

DOI: 10.7652/xjtuxb201404014

高孔隙率通孔金属泡沫有效导热系数的 实验和理论研究

杨肖虎¹, 邝九杰¹, 白佳希², 卢天健², 金东范³

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械结构强度与
振动国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 金山大学机械工程学院, 2050, 南非约翰内斯堡)

摘要: 为了研究高孔隙率通孔金属泡沫中的热传导特性及预测有效导热系数, 发展了一种新的全解析有效导热系数模型。该模型通过建立更真实的十四面体三维结构作为代表单元, 解析求解代表单元内稳态傅里叶热传导方程获得通孔泡沫铝的有效导热系数。该模型不含任何拟合或经验参数, 有效导热系数与孔隙率之间具有简单的线性关系, 且比例系数阐释了热曲折率的大小。高孔隙率下, 模型预测与实验测量和文献数据吻合良好。研究表明: 对于具有大导热系数比的实心杆与流体相(如充满空气的泡沫铝), 流体相的传热可忽略不计, 热量沿着曲折金属杆的一维传导占主导地位。在忽略自然对流和辐射传热时, 泡沫铝有效导热系数基本不受孔密度及杆截面形状的影响。在所研究的温度范围内, 泡沫铝有效导热系数可视为常数。

关键词: 有效导热系数; 通孔金属泡沫; 一维热传导; 十四面体

中图分类号: TK311 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0079-06

Experimental and Analytic Investigations for Effective Thermal Conductivity in High Porosity Metallic Foams

YANG Xiaohu¹, KUANG Jiujie¹, BAI Jiayi², LU Tianjian², KIM Tongbeum³

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Mechanical Engineering, University of the Witwatersrand, Private Bag 3, Wits 2050, Johannesburg, South Africa)

Abstract: To demonstrate a totally analytic model of effective thermal conductivity in high porosity open-cell metallic foams, a 3D tetrakaidecahedron configuration is selected as the representative unit cell for the metal foam. By solving 1D steady-state Fourier's equation for the representative volume, a purely analytic model without requiring any fitting or empirical coefficient is obtained. Coinciding well with the present measurements and experimental data from literature, this model suggests a linear dependence of effective thermal conductivity upon porosity, where the proportionality coefficient is the reciprocal of thermal tortuosity. The heat transfer in fluid phase is negligible due to large thermal conductivity ratio between solid ligaments and fluid phase (e. g., air-saturating Al foam), 1D heat conduction along the tortuous ligaments thus dominates. Neglecting natural convection and radiation of thermal energy, the topological parameters, such as pore density (PPI) and ligament cross-sectional shape, exert little influence

收稿日期: 2013-10-09。 作者简介: 杨肖虎(1986--),男,博士生;卢天健(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2011CB6103005);高等学校学科创新引智计划资助项目(B06024);国家自然科学基金资助项目(51206128)。

网络出版时间: 2014-01-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140115.1446.001.html>

on effective thermal conductivity. Furthermore, the effective conductivity remains constant within the experimental temperature range.

Keywords: effective thermal conductivity; open-cell metal foam; one-dimensional heat conduction; tetrakaidecahedron

通孔金属泡沫具有比表面积大、体积小、质量轻等优点,在电子元器件热管理、燃料电池和紧凑型热交换器等领域中有着广阔的应用^[1-2]。在以金属泡沫为核心的热交换系统热分析中,有效导热系数是一个关键参数,故有关泡沫金属的传热过程和精确评估其有效导热系数的研究得到了广泛关注^[2]。

在 Maxwell 的先驱性工作^[3]之后,出现了大量致力于通过解析方法确定多孔介质有效导热系数的理论研究^[4],它们都基于一些重要的假设,例如:随机分布的两相串并联结构^[5];对称分布的两相结构^[6]。然而,由于这些模型的假设不符合多孔介质的实际结构,不能对通孔金属泡沫的有效导热系数进行准确预测,因而有必要建立一种基于准确描述多孔介质拓扑结构的有效导热系数模型。

Calmidi 等和 Bhattacharya 等提出了一个以二维六角蜂窝形状为单胞的周期性结构来近似模拟通孔泡沫铝的拓扑结构^[7-8],六角形连接处具有一个大小可调节的正方形或圆形节点,节点大小可通过拟合实验数据得到。虽然此类二维模型能够对通孔金属泡沫的有效导热系数给出较好的预测,但从本质上讲它们属于半解析模型,二维的周期性结构与金属泡沫的三维拓扑结构存在很大差异,对探索热量沿着金属泡沫的三维骨架进行传导的帮助很有限。

Boomsma 等将二维六边形结构扩展为以十四面体为单胞的三维周期性拓扑结构^[9],为简单起见,他们假定构成十四面体每条边的金属杆为圆柱形,杆连接处具有立方体节点。虽然十四面体单胞模型可较好地估计通孔泡沫铝的有效导热系数,但该模型的解析形式相当复杂,且立方体节点的大小需通过拟合实验数据获得。本质上讲,该模型也是一个半解析模型。

本文针对通孔泡沫铝真实的三维拓扑结构提出一个完全解析的有效导热系数模型,据此加深对泡沫铝中三维热传导机理的认识。通过扫描电镜 (SEM) 下对泡沫铝拓扑结构的观察分析,确定以十四面体为单胞的周期性结构近似泡沫铝的空间拓扑。此外,为了验证本文模型的正确性,实验测量了具有不同孔隙率(0.912~0.963)和孔密度的通孔泡沫铝的有效导热系数,并将模型预测值与实验测量、

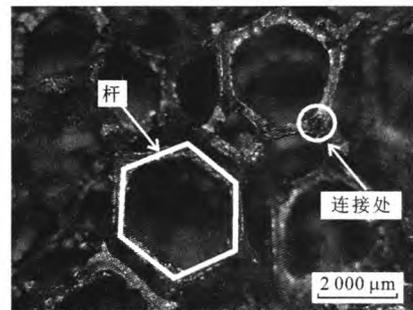
文献中的数据和其他模型预测值做了分析比较。

1 解析模型

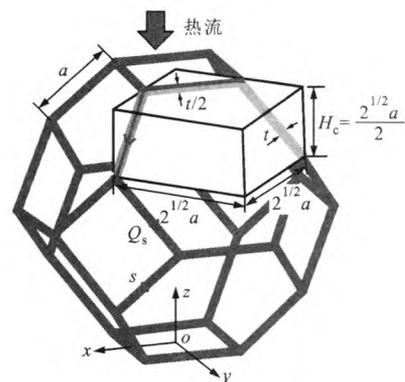
1.1 一维传热模型

在建立解析模型之前,首先需要确定通孔泡沫铝的三维拓扑结构。在发泡法制备^[10]通孔泡沫铝材料的过程中,气泡在熔体中自由移动,最终会形成十四面体来保证最小的表面能^[11],这与泡沫铝在 SEM 下观察的结果一致,如图 1a 所示,以下的传热分析均基于十四面体结构。

图 1b 为十四面体单胞模型,十四面体包含在一个长方体单胞中,由边长 a 和厚度 t 均相同的 6 个正方形和 8 个六边形组成。Boomsma 等认为在金属杆的连接处存在一个立方体节点,且通过实验拟合得到该节点的大小是杆厚度的 2.95 倍^[9]。但是,通过分析 SEM 图片,发现节点大小仅为杆厚度的 1.25 倍。考虑到节点的影响很有限(稍后讨论),节



(a)扫描电镜照片



a 为棱边长度; t 为棱厚度

(b)十四面体单胞模型

图 1 通孔泡沫铝的拓扑结构

点尺寸忽略不计。

用 k_e 表示单胞的有效导热系数, k_s 和 k_f 分别表示杆材料和单胞内填充空气的导热系数。根据 Fourier 导热定律, 施加于控制体的总热量 Q_t 可表示为

$$Q_t = k_e A_0 \frac{\Delta T}{H_c} \quad (1)$$

式中: A_0 表示长方体单胞的传热面积; H_c 表示单胞的高度; ΔT 是单胞的上下表面温差。

通过单胞的总热量由固相热量 (Q_s) 和流体相热量 (Q_f) 共同传导, 即 $Q_t = Q_s + Q_f$ 。根据 Fourier 导热定律, 沿着杆的一维传热可表示为

$$Q_s = -k_s A_s \frac{dT}{ds} \quad (2)$$

式中: s 是沿着杆的坐标, 强烈依赖于泡沫铝的拓扑结构; 由于杆的截面积 A_s 是微元 ds 的函数而与 dT 无关, 采用分离变量法, 可得

$$Q_s ds = -k_s dT \quad (3)$$

将式(3)积分, 得到

$$Q_s \int_0^{H(s)} \frac{1}{A_s} ds = -k_s T \Big|_0^{H_c} \quad (4)$$

假设沿着弯曲一维传热路径的热量 Q_s 为恒定, 将式(4)经过变换可得

$$Q_s = k_s \Delta T / \left(\int_0^{H(s)} \frac{1}{A_s} ds \right) \quad (5)$$

考虑到金属杆与填充泡沫铝孔洞的空气导热系数相差 8 000 倍以上 ($k_s/k_f > 8 000$), 可忽略不计通过气体相的传热 (即 $Q_t = Q_s$)。比较式(1)和式(5), 得到归一化的有效导热系数 (k_e/k_s) 的如下表达式

$$\frac{k_e}{k_s} = \left(\frac{H_c}{A_0} \right) / \left(\int_0^{H(s)} \frac{1}{A_s} ds \right) \quad (6)$$

式(6)虽然是针对高孔隙率通孔泡沫材料提出的, 但对于大长径比杆状多孔材料也同样适用, 当多孔材料的拓扑结构已知时可以给出具体的表达式。

1.2 十四面体单元的拓扑分析

为便于计算, 仅拿出十四面体单元的 1/16 作为单胞进行拓扑结构分析。该单胞包含了 3 根长度为 a , 厚度分别为 t , t 和 $t/2$ 且具有正方形横截面的杆, 单胞的长 \times 宽 \times 高为 $2^{1/2}a \times 2^{1/2}a \times 2^{1/2}a/2$, 如图 1b 所示。

根据单胞的几何特征, 两相多孔介质的相对密度可用棱边长度和厚度的函数表示为

$$\rho^* = 1 - \epsilon = \frac{3 \times 2^{1/2}}{4} \frac{t^2}{a^2} \quad (7)$$

式中: ρ^* 和 ϵ 分别为多孔介质相对密度和孔隙率; a

和 t 分别为金属杆的长度和厚度。对式(6)中传热面积的倒数沿 s 路径的积分可作如下计算

$$\int_0^{H(s)} \frac{1}{A_s} ds = \frac{a}{t^2} \quad (8)$$

A_0 和单胞高度 H_c 可由以下几何关系决定

$$A_0 = 2a^2 \quad (9)$$

$$H_c = \frac{2^{1/2}a}{2} \quad (10)$$

将式(8)~(10)代入式(6)可得

$$\frac{k_e}{k_s} = \left(\frac{H_c}{A_0} \right) / \left(\int_0^{H(s)} \frac{1}{A_s} ds \right) = \frac{2^{1/2}}{4} \frac{t^2}{a^2} \quad (11)$$

再把孔隙率的表达式(7)代入式(11), 得到最终的解析表达式为

$$k_e/k_s = (1 - \epsilon)/3 \quad (12)$$

由此可以看出, 有效导热系数是孔隙率的线性函数, 系数为 1/3。式(12)在形式上与一些经验关联式类似, 具有 $k_e/k_s = C(1 - \epsilon)$ 的形式。例如: Bhattacharya 等通过拟合实验数据^[8]得到 $C = 0.35$; Ozmat 等通过热电比拟^[12]得到 $C = 0.346$ 。

式(12)从解析的角度解释了这些经验关系式具有类似经典并联模型的线性表达形式的物理原因, 同时也提供了经验公式系数 (0.33 左右) 的物理意义为热曲折度 (tortuosity)。

2 实验研究

2.1 实验装置

本文所使用的泡沫铝试样由纯铝 (导热系数为 $236 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 通过发泡法制成并切割成相同的尺寸 $68 \text{ mm} \times 68 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$, 详细参数见表 1。采用稳态法测量通孔泡沫铝的有效导热系数, 实验装置如图 2 所示。泡沫铝试样被夹在 2 mm 厚的铜基板中, 接触面上涂有导热硅脂以减小接触热阻。上端采用 Kapton 薄膜电加热片提供恒定热流, 下侧铜基板外侧设置恒温冷却装置, 以实现泡沫铝热

表 1 通孔泡沫铝试样参数

试件编号	孔隙率	孔直径/mm	孔密度/ m^{-1}
1	0.912	2.3	276
2	0.913	3.0	197
3	0.917	1.8	394
4	0.923	0.8	787
5	0.928	1.8	394
6	0.953	3.65	236
7	0.957	2.75	315
8	0.963	1.7	394

平衡。其余四周及装置外部均覆盖了导热系数为 $0.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的聚氨酯泡沫,此外还在有机玻璃的内外侧壁附加放置了两个 T-型热电偶 (COT-2, Omega™) 用以估计侧壁热损失 q''_{loss} 。在本次实验范围内,通过侧壁的热流损失 (q''_{loss}) 在总输入热流 (q''_{input}) 中所占比例为 1.5%,因此可以视为一维热流。

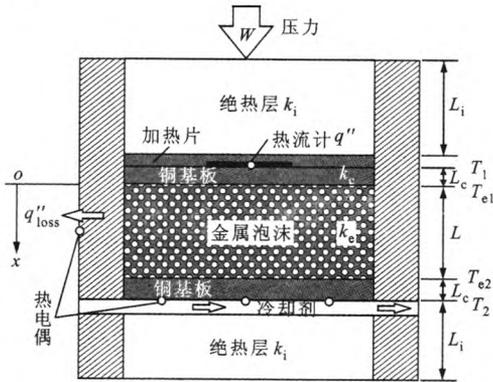


图2 有效导热系数实验测试系统示意图

如图2所示,沿 x 轴的一维稳态导热由傅里叶导热定律确定,经简单变换后得到试件的有效导热系数为

$$k_e = -\frac{q''_{\text{net}} L}{\Delta T} \quad (13)$$

式中: q''_{net} 是通过试件的净流量,定义为 $q''_{\text{net}} = q''_{\text{input}} - q''_{\text{loss}}$; L 是试件沿 x 轴方向的长度; $\Delta T = T_{e2} - T_{e1}$ 是试件上下表面的温差。由于 T_{e2} 和 T_{e1} 为非直接测量量,因此其数值由下式确定

$$T_{e2} = T_2 + \frac{q''_{\text{net}} L_c}{k_c} \quad (14)$$

$$T_{e1} = T_1 - \frac{q''_{\text{net}} L_c}{k_c} \quad (15)$$

式中: T_2 和 T_1 分别表示直接由热电偶测量得到的铜基板下表面和上表面的温度。

2.2 不确定度分析

通过实验测得的导热系数 k_e 受到 q''_{net} 、 T_{e1} 、 T_{e2} 和 L 的测量精度的影响。其中 L 控制为 22 mm 固定不变, k_e 的测量误差可依据 Coleman 等^[13] 给出的评估方法估计为

$$\frac{\Delta k_e}{k_e} = \left[\left(\frac{\Delta q''_{\text{net}}}{q''_{\text{net}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{e1}}{T_{e1} - T_{e2}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{e2}}{T_{e1} - T_{e2}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

式中:测量 T_{e1} 和 T_{e2} 所用热电偶的误差控制在 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内。对于由膜状热流计测量的输入热流

q''_{net} 而言,其误差主要来源于万用表的信号读数,估计在 2.0% 以内。综上,本文测量有效导热系数的误差估计在 $\pm 3.5\%$ 之内。

3 结果讨论

3.1 导热系数与孔隙率之间的关系

图3描绘了通孔泡沫铝有效导热系数与孔隙率之间的关系,可以看出:在高孔隙 ($\epsilon \geq 0.9$) 范围内有效导热系数强烈依赖于孔隙率,呈线性关系,且数值上随着孔隙率的升高而大幅降低。本文的解析模型预测与本文测量所得及文献[7,14]中给出的实验测定数据变化趋势一致,且能很好地吻合。这意味着通过空气和节点的传热对通孔泡沫铝的整体有效导热系数的影响确实很小。

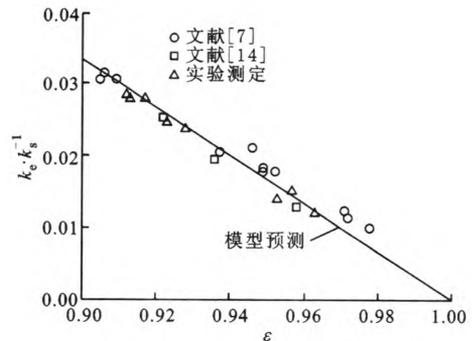


图3 有效导热系数与孔隙率的关系

据文献[15-16]报道,多孔介质的有效导热系数可用孔隙率和曲折度进行评估,即

$$\frac{k_e}{k_s} = \frac{(1-\epsilon)}{\tau} \quad (17)$$

式中: τ 是曲折度,定义为热量实际传导的路线长度与直线传导(最短路线)的比值,反映了传热长度的伸长率。

对比式(17)和(12)可得 $\tau = 3$ 。热量在宏观上通过金属杆并联传递,但从微观(孔隙级)上看具有曲折路径,预计传热长度长于真正的并联结构,从而导致有效传热系数减小。需要指出的是,流体相传热的忽略仅限于高导热系数比情形,如本文考虑的通孔泡沫铝 ($k_s/k_f > 8000$),对化学工程中常用的液体饱和和多孔陶瓷而言,必须考虑流体相的传热。

3.2 节点、孔大小及杆截面形状的影响

3.2.1 节点影响 Boomsma 等通过实验拟合得到了大小为杆厚度 2.95 倍的立方体节点^[9]。但是,通过分析本文的 SEM 图片,发现通孔泡沫铝节点的大小仅为杆厚度的 1.25 倍。此外,在理论模型的建立推导中忽略节点对导热的影响后所得到的预测结

果与实验数据吻合良好(见图3),这也进一步说明高孔隙率泡沫铝的真实节点对传热的影响有限,可忽略不计。

3.2.2 孔密度影响 图4描绘了孔密度对高孔隙率通孔泡沫铝有效导热系数的影响,图中实验数据来自于本实验测量和 Calmidi 等的实验结果^[7]。实验数据分为4组,由于每组的泡沫孔隙率不尽相同,故采用平均孔隙率。在采用平均孔隙率时,泡沫铝孔密度从 $197 \sim 1575 \text{ m}^{-1}$ 变化对有效导热系数的影响很有限。例如,图4中 ϵ 约为 0.910 时,来自本实验测定和文献^[7]孔密度为 197、276 和 394 m^{-1} 的泡沫铝有效导热系数测量结果在同一水平线上。因此,在忽略自然对流换热和辐射换热时,孔密度对泡沫铝有效导热系数的影响可以忽略不计。

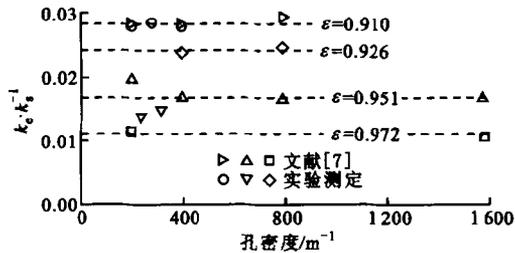


图4 实验测量孔密度对泡沫有效导热系数的影响

3.2.3 杆截面形状影响 本文基于十四面体单胞结构的解析模型预测与实验数据符合得很好,且 $\tau = 3$ 。由此可见,在高孔隙率范围内,泡沫铝的拓扑结构不随孔隙率的变化而变化,孔隙率的改变只会导致泡沫铝单胞结构成比例的缩放。研究表明^[7-8],随着孔隙率的增大,杆截面形状逐渐向三角形变化。然而,对于给定孔隙率和孔径的金属泡沫而言,对于具有任意截面形状的杆,可假设其截面积保持不变,例如: $A_{\text{正方形}} = A_{\text{三角形}} = A_{\text{圆}} = t^2$,然后依据不同杆截面建立传热分析,可得与式(12)相同的表达式。

需要指出的是,在孔隙率、孔径保持不变的前提下,杆的截面形状对其表面积仍然有影响。由于本文忽略了杆与周围流体间的热交换以及杆间的辐射换热,杆的表面积对有效导热系数没有影响。但是,在其他热交换情形中,如辐射和强制对流,杆的表面积(即杆截面形状)将发挥重要作用。

3.3 温度对泡沫铝有效导热系数的影响

一般而言,材料的物性参数随着温度变化而变化^[17]。为了分析通孔泡沫铝有效导热系数随温度的变化趋势,对泡沫铝试样#7(见表1)在不同温度下进行了导热系数测量。在此次实验的温度($320 \sim$

360 K)范围内,泡沫铝有效导热系数基本不受温度变化影响,其变化率在2%以内,可视为恒物性处理。但是,当温度进一步升高时,热辐射的作用不断增大,故泡沫铝有效导热系数对温度的依赖也不断增强。

3.4 其他单元体模型

通孔泡沫铝的有效导热系数依据所选单元体的不同而呈现出不同的规律。Calmidi 等和 Bhattacharya 等提出以二维六角蜂窝形状为单胞的周期性结构来近似泡沫铝的拓扑结构^[7-8]。采用此种结构进行理论建模,有效导热系数为

$$\frac{k_e}{k_s} = \frac{1}{2}(1 - \epsilon) \quad (18)$$

若采用 Paek 等提出的立方体单元结构^[14],则有效导热系数为

$$\frac{k_e}{k_s} = \frac{2}{3}(1 - \epsilon) \quad (19)$$

图5给出了采用不同单元体结构的有效导热系数模型以及经典的并联模型的预测值,并与泡沫铝实验结果进行比较。可以看出,基于六边形和立方体结构的模型以及经典的并联模型均过高地估计了泡沫铝的有效导热系数。尽管采用不同单元体结构得到的有效导热系数模型均具有类似于并联模型的形式,但这些模型并不能准确预测通孔泡沫铝的有效导热系数,这主要是由于不同单元体结构对传热距离(即热曲折度)的预测不同。因此,本文结果表明,针对高孔隙率通孔金属泡沫,唯有建立精确的三维孔拓扑结构才能准确地预测这类多孔介质的有效导热系数。

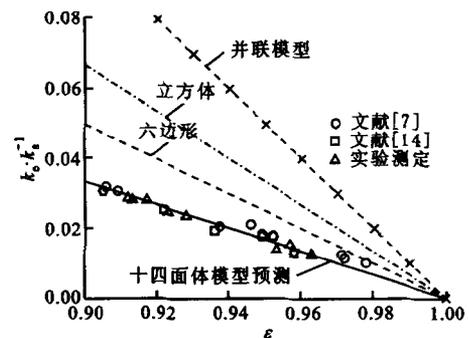


图5 不同有效导热系数模型比较

4 结论

在一维传热假设下,本文选择更接近通孔泡沫铝真实拓扑结构的十四面体单胞结构进行传热分析,建立了一个形式简单、完全解析的理论模型,用

于预测高孔隙率通孔金属泡沫的有效导热系数。该理论模型不需任何拟合或经验参数,其预测值与实验结果吻合良好。结果表明,对于大导热系数比的多孔材料而言(如充盈空气的泡沫铝),流体相的传热可忽略不计;对高孔隙通孔泡沫铝而言,节点对传热的影响很有限,有效导热系数与孔隙率之间呈线性关系,且热曲折度为0.33。

参考文献:

- [1] 邝九杰, 隋丹, 金东范, 等. 轴流风扇冲击射流下泡沫铝热沉的换热特性 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 6-10.
KUANG Jiujie, SUI Dan, KIM Tongbeum, et al. Open-celled aluminum foam heat sinks for electronics cooling with axial fan impinging flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 6-10.
- [2] KAVIANY M. Principles of heat transfer in porous media [M]. New York, USA: Springer Inc., 1995
- [3] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism [M]. 3rd ed. New York, USA: Dover Publications, Inc., 1954.
- [4] PROGELHOF R C, THRONE J L, REUTSCH R R. Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: a review [J]. Polymer Engineering Science, 1976, 16(9): 615-625.
- [5] LANDAUER R. The electrical resistance of binary metallic mixtures [J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23(7): 779-784.
- [6] HSU C T, CHENG P, WONG K W. Modified Zehner-Schlunder models for stagnant thermal conductivity of porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(17): 2751-2759.
- [7] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. The effective thermal conductive of high porosity fibrous metal foams [J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121(2): 466-471.
- [8] BHATTACHAYA A, CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Thermophysical properties of high porosity metal foams [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 1017-1031.
- [9] BOOMSMA K, POULIKAKOS D. On the effective thermal conductivity of a three dimensional structured fluid-saturated metal foam [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(4): 827-836.
- [10] 张钱城, 卢天健, 何思渊, 等. 闭孔泡沫铝的孔结构控制 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 255-270.
ZHANG Qiancheng, LU Tianjian, HE Siyuan, et al. Control of pore morphology in close-celled aluminum foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 255-270.
- [11] WEAIRE D, HUTZLER S. The physics of foam [M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1999.
- [12] OZMAT B, LEYDA B, BENSON B. Thermal applications of open-cell metal foams [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(5): 839-862.
- [13] COLEMAN H W, STEELE W G. Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [14] PAEK J W, KANG B H, KIM S Y, et al. Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials [J]. International Journal of Thermophysics, 2000, 21(2): 453-464.
- [15] YANG X H, LU T J, KIM T. A simplistic model for the tortuosity in two-phase close-celled porous media [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2013, 46(12): 125305.
- [16] YANG X H, LU T J, KIM T. Thermal stretching in two-phase porous media: physical basis for Maxwell model [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2013, 3(2): 021011.
- [17] YANG X H, LU T J, KIM T. Temperature effects on the effective thermal conductivity of phase change materials with two distinctive phases [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38(10): 1344-1348.

[本刊相关文献链接]

- 赵伟涛, 吴九汇. 球体表面受任意周期热扰动时非傅里叶导热的求解与分析. 2014, 48(1): 13-18. [doi: DOI:10.7652/xjtuxb201401003]
- 李盈海, 陶文铨, 孙东亮, 等. 金属泡沫管内强制对流换热的数值模拟. 2008, 42(3): 261-264. [doi: 10.7652/xjtuxb200803001]
- 刘俊俏, 苗福生, 李星. 二维各向异性功能梯度材料热传导的边界元分析. 2013, 47(5): 77-81. [doi: 10.7652/xjtuxb201305014]
- 王赞社, 冯诗愚, 李云, 等. 中空纤维膜换热器传热传质特性的实验和理论研究. 2009, 43(5): 40-45. [doi: 10.7652/xjtuxb200905009]
- 孟庆龙, 王元, 闫秀英. 采用计算流体力学数值模拟的比例积分控制器. 2009, 43(5): 90-93. [doi: 10.7652/xjtuxb200905019]

(编辑 刘杨 荆树蓉)