

# 复合材料点阵夹芯结构的耦合换热及热应力分析\*

吴林志, 殷莎, 马力

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 采用数值模拟对复合材料点阵夹芯结构的传导辐射耦合换热及其产生的热应力问题进行了研究。通过孔洞辐射的计算方式, 分析了结构内部辐射对于传热机制的影响, 并探讨了纤维柱及材料发射率等因素对辐射换热强弱的影响; 最后, 分析了结构在耦合换热作用下所产生的热变形和热应力。数值结果表明, 当温度在 350℃ 左右时, 碳纤维点阵夹芯结构的辐射换热效果明显, 且温度越高其差值越大; 纤维柱对辐射换热的贡献不大; 材料的表面发射率越大, 夹芯结构的辐射换热能力越强。在上下面板固支情况下, 热应力场主要分布于上面板及纤维柱与上面板相接触根部, 增强辐射换热, 可减小根部的最大热应力。

**关键词:** 复合材料点阵夹芯; 传导辐射耦合换热; 孔洞辐射; 发射率; 热应力

中图分类号: V414.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2010)06-0969-04

## 1 引言

点阵结构材料是一种多孔有序微结构材料, 以其轻质、比强度高、比刚度大、缓冲吸能及良好的可设计性, 而成为 21 世纪前沿热点研究的材料之一<sup>[1-6]</sup>。对多孔材料的传热散热性能的研究和应用, 国内外已有大量的研究工作, 但主要集中在单相强化对流传热方面<sup>[3-7]</sup>。而对于考虑传导与辐射耦合换热的模拟计算, 北航的梁伟等<sup>[8]</sup>针对金属蜂窝热防护系统从热流量守恒方程出发, 得到了温度场的非线性积分方程; N. D. Kaushika 等<sup>[9]</sup>用指数内核近似推导了一维的传热控制方程, 并用最小二乘法离散后得到分析解。

本文所研究的复合材料点阵夹芯结构是由碳纤维复合材料一体加工成型, 兼备点阵结构一切轻质和多功能的优势, 研究开发这种复合材料点阵夹芯结构的集承载、散热于一体的多功能特性对于未来航空航天的发展是十分必要的。本文利用有限元软件对碳纤维复合材料点阵夹芯结构的传导辐射耦合换热特性进行了研究, 利用孔洞辐射的方法来模拟面板与纤维柱之间的辐射换热, 并以此为基础分析了结构中产生的热变形及热应力。

## 2 基本理论

### 2.1 传导辐射耦合换热理论

对于一般的三维热传导问题, 瞬态温度场的场变量在直角坐标中应满足的热量平衡微分方程和边界条件:

$$\rho c \frac{\partial \phi}{\partial t} - \text{div}(k \cdot \text{grad} \phi) - \rho Q = 0 \quad (\text{在物体内部}) \quad (1)$$

$$\phi = \bar{\phi} \quad (\text{在第一类边界上}) \quad (2)$$

$$k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z = q \quad (\text{在第二类边界上}) \quad (3)$$

式中,  $\rho$  是材料密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c$  是材料比热容 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ );  $k_x$ 、 $k_y$  和  $k_z$  分别是材料沿物体 3 个主方向的导热系数 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ );  $Q = Q(x, y, z, t)$  是物体内部的热源密度 ( $\text{W}/\text{kg}$ );  $n_x$ 、 $n_y$  和  $n_z$  分别是边界外法线的方向余弦。

而对于传导辐射耦合问题, 则热量平衡方程变为:

$$\rho c \frac{\partial \phi}{\partial t} - \text{div}(k \cdot \text{grad} \phi) - \text{div}(q^r) - \rho Q = 0 \quad (4)$$

其中,  $q^r$  是结构中的辐射换热量。特别地, 在 ABAQUS 软件中, 第  $i$  面上的热流量为:

$$q_i^r = \frac{\sigma \epsilon_i}{A_i} \sum_j \epsilon_j \sum_k F_{jk} C_{kj}^{-1} \left[ (\phi_j - \phi^0)^4 - (\phi_i - \phi^0)^4 \right] \quad (5)$$

其中:

$$C_{ij} = \delta_{ij} - \frac{(1 - \epsilon_i)}{A_i} F_{ij}$$

$A_i$  是第  $i$  面的面积;  $\epsilon_i$  和  $\epsilon_j$  分别为第  $i$  和  $j$  面的发射率;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数;  $F_{ij}$  为角系数矩阵;  $\phi$  和  $\phi_j$  为第  $i$  和  $j$  面的温度;  $\phi^0$  为绝对零度;  $\delta_{ij}$  是 Kronecker 常量。基于公式 (4) 和 (5), 可得到结构的温度场。

### 2.2 热应力的产生与分析

当物体各部分温度发生变化时, 物体由于热变形将产生初始线应变:

$$\epsilon_0 = \alpha(\phi - \phi_0) = \alpha \Delta T \quad (6)$$

其中,  $\alpha$  是材料的线膨胀系数 ( $1/^\circ\text{C}$ ),  $\phi$  是弹性体内任一点的温度值,  $\phi_0$  是初始温度值。如果物体受到

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2006CB601206); 国家自然科学基金资助项目 (90816024, 10872059)

收到初稿日期: 2009-10-14

收到修改稿日期: 2010-02-23

通讯作者: 吴林志

作者简介: 吴林志 (1963-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 研究领域为细观力学、功能梯度材料及新型轻质点阵结构。

约束或各部分的温度变化不均匀,使物体的热变形不能自由进行时,则会在物体中产生应力,即为“热应力”或“温度应力”。在物体中存在初应变的情况下,应力应变关系可表示成:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (7)$$

其中,  $D\varepsilon_0$  为热应力项。在有限元软件中,一般就是首先通过计算结构的温度变化所引起的热应变,然后根据(7)式得到结构的热应力的。

### 3 数值模型的建立及模拟过程

#### 3.1 数值模型的建立

数值模型的建立采用了几点基本假设: (1) 全灰体假设,即面板和夹芯均作为灰体考虑; (2) 假设模型处于真空条件下,周围没有空气流动,对流换热可以忽略,因此结构内部的传热模式为传导和辐射耦合; (3) 考虑到此类点阵结构的周期性与对称性,芯层中的单胞周围4个面的净换热量为零,且纤维柱夹芯为横观各向同性材料,其轴向方向上的热导率较其它方向大,问题简化为一维的导热与辐射问题。

模型的几何尺寸(单位: mm)和材料热物性常数分别如图1和表1所示。

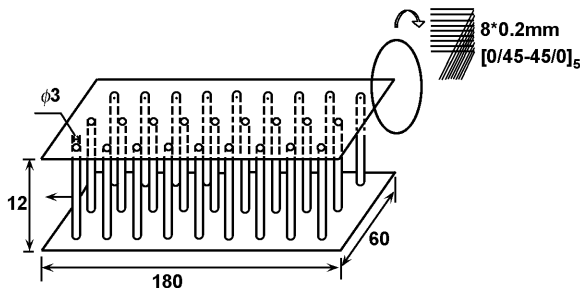


图1 复合材料点阵夹芯结构示意图

Fig 1 Composite lattice truss core sandwich structure

表1 结构的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of the structure

	面板	纤维柱		面板	纤维柱
$E_1$ (GPa)	132		$k_{11}$ (W/(m·K))	130	
$E_2$ (GPa)	10.3	132	$k_{22}$ (W/(m·K))	0.865	130
$E_3$ (GPa)	10.3		$k_{33}$ (W/(m·K))	0.865	
$G_{12}$ (GPa)	6.5		$\alpha_{11}$ (m/K)	2E-8	
$G_{23}$ (GPa)	6.5	-	$\alpha_{22}$ (m/K)	2.25E-5	2E-8
$G_{31}$ (GPa)	3.91		$\alpha_{33}$ (m/K)	2.25E-5	
$\nu_{12}$	0.25		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1600	1600
$\nu_{23}$	0.25	0.25	$c$ (J/(kg·K))	1320	3200
$\nu_{31}$	0.38				

#### 3.2 数值模拟过程

##### 3.2.1 传导辐射耦合换热的模拟

点阵结构的上面板上附带有电源芯片,假设其功率密度恒定为  $q = 9 \text{ W/cm}^2$ ,下面板假定其温度固定为  $T = 20^\circ\text{C}$ ,结构的加载示意图如图2所示。在ABAQUS有限元软件中,面板和夹芯之间采用“tie”选

项中的点对面方式完全固接,它是一种捆绑约束,不求结点耦合在一起,可以模拟实体与壳体的连接。为使计算更准确,均采用二阶单元,即面板采用壳体建模时选用8节点的四边形壳体传热单元,而点阵夹芯则采用实体建模,选择10节点的四面体传热单元。

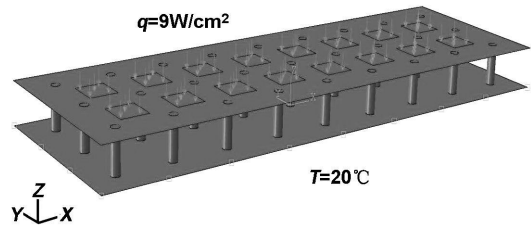


图2 复合材料点阵夹芯结构的加载示意图

Fig 2 Loading sketch of lattice core structure

上下面板和纤维柱之间会产生辐射换热,但由于结构并不是封闭的,辐射角系数之和恒等于1,剩余部分由结构向周围气体的辐射代替。在模型中建立开孔孔洞辐射,可以模拟这一过程,取上下面板内表面和纤维柱的表面发射率均为0.94,周围气体的温度为  $20^\circ\text{C}$ ,建立瞬态传热分析步,设定时间  $t = 30\text{s}$ ,模拟得到结构的热流分布和温度分布如图3和4所示。

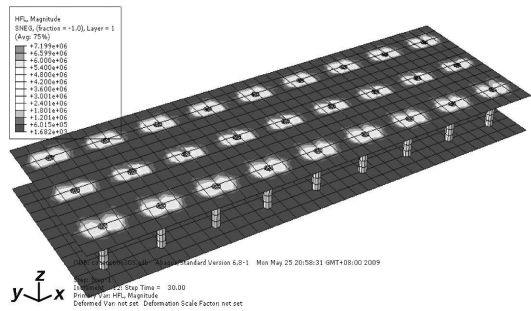


图3 复合材料点阵夹芯结构的热流场分布

Fig 3 Heat flux distribution of structure

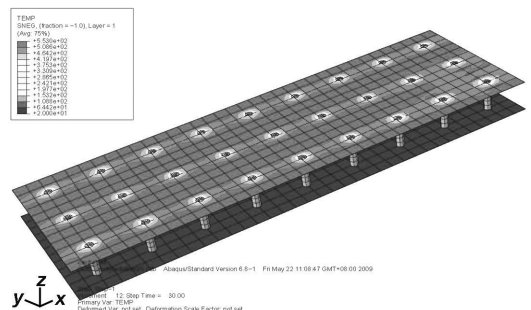


图4 复合材料点阵夹芯结构的温度场分布

Fig 4 Temperature distribution of structure

由图3可知,热流由热源最终趋向于沿芯片周围的纤维柱扩散,因此通过沿着纤维柱的热传导向冷源处扩散。从图4可以看出,热源的温度在面板上充分传导后形成条状,然后沿着纤维柱向下面板传去;而且温度在纤维柱周围成椭圆形,这是由于复合材料面板热导率是各向异性的。总之,热场的分布出现强烈的“点阵”特性。

### 3.2.2 热应力的计算

热和结构问题的分析往往是耦合在一起的,但事实上除了一些强热流环境导致材料热物理性能、热传递方式以及几何外形引起结构热边界条件的变化等情形外,结构的力学响应几乎不会明显影响材料的热物理性能、热传递方式、热边界条件。对于点阵这种复杂结构,本文将采用顺序耦合的方式来计算点阵结构的热应力。

通过 ABAQUS 软件中场函数的定义选项,将前部分瞬态传热模型计算所得到的整个瞬态温度分布作为温度载荷直接导入到结构热应力分析模型中,上下面板的四边采用固支边界条件。对于面板和芯子,分别选择 S8R 壳单元和 C3D20R 三维应力分析单元,选择适中的网格密度划分好网格,建立热应力分析步,然后进行数值模拟,分别得到了在该结束条件下结构的热变形和热应力结果如图 5 所示。上面板的热变形很明显,热应力主要集中在上面板和上面板与纤维柱连接的根部,且最大应力也是出现在根部,故根部的热疲劳问题应该引起重视。

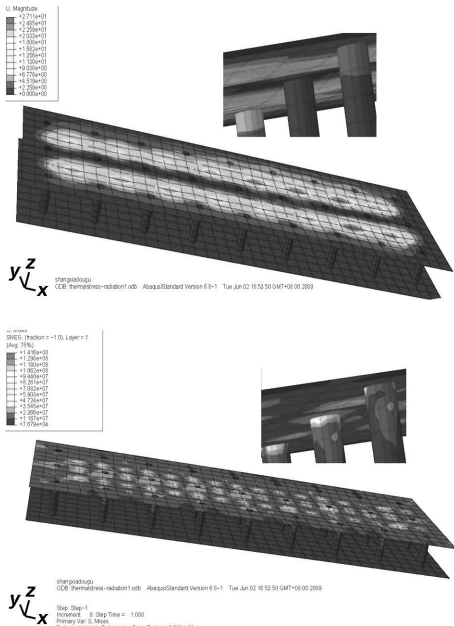


图 5 耦合换热而引起的热变形与热应力

Fig 5 The thermal displacement and thermal stress due to coupled conduction and radiation

### 3.3 分析与讨论

#### 3.3.1 辐射换热的分析与讨论

辐射换热对于整个点阵结构换热效率的贡献及其影响因素是值得深入探讨的。为此,本文模拟了仅考虑热传导时结构热场的分布,并且为考察纤维柱芯体对整体辐射换热的作用,同时又与仅考虑两个面板之间的辐射换热这种情况进行了比较。

对于这 3 种情况,分别计算得到面板上同一点的温度随时间的变化,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,仅考虑热传导作用时的温度比同时考虑辐射时的温度总体偏高,这是因为辐射换热增强了结构的传热能力

而使温度偏低;而考虑纤维柱的孔洞辐射与仅考虑两面板间的辐射换热相比,温度随时间的变化却不大,说明了纤维柱对辐射换热的作用并不大,这是由于纤维柱的横截面积相对于面板来说太小,基本可以忽略其对于辐射的作用。另外,从图 6 还可以看出,当整个结构的温度达到 350℃左右时,辐射换热对于结构温度的影响才比较明显,这与文献[10]中提到的辐射产生作用的温度范围基本相近。

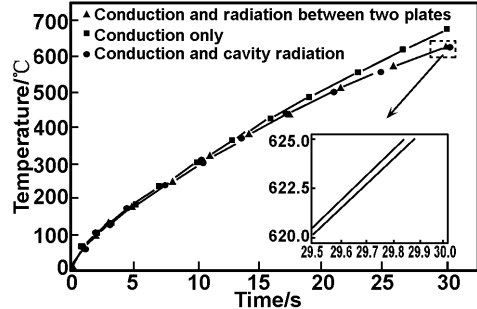


图 6 辐射换热对点阵结构换热的贡献

Fig 6 The temperature variation due to radiation

下面考虑表面发射率对结构传热性能的影响。当发射率变化时,由于孔洞辐射引起的各面板的辐射热量会发生变化,进而影响结构的传热情况。分别计算发射率为 0.94、0.8、0.7、0.6 时,结构上某相同点的温度并作以比较如图 7 所示,发射率越大,该点温度越小,说明结构的传热效果更好,并且温度越高这种效果越明显。因此,可以考虑增加结构的表面发射率来增强结构的辐射换热。

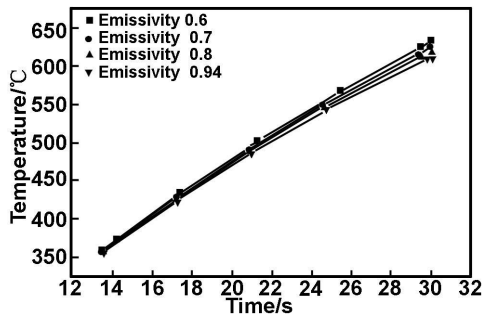


图 7 表面发射率对辐射换热的影响

Fig 7 The effect of surface emissivity to radiation

#### 3.3.2 热应力的分析与讨论

由于辐射换热使结构的温度分布偏低,本文也探讨了由辐射所引起的热应力项的大小。通过模拟发现,仅考虑热传导时的最大热应力比考虑辐射效应时高 50%,因此在进一步探讨该结构多功能化方面的应用时,可以通过适当增加结构表面的发射率来减小结构的根部热应力,以减少结构破坏的可能性。约束形式对于热应力场分布的影响很大,将约束方式改为仅上面板或仅下面板固支时,热应力场的分布如图 8 所示。两者的结构完全不同,前者的热应力场分布于上面板与纤维柱上,而后的热应力主要产生在纤维柱上。在本文所涉及到的 3 种约束方式中,通过比较可发现,仅上面板固支时所产生的最大热应力最小。

在工程应用中可以从实际要求出发,通过数值模拟确定最合理的约束方式。

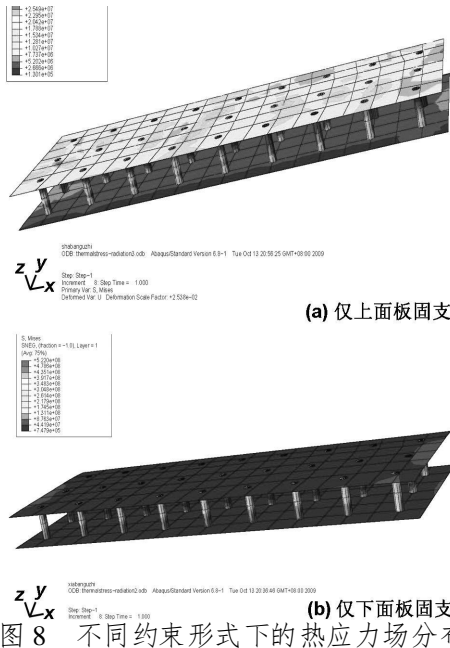


图8 不同约束形式下的热应力场分布

Fig 8 The thermal stress field distribution due to different restriction forms

### 4 结 论

(1) 在考虑热传导与热辐射耦合换热的情况下,碳纤维点阵夹芯结构内部的辐射换热在 350℃左右时较为明显;纤维柱芯体对辐射换热的贡献较小;结构表面的发射率对辐射换热的强弱有影响,发射率越高,辐射换热越强,结构的温度越低。

(2) 将传导辐射耦合计算所得到的温度场作为热载荷,在上下面板都固支的情况下,发现点阵夹芯结构热应力场主要分布在上面板及纤维柱与上面板相接触的根部,根部的热疲劳问题将较突出;另外,仅考虑热传导时的最大热应力比考虑辐射效应时的高 50%,增强辐射换热,可以减小结构根部的最大热应力。

### 参考文献:

- [1] Barnett D M, Dr Rawal S P. Multifunctional Structures Technology Demonstrated on NMP DS1[R]. NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991.
- [2] 方岱宁,郭海成,等. 轻质点阵材料的力学行为分析[R]. 四川: 首届全国航空航天领域中的力学问题学术研讨会, 2004.
- [3] Lu T J, Stone H A, Ashby M F. [J]. Acta Mater, 1998, 46(10): 3619-3635.
- [4] Zhao C Y, Kim T, Lu T J, et al. [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18: 309-317.
- [5] Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P. [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2927-2939.
- [6] Kim T, Zhao C Y, Lu T J, et al. [J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 767-780.
- [7] Kim T, Hodson H P, Lu T J. [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 1129-1140.
- [8] 刘振祺,梁伟,杨嘉陵,等. [J]. 航空学报, 2009, 30(1): 86-91.
- [9] Arulanantham M, Kaushika N D. [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16(3): 209-217.
- [10] Zhao C Y, Tassou S A, Lu T J, et al. [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2927-2939.

## Coupled heat transfer and thermal stress analysis of composite lattice core sandwich structure

WU Lin-zhi, YIN Sha, MA Li

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** A simulation was carried out for the coupled conduction and radiation heat transfer in the all composite lattice core sandwich structure. The cavity radiation method was used firstly to detect the radiation contribution to the heat transfer, and then a discussion for the effect factors of this contribution was followed, such as the participation of the lattice truss core and the surface emissivity of the composite materials. Finally, the thermal deformation and thermal stress was calculated on the basis of the known temperature field by coupled simulation. It was shown that the radiation effect was obvious when the structural temperature was around 350℃, and this effect was enhanced as the emissivity increased; the contribution of lattice truss core to the heat radiation was small. As the upper and under sheets fixed, thermal stress happened mainly in the upper facesheet and at the endwalls where the cylinders contacted with the upper facesheet. The distribution of thermal stress field depends on the restriction forms, and the max thermal stress is smallest only as the upper sheet is fixed.

**Key words:** composite lattice core structure; coupled conduction and radiation; cavity radiation; emissivity; thermal stress