

闭孔泡沫铝有效热导率模型及传热模拟研究

李家卉, 耿佃桥, 张润雨, 霍小臭, 王平

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 有效热导率是表征闭孔泡沫铝热性能的重要参数, 准确预测闭孔泡沫铝的有效热导率具有重要意义。本研究基于已有的闭孔泡沫铝有效热导率模型, 提出了一个改进模型, 并采用数值模拟方法针对闭孔泡沫铝的非稳态传热过程进行了分析, 基于温度场分布获得了有效热导率。结果表明与 Lu 模型相比, 改进模型的预测精度更高; 与文献中 3 个理论模型相比, 改进模型具有更好的适用性及预测精度; 当采用数值模拟方法计算有效热导率时, 沿传热方向的胞孔数对有效热导率的预测精度影响较大; 在保证泡沫铝胞孔数足够的条件下, 数值模拟结果的精度最高; 从成本及精度两方面考虑, 改进模型有更好的适用性。

关键词: 闭孔泡沫铝; 有效热导率; 理论模型; 数值模拟

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)05-1637-06

泡沫铝作为一种轻质多孔材料, 根据孔结构特点可分为开孔和闭孔泡沫铝^[1]。闭孔泡沫铝因其独特的力学、声学、电磁学和热学性能, 在汽车船舶、电子通讯、航空航天等领域都有着广泛的应用^[2-6]。

作为闭孔泡沫铝一个重要的热性能参数, 有效热导率可以衡量泡沫铝的蓄热能力, 并可以计算液态泡沫铝完全凝固所需的时间^[7]。因而准确预测闭孔泡沫铝的有效热导率具有十分重要的意义。有研究者采用实验方法测量泡沫铝的有效热导率, 然而实验测量存在一些问题, 如瞬态面源法要求针对具有类似结构的两块泡沫铝样品进行测量^[8], 而泡沫铝由于其结构的复杂性, 这一要求难以得到保证。再如热电偶与样品的接触热阻可导致较大的测量误差^[9]。也有研究者采用数值模拟方法对简化的泡沫铝几何模型或真实泡沫金属结构进行传热分析。如 Fiedler 等采用 LMC(lattice Monte Carlo)方法研究了闭孔泡沫铝的有效热导率^[10]。Lu 等采用 FE (finite element) 方法研究了闭孔泡沫铝的有效热导率^[11]。此外, 还有研究者采用理论分析方法, 针对有效热导率提出了一些相关理论模型。Leach^[12]给出了并联(parallel)和串联(series)两个经典的模型。Glicksman^[13]以具有均匀壁厚立方体结构为细胞单元建立模型, 基于热传导与导电具相似性, 得到有效热导率的理论公式。Ye 等^[14]基于立方单位模型对有效热导率进行了预测, 并与实验结果进行了对比。Lu 等^[11]基于二维六边形蜂窝结构, 提出了泡沫铝的有

效热导率模型。

目前, 尽管研究者提出了不同的闭孔泡沫铝有效热导率理论模型^[8,10-14], 但不同理论公式与实验结果的误差较大。因此, 本研究基于已有的理论模型进行改进, 以期提高理论模型的准确性, 同时, 采用数值模拟方法针对闭孔泡沫铝的非稳态传热过程进行分析, 通过分析泡沫铝样品的传热过程, 进一步分析验证提出的改进模型。

1 有效热导率模型

1.1 Lu 模型

Lu^[11]模型以六角形蜂窝结构为基本的泡沫铝胞孔单元, 如图 1 所示。

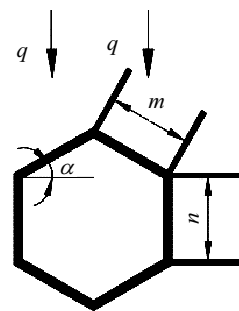


图 1 六边形结构示意图

Fig.1 Illustration of hexagonal structure

收稿日期: 2019-05-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (N180904007); 国家自然科学基金 (51304038)

作者简介: 李家卉, 女, 1992 年生, 硕士生, 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819, 电话: 024-83681733, E-mail: lijiahuine@163.com

图中 q 为热流密度, 与金属基体相比, 气体导热系数很小, 传热过程可认为是金属结构部分的导热。因此, 整个模型单元的热阻与胞壁热阻相等, 不考虑六边形厚度, 可得下式:

$$\frac{2m \cdot \sin \alpha + n}{k_{\text{eff}} S_{\text{total}}} = \frac{2m + n}{k S_{\text{wall}}} \quad (1)$$

其中, m 和 n 分别为相邻两边的宽度, k_{eff} 为有效热导率, k 为基体材料热导率, S_{total} 为垂直于热流方向的总面积(二维结构, 即为长度), S_{wall} 为细胞壁面积, 并且有下式成立:

$$\frac{S_{\text{wall}}}{S_{\text{total}}} = 1 - \varepsilon \quad (2)$$

其中, ε 为泡沫铝孔隙率。

将式(2)代入式(1)可得:

$$k_{\text{eff}} = \frac{2m \cdot \sin \alpha + n}{2m + n} k (1 - \varepsilon) \quad (3)$$

上式可改写为:

$$k_{\text{eff}} = \frac{2m \cdot \sin \alpha + n}{2m + n} k \rho \quad (4)$$

其中, $\rho = 1 - \varepsilon$, 为泡沫密度与基体材料密度之比。在已有研究中, 有效热导率模型公式可写为:

$$k_{\text{eff}} = \zeta k \rho \quad (5)$$

其中 ζ 表示胞孔壁的曲折形状。

对比式(4)和式(5), 可得:

$$\zeta = \frac{2m \cdot \sin \alpha + n}{2m + n} = \frac{H^*}{0.5L} \quad (6)$$

其中, L 为整个胞孔外周长, H^* 为胞孔在热流方向的投影长度。

1.2 改进模型

在图 1 所示结构中, 夹角为固定值。对于实际闭孔泡沫铝, 其泡沫结构在凝固过程中, 夹角在重力及表面张力的共同作用下, 气泡稳定后多形成一个类球型的胞孔结构。因此, 本模型假设胞孔结构内边界为一个椭圆形, 外边界为一个六边形, 如图 2 所示。

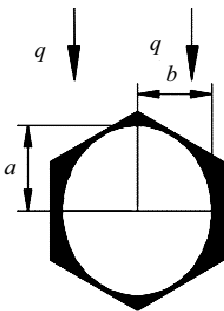


图 2 改进模型示意图

Fig.2 Illustration of improved model

椭圆周长为 $L = 2\pi a + 4(b - a)$, 代入式(6)可得:

$$k_{\text{eff}} = \frac{2a}{(\pi - 2)a + 2b} k (1 - \varepsilon) \quad (7)$$

通过式(7)可以看出, 有效热导率与泡沫铝的相对密度、基体材料热导率、胞孔长度与胞孔二分之一周长之比线性相关。当 $a \rightarrow b$ 时, 即内边界由椭球形变为球形时, 上式简化如下:

$$k_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} k (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

1.3 应用改进模型计算有效热导率

如图 3 所示, 选取文献[15]中某一泡沫铝样品作为研究对象, 其孔隙率为 0.89, 在泡沫铝横截面中随机选取 10 个胞孔结构, 用 Image-Pro 进行处理。其中基体材料热导率取值为 $180 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [15]。

分别采用 Lu 模型与本研究改进模型计算选取的 10 个胞孔的有效热导率, 并与整块泡沫铝样品有效热导率进行对比, 其有效热导率采用稳态比较法测定 [15]。

如图 4 所示, 所选取 10 个胞孔不完全相同, 因而对应有热导率并不相等, 采用 Lu 模型与本改进模型预测的 10 个胞孔有效热导率范围分别为 $11.0 \sim 15.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $10.0 \sim 12.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。同时, 对应整块泡沫铝样品有效热导率为 $10.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

由式(7)可知, 泡沫铝有效热导率仅与胞孔几何参数、基体材料热导率及孔隙率有关, 由于基体材料热导率及孔隙率取值一定, 说明与 Lu 模型相比, 采用本改进模型得到的结果与实验测量值更为接近, 改进模型较好地提高了预测精度。

由式(7)和(8)可知, 闭孔泡沫铝有效热导率与泡沫铝的相对密度、基体材料热导率相关, 文献[8]给出了已发表文献中关于泡沫金属有效热导率的公式, 本研究从中选取 3 个公式列于表 1。

为进一步分析改进模型, 分别应用表 1 中 3 个公式及本研究改进模型计算文献[15]中 6 个不同泡沫铝样品有效热导率, 并与实验测量结果进行对比, 泡沫铝样品的相关参数列于表 2, 采用式(8)计算泡沫铝样品有效热导率。

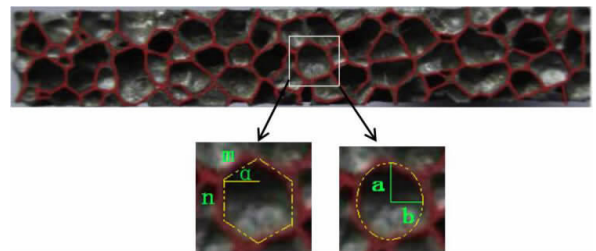


图 3 泡沫铝的横截面

Fig.3 Cross-section of the aluminum foam [15]

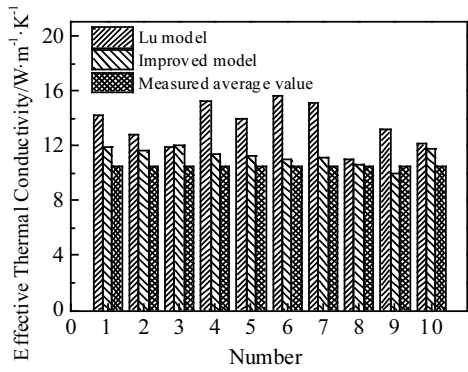


图 4 预测值与实验测量值的比较

Fig.4 Comparison between predicted values and experimental results

表 1 文献中的有效热导率公式

Table 1 Expressions for effective thermal conductivity from literatures [8]

Name	Equation
Misnar	$k_{eff} = k(1 - \varepsilon^{2/3})$
Russel	$k_{eff} = k \frac{1 - \varepsilon^{2/3}}{1 - (\varepsilon^{2/3} - \varepsilon)}$
Maxwell	$k_{eff} = k \left[\frac{2(1 - \varepsilon)}{2 + \varepsilon} \right]$

表 2 泡沫铝样品相关参数

Table 2 Related parameters of foam aluminum sample^[15]

Group	A	B	C	D	E	F
Porosity	0.928	0.894	0.887	0.885	0.874	0.828
Thermal conductivity of matrix/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	140	180	140	140	180	140

图 5 表明表 1 中 3 个公式的预测值相差不大，但与研究改进模型相比，改进模型计算得到的有效热导率与实测值更接近，说明改进模型具有更好的适用性。此外，由于金属基体材料的导热系数对泡沫铝的有效热导率有直接影响，因而图 5 中孔隙率在 0.89 附近的 3 个点虽然孔隙率相差较小，但由于基体材料的导热系数不同，有效热导率不同。

2 闭孔泡沫铝传热过程的数值模拟

为进一步研究泡沫铝的传热过程，采用数值模拟方法对图 3 所示泡沫铝样品的传热过程进行分析，通过分析传热过程的温度场得到局部区域的热导率，进而与实验测量的样品平均有效热导率进行对比。

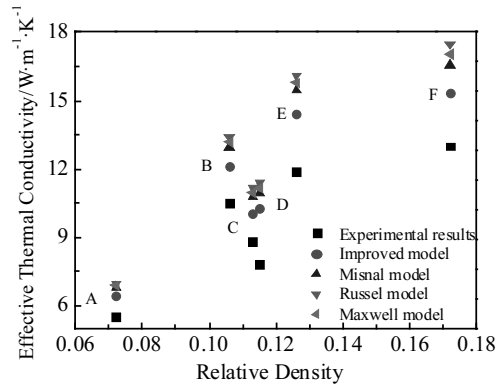


图 5 不同相对密度下的预测值和实验测量值

Fig.5 Predictive and experimental results at different relative density

2.1 数学模型

建立的模型基于以下基本假设^[16-18]：仅考虑二维传热过程；仅考虑胞孔基体材料的导热，忽略胞孔内气体导热及对流的影响；忽略辐射换热的影响。

对于二维非稳态热传导问题，控制方程为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (9)$$

其中， ρ 为材料的密度，kg/m³； c 为材料的比热容，J/(kg·K)； T 为温度，K； t 为时间，s； λ 为导热系数，W/(m·K)。

2.2 网格划分、模拟参数及边界条件

基于文献[15]中泡沫铝横截面图像，提取胞孔壁面轮廓曲线，然后对几何模型进行处理，最终网格划分如图 6 所示，其中网格总数 15 万。

模拟用相关参数如下：密度为 2719 kg/m³，比热容为 871 J/(kg·K)，导热系数为 180 W/(m·K)^[15]。初始状态下模型整体温度为 300 K，分别模拟 2 种情况：(1) 上边界面温度恒定为 500 K，下边界面温度恒定为 300 K，两侧边界为绝热边界；(2) 左边界面温度恒定为 500 K，右边界面温度恒定为 300 K，上下两边界为绝热边界。

2.3 温度场分布

图 7 所示为第 (1) 种情况，即上下边界面温度分

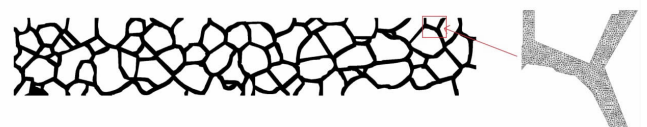


图 6 划分网格示意图

Fig.6 Schematic of grid system

别为 500 和 300 K 时不同时刻下的温度场分布。图 7a 为温度场完全稳定后的温度场分布（此时 $t=3$ s）。图 7b~7e 为不同时刻的温度场分布。传热方向从上至下时，除了两侧绝热边界和中心轴附近，温度变化趋势大致在一个水平线上。左右边界保持恒温，温度变化较慢。

2.4 泡沫铝的有效热导率

如图 8 所示，将泡沫铝温度场由左至右平均分为 10 个区域，在每个区域内随机取 5 个点（如图 8 中标记点 a），通过分析泡沫铝样品温度场求出标记点的热扩散率；进而得到该点有效热导率，然后将 5 个点有效热导率的算术平均值作为该区域的有效热导率。

图 9 所示为不同传热方向下对应 10 个区域的平均有效热导率。当传热方向为由上至下时，10 个区域的有效热导率变化较大，最大值为 $9.87 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，最小值为 $5.01 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，平均值为 $7.54 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。当传热

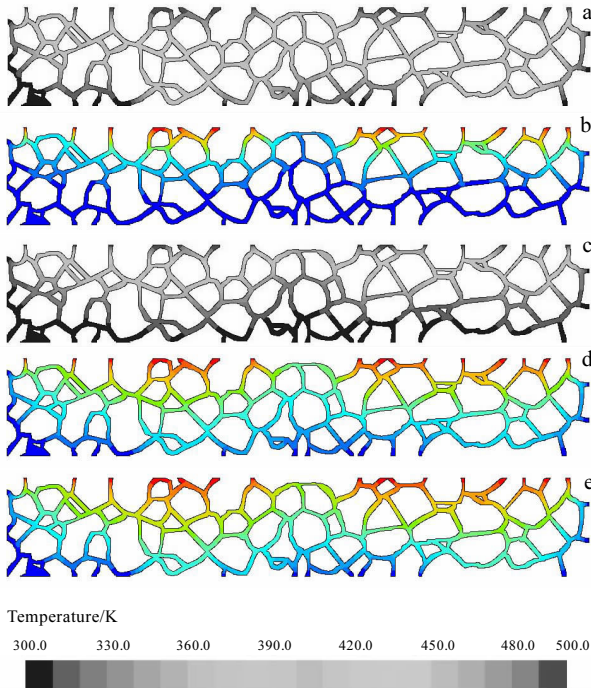


图 7 不同时刻下的温度场分布

Fig.7 Temperature field distribution at different time: (a) $t=3$ s, (b) $t=0.1$ s, (c) $t=0.2$ s, (d) $t=0.5$ s, and (e) $t=1$ s

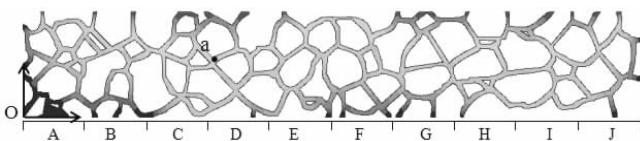


图 8 模型不同区域划分示意图

Fig.8 Schematic diagram of different regions

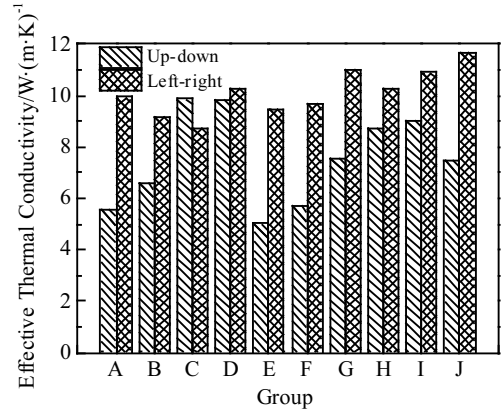


图 9 不同传热方向下的平均有效热导率

Fig.9 Average effective thermal conductivity in different heat transfer directions

方向为由左至右时，10 个区域的有效热导率变化较小，最大值为 $11.69 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，最小值为 $8.75 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，平均值为 $10.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。原因在于传热方向由上至下时，热流经过的胞孔平均在 4 个左右，胞孔的不均匀分布导致了结果的随机性太强，10 个点的分布较为分散；当传热方向由左至右时，热流经过的胞孔平均在 15 个左右，胞孔的不均匀性对结果的影响减小，10 个点分布更集中。

3 不同泡沫铝有效热导率计算方法比较

为比较不同方法，分别采用 Lu 模型、改进模型及数值模拟方法计算图 3 所示泡沫铝样品的有效热导率。

图 10 所示为改进模型、Lu 模型、数值模拟（2 个传热方向）3 种方法得到的有效热导率与实验结果的对比。在本研究模拟条件下，当传热方向为由左至右时，在传热方向上胞孔数目平均在 15 个左右，根据传热模拟结果得到的有效热导率与实验结果最接近；反之，当传热方向为由上至下时，在传热方向上胞孔数目平均在 4 个左右，根据传热模拟得到的有效热导率误差最大。说明泡沫铝样品的尺寸（即传热方向的胞孔数）对最终通过模拟得到的有效热导率的精度影响很大。即在保证泡沫铝样品足够大的条件下，数值模拟结果的精度最高。

图 10 还表明改进模型与数值模拟（由左至右）相比，精度相差不大，与 Lu 模型相比，精度有了较大的提高，由于数值模拟方法需要耗费较多的时间及资源，因而从预测精度及成本两方面考虑，改进模型有更好的适用性。

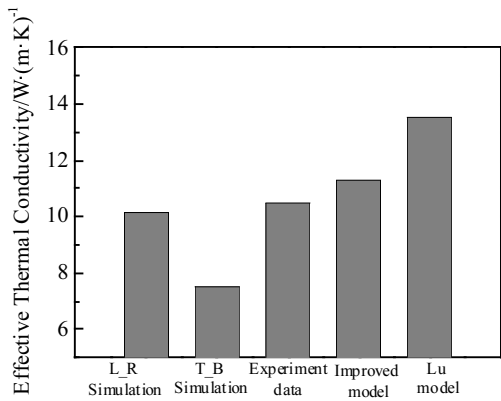


图 10 有效热导率预测结果与实验结果比较

Fig.10 Comparisons between predicted and experimental results of effective thermal conductivity

4 结 论

1) 基于泡沫金属有效热导率的 Lu 模型, 提出了一个改进模型, 与原模型相比, 改进模型的预测精度更高。

2) 从文献中选取了三个理论模型与改进模型进行对比, 结果表明改进模型具有更好的适用性及预测精度。

3) 采用数值模拟方法分析了泡沫铝样品的非稳态传热过程, 并通过温度场模拟结果得到了有效热导率, 结果表明传热方向的胞孔数对最终有效热导率的预测精度影响较大, 在保证泡沫铝胞孔数足够的条件下(本研究胞孔数 15), 数值模拟结果的精度最高。

4) 改进模型与数值模拟方法相比, 精度相差不大, 与 Lu 模型相比, 精度有了较大的提高, 从成本及精度两方面考虑, 改进模型有更好的适用性。

参考文献 References

[1] Harte A M, Fleck N A, Ashby M F. *Acta Materialia*[J], 1999(8): 2511

- [2] Wang H, Zhou X Y, Long B *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016(12): 3147
- [3] Duarte I, Vesenjok M, Krstulović-Opara L. *Composite Structures*[J], 2016, 154: 231
- [4] Nammi S K, Edwards G, Shirvani H. *Acta Astronautica*[J], 2016, 128: 243
- [5] Feng Yi(凤 仪), Zhu Zhengang(朱震刚), Pan Yi(潘 艺). *Metallic Functional Materials(金属功能材料)*[J], 2004(3): 19
- [6] Campana F, Cortese L, Pilone D. *Materials Science & Engineering A*[J], 2012, 556: 400
- [7] Zhang B, Kim T, Lu T J. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2009(1-2): 133
- [8] Solorzano E, Reglero J A, Rodriguez-Perez M A *et al.* *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2008, 25-26: 6259
- [9] Paek J W, Kang B H, Kim S Y *et al.* *International Journal of Thermophysics*[J], 2000(2): 453
- [10] Fiedler T, Solórzano E, Garcia-Moreno F *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2009(10): 843
- [11] Lu T J, Chen C. *Acta Materialia*[J], 1999(5): 1469
- [12] Leach A G. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 1999, 26(5): 733
- [13] Glicksman L R. *Heat Transfer in Foams*[M]. Berlin: Springer Netherlands, 1994: 104
- [14] Ye H, Ni Q, Ma M. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2015, 86: 853
- [15] Ye H, Ma M, Ni Q. *Applied Thermal Engineering*[J], 2015, 77: 127
- [16] Yang Jianmeng(杨建蒙), Lv Meijuan(吕美娟), Xing Fei(邢 飞) *et al.* *Coal Science and Technology(煤炭科学技术)*[J], 2017(11): 149
- [17] Zamel N, Li X G, Shen J *et al.* *Chemical Engineering Science*[J], 2010(13): 3994
- [18] Zheng H P, Wang C H. *Energies*[J], 2017(7): 902

Effective Thermal Conductivity Modeling of Closed-cell Aluminum Foam and Heat Transfer Simulation

Li Jiahui, Geng Dianqiao, Zhang Runyu, Huo Xiaochou, Wang Ping

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Effective thermal conductivity is a key parameter to characterize the thermal property of closed-cell aluminum foam. It is of great significance to predict the effective thermal conductivity of closed-cell aluminum foam. In this paper, based on the existing models for effective thermal conductivity of closed-cell aluminum foam, an improved model was proposed. Furthermore, the numerical simulation

method was employed to analyze the unsteady heat transfer process of closed-cell aluminum foam. And the effective thermal conductivity was obtained from the distribution of temperature field. The results show that the improved model has higher prediction accuracy compared with Lu model. Besides, the improved model has better applicability and prediction accuracy compared with the three theoretical models from literature. The number of cells in the heat transfer direction has a great influence on the accuracy of the effective thermal conductivity by the numerical simulation method. The accuracy of numerical simulation is the highest when the number of cell holes is enough. Considering cost and accuracy, the improved model has better applicability.

Key words: closed-cell aluminum foam; effective thermal conductivity; theoretical model; numerical simulation

Corresponding author: Geng Dianqiao, Ph. D., Associate Professor, Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, Tel: 0086-24-83681733, E-mail: gengdianqiao@epm.neu.edu.cn