

侧壁开孔蜂窝夹芯结构的传热性能分析

郑宁悦, 陈 学, 孙 创, 夏新林

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对侧壁开孔蜂窝夹芯结构, 建立了蜂窝单元高温辐射-导热耦合传热模型, 采用有限元方法分析了内部传热机制, 获得了其高温等效导热系数。讨论了开孔形状、开孔参数、孔排布形式等结构参数对等效导热系数的影响, 拟合得到了等效导热系数的计算关联式。研究表明: 开孔形状对蜂窝单元等效导热系数几乎无影响; 等效导热系数随孔隙率增大而减小, 受开孔数影响较小。并联开孔相对于串联开孔时等效导热系数更低, 孔隙率 14%、孔数为 4 时等效导热系数比串联时小 8.4%, 相较于未开孔时降低 16.1%。

关 键 词: 蜂窝结构; 高温传热; 等效导热系数; 侧壁开孔; 有限元方法

中图分类号: V445.1; TK124

文献标志码: A

Analysis on heat transfer performance of honeycomb sandwich structure with side wall openings

ZHENG Ningyue, CHEN Xue, SUN Chuang, XIA Xinlin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Targeting the new honeycomb sandwich structure with holes on the sidewall, the coupled heat transfer model of high temperature radiation-heat conduction of honeycomb unit was established. The internal heat transfer mechanism was analyzed by using the finite element method, and the high temperature equivalent thermal conductivity was obtained. The effects of structural parameters, such as hole shape, hole parameters and hole arrangement on equivalent thermal conductivity were discussed, and the calculation correlation of equivalent thermal conductivity was obtained by fitting. Studies showed that the hole shape had little effect on the equivalent thermal conductivity of honeycomb cells. The equivalent thermal conductivity decreased with the increase of porosity, which was less affected by the number of holes. The equivalent thermal conductivity of parallel holes was lower than that of series holes. When the porosity was 14% and the number of holes was 4, the equivalent thermal conductivity was 8.4% smaller than that of series holes, 16.1% lower than that without holes.

Keywords: honeycomb structure; high temperature heat transfer; equivalent thermal conductivity; side wall opening; finite element method

近年来, 防隔热材料与结构在航空航天飞行器热防护^[1]、太阳能集热器^[2]、空间卫星技术^[3]等领域备受重视, 由于蜂窝夹芯结构的轻质、良隔热体以及较强的抗变形能力, 广泛应用于实际工

程中。在此类应用场合中, 准确获取蜂窝夹芯结构的等效导热系数成为系统热性能预测、设计与优化的关键。

许多学者已从理论计算和实验分析角度对蜂

收稿日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51806046); 黑龙江省博士后资助(LBH-Z18081)

作者简介: 郑宁悦(1998—), 女, 硕士生, 主要从事高温热防护结构的传热特性研究。E-mail: NingyueZheng@163.com

通信作者: 陈学(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事高温耦合传热和红外辐射传输研究。E-mail: hit_chenxue@hit.edu.cn

引用格式: 郑宁悦, 陈学, 孙创, 等. 侧壁开孔蜂窝夹芯结构的传热性能分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20210398. ZHENG Ningyue, CHEN Xue, SUN Chuang, et al. Analysis on heat transfer performance of honeycomb sandwich structure with side wall openings[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20210398.

窝夹芯结构的高温传热性能进行了深入研究。Swarm 和 Pittman 通过理论和实验分析提出了蜂窝结构等效导热系数的 S-P 经验公式^[4]。部分学者采用有限差分^[5]、有限体积^[6-9]以及有限元^[10-12]等方法数值研究了蜂窝夹芯结构的传热机制。李东辉等^[13]和景丽等^[14]将蒙特卡洛法和有限体积法相结合,获得了典型边界条件下的瞬态温度场,求解了蜂窝夹芯结构的等效导热系数。Ashikhmina 等^[15]建立了蜂窝单元的三维非稳态辐射-导热耦合模型,通过实验获取温度场分布,结合 COMSOL Multiphysics 软件反演获得等效导热系数。Guo 等^[16]进一步考虑了蜂窝单元的内部对流,分析了蜂窝上下面板温度及几何参数对其等效导热系数的影响。Chanda 等^[17]针对蜂窝复合材料进行全尺度直接数值模拟,基于神经网络及遗传算法,开发了一种估算层状蜂窝复合材料各向导热系数的实验方法。梁伟等^[18]通过实验得到了在气动加热环境下蜂窝板瞬态热响应特征,发现蜂窝结构上下表面温差可达 91 K 以上,表明蜂窝结构具有良好的隔热性能。上述研究均是针对未开孔型蜂窝结构,当前对侧壁开孔型蜂窝结构的传热特性研究还缺少报道。

针对侧壁开孔蜂窝结构,考虑其周期性排布的特点,本文着眼于单个蜂窝单元,建立其高温辐射-导热耦合传热模型,探究开孔几何特征对其等效导热系数的影响规律,总结了蜂窝单元等效导热系数的关联式。

1 数学物理模型及计算方法

图 1 所示为侧壁开孔蜂窝单元几何模型,主要由上下盖板及中间所夹蜂窝芯组成,本文对蜂窝芯侧壁进行开孔,从而获得轻质蜂窝结构。其中尺寸参数如下: a 为蜂窝单元边长; d 为上下盖板厚度; δ 为蜂窝单元侧壁厚度; H 为蜂窝单元高度; L 为蜂窝单元有效宽度。忽略蜂窝结构中空气自然对流^[10]、蒙皮与芯层的接触热阻,则主要

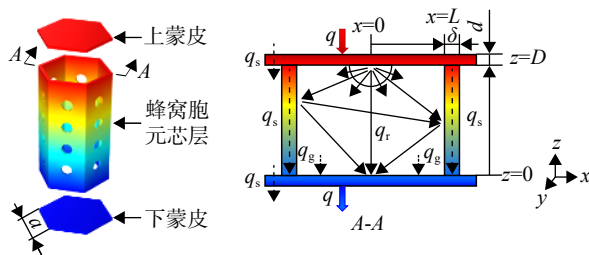


图 1 蜂窝单元内部传热机制

Fig. 1 Heat transfer mechanism in honeycomb unit

传热方式包含:固体结构导热、内腔气体导热以及固体内壁面之间的热辐射。图中 q_r 为辐射热流; q_s 为固体结构导热热流; q_g 为空腔内气体导热热流; q 为总热流。

蜂窝结构单元的三维稳态辐射-导热耦合控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi = 0 \quad (1)$$

式中 T 为蜂窝单元结构整体温度; k 为导热系数, $i=1$ 表示蒙皮、 $i=2$ 表示蜂窝芯材, $i=3$ 表示内腔气体; Φ 为广义热源。蜂窝内辐射传热为表面间的辐射,蜂窝壁面和蒙皮均视为漫反射灰体,内部气体视为透明体,由净热流法,辐射换热量表示为:

$$Q_m = q_m A_m = (J_m - H_m) A_m \quad m = 1, 2, 3, \dots, M_s \quad (2)$$

$$J_m = \varepsilon_m \sigma T_m^4 + (1 - \varepsilon_m) H_m \quad m = 1, 2, 3, \dots, M_s \quad (3)$$

$$H_m = \sum_{j=1}^{M_s} J_j \varphi_{m-j} \quad m = 1, 2, 3, \dots, M_s \quad (4)$$

其中 Q 为辐射换热量; J 为有效辐射; H 为投射辐射; ε 为表面发射率; T_m 为蜂窝单元结构各表面温度; φ 为角系数,采用 Hemicube 模型计算; M_s 为参与辐射换热的表面总数。

上下表面采用第一类边界条件;由于周期性及侧壁开孔面积较小,忽略相邻单元间的影响,因此壁面四周采用对称边界条件:

$$T|_{z=D+d} = T_h \quad T|_{z=-d} = T_l \quad (5)$$

侧壁面

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{0 \leq x \leq D} = 0 \quad (6)$$

式中 T_h 、 T_l 分别为稳态时蜂窝板上表面与下表面温度。根据傅里叶导热定律,蜂窝单元的等效导热系数可表示为:

$$k_e = qH/A \quad (7)$$

式中 A 为蜂窝盖板总面积($A=A_s+A_g$, A_s 为芯层固体部分截面积, A_g 为芯层气体部分截面积);通过建立蜂窝结构单元模型,数值模拟传热过程,计算整体温度场进而求解总热流,最终获得蜂窝结构等效导热系数。

2 模型验证

本文采用有限元软件 COMSOL Multiphys-

ics 对未开孔型蜂窝单元等效导热系数(k_e)进行了预测,与 S-P 经验公式进行对比验证。忽略上下面板厚度,考虑上下面板内表面热辐射。基本计算参数为:上下表面温差 $T_h - T_l = 100$ K, 平均温度 $T_{avg} = (T_h + T_l)/2$; $a = 5$ mm, $H = 10$ mm, $\delta = 0.5$ mm, 尺寸因子 $\lambda = H/d_c$, 当量直径 $d_e = 2a\sqrt{3\sqrt{3}/2\pi}$, $k_2 = 12.17$ W/(m·K), $\varepsilon = 0.14$, 内腔气体视为空气。图 2 为数值模拟与 S-P 经验公式的结果对比,误差在 0.09% 以内,说明本文计算方法可靠。可见,当 $T_{avg} > 250$ K 时,辐射对等效导热系数的贡献不可忽略;当 $T_{avg} = 1150$ K 时,辐射对等效导热系数的贡献达到 13.66%。

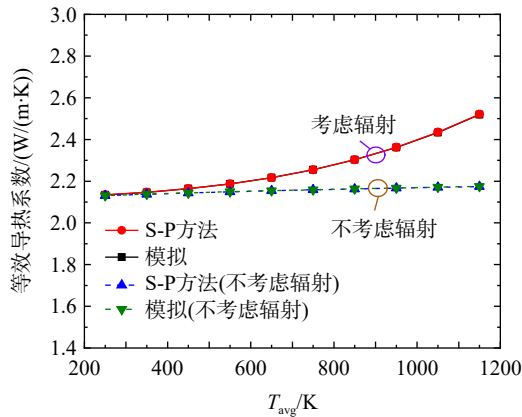


图 2 蜂窝单元等效导热系数随上表面温度变化曲线
Fig. 2 Variation of the equivalent thermal conductivity of the honeycomb cell with the temperature of the upper surface

3 结果与讨论

3.1 开孔形状对等效导热系数的影响

为进一步减轻蜂窝结构质量,降低等效导热系数,本文对蜂窝单元侧壁进行开孔。定义基本计算参数:孔隙率为 p , 开孔数为 N , $T_h = 1200$ K, $T_l = 1100$ K, $a = 5$ mm, $H = 10$ mm, $\delta = 0.5$ mm, $d = 1$ mm, $k_1 = k_2 = 12.17$ W/(m·K), $\varepsilon = 0.14$, k_3 为平均温度 T_{avg} 对应的空气导热系数。

首先讨论开孔形状对等效导热系数的影响。保持 $p = 12\%$ 不变,在不改变其他基本参数的情况下,沿蜂窝侧壁面中轴线等间距开孔,计算结果如图 3 所示。由图可知,对蜂窝单元侧壁开孔可明显降低等效导热系数,未开孔的蜂窝单元等效导热系数为 2.52 W/(m·K),侧壁开孔的等效导热系数为 $2.3 \sim 2.4$ W/(m·K)。当采用方形开孔、 $N = 2$ 时,等效导热系数低至 2.3 W/(m·K)。其次,当 N 一定时,方孔的等效导热系数略小于圆孔,

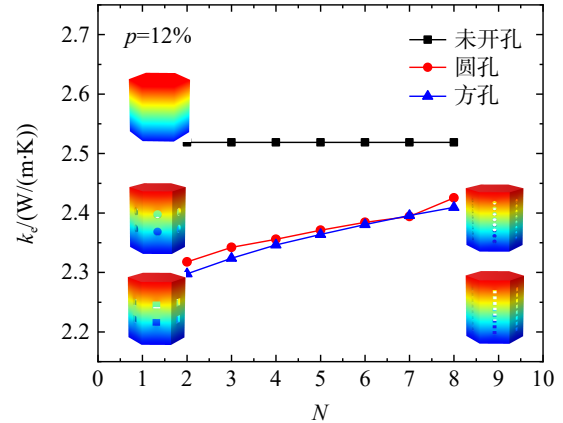


图 3 开孔形状对蜂窝单元等效导热系数的影响

Fig. 3 Effect of hole shape on equivalent thermal conductivity of honeycomb unit

但整体差别不大。不论是方孔或是圆孔,等效导热系数随着开孔数的增大都略有增大,但总体而言变化不大。

3.2 开孔几何参数对等效导热系数的影响

针对侧壁串联开圆孔型蜂窝单元,本节探究了开孔数和孔隙率对等效导热系数的影响,结果如图 4 所示。可见,保持 p 不变,增大 N ,蜂窝单元的等效导热系数有小幅上升,但不超过 0.12 W/(m·K),增幅小于 5.3%。保持 N 不变,增大 p ,蜂窝单元的等效导热系数逐渐减小。当 $p = 14\%$ 、 $N = 2$ 时,等效导热系数达到最小值 2.26 W/(m·K),与 $p = 8\%$ 时相比减小了 0.18 W/(m·K),变化率达到 8%。可见,蜂窝单元的等效导热系数受到 p 与 N 的共同影响,其中 p 起主导作用。当 p 不变,增大 N 时,蜂窝单元侧壁的热流线排布发生变化,等效导热系数升高。

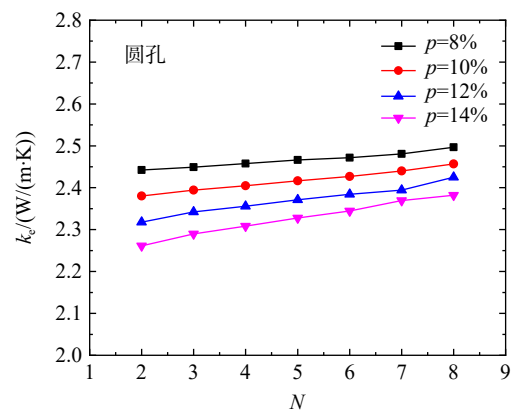


图 4 孔隙率与开孔数对等效导热系数的影响

Fig. 4 Effect of porosity and number of openings on equivalent thermal conductivity

3.3 孔排布形式对等效导热系数的影响

分别对蜂窝单元侧壁沿轴向串联和并联开孔, 等效导热系数变化规律如图 5 所示。不论是串联排列还是并联排列, 孔隙率与等效导热系数均呈线性相关。增大孔隙率将减小轴向热流流通面积及辐射换热面积, 进而降低蜂窝单元的等效导热系数。

图 5(a) 为 $p=12\%$, 蜂窝单元等效导热系数随开孔数的变化规律。当 p 一定, 增大 N 时, 并联排布相比于串联排布的等效导热系数更小; 当 $N=2$ 时, 两者差值达到最大值 $0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。其次, 串联排布时, 蜂窝单元等效导热系数随 N 变化不大, 增幅小于 4.6% 。并联排布时, 等效导热系数在 $N=2$ 时达到最小值 $2.07 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 当 N 从 2 增大至 4 时, 其值小幅增大了 $0.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 在 $N=4$ 处出现拐点, 之后变化不大, 总体增幅小于 8.3% 。整体来看, 不论是串联还是并联排布, 当 p 一定时, 改变 N 对蜂窝单元等效导热系数影响不大。

图 5(b) 为当 $N=4, 6$ 时, 蜂窝单元等效导热系数随孔隙率的变化曲线。定义当孔的排布形式及孔隙率相同时, $N=4, 6$ 对应的等效导热系数差值为 Δk_e 。可见, 当 p 与 N 一定时, 串联排布的等效导热系数明显大于并联排布的, 验证了图 5(a) 的正确性。其次, 当 p 由 8% 增大到 14% 时, 串联排布的 Δk_e 基本不变; 并联排布的 Δk_e 逐渐增大, 由 $0.01 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增大至 $0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 表明并联排布的蜂窝单元等效导热系数对 p 变化更敏感。整体来看, 不论串联排布或并联排布, 保持 N 不变, 蜂窝单元的等效导热系数都随 p 增大而单调下降。当 $p=14\%$ 、 $N=4$ 且并联排布时, 蜂窝单元的等效导热系数达到最小值 $2.11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 相较于未开孔的蜂窝结构等效导热系数降低了 16.1% 。

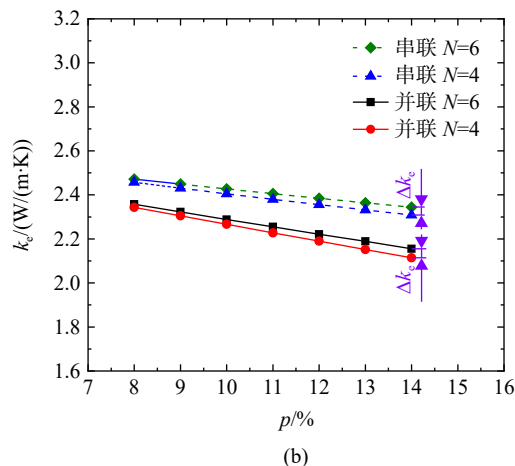
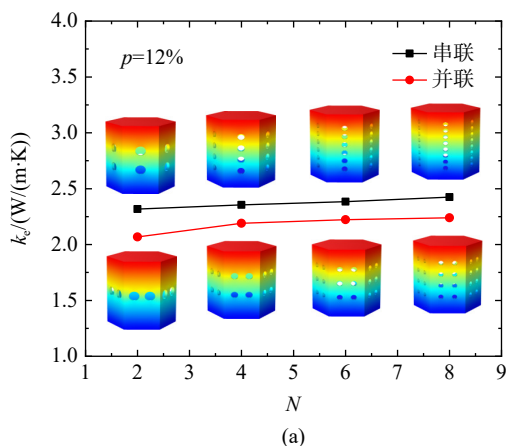


图 5 孔排布形式对等效导热系数的影响

Fig. 5 Effect of hole arrangement on equivalent thermal conductivity

3.4 蜂窝单元等效导热系数计算关联式

本节针对上述侧壁串联及并联开圆孔型蜂窝单元, 对 S-P 经验公式进行了修正, 获得了蜂窝单元上下表面温度改变时的等效导热系数计算公式; 相关参数与文中第 3.1 节一致。

图 6(a) 为 $p=8\%\sim 14\%$, $N=2\sim 8$ 时, 侧壁串联开圆孔蜂窝单元的等效导热系数预测结果。由图可知, 当上下表面温度一定时, 同时改变 p 与 N , 蜂窝单元的等效导热系数近似呈现为平面分布。如图 6(b) 所示, 拟合值与预测值误差 ΔE 小于 0.5% , 表明拟合结果可靠。计算关联式如下:

$$k_e = \eta \left\{ \xi_1 \left[p + (p\lambda + 0.3)^{-0.69} e^{1.63(p\lambda + 1)^{-0.89}} \right] + \xi_2 \right\} / \xi_0 \quad (8)$$

式中 $\xi_1 = 2.66651/\xi_0$; $\xi_2 = (0.20438N + 1)/\xi_0$; $\xi_0 = -0.00129N^2 + 0.22564N + 3.55785p + 1$; $\eta = \exp(-0.148 - 0.00011T_{\text{avg}} + 0.000000207T_{\text{avg}}^2)$ 。

式(8)可适用于以下温度、孔隙率及开孔数: $T_h=500\sim 1200 \text{ K}$, $T_h-T_l=0\sim 100 \text{ K}$, $p=8\%\sim 14\%$, $N=2\sim 8$ 。

以孔隙率 $p=8\%$, 计算不同温度 $T_h=500\sim 1200 \text{ K}$ 、串联开孔数 $N=2\sim 8$ 下的等效导热系数, 图 7 为采用式(8)得到的下预测值与实际模拟值误差曲线。由图中可以看出, 预测值与实际模拟值误差小于 0.4% , 随着上表面温度的升高, 预测值与模拟值更加吻合。

图 8(a) 为 $p=8\%\sim 14\%$, $N=2\sim 8$ 时, 侧壁并联开圆孔蜂窝单元的等效导热系数预测结果。可见, 当上下表面温度一定时, 同时改变 p 与 N , 蜂窝单元的等效导热系数近似呈现为曲面分布。如

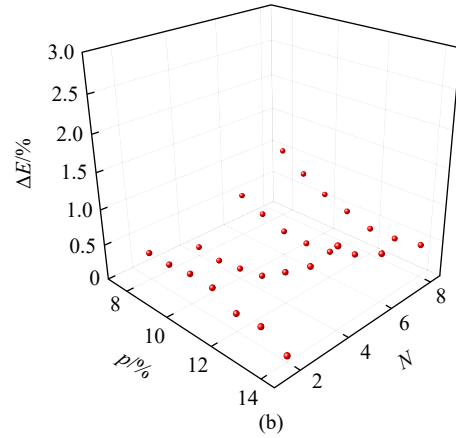
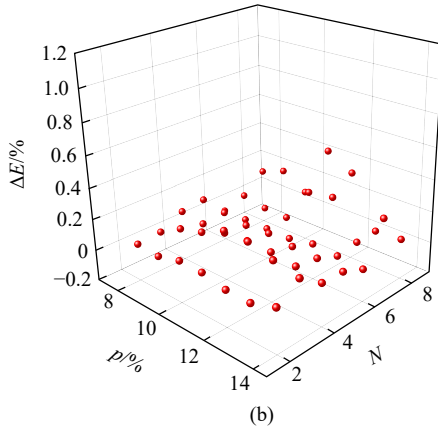
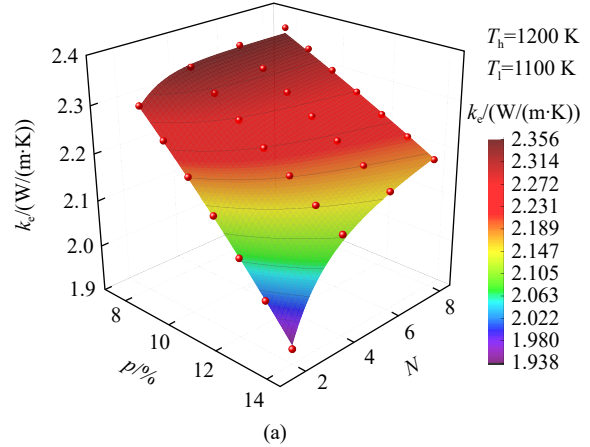
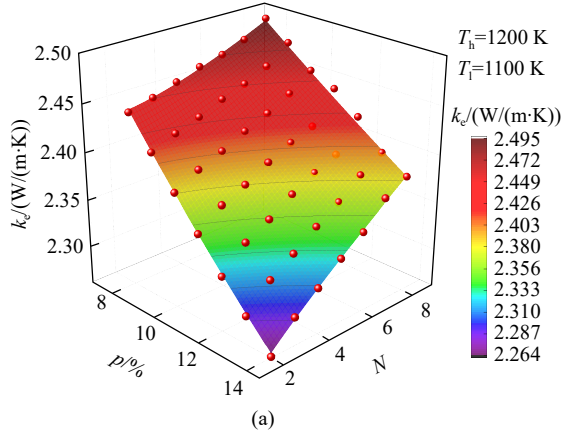


图 6 侧壁串联开孔蜂窝结构等效导热系数拟合示意图

Fig. 6 Schematic of the fitted equivalent thermal conductivity of the honeycomb structure with tandem openings in the side walls

图 8 侧壁串联开孔蜂窝结构等效导热系数拟合示意图

Fig. 8 Schematic of the fitted equivalent thermal conductivity of the honeycomb structure with tandem openings in the side walls

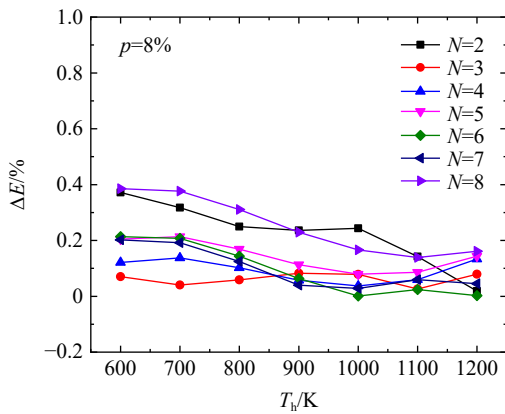


图 7 预测值与模拟值误差曲线

Fig. 7 Error curve between predicted and simulated values

图 8(b) 所示, 拟合值与预测值误差 ΔE 小于 1.1%, 表明拟合结果可靠。计算关联式如下:

$$k_e = \eta \left\{ \left[\xi_1 p + \xi_2 (p\lambda + 0.3)^{-0.69} e^{1.63(p\lambda + 1)^{-0.89}} \right] + \xi_3 \right\} / \xi_0 \quad (9)$$

式中 $\xi_1 = -12.028\,23 / \xi_0$; $\xi_2 = 18.523\,6 / \xi_0$; $\xi_3 = (0.269\,93N + 1) / \xi_0$; $\xi_0 = 2.564\,74p \cdot \exp(-N) +$

$$0.114\,91N - 2.658\,18p + 1; \quad \eta = \exp(-0.154\,36 - 0.000\,114\,8T_{\text{avg}} + 0.000\,000\,216\,4T_{\text{avg}}^2).$$

公式可适用于以下温度、孔隙率及开孔数:

$T_h = 500 \sim 1\,200\text{ K}$, $T_h - T_l = 0 \sim 100\text{ K}$, $p = 8\% \sim 14\%$, $N = 2 \sim 8$ 。

同理, 以孔隙率 $p = 8\%$, 计算不同温度 $T_h = 500 \sim 1\,200\text{ K}$ 、串联开孔数 $N = 2 \sim 8$ 下的等效导热系数, 预测值与实际模拟值误差小于 2.8%。

4 结 论

本文建立了侧壁开孔蜂窝结构模型, 研究了蜂窝内部高温辐射-导热耦合传热过程, 讨论了开孔形状、开孔参数及开孔排布对等效导热系数的影响规律, 获得了等效导热系数随开孔参数及温度变化的关联式, 所得结论如下。

1) 开孔形状对蜂窝单元等效导热系数的影响不大。当孔隙率一定时, 蜂窝单元方形开孔与圆形开孔等效导热系数变化率小于 0.9%。

2) 对串联圆孔型蜂窝单元, 等效导热系数随

开孔数增大而略微增大,增幅不超过 5.3%;随孔隙率增大而明显减小,变化率可达 8%。

3) 蜂窝单元开孔并联排列相较于串联排列等效导热系数更小。并联开孔相对于串联开孔时等效导热系数更低,当 $p=14\%$ 、 $N=4$ 时等效导热系数达到最小值 $2.11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,相较于未开孔时降低 16.1%,比串联时小 8.4%。

参考文献:

- [1] 刘双,张博明,解维华.可重复使用航天器金属热防护系统的结构优化进展[J].航天制造技术,2007(3): 43-48.
LIU Shuang, ZHANG Boming, XIE Weihua. Progress in structural optimization of metal thermal protection system for reusable spacecraft[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2007(3): 43-48. (in Chinese)
- [2] 付宇,刘正东,王利伟.蜂窝结构与平板太阳集热器[J].科协论坛(下半月),2011(9): 27-28.
FU Yu, LIU Zhengdong, WANG Liwei. Honeycomb structure and flat solar collector[J]. Science & Technology Association Forum, 2011(9): 27-28. (in Chinese)
- [3] 李浩.卫星蜂窝夹层板隔热及热变形研究[D].长春:吉林大学,2018.
LI Hao. Research on thermal insulation and thermal deformation of a satellite honeycomb sandwich plate[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [4] SWANN R, PITTMAN C. Analysis of effective thermal conductivities of honeycomb-core and corrugated-core sandwich panels[R]. NASA Technical Note D-714, 1961.
- [5] 马忠辉.可重复使用运载器热防护系统性能分析研究[D].西安:西北工业大学,2004.
MA Zhonghui. Reusable launch vehicle thermal protection system performance study[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [6] LIU Donghuan, JIN Lei, SHANG Xinchun. Comparisons of equivalent and detailed models of metallic honeycomb core structures with in-plane thermal conductivities[J]. Procedia Engineering, 2012, 31: 967-972.
- [7] DARYABEIGI K. Heat transfer in adhesively bonded honeycomb core panels[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2002, 16(2): 217-221.
- [8] 解维华,张博明,杜善义.金属蜂窝结构有效热导率的预报与实验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(5): 787-789.
XIE Weihua, ZHANG Boming, DU Shanyi. Numerical prediction and measurement of effective thermal conductivity of honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(5): 787-789. (in Chinese)
- [9] 解维华,张博明,杜善义.重复使用飞行器金属热防护系统的有限元分析与设计[J].航空学报,2006,27(4): 650-656.
XIE Weihua, ZHANG Boming, DU Shanyi. Analysis and design of metallic thermal protection systems for reusable launch vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(4): 650-656. (in Chinese)
- [10] ZHENG Liming, WU Dafang, PAN Bing, et al. Experimental investigation and numerical simulation of heat-transfer properties of metallic honeycomb core structure up to 900°C [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 60(1/2): 379-386.
- [11] 李义强,聂玉峰,魏杰.金属蜂窝夹芯面板有效导热系数的数值计算[J].航空计算技术,2010,40(2): 5-8.
LI Yiqiang, NIE Yufeng, WEI Jie. Numerical simulation of effective thermal conductivity of metal honeycomb core sandwich panel[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(2): 5-8. (in Chinese)
- [12] 吴一昊,王天舒.考虑辐射效应金属蜂窝夹芯板传热性能的数值模拟分析[J].材料导报,2016,30(增刊1): 164-167.
WU Yihao, WANG Tianshu. The simulation of heat transfer performance of metal honeycomb sandwich panel taking into account radiative effects[J]. Materials Review, 2016, 30(Suppl.1): 164-167. (in Chinese)
- [13] 李东辉,夏新林.金属蜂窝结构的稳态热性能[J].工程热物理学报,2008,29(12): 2094-2096.
LI Donghui, XIA Xinlin. Steady thermal performance of metallic honeycomb panels[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(12): 2094-2096. (in Chinese)
- [14] 景丽,王广飞,唐绍锋,等.金属蜂窝夹芯板辐射导热耦合问题[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(5): 827-831.
JING Li, WANG Guangfei, TANG Shaofeng, et al. Radiation and conduction coupling problems of honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(5): 827-831. (in Chinese)
- [15] ASHIKHMINA E, PROSUNTISOV P. Numerical simulation and experimental validation of effective thermal conductivity coefficient of hexagonal aramid honeycomb used in wing skin of tourist class reusable spaceplane[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 38: 2025-2030.
- [16] GUO Zhensheng, SONG Yiheng, CHEN Jinxiang, et al. Relation between the geometric parameters and the composite heat transfer of paper honeycomb plates under cold-above/hot-below conditions and the corresponding influence mechanism[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102582.
- [17] CHANDA S, BALAJI C, VENKATESHAN S P, et al. Estimation of principal thermal conductivities of layered honeycomb composites using ANN-GA based inverse technique[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 111: 423-436.
- [18] 梁伟,张立春,吴大方,等.金属蜂窝夹芯板瞬态热性能的计算与试验分析[J].航空学报,2009,30(4): 672-677.
LIANG Wei, ZHANG Lichun, WU Dafang, et al. Computation and analysis of transient thermal performance of metal honeycomb sandwich panels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 672-677. (in Chinese)

(编辑:张雪)