

文章编号: 1000-6893(2006)06-1229-05

基于导热性能的复合材料微结构拓扑优化设计

张卫红, 汪 雷, 孙士平

(西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

Topology Optimization for Microstructures of Composite Materials Based on Thermal Conductivity

ZHANG Wei-hong, WANG Lei, SUN Shi-ping

(The Key Laboratory of Contemporary Design & Integrated Manufacturing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘 要: 基于均匀化理论和拓扑优化技术,提出了复合材料稳态导热性微结构构型的设计方法。根据均匀化理论给出的周期性材料微结构(单胞)等效导热系数的计算公式,结合有限元分析手段对单胞的等效导热系数求解;定义设计区域内微结构每个单元的导热系数为伪密度设计变量,约束材料用量,分别以材料微结构某个方向导热性能最好为目标和宏观结构的散热性能最佳为目标;采用实体各向同性惩罚函数法(SIMP)构造单胞拓扑结构优化数学模型,导出材料等效导热系数的灵敏度计算公式;采用凸规划对偶求解与周长控制约束相结合进行拓扑优化并获得了优化的微结构构型,数值算例结果验证了所提出的拓扑优化方法可以有效地进行复合材料微结构的导热性能设计。

关键词: 复合材料; 导热性; 均匀化方法; 微结构; 拓扑优化

中图分类号: V257 **文献标识码:** A

Abstract: A new method is presented for thermal conductive microstructures of composite materials based on the technique of homogenization method and topology optimization. From the mathematical formulation of effective thermal conductivity for periodic microstructures, the effective conductivity matrix is evaluated by means of the finite element method. By defining the pseudo-density variable of each element in the design domain and constraining the total material cost, a topology optimization model with SIMP method is built to maximize either the effective thermal conductivity of the microstructure in specified directions or the thermal conduction efficiency of the macrostructure. The sensitivity of the objective function is then given. The optimal solution can be obtained by means of the dual optimization algorithm and perimeter constraint. Numerical results verify the validity of the proposed topology optimization method in the thermal conduction design of the microstructures.

Key words: composite materials; thermal conductivity; homogenization method; microstructure; topology optimization

近年来,航空、航天等高科技的发展使基于给定材料的传统结构设计模式受到了巨大的挑战。材料科学、结构力学和计算技术的交汇融合,及材料设计与结构设计的交汇融合成为目前研制新型材料与结构的新方法。

从 20 世纪 80 年代开始,材料微结构的设计、等效力学性能、热性能计算以及微结构构型对宏观性能的影响规律等基础问题引起了世界众多科研人员的关注。1993 年 Lakes^[1]在《自然》杂志上明确阐明通过不同组分材料的复合可以获得任何

单相材料无法比拟的极端材料特性。20 世纪 90 年代中期,Sigmund^[2,3]率先提出了基于均匀化理论和拓扑优化方法的各向同性材料微结构单胞拓扑优化逆向设计技术,在预先给定材料性能要求基础上,使用拓扑优化方法进行材料微结构构型的布局剪裁,获得了具有良好特性的复合材料构型,如负的泊松比、负的热膨胀系数、零剪切性能以及具有良好压电特性的压电材料。

导热性是衡量复合材料散热性能的重要指标,兼有轻质与良好导热性的多孔材料广泛应用于卫星、飞机、汽车等零部件上。近年来,复合材料等效导热性成为研究热点之一,Tzou^[4]采用自洽方法给出了球形空洞材料的整体导热系数表达

收稿日期:2005-07-05; 修订日期:2005-12-06

基金项目:国家自然科学基金(90405016,10372083)、航空科学基金(04B53080)、973 计划(2006CB601205)

式;程耿东、刘书田^[5]等用均匀化方法对单向纤维复合材料的导热性进行预测;程伟、赵寿根^[6]等采用“米”字形枝状胞有限元模型和试验方法研究了三维四向编织复合材料等效热特性,进一步的工作需要从材料和结构设计的角度对微结构构型进行布局优化设计。

本文在以上研究的基础上,采用均匀化理论,在材料微结构单胞呈空间周期分布的假设条件下,对材料微结构的等效导热系数进行有效计算。并以微结构等效导热系数最大化为目标和宏观结构散热性能最佳为目标优化设计材料微结构构型,建立了严格的优化数学模型;采用凸规划对偶求解与周长控制约束^[7]相结合的算法进行拓扑优化计算,数值算例对理论和算法进行了验证。

1 材料微结构设计

1.1 均匀化理论

均匀化方法(如图 1 所示)是一种严格的数学理论,它以连续介质理论为基础,假设宏观结构由周期性微结构元在空间中重复堆积而成,宏观结构的性能参数是微结构性能的平均值。假设材料有宏观 x 和微观 y 两种尺度,分别对应于宏观结构和微结构,两者的关系如下

$$y = x/\varepsilon \quad 0 < \varepsilon \ll 1 \quad (1)$$

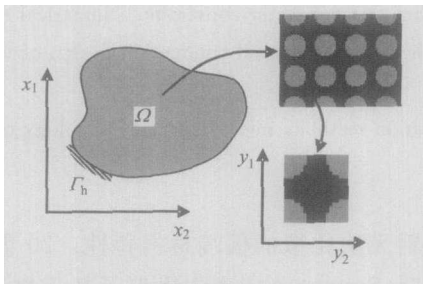


图 1 均匀化方法示意图

Fig. 1 Illustration of homogenization method

材料在微观上不均匀,但由于微观尺度远小于宏观尺度,所以材料在宏观上仍然视为均匀。以温度场函数为例,

$$T_\varepsilon(x) = T(x, y) \quad (2)$$

若以小参数 ε 渐近展开,则一阶近似为

$$T(x, y) = T_0(x) + \varepsilon T_1(x, y) \quad (3)$$

式中: T_0 为宏观温度; T_1 为微观温度,同时可以看出宏观性质仅仅是宏观尺度 x 的函数。

对于热传导问题,将整个结构看成连续介质,

稳态热传导问题的控制方程和边界条件为

$$\int_a \mathbf{K}_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_i} d\Omega = \int_a f \delta T d\Omega + \int_{\Gamma_h} h \delta T \nabla \delta T \quad (4)$$

式中: \mathbf{K}_{ij} 为热传导系数张量; f 和 h 分别为内部热源和边界上流入热流。

把式(3)代入控制方程式(4),同时根据周期性函数 Ψ 的平均化原则式(5),宏观-微观耦合问题可以转化为宏观问题、微观问题来解决,

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_a \Psi(x/\varepsilon) d\Omega = \int_a \frac{1}{|Y|} \int_Y \Psi(y) dY d\Omega \quad (5)$$

式中 $|Y|$ 代表整个单胞的体积。

对于热传导问题可以分别得到如下的微观和宏观控制方程

$$\int_Y \mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \chi_j}{\partial y_i} \frac{\partial \delta T_1}{\partial y_i} dY = \int_Y \mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \delta T_1}{\partial y_i} dY \nabla \delta T_1 \quad (6)$$

$$\int_a \mathbf{K}_{ij}^H \frac{\partial T_0}{\partial x_j} \frac{\partial \delta T_0}{\partial x_i} d\Omega = \int_a f^H \delta T_0 d\Omega + \int_{\Gamma_h} h \delta T_0 d\Gamma \nabla \delta T_0 \quad (7)$$

使用周期性边界条件,通过求解微观控制方程,可得到微结构关于热传导的特征函数。式(7)中均匀化的热传导系数张量 \mathbf{K}_{ij}^H 可以严格定义为

$$\mathbf{K}_{ij}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y (\mathbf{K}_{ij} - \mathbf{K}_{ij}^p) \frac{\partial \chi_j}{\partial y_i} dY \quad (8)$$

1.2 优化数学模型

拓扑优化中的材料插值方法有多种,其中 SIMP 方法简单实用,微结构单元材料导热系数与单元密度存在如下关系式

$$\mathbf{K} = (x_e)^p \mathbf{K}_0 \quad (e = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: \mathbf{K}_0 和 \mathbf{K} 分别为单元材料导热系数张量和惩罚后的导热系数张量; x_e 为单元伪密度; p 为惩罚因子,本文取 $p=4$ 。选择惩罚因子的目的是对中间密度单元项进行惩罚,使结构单元密度尽可能趋近于 0 或 1 两种极限状态。

本工作旨在确定由实体材料和空心构成的微结构拓扑形式,使得材料和结构具有最佳导热、散热性能。对独立二维单胞结构加载周期性边界条件,微结构等效导热系数 \mathbf{K}_{12}^H 和 \mathbf{K}_{21}^H 远小于主方向导热系数 \mathbf{K}_{11}^H 和 \mathbf{K}_{22}^H ,可以近似为零。以主方向导热系数的倒数加权和最小为目标函数优化设计单胞构型,可使材料微结构沿相应方向的等效导热系数最大,加权因子(w_1, w_2)的大小取决于材料微结构相关方向导热性的重要程度,优化模型为

$$\begin{aligned}
 & \text{find } \mathbf{x} = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n\}^T \in \mathbf{R}^n \\
 & \text{min } S = \omega_1(1/\mathbf{K}_{11}^H) + \omega_2(1/\mathbf{K}_{22}^H) \\
 & \text{s. t. } \sum_{e=1}^n x_e v_e \leq f_v V_0 \\
 & P(\mathbf{x}) = \sum_{e=1}^M l_e (x_i - x_j)^2 \leq \bar{P} \\
 & 0 < x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中: S 为微结构等效主方向热传导系数倒数的加权和; \mathbf{x} 为微结构单元伪密度向量; v_e 为微结构单元体积; V_0 为微结构总体积; $P(\mathbf{x})$ 为全局周长约束; \bar{P} 为给定周长约束上限; l_e 为相邻单元 i 和 j 的邻边长度; f_v 为实心材料的体分比。

引入小变量 $x_{\min} = 10^{-3}$ 是为了防止单元热刚度矩阵奇异。 $P(\mathbf{x})$ 用于阻止微结构构型出现棋盘格效应, 在几何上它反映所有相邻单元的密度的总变化。以单元伪密度 \mathbf{x} 作为优化设计变量, 目标函数对其的灵敏度为

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial S}{\partial x_e} &= \frac{\partial(\omega_1(1/\mathbf{K}_{11}^H) + \omega_2(1/\mathbf{K}_{22}^H))}{\partial x_e} = \\
 & -\omega_1(\mathbf{K}_{11}^H)^{-2} \partial \mathbf{K}_{11}^H / \partial x_e - \omega_2(\mathbf{K}_{22}^H)^{-2} \partial \mathbf{K}_{22}^H / \partial x_e. \quad (11)
 \end{aligned}$$

以上从材料设计的范畴对微结构构型进行拓扑优化设计, 使材料满足特定的要求; 另一方面也可从结构设计角度出发, 把微结构作为宏观结构中的一部分, 通过对宏观结构加载热载荷, 以宏观结构的整体散热性能最佳为目标对宏观结构中的单胞构型进行优化设计, 从而得到具有最佳散热性的宏观结构布局, 优化模型为

$$\begin{aligned}
 & \text{find } \mathbf{x} = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n\}^T \in \mathbf{R}^n \\
 & \text{min } S = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_b \mathbf{K}^H(\mathbf{x}) \mathbf{T} = \\
 & \sum_{e=1}^n (\mathbf{T}_e)^T \mathbf{K}_{be} (\mathbf{K}^H(\mathbf{x}) \mathbf{T}_e \\
 & \text{s. t. } \sum_{e=1}^n x_e v_e \leq f_v V_0 \\
 & P(\mathbf{x}) = \sum_{e=1}^M l_e (x_i - x_j)^2 \leq \bar{P} \\
 & 0 < x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} \quad (12)
 \end{aligned}$$

式中: S 为宏观结构的散热弱度; \mathbf{K}_b 为总体热传导矩阵; \mathbf{T}_e 为单元节点温度向量; \mathbf{T} 为总体节点温度向量; \mathbf{K}^H 为微结构的等效热传导系数张量。

基于宏观结构热传导方程, 可得目标函数灵敏度为

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial S}{\partial x_e} &= -\mathbf{T}^T \frac{\partial \mathbf{K}_b(\mathbf{K}^H(\mathbf{x}))}{\partial x_e} \mathbf{T} = \\
 & -\sum_{e=1}^n (\mathbf{T}_e)^T \frac{\partial \mathbf{K}_{be}(\mathbf{K}^H(\mathbf{x}))}{\partial x_e} \mathbf{T}_e =
 \end{aligned}$$

$$-\sum_{e=1}^n (\mathbf{T}_e)^T \left(\int_V \mathbf{B}^T \frac{\partial \mathbf{K}^H(\mathbf{x})}{\partial x_e} \mathbf{B} dv \right) \mathbf{T}_e \quad (13)$$

本文采用凸规划对偶法和子迭代松弛策略求解上述优化模型。利用对偶原理将设计空间的最小化问题转换成对偶空间变量的最大化问题, 使得优化设计变量减少; 子迭代松弛策略使问题周长约约束得到精确满足, 从而有效地抑止棋盘格式, 消除中间密度灰度值。

1.3 灵敏度的求解

以上优化模型灵敏度的求解最后均可归结为等效热传导系数 \mathbf{K}_{ij}^H 对微结构单元伪密度的灵敏度求解, 下面具体展开对其求解过程。由式(8)可得

$$\frac{\partial \mathbf{K}_{ij}^H}{\partial x_e} = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left[\frac{\partial \mathbf{K}_{ij}}{\partial x_e} - \frac{\partial}{\partial x_e} \left(\mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \chi_j}{\partial y_l} \right) \right] dY \quad (14)$$

采用有限元离散得

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathbf{K}_{ij}^H}{\partial x_e} &= \frac{1}{|Y|} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \mathbf{K}_{ijt}}{\partial x_e} - \frac{\partial}{\partial x_e} \left(\mathbf{K}_{ij}^t \frac{\partial \chi_{jt}}{\partial y_l} \right) \right] v_i = \\
 & \frac{v_e}{|Y|} \left(\frac{\partial \mathbf{K}_{ije}}{\partial x_e} - \frac{\partial \mathbf{K}_{ie}}{\partial x_e} \frac{\partial \chi_{je}}{\partial y_l} \right) - \\
 & \frac{1}{|Y|} \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_{ijt} \frac{\partial}{\partial x_e} \left(\frac{\partial \chi_{jt}}{\partial y_l} \right) v_i = \\
 & \frac{v_e}{|Y|} \frac{p}{x_e} \left(\mathbf{K}_{ije} - \mathbf{K}_{ie} \frac{\partial \chi_{je}}{\partial y_l} \right) - \\
 & \frac{1}{|Y|} \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_{ijt}^r \frac{\partial}{\partial x_e} \left(\frac{\partial \chi_{jt}}{\partial y_l} \right) v_i \quad (15)
 \end{aligned}$$

若令 $\phi_{jt} = \frac{\partial \chi_{jt}}{\partial y_l}$, 式(15)可变为

$$\frac{\partial \mathbf{K}_{ij}^H}{\partial x_e} = \frac{v_e}{|Y|} \frac{p}{x_e} \left(\mathbf{K}_{ije} - \mathbf{K}_{ie} \phi_{je} \right) - \frac{1}{|Y|} \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_{ijt} \frac{\partial \phi_{jt}}{\partial x_e} v_i \quad (16)$$

同时可以得到

$$\phi = \mathbf{B} \chi, \quad \partial \phi / \partial x_e = \mathbf{B} \partial \chi / \partial x_e \quad (17)$$

下面求解式(16)中惟一的未知参数 $\partial \phi_{jt} / \partial x_e$, 根据微结构的热传导有限元方程

$$\mathbf{K}_b \chi = \mathbf{Q} \quad (18)$$

两边分别对 x_e 求导可得

$$\mathbf{K}_b \frac{\partial \chi}{\partial x_e} = \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x_e} - \frac{\partial \mathbf{K}_b}{\partial x_e} \chi \quad (19)$$

若令 $\bar{\chi}_e = \frac{\partial \chi}{\partial x_e}$, $\bar{\mathbf{Q}}_e = \left(\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x_e} - \frac{\partial \mathbf{K}_b}{\partial x_e} \chi \right)$, 可得有限元方程

$$\mathbf{K}_b \bar{\chi}_e = \bar{\mathbf{Q}}_e \quad (20)$$

所以对已知单胞结构求解有限元方程式(20)可得 $\bar{\chi}_e = \partial \chi / \partial x_e$, 代入式(17)可以求得 $\partial \phi_{jt} / \partial x_e$, 通过式

(14)即可求得等效热传导系数 K_{ij}^H 对单元伪密度 x 的灵敏度。

按照以上所述的灵敏度求解方法,结合有限元分析,采用凸规划对偶法和子迭代松弛策略,即可对优化模型进行优化求解,优化流程如图2所示。

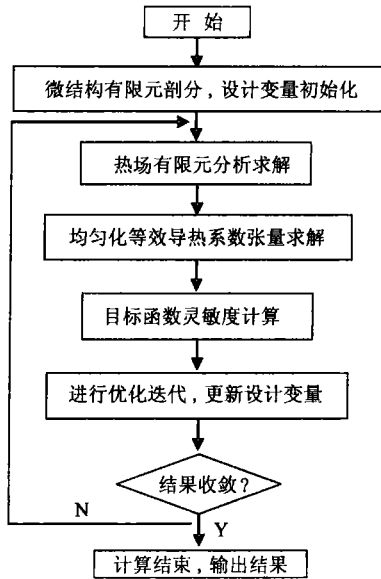


图2 微结构拓扑优化设计流程

Fig.2 Algorithm for topology optimization of microstructures

2 算例分析

2.1 单独微结构构型优化

微结构取 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 正方形单胞,加载温度场周期性边界条件,结构离散为 20×20 的四边形四节点单元,假设组分材料的导热系数为 $k = 1\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,单胞结构如下图3所示。

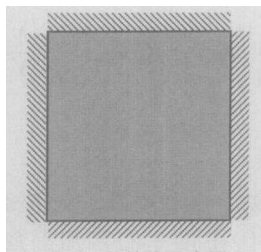
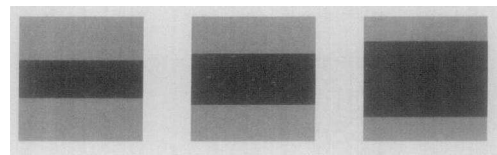


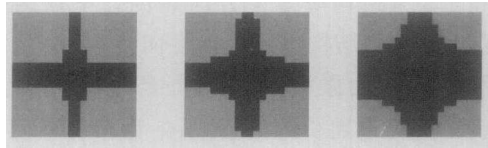
图3 微结构示意图

Fig.3 Illustration of microstructures

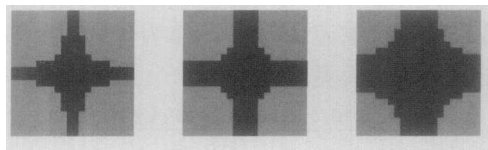
为了展开比较,分别取材料体分比 $f_v = 30\%$, $f_v = 40\%$, $f_v = 60\%$ 进行单胞水平方向与垂直方向导热系数加权优化,同时为了研究加权因子对微结构材料构型设计的影响,分别以如下3种加权因子模型对微结构进行优化设计:模型(1) $w_1 = 1.00, w_2 = 0$;模型(2) $w_1 = 0.75, w_2 = 0.25$;模型(3) $w_1 = 0.50, w_2 = 0.50$ 。优化结果如图4所示,图中灰色表示空心区域,黑色表示实体区域。



$f_v = 30\%$ $f_v = 40\%$ $f_v = 60\%$
 $K_{11}^H = 0.297\ 2$ $K_{11}^H = 0.397\ 6$ $K_{11}^H = 0.590\ 3$
 $K_{22}^H = 0$ $K_{22}^H = 0$ $K_{22}^H = 0$
 (a) $w_1 = 1.00, w_2 = 0$



$f_v = 30\%$ $f_v = 40\%$ $f_v = 60\%$
 $K_{11}^H = 0.218\ 2$ $K_{11}^H = 0.261\ 9$ $K_{11}^H = 0.482\ 0$
 $K_{22}^H = 0.126\ 3$ $K_{22}^H = 0.205\ 7$ $K_{22}^H = 0.297\ 2$
 (b) $w_1 = 0.75, w_2 = 0.25$



$f_v = 30\%$ $f_v = 40\%$ $f_v = 60\%$
 $K_{11}^H = K_{22}^H = 0.152\ 4$ $K_{11}^H = K_{22}^H = 0.241\ 2$ $K_{11}^H = K_{22}^H = 0.413\ 4$
 (c) $w_1 = 0.50, w_2 = 0.50$

图4 微结构优化结果

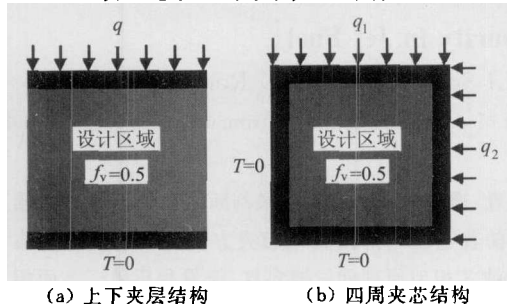
Fig.4 Optimal microstructures

从以上优化结果可以看出,微结构的材料布局随权因子(w_1, w_2)的变化发生了改变。当水平方向的权因子 w_1 从大到小变化 ($1.00, 0.75, 0.50$),同时垂直方向的权因子 w_2 从小到大变化 ($0.25, 0.50$)时,材料布局由水平方向逐渐增加成为沿垂直方向分布。当加权因子 w_1 小于 w_2 时,如取 $w_1 = 0, w_2 = 1.00$ 或 $w_1 = 0.25, w_2 = 0.75$ 时,优化结果相当于模型(1)和模型(2)旋转 90° 后的结果。而取不同体分比 f_v 对于微结构的材料布局方向没有影响,主要使得微结构的等效热传导系数的大小发生改变。

2.2 宏观结构中的微结构构型优化

下面从宏观结构考虑微结构构型的集成设计,微结构作为宏观结构的一部分,以宏观结构的整体散热性能最佳对微结构构型进行设计。所研究的问题如图5所示的两种平面结构。在图5(a)所示夹层结构中,上端加载热流密度 $q = 0.01\text{ kW}/\text{m}^2$,下端固定温度 $T = 0$;在图5(b)所示四周夹芯结构中,上端和右端加载热流密度 $q_1 = 0.02\text{ kW}/\text{m}^2, q_2 = 0.01\text{ kW}/\text{m}^2$,下端和左端

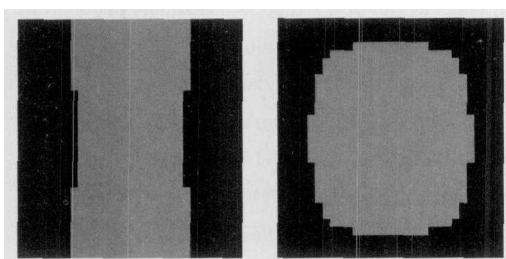
固定温度 $T=0$ 。图中黑色部分为夹层板非设计区域(由实体材料填充),灰色部分为优化设计区域(由微结构填充)。宏观结构离散为 10×10 的四边形四节点单元的有限元模型,组分材料的热传导系数为 $k=1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,设计区域的材料体积比 $f_v=0.5$ 。微结构取单位正方形大小,离散为 30×30 的四边形四节点单元的有限元模型。



(a) 上下夹层结构 (b) 四周夹芯结构
图5 结构示意图

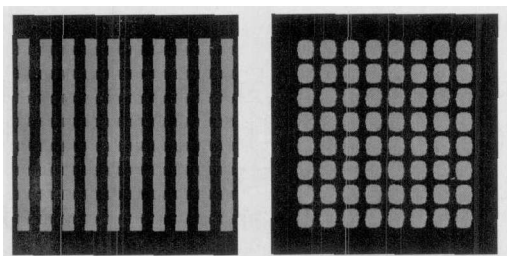
Fig. 5 Design domain and loading

微结构单胞优化结果如图6所示,宏观结构布局如图7所示。图中灰色表示空心区域,黑色表示实体材料区域。



(a) 上下夹层 (b) 四周夹芯
图6 材料微结构优化结果

Fig. 6 Optimal microstructures



(a) 上下夹层 (b) 四周夹芯
图7 宏观结构布局

Fig. 7 Macro-material layout

从优化结果来看,对于不同的宏观结构加载方式,所设计出微结构的构型不同,但都完全符合结构实际散热、导热要求;宏观结构呈现蜂窝、夹层结构的几何特征,具有轻质材料良好的特性。对于蜂窝、夹层的孔洞处可以进一步加载对流、辐射等边界条件来加强结构的散热性能。

3 结束语

采用均匀化理论和拓扑优化技术,发展了导

热性微结构拓扑优化设计方法,开辟了多孔导热性材料与结构集成设计的一个新思路。在微结构设计中分别考虑单胞导热性能的方向要求和体比对设计结果的影响,以及不同宏观结构载荷条件下微结构构型的变化。通过二维算例分析,设计出了导热、散热性能较好的微结构构型,有效地验证了所提方法的可靠性,对航空航天新型轻质防热功能材料与结构设计具有重要的参考意义。

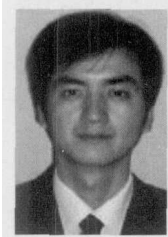
参 考 文 献

- [1] Lakes R. Materials with structural hierarchy [J]. Nature, 1993, 361: 511-515.
- [2] Sigmund O. Materials with prescribed constitutive parameters: an inverse homogenization problem [J]. International Journal of Solids and Structures, 1994, 31(17): 2313-2329.
- [3] Sigmund O, Torquato S. Design of materials with extreme thermal expansion using a three-phase topology optimization method [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1997, 45(6): 1037-1067.
- [4] Tzou D Y. A universal model for the overall thermal conductivity of porous media [J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25:1064-1084.
- [5] 程耿东,刘书田. 单相纤维复合材料导热系数预测[J]. 复合材料学报, 1996, 13(1): 78-85.
Cheng G D, Liu S T. Prediction of thermal conductivity of unidirectional fiber reinforced composites [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 1996, 13(1): 78-85. (in Chinese)
- [6] 程伟,赵寿根,刘振国. 三维四向编织复合材料等效热特性数值分析和试验研究[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 102-105.
Cheng W, Zhao S G, Liu Z G. Thermal property of 3-D braided fiber composites: experimental and numerical result [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 102-105. (in Chinese).
- [7] Zhang W H, Duysinx P. Dual approach using a variant perimeter constraint and efficient sub-iteration scheme for topology optimization [J]. Computers & Structures, 2003, 81(22/23): 2173-2181.

作者简介:



张卫红(1964-) 男,教授,博士生导师,工学博士,国家第二批“长江计划”特聘教授。主要研究方向:多学科,多目标优化设计,材料与结构一体化优化设计与加工仿真。E-mail: zhangwh@nwpu.edu.cn



汪雷(1979-) 男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料与结构的优化设计,飞行器结构设计等。E-mail: leiwang009@hotmail.com

(责任编辑:蔡斐)