

DOI: 10.7652/xjtuxb201407003

金属丝网编织 Kagome 自然对流实验研究

杨肖虎¹, 白佳希², 卢天健², 金东范³, KANG Ki-Ju⁴

(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; 4. 国立全南大学材料强度国家实验室, 500757, 韩国光州)

摘要: 为了研究金属丝网编织 Kagome(WBK)热沉自然对流换热性能及其影响因素,对 WBK 热沉进行了大空间稳态自然对流实验研究。鉴于 WBK 热沉结构上强烈的各向异性,在不同面烧结铝基板进行总传热热阻测量。设计搭建了具有 $0^\circ\sim 90^\circ$ 任意旋转功能的实验台,对不同倾角下的自然对流换热热阻进行了测量。作为参照,选取与 WBK 热沉相同尺寸的光板进行了稳态自然对流热阻测量。研究表明:与光表面相比,WBK 芯体具有更高的比表面积,可以有效地降低自然对流换热热阻,为光表面的 42% 左右。WBK 芯体 3 个方向的对流换热热阻不同,显示出强烈的各向异性,具有适中堵塞率(迎风面积)的 $o-b$ 方向具有最小的热阻。在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 倾角内,WBK 芯体在 3 个方向均存在一个最佳倾角,约为 50° ,相应的换热热阻最小。

关键词: 金属丝网编织 Kagome; 自然对流; 各向异性; 倾角

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0012-05

Experimental Investigation to Natural Convective Heat Transfer in Wire-Woven Bulk Kagome Truss

YANG Xiaohu¹, BAI Jiayi², LU Tianjian², KIM Tongbeum³, KANG Ki-Ju⁴

(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, Johannesburg Private Bag 3, Wits 2050, South Africa; 4. National Laboratory for Material Strength, School of Mechanical Systems Engineering, Chonnam National University, Gwang-ju 500757, Republic of Korea)

Abstract: Natural convection on a novel periodic lattice frame material wire-woven bulk Kagome-sintered plate (WBK) at different inclination angles is experimentally investigated, and overall heat transfer performance is evaluated by the total thermal resistance concerning the effects of orientations ($o-a$, $o-b$, and $o-c$) and inclination angles covering 0° (horizontal orientation), 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , and 90° (vertical orientation). The optimal inclination angle is found to approach 50° , corresponding to the minimum thermal resistance at a heat flux of $1\ 150\ \text{W/m}^2$. The average thermal resistance for WBK specimens gets 42% that of the smooth plate in the Rayleigh number range of $6.1 \times 10^7\sim 2.2 \times 10^8$. The heat transfer performance (thermal resistance) of WBK sample is different in three orientations due to its strong anisotropic topology: $o-b$ orientation has smallest thermal resistance, but $o-a$ orientation has the biggest one. Moderate blockage ratio results in relatively high flow mixing but acceptable flow resistance, ultimately leading to enhancing natural convective heat transfer.

Keywords: wire-woven bulk Kagome; natural convection; anisotropy; inclination angle

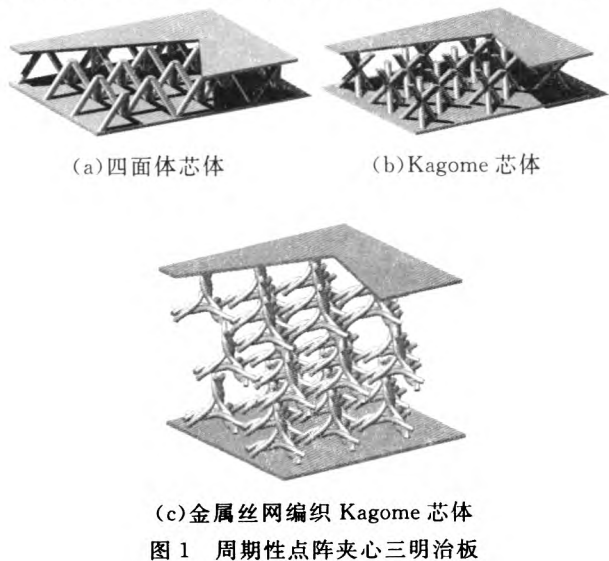
收稿日期: 2013-12-30。 作者简介: 杨肖虎(1986—),男,博士生;卢天健(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2011CB6103005);高等学校学科创新引智计划资助项目(B06024);国家自然科学基金资助项目(51206128)。

网络出版时间: 2014-04-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140425.0930.008.html>

随着高新技术的发展,人们已不再满足于材料单纯的轻质化,而是寻找兼有轻质和其他优良性能相结合的先进材料以适应不同的需求。多孔金属材料的问世引起了力学、热学、材料学、声学以及电磁学等学科的广泛关注。多孔金属按照其微结构规则程度可分为无序和有序两大类,前者主要指孔洞随机分布的泡沫金属,后者主要指具有孔周期性分布的点阵材料。周期性多孔材料的拓扑结构能够精确控制,这使得在给定质量下,高孔隙率周期性多孔材料在结构上优于具有随机孔的多孔金属材料。

点阵材料因其规则的微观结构和高孔隙率,兼备轻质、高强、强化换热、吸波等优良特性,能够实现多功能的集成设计,尤其能满足航天飞行器同时对力学载荷和热载荷的需求^[1-2]。Kim 等针对具有四面体单胞(图 1a)的周期性点阵三明治夹心结构的力学性能和传热强化进行了系统研究,发现金属点阵材料在强化力学承载和换热方面具有独特的优势^[3-5]。Hoffman 等对 Kagome(WBK)芯体(图 1b)三明治板进行了强制对流换热研究^[6]。传统的单层 Kagome 三明治板需要通过铸造制备,多层 Kagome 芯体制备工艺复杂,需要钎焊每一个四面体或者整体铸模制备。最近,Kang 等通过三维编织金属螺旋线得到了多层周期性 Kagome 结构^[7-8](图 1c)。Lee 等针对 WBK 芯体进行了力学结构分析,发现它的压缩强度高于泡沫金属和 Egg-box 芯体,与金字塔芯体结构相当^[8-9]。Joo 等对 WBK 点阵进行了强制对流换热实验研究,发现与四面体和 Kagome 点阵相比,摩擦系数相当,对流换热系数更高^[10-11],但是迄今未见到对 WBK 点阵的自然对流研究。本文开展了多层 WBK 点阵的大空间稳态自然对流实



验研究,以评估其作为热沉在以自然对流为基础的电子器件散热领域的应用前景。

1 实验系统

1.1 金属丝网编织 Kagome 样品

将直径为 d 的圆柱形金属丝制作成截距为 P 、螺距为 h_r 的螺旋线,之后将螺旋线从 3 个不同方向编织成平面 Kagome 结构,最后将若干 Kagome 网状平面编织成三维 Kagome 芯体(见图 2),铝丝编织的连接处通过钎焊连接(见图 3)。

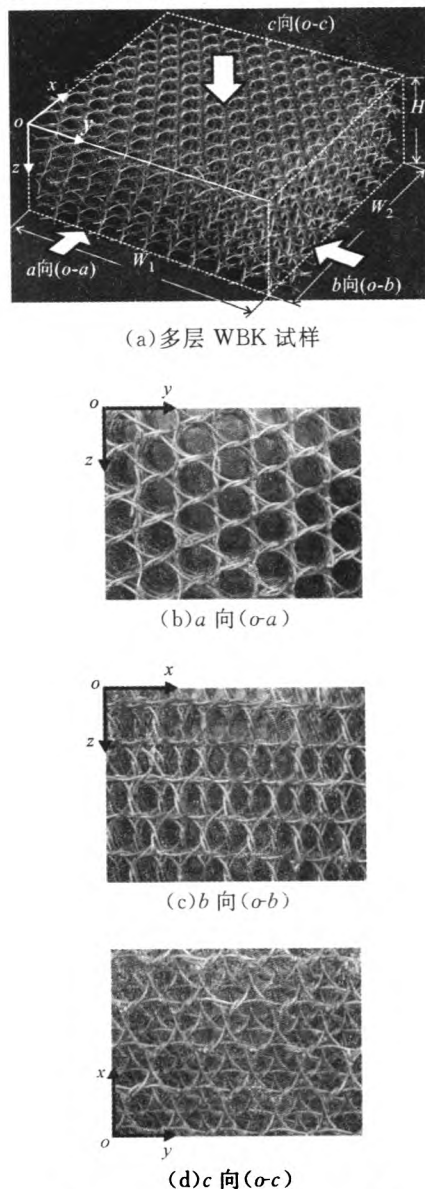


图 2 金属丝网编织 Kagome 结构

为了更清楚地理解 WBK 芯体结构上的各向异性,取 3 个方向的截面示于图 2b~2d 中。可以看出: σ -a 截面呈现出典型的正六边形和正三角形所组成的二维 Kagome 结构; σ -b 截面,在六边形大孔

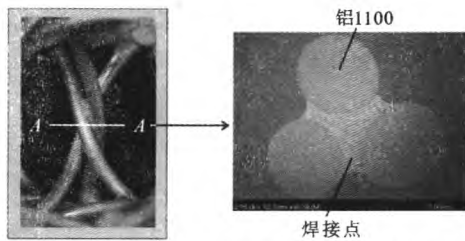


图3 铝丝焊点及截面扫描电镜(SEM)照片

的中间出现了 Kagome 单体(两个正四面体尖部链接); $o-c$ 截面,在六边形大孔中间出现了 Kagome 单体的顶面三角形。各向异性的孔结构导致了3个方向的堵塞率 δ 不同, $\delta_{oc} > \delta_{ob} > \delta_{oa}$, 这将影响流体通过不同方向的流动特性。

本研究使用的 WBK 试样的详细参数在表 1 中列出。WBK 试样由纯铝丝通过上述三维编织方法制成并切割成尺寸 $W_1 \times W_2 \times H$ 为 $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的立方体。WBK 的孔隙率通过测量其相对密度 ρ^* 后利用关系式 $\epsilon = 1 - \rho^*$ 得到。

表1 金属丝网编织 Kagome 试样参数

试样参数	1# 试样	2# 试样
芯体材料	纯铝 1100	纯铝 1100
导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	236	236
相对密度 ρ^*	0.038	0.038
孔隙率 ϵ	0.962	0.962
截距 P/mm	14.7	14.7
铝丝直径 d/mm	1.0	1.0
焊接点	焊接	焊接
$W_1 \times W_2 \times H/\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	$75 \times 75 \times 50$	$75 \times 75 \times 50$
铝基板烧结面	$x-o-z$ 面	$x-o-y$ 面

1.2 实验装置

本文通过稳态自然对流的实验结果评估 WBK 热沉的自然对流换热性能,为此设计并建立了一个如图 4 所示的测试装置,其主要由测试段和数据采集系统组成。

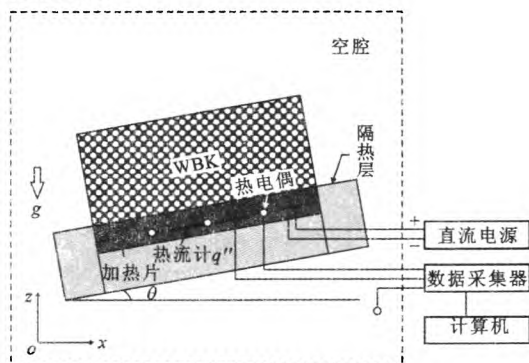


图4 自然对流实验测试系统示意图

WBK 试件事先烧结在 2 mm 厚的铝板上,并在铝板的背面开槽铺设热电偶(COT-2, OmegaTM)和膜状热流密度计(HFS-3, OmegaTM)。为了模拟电子器件工作时的热边界,采用 Kapton 薄膜电加热片提供恒定热流,并在接触面上涂有导热硅脂以减小接触热阻。实验装置的外表面覆盖了导热系数为 $0.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的聚氨酯泡沫,此外还铺设了两个 T-型热电偶(COT-2, OmegaTM)用以估计热损失 q''_{loss} 。在本次实验范围内, q''_{loss} 在总输入热流 q''_{in} 中所占比例为 1.2% 。

考虑到电子器件安装角度对换热的影响,特地设置了转角系统,能够 $0^\circ \sim 90^\circ$ 任意旋转。整个测试段放置在一个大空腔内,以保证环境温度恒定,另外设置热电偶实时监测空腔内的环境温度。

1.3 数据处理

本文开展稳态自然对流实验,采用自然对流热阻 R 和恒热流边界条件下的 Rayleigh 数 Ra_q 评估 WBK 自然对流换热性能。 R 和 Ra_q 分别定义为

$$R = \frac{\Delta T}{Q_{\text{net}}} \quad (1)$$

$$Ra_q = \frac{g\beta q''_{\text{net}} L^4}{\alpha_1 \nu_1 k_f} \quad (2)$$

式中: $\Delta T = T_w - T_\infty$, T_w 为铝基板温度, T_∞ 为环境温度; Q_{net} 是自然对流换热量,等于通过试件的净流量 q''_{net} 与基板面积 L^2 的乘积; q''_{net} 为薄膜加热片提供的热流量减去热损失,即 $q''_{\text{net}} = q''_{\text{in}} - q''_{\text{loss}}$; g 是重力加速度;特征长度 L 取为铝基板的长度; β , α_1 , ν_1 和 k_f 分别是流体的热膨胀系数、热扩散率、运动黏度和导热系数。本研究中所有相关的热物性均以 $(T_w + T_\infty)/2$ 作为参考温度确定,并假设在实验温度范围内 Pr 恒定。

1.4 不确定度分析

实验数据均在稳态下获得,当基板温度、环境温度以及二者温差在 100 min 内波动 $\pm 0.2^\circ \text{C}$ 时可视为稳态。测得的 R 受 q''_{net} , T_w 和 T_∞ 的测量精度影响,其中 L 控制为 75 mm 固定不变, R 的测量误差可依据 Coleman 等给出的评估方法估计^[12]

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\left(\frac{\Delta T_w}{T_w - T_\infty} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_\infty}{T_w - T_\infty} \right)^2 + \left(\frac{\Delta q''_{\text{net}}}{q''_{\text{net}}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

测量 T_w 和 T_∞ 所用热电偶的误差控制在 0.2°C 以内。 q''_{net} 的误差主要取决于膜状热流密度计在万用表的信号读数,根据 HFS-3 说明书估计在 2.0% 以内。综上,本文测量自然对流换热热阻的误差估计

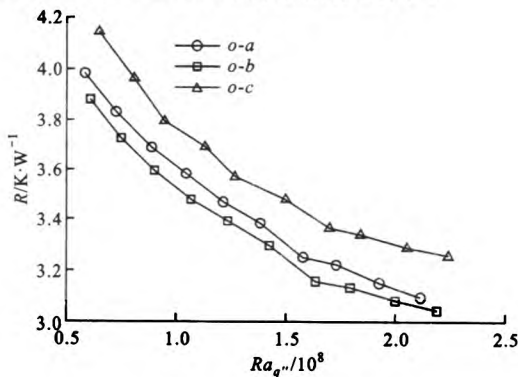
在±2.94%之内。

2 结果讨论

2.1 各向异性的自然对流

金属丝网编织 Kagome 结构不同于传统的多孔介质,它显示出强烈的各向异性,如图 2b~2d 所示。为了研究各向异性对自然对流换热的影响,分别在 $x-o-z$ 面和 $x-o-y$ 面烧结铝基板。 $x-o-z$ 面烧结基板的试样可进行 $o-c$ 方向的竖直自然对流实验研究, $o-a$ 和 $o-b$ 方向的自然对流通通过 $x-o-y$ 面烧结基板的 WBK 试件进行。

图 5 描绘了 WBK 各个方向竖直位置($\theta=90^\circ$)自然对流换热热阻和 Ra_q 的关系。可以看出:WBK 各个方向的换热热阻强烈依赖于 Ra_q ,呈单调关系,数值上随着 Ra_q 的增大而大幅减小; R 显示出强烈的各向异性特征,在相同 Ra_q 下, $R_{ob} < R_{oa} < R_{oc}$;与 $o-c$ 方向的热阻相比, $o-b$ 方向减小了 10%左右, $o-a$ 方向减小了 5%左右。这是因为各向异性造成的各个方向的堵塞率不同,如图 2b~2d 所示。 $o-c$ 方向堵塞率最大, $o-a$ 方向最小,流体不得不绕过金属杆,迂回曲折地流动^[13]。堵塞率越大,流体流过该截面时的压降越大,流动阻力越大。靠浮升力驱动的自然对流对流动阻力异常敏感,对流换热效果会随着流动阻力的增加而大幅减弱。另一方面,堵塞率的增大也加强了流体扰动,强化了流体之间掺混,对于减薄流动边界层、消除热饱和有益,这样反而会带来换热的强化。综合这两方面的因素,具有适中扰动的 $o-b$ 方向自然对流换热热阻最小。



$o-a$ 方向截面与重力加速度方向垂直

图 5 WBK 各个面竖直位置($\theta=90^\circ$)换热特性比较

2.2 倾角对自然对流热阻的影响

考虑到电子器件安装角度对换热的影响,本文针对金属丝网编织 Kagome 芯体的 3 个方向进行了相同加热功率下、 $0^\circ \sim 90^\circ$ 不同倾角的稳态自然对流

换热研究,结果示于图 6。需要指出的是,由于芯体从 0° (加热面水平向上) 转到 90° (加热面竖直) 时,垂直于重力加速度方向的面会发生变化,与图 5 的定义一致,图 6 中 $o-a$ 方向截面与重力加速度方向垂直。

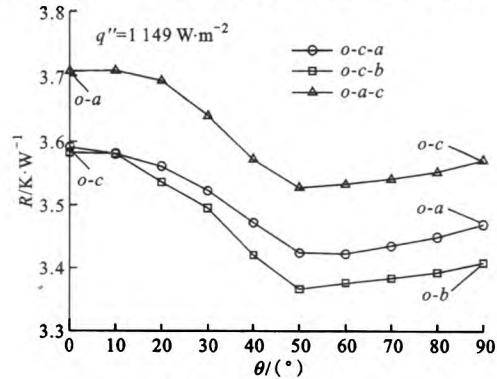


图 6 倾角对自然对流热阻的影响

从图 6 可以看出,自然对流热阻随着倾角的增大呈现出先减小后增大的趋势,在 50° 倾角附近换热热阻达到最小值。这与文献[14]报道的通孔金属泡沫自然对流的特点一致,多孔金属芯体自然对流换热系数存在最优角的现象本质上与光板倾斜自然对流机理类似。加热面(光板)水平时,浮升力完全垂直于加热面,壁面附近流体的水平速度(平行于壁面)很小。当加热面倾斜时,产生一个平行于壁面的浮升力分量 $g \sin \theta$,使得平行于壁面的流体局部速度增大,换热系数提高,热阻减小,同时垂直于壁面的浮升力分量 $g \cos \theta$ 减小,使得流动边界层增厚,热阻增大。考虑到倾角从 0° 开始增加, $g \sin \theta$ 涨幅明显,壁面局部流速增大强化换热的效果强于边界层增厚带来的传热弱化;随着倾角进一步增大, $g \cos \theta$ 降幅显著,起主要作用,边界层增厚带来的传热弱化更强,因此存在一个最优角度使得总热阻最小。

WBK 芯体由于结构的强烈各向异性,导致了不同方向最优角所对应的换热热阻不同。随着倾角的增加,垂直于重力加速度的平面呈现出接近 90° 倾角的结构特征,具有适中扰动(堵塞率)的方向在最优倾角附近自然对流换热热阻最小。此外, 0° 时 $o-c-a$ 和 $o-c-b$ 曲线的自然对流热阻相同且小于 $o-a-c$ 的热阻,这是由于铝基板烧结在 $x-o-y$ 面上,加热面水平时,流体向上流动的方向均是 $o-c$ 方向,流体流过较大的迎风面积(堵塞率)有利于强化换热。 90° 时 $R_{ob} < R_{oa} < R_{oc}$,这与图 5 的分析一致。

2.3 WBK 自然对流强化效果

图 7 展示了烧结有铝制金属丝网编织 Kagome 芯体和相同总体尺寸铝制光表面的热阻对比,可以

看出,二者的自然对流换热热阻均随 Ra_q 增大而减小,且平板热阻下降得更显著。在实验工况范围内,即 $Ra_q = 6.1 \times 10^7 \sim 2.2 \times 10^8$,平板自然对流热阻下降了 27.4%,WBK 芯体 $o-b$ 方向热阻下降了 18.8%。此外,由于金属骨架增加了自然对流的换热面积,使其总热阻为光表面热阻的 42%左右,这说明多孔表面是强化自然对流的有效措施。

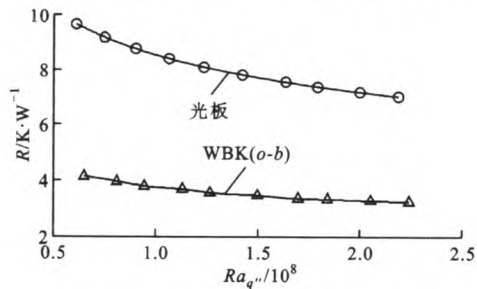


图7 WBK与光板自然对流热阻比较

3 结论

本文对金属丝网编织 Kagome 芯体进行了大空间稳态自然对流实验研究,得出主要结论如下:

(1)WBK 结构 3 个方向的对流换热热阻显示出强烈的各向异性,具有适中堵塞率的 $o-b$ 方向热阻最小;

(2)在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 倾角内,WBK 结构在 3 个方向均存在一个最佳倾角,约为 50° ,相应的自然对流热阻最小;

(3)与竖直光板相比,WBK 结构具有更高的比表面积,可以有效地降低自然对流换热热阻。

参考文献:

- [1] 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]. *Advanced in Mechanics*, 2006, 36(4): 517-535.
- [2] 卢天健,刘涛,邓子辰.多孔金属材料多功能化设计的若干进展[J].力学与实践,2008,30(1):1-9.
LU Tianjian, LIU Tao, DENG Zichen. Multifunctional design of cellular metals: a review [J]. *Mechanics and Practice*, 2008, 30(1): 1-9.
- [3] KIM T, HODSON H, LU T J. Fluid-flow and end-wall heat-transfer characteristics of an ultralight lattice-frame material [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(6): 1129-1140.
- [4] KIM T, HODSON H, LU T J. Contribution of vortex structures and flow separation to local and overall pressure and heat transfer characteristics in an ultralight lattice material [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(19): 4243-4264.
- [5] KIM T, ZHAO C Y, LU T J, et al. Convective heat dissipation with lattice-frame materials [J]. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(8): 767-780.
- [6] HOFFMANN F, HODSON H, LU T J. Heat transfer performance and pressure drop of Kagome core metal truss panels [M]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2003: 10-35.
- [7] KANG K J. A wire-woven cellular metal of ultrahigh strength [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(6): 1865-1874.
- [8] LEE Y H, LEE B K, JEON I, et al. Wire-woven bulk Kagome truss cores [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(18): 6084-6094.
- [9] LEE B K, JEON I, KANG K J. A parametric study on compressive characteristics of wire-woven bulk Kagome truss cores [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(2): 445-453.
- [10] JOO J H, KANG B S, KANG K J. Experimental studies on friction factor and heat transfer characteristics through wire-woven bulk Kagome structure [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2009, 22(2): 99-116.
- [11] FENG S S, LIM 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.
- [12] COLEMAN H W, STEELE W G. Experimentation and uncertainty analysis for engineers [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999: 103-115.
- [13] 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.
- [14] QU Z G, WANG T S, TAO W Q, et al. Experimental study of air natural convection on metallic foam-sintered plate [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2012, 38(2): 126-132.

(编辑 荆树蓉)