

结构参数对开孔泡沫传热特性影响的数值分析

张之豪, 郭雪岩, 李 春

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 为了解随机 Kelvin cell 结构的孔隙率和孔泡密度对泡沫材料内流体压降、体积对流换热系数和面积优化因子的影响, 采用计算流体力学方法对不同孔隙率和孔泡密度的随机 Kelvin cell 结构金属铝泡沫材料的强制对流换热 (FCHT) 过程进行了数值模拟。结果表明: 入口速度在 5~20 m/s 范围内, 当入口速度一定时, 流体压降及体积对流换热系数随孔隙率的减小而增大, 随孔泡密度的增大而增大; 面积优化因子随孔隙率的增大而增大, 随孔泡密度的减小而减小; 入口速度在 5~20 m/s 范围内, 面积优化因子在不同孔泡密度下随入口速度的变化具有不同的变化趋势, 入口速度提高时, 孔泡密度为 5PPI 的随机 Kelvin cell 泡沫面积优化因子呈增大趋势, 孔泡密度为 10PPI 时面积优化因子呈先增大后减小趋势, 孔泡密度为 20PPI 时面积优化因子呈减小趋势; 压降及体积对流换热系数随入口速度的提高分别呈指数型、对数型增长。

关 键 词: 开孔泡沫; 随机 Kelvin cell 结构; 计算流体力学; 强制对流换热; 体积对流换热系数

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.08.014

[引用本文格式] 张之豪, 郭雪岩, 李 春. 结构参数对开孔泡沫传热特性影响的数值分析[J]. 热能动力工程, 2024, 39(8): 120-127. ZHANG Zhihao, GUO Xueyan, LI Chun. Numerical analysis of the influence of structural parameters on heat transfer characteristics of open cell foam[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8): 120-127.

Numerical Analysis of the Influence of Structural Parameters on Heat Transfer Characteristics of Open Cell Foam

ZHANG Zhihao, GUO Xueyan, LI Chun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: To understand the impact of the porosity and pore density in random Kelvin cell structures on the fluid pressure drop, volumetric convection heat transfer coefficients and area optimization factor in foam materials, computational fluid dynamics (CFD) method was used to numerically simulate the forced convection heat transfer (FCHT) process in aluminum foam materials with various porosities and pore densities featuring random Kelvin cell structures. The findings indicate that within an inlet velocity range of 5-20 m/s, both fluid pressure drop and volumetric convection heat transfer coefficients increase as porosity decreases and pore density increases when the inlet velocity remains constant; additionally, the area optimization factor increases with the increase in porosity and decreases with the decrease in pore density. Within the inlet velocity range of 5-20 m/s, the trend of the area optimization factor varies with inlet velocity and pore density. As the inlet velocity increases, the area optimization factor for random Kelvin cell foam with a pore density of 5PPI increases, it first increases and then decreases for 10PPI, and it decreases for 20PPI. Both pressure drop and volumetric convection heat transfer coefficients exhibit exponential and logarithmic increases, respectively, with rising inlet velocities.

Key words: open cell foam, random Kelvin cell structure, computational fluid dynamics (CFD), forced convection heat transfer (FCHT), volumetric convective heat transfer coefficient

引 言

开孔泡沫材料由于其极高的孔隙率、良好的渗透性以及高比表面积(固体与流体单位体积之间接触表面积),在过去几十年内引起了很多研究者的兴趣^[1-3]。开孔泡沫在热交换器^[4]、燃烧催化^[5]和电子冷却系统^[6]等方向应用广泛。

研究人员对真实开孔泡沫的强制对流换热(FCHT)进行了研究^[7-9]。Dietrich 等人^[7]建立了预测开孔泡沫单位压降的实验关联式,并得出压降随孔隙率的减小而增大随孔泡密度的增大而增大。Xia 等人^[8]对真实开孔泡沫的传热特性进行研究,研究表明,开孔泡沫体积对流换热系数随着孔隙率的降低和孔泡密度的增加而提高,将其实验结果与现有的实验相关预测结果进行了比较,误差为 $\pm 40\%$,这是由于制造过程中孔隙结构的不规则性造成的。因此,为了简化真实泡沫,研究人员提出了多种等效替代模型来进行研究,如立方体、Laguerre-Voronoi 结构、Kelvin cell 结构以及 Weaire-Phenlan 结构等。

其中,Kelvin cell 结构是用来表征真实泡沫最流行和最直接的结构^[10-11]。而在 Kelvin cell 结构的基础上,研究人员提出了对其进行随机化处理的观点^[12]。Lucci 等人^[12]对真实泡沫进行 3D 扫描获得其几何特性,并生成了与其几何特性相匹配的随机 Kelvin cell 结构,用 CFD 分析了两种泡沫的几何、动量和传质特性,研究表明,随机 Kelvin cell 结构表现出与真实泡沫相似的行为,且明显具有更好的反应性和压降之间的权衡,而对于该结构传热方面的研究仍然空白。

为了解孔隙率及孔泡密度对压降和体积对流换热系数的影响,本文利用 Python 脚本语言对建模软件进行二次开发,实现规则 Kelvin cell 结构以及随机 Kelvin cell 结构的参数化设计和自动化生成,通过随机波动范围来控制其随机度,并采用计算流体力学(CFD)方法对随机 Kelvin cell 结构强制对流换热过程进行了数值计算。

1 物理模型与数值计算方法

1.1 物理模型

真实泡沫骨架和规则 Kelvin cell 结构如图 1 所示。从微观结构中可以看出,开孔泡沫材料一般是

11~17 面体的骨架结构,而 Kelvin cell 结构是典型的十四面体骨架结构。规则 Kelvin cell 结构主要由 3 个参数进行控制,即 d_s 、 d_p 、 D_p 。在本研究中,采用 d_p 定义孔径(也有研究者称之为窗径 d_w ^[7]),用 d_s 定义骨架直径, D_p 定义特征孔径,使用 PPI 定义孔泡密度^[13-14]。

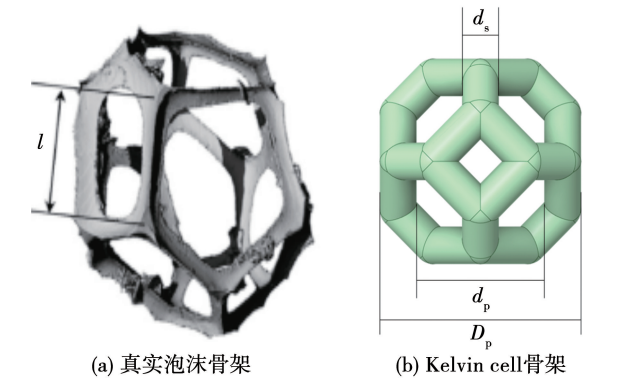


图 1 真实泡沫和规则 Kelvin cell 结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of real foam and regular Kelvin cell

建模参考了随机骨料生成的方法^[15],利用 python 语言完成建模,天顶角方位角角度随机波动范围为 $-5\sim 5$ 倍,生成半径的随机波动范围 $-2\sim 2$ 倍,数据为多次测试结果,既保证了一定的随机程度,又保证不会因随机程度太大而导致模型畸变。

基于计算量以及计算资源的考量,采用 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的四边形面沿着 Z 轴方向进行切割,将切割下来的结构作为计算模型,表 1 为切割后不同孔隙率及不同孔泡密度的几何参数。其中, ε 表示孔隙率, a_{sf} 表示比表面积。图 2 为各样本局部放大图。

表 1 随机 Kelvin cell 结构具体参数
Tab. 1 Specific parameters of random Kelvin cell structure

样本	ε	孔泡密度/ PPI	d_s/mm	d_p/mm	D_p/mm	a_{sf}/m^{-1}
A	0.92	10	0.42	2.14	2.56	774.89
B	0.9	10	0.5	2.06	2.56	845.66
C	0.88	10	0.54	2	2.54	897.35
D	0.86	10	0.6	1.95	2.55	981.08
E	0.9	5	0.8	4.224	5.024	566.17
F	0.9	20	0.25	1.02	1.27	1326.855

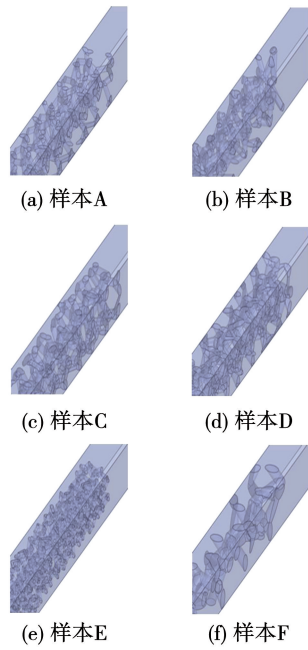


图2 不同孔隙率孔泡密度泡沫结构局部放大的几何模型
Fig.2 Geometric models of local amplification of foam structure with different porosities and cell densities

1.2 数值计算方法

利用 Fluent Meshing 软件生成非结构化网格。然后将生成的网格导入 Fluent 软件中,计算泡沫模型的强制对流换热过程。本次数值模拟中最小雷诺数大于 1 000,故特征长度由水力直径决定。颗粒填充床中,当雷诺数大于 300 时,流动为湍流流动^[16-18]。采用 $k-\varepsilon$ 中的 realizable 模型模拟开孔泡沫中的湍流过程。

牛顿流体的控制方程如下^[10,18]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \tag{3}$$

式中: ρ —密度, kg/m^3 ; t —时间, s ; u —速度, m/s ; p —压力, Pa ; μ —动力粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; μ_t —湍流粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; c_p —比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T —温度, K ; λ —导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 角标 i, j —坐标方向。

边界条件如图 3 所示。骨架与流体域之间的壁面采用恒定热流密度 $15 \text{ kW}/\text{m}^2$ ^[19] 和无滑移边界条件,忽略辐射效应,以便于数据比较。

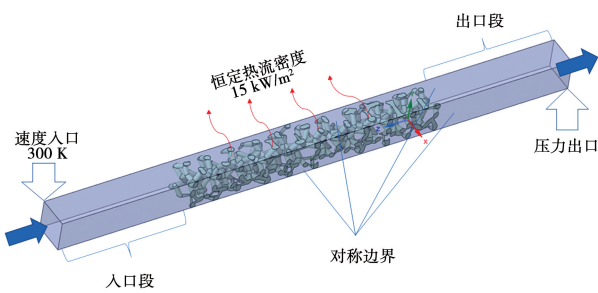


图3 边界条件设置
Fig.3 Boundary condition setting

此外,假设热物理性质,空气的密度是恒定的,金属铝及空气物性参数如表 2 所示。Mancin 等人^[20]通过分析压力梯度差发现,沿流向的样本流体在 10 个孔隙后呈现充分发展状态,在 20 个孔隙中误差仅为 3.2%。Zhang 等人^[19]同样验证了孔径约为 2 mm 的泡沫将出入口区域留下二分之一泡沫长度的距离能够使流体充分发展。故本文中将出入口区域端留下了二分之一泡沫长度的距离,流动方向上长度约为 51 mm,以保证流体充分发展。

表2 物性参数表
Tab.2 Property parameter list

物质	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	动力粘度/ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
空气	1.22	1 006.43	1.789×10^{-5}
铝	2 719	871	—

1.3 网格无关性及数值方法验证

全域网格划分和无关性验证方法参考文献[21],网格划分控制参数如表 3 所示。

表3 网格划分控制参数
Tab.3 Control parameters for grid division

参 数	数 值
基准尺寸/mm	0.425, 0.525, 0.625
面网格尺寸/mm	基准尺寸 $\times 8\%$
增长率	1.2
边界层数	2
边界层厚度	基准尺寸 $\times 2\%$

其中,基准尺寸为一个物理尺寸,按照比例对面网格和体网格进行尺寸设置。比较了不同基准尺寸下随机 Kelvin cell 结构压降,结果如图 4 所示。从

图 4 可知,所有分辨率尺寸下网格计算结果的压降最大偏差小于 2.5%。因此,基准尺寸为 0.625 mm 的粗分辨率网格,以最小的计算资源满足了计算精度的要求,该尺寸下网格控制参数可以用于其他尺寸模型的网格划分。

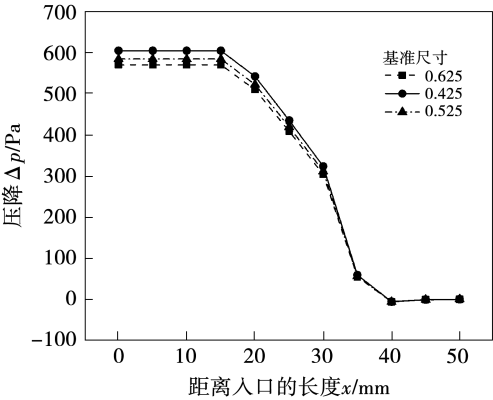


图 4 网格无关性验证
Fig.4 Grid independence verification

由于泡沫互连的骨架是随机分布的,因此研究的泡沫涉及到取向选择的问题,故有必要考虑泡沫的各向异性对其传热和阻力特性的影响。由于在较大雷诺数下泡沫的传热系数受各向异性的影响较小^[22],因此本文只研究了各向异性对阻力特性的影响。孔隙率为 0.9 和 0.86 的泡沫结构孔泡密度均为 10PPI(分别为样本 B 和 D),其 X、Y 及 Z 方向的阻力特性如图 5 所示。从图 5 可知,从 Z 轴、Y 轴、X 轴 3 个方向分别去切割模型,速度范围为 5 ~ 20 m/s 时,孔隙率为 0.86 的模型的单位压降在 3 个方向几乎没有差异,而孔隙率为 0.9 的模型 3 个方向最大误差仅为 1.48%。

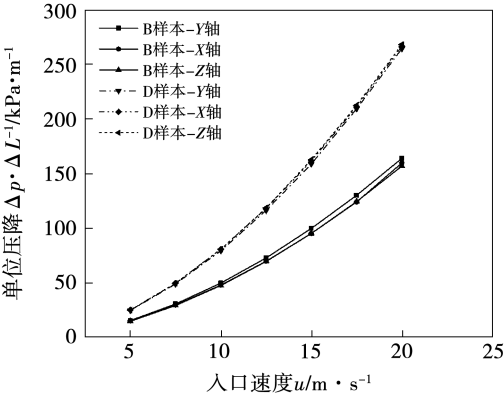


图 5 各向异性验证
Fig.5 Anisotropy verification

2 结果与分析

2.1 孔隙率的影响

采用压降与体积对流换热系数两个参数评价换热结构的传热性能,体积对流换热系数由式(4)给出:

$$h_v = a_s h \tag{4}$$

式中: h —对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_v —体积对流换热系数, $W/(m^3 \cdot K)$ 。

在 5 ~ 20 m/s 速度范围内对孔隙率为 0.92, 0.9, 0.88 和 0.86 的随机 Kelvin cell 结构进行了数值模拟。

孔隙率对单位压降的影响如图 6 所示,对体积对流换热系数的影响如图 7 所示。

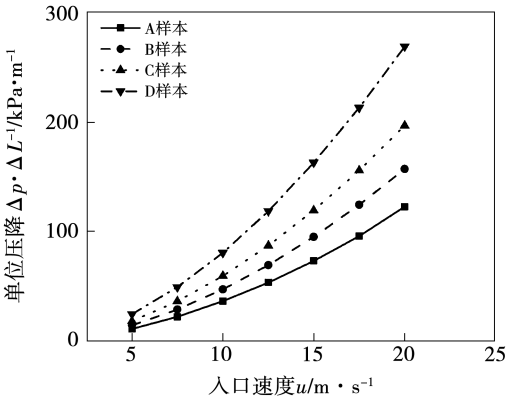


图 6 孔隙率对压降的影响
Fig.6 Effect of porosity on pressure drop

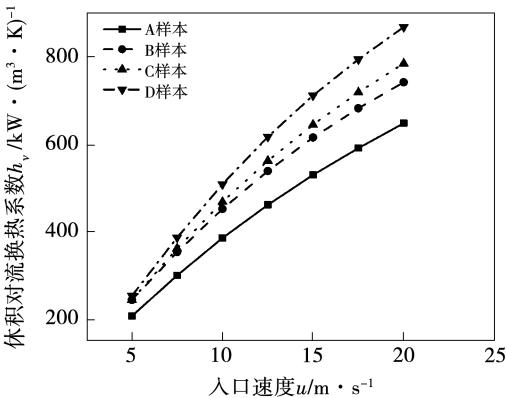


图 7 孔隙率对体积对流换热系数的影响
Fig.7 Effect of porosity on volumetric convection heat transfer coefficient

从图 6、图 7 能够看出,随着入口速度的增大,

随机 Kelvin cell 结构单位压降与换热系数显著增大。以样本 D 为例,相比于 5 m/s 入口速度,20 m/s 入口速度时单位压降与换热系数分别提升 9.9 倍、2.41 倍,且随着孔隙率的减小压降与换热系数增大。压降与换热都发生在骨架区域,故孔隙率的改变对两者必然造成影响。

随机 Kelvin cell 结构比表面积对单位压降和体积对流换热系数的影响如图 8、图 9 所示。

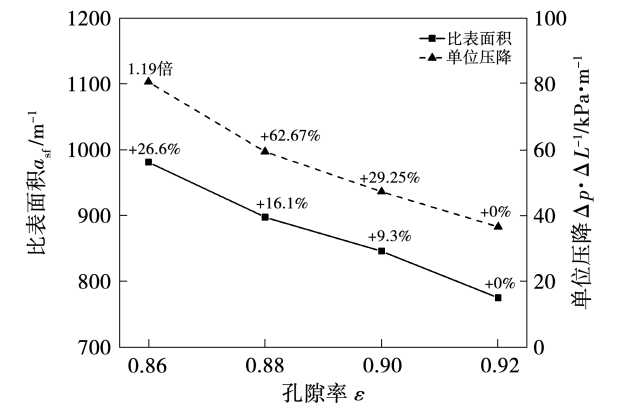


图 8 随机 Kelvin cell 结构比表面积对单位压降的影响

Fig. 8 Effect of specific surface area of random Kelvin cell structure on unit pressure drop

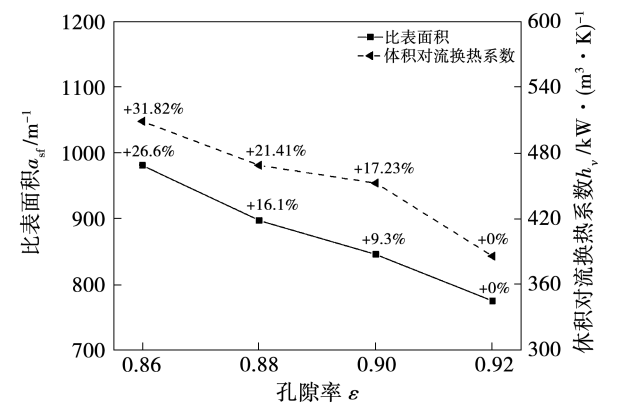


图 9 随机 Kelvin cell 结构比表面积对体积对流换热系数的影响

Fig. 9 Effect of specific surface area of random Kelvin cell structure on volumetric convective heat transfer coefficient

从图 8、图 9 可知,在固定速度($v = 10 \text{ m/s}$)的情况下,孔隙率的改变引起了比表面积的改变。相比样本 A 的结构,样本 D 比表面积增加了 26.6%。而比表面积的增加,使动量与能量传递面积更大,从

而使压降与换热系数有不同程度地增强,压降增加了 1.19 倍,换热系数增加了 31.82%。且随着速度的增加,该影响会更大;另一个造成这个现象的关键因素是:样本 D 骨架半径最大,故骨架结构对其流动扰动更大,使其压降与换热系数更大。

从曲线趋势分析,对于单位压降而言,随速度的提升呈指数型增长;对于体积对流换热系数而言,则呈对数型增长。可见,一味地提高速度并不能使换热性能得到提升,相反会导致其急剧下降。想要使换热性能最大化,需在压降及体积对流换热系数之间做出权衡。

为了更好地去评价压降与体积对流换热系数对整体传热特性的影响,采用面积优度因子^[19]方法进行评价,公式如下:

$$\frac{j}{f} = Nu_v / Re Pr^{1/3} f \tag{5}$$

$$j = Nu_v / Re Pr^{1/3} \tag{6}$$

$$f = \frac{\Delta P}{\Delta L} \times \frac{2d_h}{\rho \mu^2} \tag{7}$$

$$Nu_v = h_v d_h^2 / \lambda \tag{8}$$

$$Re = \rho u d_h / \mu \tag{9}$$

式中: λ —空气热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; u —入口速度, m/s ; ρ —空气密度, kg/m^3 ; μ —动力粘度, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; f —摩擦因子。

对孔隙密度均为 10PPI 孔隙率为 0.86、0.88、0.90 和 0.92 的泡沫结构换热性能进行了分析,孔隙率对面积优度因子的影响如图 10 所示。

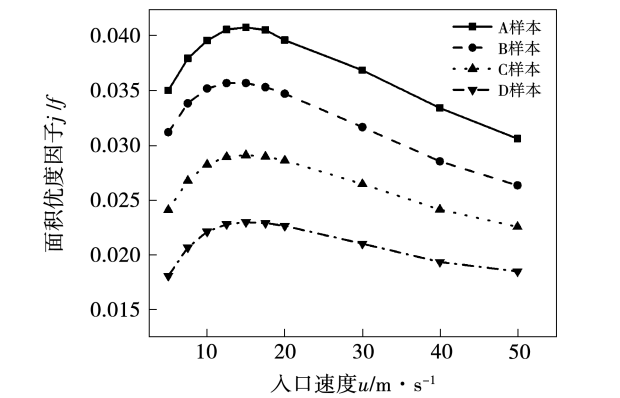


图 10 孔隙率对面积优度因子的影响

Fig. 10 Effect of porosity on area optimization factor

图 10 表明,随着入口速度的增大,不同孔隙率

样本的 j/f 呈先增大后减小的趋势。这是因为根据前文中对压降以及对流换热系数增长趋势的分析,当换热系数的增长率大于压降的增长率时(入口速度 $5 \sim 15 \text{ m/s}$),换热性能增大,且出现最大值,而在最值之后,随着速度的增大,压降增长率大于换热系数增长率,故换热性能不断下降。另外,当入口速度在 $5 \sim 50 \text{ m/s}$ 时,随着孔隙率的增大,整体换热性能提高。这是由于孔隙率的改变造成比表面积的变化,使单位压降以及换热系数分别提升了 1.19 倍,31.82%,比表面积的增大对压降的影响远远大于换热系数,使其换热性能下降。

2.2 孔泡密度的影响

为探究孔泡密度对压降及体积对流换热系数的影响,对 3 种不同孔泡密度(5PPI、10PPI、20PPI)的泡沫结构在入口速度范围为 $5 \sim 20 \text{ m/s}$ 时进行了数值模拟。孔泡密度对单位压降和体积对流换热系数的影响如图 11、图 12 所示。

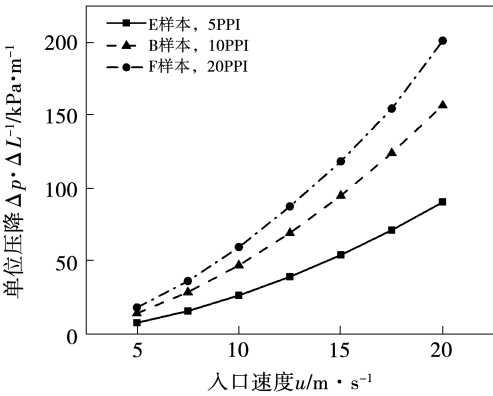


图 11 孔泡密度对压降的影响
Fig. 11 Effect of PPI on pressure drop

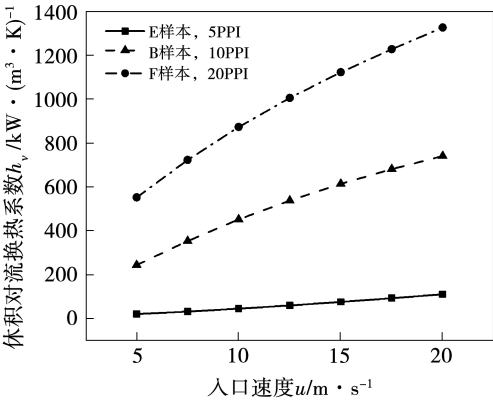


图 12 孔泡密度对体积对流换热系数的影响
Fig. 12 Effect of PPI on volumetric convective heat transfer coefficient

从图 11、图 12 中能够看出,随着入口速度的增大,压降与体积对流换热系数增长同样显著,二者分别增大 10.48 和 4.15 倍,且随着孔泡密度的增大,压降与体积对流换热系数增大。

随机 Kelvin cell 结构比表面积对单位压降和体积对流换热系数的影响如图 13、图 14 所示。由图 13、图 14 可知,在固定速度(10 m/s)时,孔泡密度的改变造成了比表面积的改变大,最大相差 1.34 倍,从而导致了压降与体积对流换热系数的剧烈变化,分别使单位压降及换热系数提高了 1.24 和 18.12 倍。

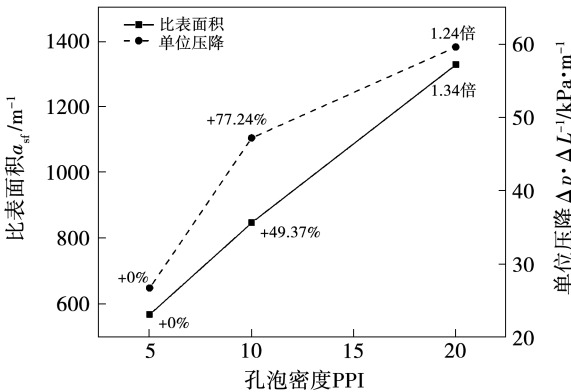


图 13 随机 Kelvin cell 结构比表面积对单位压降的影响
Fig. 13 Effect of specific surface area of random Kelvin cell structure on unit pressure drop

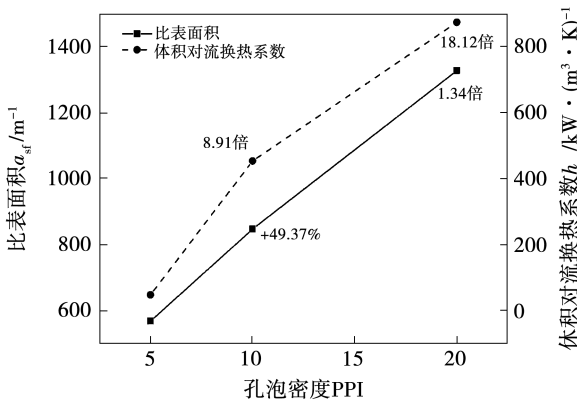


图 14 随机 Kelvin cell 结构比表面积对体积对流换热系数的影响
Fig. 14 Effect of specific surface area of random Kelvin cell structure on volumetric convective heat transfer coefficient

同样,采用面积优度因子^[19]来进行换热性能的

评价。对孔隙率为 0.9,孔泡密度为 5PPI、10PPI 和 20PPI 的泡沫结构换热性能进行了分析,如图 15 所示。图 15 表明,当速度在 5 ~ 20 m/s 时,对于孔泡密度为 5PPI 的样本,换热性能随着速度的增大而增大;对于 10PPI 的样本,与 2.1 节相同,换热性能随着速度的增大先增大后减小,且存在着最大值;对于 20PPI 的样本,换热性能随着速度的增大而减小。以上结果都归因于压降及换热系数不同的增长率。当压降增长率大于换热系数时,换热性能下降,反之换热性能上升,故造成了不同样本的不同变化趋势。

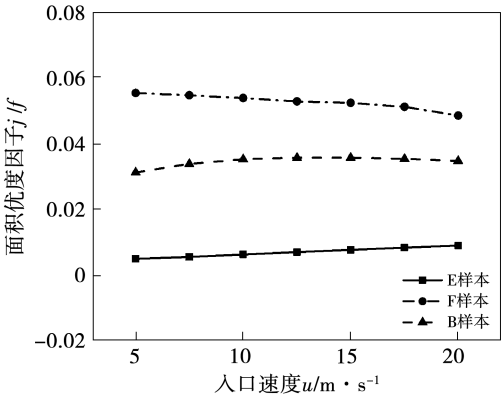


图 15 PPI 对面积优化因子的影响

Fig. 15 Effect of PPI on area optimization factor

2.3 泡沫结构单位压降对比

孔泡密度 10PPI,孔隙率为 0.88 的随机 Kelvin cell 泡沫结构、规则 Kelvin cell 结构泡沫与真实泡沫在速度范围为 5 ~ 20 m/s 时单位压降的对比如图 16 所示。由于真实泡沫实验数据受几何因素及材料不同的影响,故真实泡沫单位压降数据采用 Dietrich 等人^[7]提出的单位压降实验关联式得出。从图 16 中可以发现,随机结构更加接近真实泡沫。当速度低于 10 m/s 时,三者吻合的很好,最大偏差 10.44%。但随着速度的增大,偏差越来越大,最大为 33.15%。造成这一现象的关键为,相比于规则结构,随机结构拥有更大的比表面积,且骨架结构分布更为随机。当流速较低时($u = 5\text{ m/s}$),无论结构多么复杂,由于本身流速并不大,结构的差别对其影响并不能完全体现出来。但随着流速的提升,结构对其扰动更加剧烈,造成了不同的偏差。

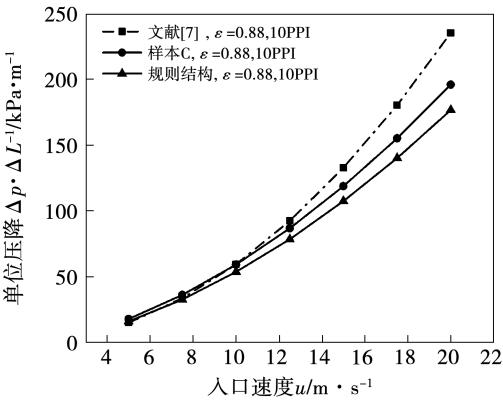


图 16 真实泡沫、规则 Kelvin cell 泡沫和随机 Kelvin cell 泡沫的单位压降对比

Fig. 16 Comparison of unit pressure drop of real foam, regular Kelvin cell foam and random Kelvin cell foam

3 结 论

基于计算流体力学 (CFD) 方法数值研究了强制对流换热条件下随机 Kelvin cell 结构孔隙率及孔泡密度对压降和换热性能的影响,主要研究结论如下:

(1) 随机 Kelvin cell 结构的孔隙率及孔泡密度是影响流体压降、体积对流换热系数和面积优化因子的关键因素。在入口速度 5 ~ 20 m/s 范围内,当入口速度一定时,流体压降及体积对流换热系数随孔隙率的增大而减小、随孔泡密度的增大而增大,面积优化因子随孔隙率的增大而增大、随孔泡密度的减小而减小。

(2) 在入口速度 5 ~ 20 m/s 范围内,面积优化因子在不同孔泡密度下随入口速度的变化具有不同的变化趋势,当孔泡密度为 5PPI 时随机 Kelvin cell 泡沫面积优化因子随入口速度提高而增大,当孔泡密度为 10PPI 时面积优化因子先增大后减小,当孔泡密度为 20PPI 时面积优化因子随入口速度提高而减小;压降及体积对流换热系数随入口速度的提高分别呈指数型、对数型增长。

(3) 随机 Kelvin cell 结构相比于规则 Kelvin cell 结构更加接近真实泡沫。

参考文献:

[1] YAN H, WU W T, ZHAO Z, 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.

[2] MOU X, CHEN Z. Pore-scale simulation of heat and mass transfer in deformable porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 158: 119878.

[3] POURESLAMI P, SIAVASHI M, MOGHIMI H, et al. Pore-scale convection-conduction heat transfer and fluid flow in open-cell metal foams: A three-dimensional multiple-relaxation time lattice Boltzmann (MRT-LBM) solution[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 126: 105465.

[4] ODABAE M, HOOMAN K. Application of metal foams in air-cooled condensers for geothermal power plants: An optimization study[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38(7): 838 – 843.

[5] GONG L, LI Y, BAI Z, et al. Thermal performance of micro-channel heat sink with metallic porous/solid compound fin design[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 288 – 295.

[6] QU Z G, LI W Q, WANG J L, et al. Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(10): 1546 – 1549.

[7] DIETRICH B, SCHABEL W, KIND M, et al. Pressure drop measurements of ceramic sponges—Determining the hydraulic diameter[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(16): 3633 – 3640.

[8] XIA X L, CHEN X, SUN C, et al. Experiment on the convective heat transfer from airflow to skeleton in open-cell porous foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 106: 83 – 90.

[9] ZHAO Jiafei, SUN Mingrui, ZHANG Lunxiang, et al. Forced convection heat transfer in porous structure; Effect of morphology on pressure drop and heat transfer coefficient[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(2): 363 – 393.

[10] VIJAY D, GOETZE P, WULF R, et al. Homogenized and pore-scale analyses of forced convection through open cell foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 123: 787 – 804.

[11] ZHU Q, XUAN Y. Performance analysis of a volumetric receiver composed of packed shaped particles with spectrally dependent emissivity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 421 – 431.

[12] LUCCI F, DELLA TORRE A, VON RICKENBACH J, et al. Performance of randomized Kelvin cell structures as catalytic substrates: Mass-transfer based analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 112: 143 – 151.

[13] HUU T T, LACROIX M, PHAM HUU C, et al. Towards a more realistic modeling of solid foam: Use of the pentagonal dodecahedron geometry[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(24): 5131 – 5142.

[14] LACROIX M, NGUYEN P, SCHWEICH D, et al. Pressure drop measurements and modeling on SiC foams[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(12): 3259 – 3267.

[15] 汪 奔, 王 弘, 张志强, 等. 三维随机凹凸型混凝土骨料细观建模方法研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(5): 1072 – 1076.

WANG Ben, WANG Hong, ZHANG Zhiqiang, et al. Study on mesoscopic modeling method for three-dimensional random concave-convex concrete aggregate[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(5): 1072 – 1076.

[16] DELLA TORRE A, MONTENEGRO G, TABOR G R, et al. CFD characterization of flow regimes inside open cell foam substrates[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, 50: 72 – 82.

[17] DYBBS A, EDWARDS R V. A new look at porous media fluid mechanics—Darcy to turbulent[J]. Springer Netherlands, 1984, 82: 199 – 256.

[18] PENG W, XU M, LI X, et al. CFD study on thermal transport in open-cell metal foams with and without a washcoat: Effective thermal conductivity and gas-solid interfacial heat transfer[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 161: 92 – 108.

[19] ZHANG Z, YAN G, SUN M, et al. Pore-scale simulation of forced convection heat transfer in metal foams with uniform and gradient structures[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120074.

[20] MANICIN S, ZILIO C, DIANI A, et al. Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 62: 112 – 123.

[21] HUO G, GUO X. Numerical analyses of heterogeneous CLC reaction and transport processes in large oxygen carrier particles[J]. Processes, 2021, 9(1): 125.

[22] LASIELLO M, BIANCO N, CHIU W K S, et al. Anisotropic convective heat transfer in open-cell metal foams: Assessment and correlations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119682.

(丛 敏 编辑)