%,208%~298%,155%~214%,152%~221%,175%~253%和 183%~281%。散热性能对比表明:对于 6 种材质的点阵结构,热沉长度为 120 mm 时,最小热阻比最大热阻分别低约 66%,65%,54%,50%,50%和 50%;热沉长度为 1 200 mm 时,最小热阻比最大热阻分别低 37%~39%,31%~37%,16%~25%,14%~19%,12%~16%和 12%~15%。对所有点阵结构,随着材料导热系数的增大,点阵芯体内的温度梯度逐渐减小,点阵芯体的肋效率逐渐增大,但增长率逐渐减小。因此,总体传热随导热系数单调递增,但增长率逐渐减小。由于不同点阵芯体表面的对流传热系数和比表面积不同,其增长率也不尽相同;对流传热系数和比表面积越大,总体传热对导热系数越敏感。随着热沉长度的增加,温升热阻逐渐增大,不同点阵芯体热沉间散热性能的差别逐渐减小;此时,总热阻主要由温升热阻支配。

2) 在等压降条件下,综合传热性能与散热性能,推荐使用 A 向节点偏移 X 点阵和 B 向节点偏移 X 点阵。传热性能对比表明:最优点阵的总体 Nusselt 数比最差点阵的总体 Nusselt 数分别高 81%~374%,86%~279%,68%~101%,90%~118%,68%~199%和 66%~203%。值得注意的是,部分点阵由于阻力系数较小,低压降下总体传热性能很差,但在高压降下总体传热性能占优势,对应流体流量却较大,在工程设计中,应综合考虑流量、压降和传热性能。

3) 在等泵功条件下,综合传热性能与散热性能,推荐使用 A 向节点偏移 X 点阵和 B 向矩形杆金字塔点阵。传热性能对比表明:最优点阵的总体 Nusselt 数比最差点阵的总体 Nusselt 数分别高 49%~146%,38%~123%,51%~112%,55%~126%,57%~186%和 75%~201%。等泵功条件下,导热系数的变化对于传热性能影响显著,对于散热性能影响较小。热沉长度为 1 200 mm 时,等压降和等泵功条件下,点阵的总体散热性能优劣变化较小。

参考文献(References):

- [1] 李勇. 超临界碳氢燃料流动传热特性及其强化机理研究[D]. 西安:西北工业大学,2021. (LI Yong. Study on heat transfer characteristics and strengthening mechanism of supercritical hydrocarbon fuel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021. (in Chinese))
- [2] 张凯,吴引江,刘高建,等. 高孔隙率金属多孔材料的制备技术与应用[J]. 中国材料进展,2023,42(10):814-825. (ZHANG Kai, WU Yingjiang, LIU Gaojian, et al. Preparation technology and application of metal porous materials with high porosity[J]. *Materials China*, 2023, 42(10): 814-825. (in Chinese))
- [3] YAN H B, WU W T, ZHAO Z Y, et al. Review and comparison of turbulent convective heat transfer in state-of-the-art 3D truss periodic cellular structures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 235: 121450.
- [4] 张永存. 多孔材料传热特性分析与散热结构优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2008. (ZHANG Yongcun. Heat transfer characteristic analysis and heat dissipation structure optimization design of porous materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [5] 严景好,李杰,李一鸣,等. 基于梯度孔隙率金属泡沫的复合相变单元储热性能数值模拟[J]. 储能科学与技术,2023,12(8):2424-2434. (YAN Jinghao, LI Jie, LI Yiming, et al. Numerical simulation of thermal storage performance of composite phase change cell based on gradient porosity metal foam[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(8): 2424-2434. (in Chinese))

- [6] 何树, 娄钦. 多孔介质孔隙率对池沸腾传热性能影响机理的模拟研究[J]. 应用数学和力学, 2024, **45**(3): 348-364. (HE Shu, LOU Qin. Simulation study of porosity effects of porous media on pool boiling heat transfer performances[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(3): 348-364. (in Chinese))
- [7] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, **36**(4): 517-535. (LU Tianjian, HE Deping, CHEN Changqing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2006, **36**(4): 517-535. (in Chinese))
- [8] MEKKI B S, LANGER J, LYNCH S. Genetic algorithm based topology optimization of heat exchanger fins used in aerospace applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, **170**: 121002.
- [9] FENG S S, LI M Z, JOO J H, et al. Thermomechanical properties of brazed wire-woven bulk Kagome cellular metals for multifunctional applications[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, **26**(1): 66-74.
- [10] FERRARI L, BARBATO M, ESSER B, et al. Sandwich structured ceramic matrix composites with periodic cellular ceramic cores: an active cooled thermal protection for space vehicles[J]. *Composite Structures*, 2016, **154**: 61-68.
- [11] LUO S B, XU D Q, SONG J W, et al. A review of regenerative cooling technologies for scramjets[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **190**: 116754.
- [12] KAUR I, AIDER Y, NITHYANANDAM K, et al. Thermal-hydraulic performance of additively manufactured lattices for gas turbine blade trailing edge cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, **211**: 118461.
- [13] YAN H B, MEW T, LEE M G, et al. Thermofluidic characteristics of a porous ventilated brake disk[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2015, **137**(2): 022601.
- [14] YAN H B, ZHANG Q C, LU T J. Heat transfer enhancement by X-type lattice in ventilated brake disc[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, **107**: 39-55.
- [15] 黄安坤, 温耀杰, 张百成, 等. 增材制造金属点阵结构性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, **66**(11): 90-101. (HUANG Ankun, WEN Yaojie, ZHANG Baicheng, et al. Research progress on properties of metal lattice structures in additive manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, **66**(11): 90-101. (in Chinese))
- [16] 杨伟东, 李浩南, 王媛媛, 等. 面向增材制造的非均匀点阵结构综述[J/OL]. 机械科学与技术, 2023[2024-07-12]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230060>. (YANG Weidong, LI Haonan, WANG Yuanyuan, et al. A review of heterogeneous lattice structures for additive manufacturing[J/OL]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023[2024-07-12]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230060>. (in Chinese))
- [17] RAZANI A, PAQUETTE J W, MONTOYA B, et al. A thermal model for calculation of heat transfer enhancement by porous metal inserts[J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2001, **8**: 411-420.
- [18] INAYAT A, FREUND H, ZEISER T, et al. Determining the specific surface area of ceramic foams: the tetra-kaidecahedra model revisited[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, **66**(6): 1179-1188.
- [19] KOOISTRA G. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium[J]. *Acta Materialia*, 2004, **52**(14): 4229-4237.
- [20] LI M, WU L, MA L, WANG B, et al. Mechanical response of all-composite pyramidal lattice truss core sandwich structures[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, **27**(6): 570-576.
- [21] REN X, XIAO L, HAO Z. Multi-property cellular material design approach based on the mechanical behaviour analysis of the reinforced lattice structure[J]. *Materials & Design*, 2019, **174**: 117785.
- [22] HYUN S, TORQUATO S. Optimal and manufacturable two-dimensional, Kagome-like cellular solids[J]. *Journal of Materials Research Society*, 2001, **17**: 137-144.
- [23] DESHPANDE V S, FLECK N A, ASHBY M F. Effective properties of the octet-truss lattice material[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, **49**: 1747-1769.
- [24] YUN S, KWON J, LEE D C, et al. Heat transfer and stress characteristics of additive manufactured FCCZ lat-

- tice channel using thermal fluid-structure interaction model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **149**: 119187.
- [25] ZHANG Q C, HAN Y B, CHEN C Q, et al. Ultralight X-type lattice sandwich structure (I): concept, fabrication and experimental characterization[J]. *Science in China(Series E): Technological Sciences*, 2009, **52** (8): 2147-2154.
- [26] LV G X, JENSEN E, SHEN C T, et al. Effect of amine hardener molecular structure on the thermal conductivity of epoxy resins[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, **3**(1): 259-267.
- [27] TU Z C, MAO J K, HAN X S, et al. Prediction model for the anisotropic thermal conductivity of a 2.5-D braided ceramic matrix composite with thin-wall structure[J]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(5): 875.
- [28] SWEET J N, ROTH E P, MOSS M. Thermal conductivity of Inconel 718 and 304 stainless steel[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1987, **8**(5): 593-606.
- [29] DIXIT T, NITHIARASU P, KUMAR S. Numerical evaluation of additively manufactured lattice architectures for heat sink applications[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, **159**: 106607.
- [30] WANG Y, DING G F. Numerical analysis of heat transfer in a manifold microchannel heat sink with high efficient copper heat spreader[J]. *Microsystem Technologies*, 2007, **14**(3): 389-395.
- [31] JIN X, SHEN B B, YAN H B, et al. Comparative evaluations of thermofluidic characteristics of sandwich panels with X-lattice and pyramidal-lattice cores[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **127**: 268-282.
- [32] ZHANG X Q, JIN X, XIE G N, et al. Thermo-fluidic comparison between sandwich panels with tetrahedral lattice cores fabricated by casting and metal sheet folding[J]. *Energies*, 2017, **10**(7): 906.
- [33] SHEN B B, YAN H B, XUE H Q, et al. The effects of geometrical topology on fluid flow and thermal performance in Kagome cored sandwich panels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **142**: 79-88.
- [34] YAN H B, ZHANG Q C, CHEN W J, et al. An X-lattice cored rectangular honeycomb with enhanced convective heat transfer performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, **166**: 114687.
- [35] JOO J H, KANG K J, KIM T, et al. Forced convective heat transfer in all metallic wire-woven bulk Kagome sandwich panels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**(25/26): 5658-5662.
- [36] KIM T, HODSON H P, LU T J. Pressure loss and heat transfer mechanisms in a lattice-frame structured heat exchanger[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part C): Journal of Mechanical Engineering Science*, 2004, **218**(11): 1321-1336.
- [37] YAN H B, YANG X H, LU T J, et al. Convective heat transfer in a lightweight multifunctional sandwich panel with X-type metallic lattice core[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **127**: 1293-1304.
- [38] YAN H B, ZHANG Q C, LU T J, et al. A lightweight X-type metallic lattice in single-phase forced convection [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **83**: 273-283.