

基于有限元法的平纹编织 C/SiC 复合材料 等效导热系数预测方法

陆思达^{1,2}, 高希光¹, 宋迎东^{1,3}

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院

江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;

2. 克兰菲尔德大学 工程学院 动力推进系, 贝德福德郡 MK43 0AL;

3. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 提出了一种采用有限元法计算平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的方法. 首先研究了材料的细观结构, 根据材料显微照片建立了带基体碳纤维束复合材料的单胞模型, 采用基体中孔隙分布随机生成的单胞模型, 计算了孔隙率对基体等效导热系数的影响, 通过施加 3 组边界条件计算出带基体碳纤维束和复合材料的等效导热系数. 最后应用提出的方法计算分析了碳纤维体积分数和孔隙率对复合材料等效导热系数的影响规律. 结果显示: 复合材料等效导热系数随碳纤维体积分数增大而线性下降, 碳纤维体积分数从 54% 增加到 78% 的过程中, 复合材料 y 轴方向的等效导热系数下降了 12.8%, x 与 z 轴方向的等效导热系数同时下降了 8.6%; 复合材料等效导热系数随孔隙率增大呈加速下降趋势, 孔隙率从 0 增加到 30% 的过程中, 材料的 x 与 z 轴方向的等效导热系数下降了 22.91%, y 轴方向的等效导热系数下降了 34.66%.

关 键 词: 航空、航天推进系统; C/SiC 复合材料; 导热系数; 单胞模型; 孔隙率

中图分类号: V254; TB33

文献标志码: A

Prediction method on equivalent thermal conductivity coefficient of plain braided C/SiC composites material based on finite element method

LU Si-da^{1,2}, GAO Xi-guang¹, SONG Ying-dong^{1,3}

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Power and Propulsion, School of Engineering,

Cranfield University, Bedfordshire MK43 0AL, United Kingdom;

3. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A computing method on equivalent thermal conductivity of plain braided C/SiC composites material was proposed based on finite element method. Mesoscopic structure of materials was studied firstly, including microscopic model of carbon fiber bundles with matrix and single-cell model. Effects of porosity on the matrix equivalent thermal conductivity coefficient were calculated using random-pore single-cell model. The equivalent

收稿日期: 2013-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(51105195); 航空科学基金(2011ZB52024, 2012ZB52027)

作者简介: 陆思达(1991-), 男, 上海人, 硕士生, 主要研究方向为飞行器动力工程.

通讯作者: 高希光(1981-), 男, 福建沙县人, 副教授, 博士, 研究方向为航空发动机结构、强度与振动.

thermal conductivity coefficient of carbon fiber bundles with matrix and composites material was calculated under the condition of three sets of boundary conditions. Finally with the proposed method, the relationship between equivalent thermal conductivity coefficient and fiber volume fraction/porosity was studied in detail. The results indicate that the equivalent thermal conductivity coefficient of the composites material decreases linearly with the increase of fiber volume fraction. While fiber volume fraction increases from 54% to 78%, the equivalent thermal conductivity coefficient in y axis direction declines by 12.8% and that in x and z axis directions by 8.6%. The equivalent thermal conductivity coefficient of the composites material presents an accelerating downward trend during the porosity's rising process. While the porosity increases from 0% to 30%, the equivalent thermal conductivity coefficient declines by 22.91% in x and z axis directions and 34.66% in y axis direction.

Key words: aerospace propulsion system; C/SiC composites material; thermal conductivity coefficient; single-cell model; porosity

C/SiC(陶瓷基)复合材料具有低密度、高熔点、高刚度、高硬度和较高的高温强度,且抗腐蚀、抗蠕变、疲劳性能好,是航空航天飞行器热端部件理想的候选材料。经过碳纤维增强的 C/SiC 复合材料,克服了陶瓷脆性大的缺陷。通过应用新的编织技术,使编织复合材料克服了传统层合板复合材料易分层、裂纹扩展快、垂直厚度方向强度低、抗冲击损伤性能差的缺点。因此,编织 C/SiC 复合材料具有更好的抵抗损伤和裂纹扩展能力,可取代高温合金成为新一代高温结构材料,可以用于航空发动机的燃烧室、涡轮导向叶片、高压涡轮、加力燃烧室和尾喷管,可显著提高发动机性能,同时可以用于火箭等航天器的热端部件,极具应用前景^[1-5]。

导热性是 C/SiC 复合材料重要的材料参数,国内外有许多学者对 C/SiC 复合材料等效导热系数的计算方法进行了研究^[5-12]。XU Yibin 和 Yagi^[11]对 C/SiC 复合材料导热性进行有限元结构分析,得到其等效热流密度和温度梯度,然后结合傅里叶定理求解出等效导热系数。Tzou^[12]利用自洽方法给出了预测球形空洞和圆盘形裂缝材料整体导热性的表达式。聂荣华、矫桂琼、王波^[5]利用等效热阻-电阻法预测了二维编织 C/SiC 复合材料的结构参数、碳纤维体积分数、孔洞体积分对其等效导热系数的影响规律。程耿东、刘书田^[7]利用均匀化方法预测 C/SiC 复合材料导热性。

然而上述预测方法使用的模型均较为简单,不能充分考虑微观结构对等效导热系数的影响。基于单胞的细观力学方法可以模拟复杂的几何结

构^[13-20]。本文采用有限元法与单胞模型相结合,提出了平纹编织 C/SiC 复合材料的等效导热系数预测方法,并通过算例分析研究了碳纤维体积分数和基体孔隙率对复合材料等效导热系数的影响。

1 等效导热系数预测方法

1.1 单胞模型与微观模型

平纹编织 C/SiC 复合材料横截面显微照片如图 1 所示。从图中可以看出,该复合材料由带基体碳纤维束和外围基体构成,碳纤维束的编织方式为二维编织,其结构与织布相似。由此结构特点,以带基体碳纤维束和外围基体作为复合材料的基本要素建立其单胞模型(如图 2 所示)。图中 a 为带基体碳纤维束宽度, b 为平行碳纤维束之间的距离, h_b 为单层基体厚度, h_f 为单层带基体碳纤维束厚度。

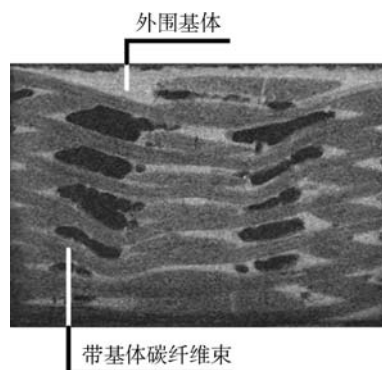


图1 横截面显微照片

Fig. 1 Cross section micrograph

图2中带基体碳纤维束的微观结构与单向碳纤维增强复合材料非常接近,根据文献[17]可以采用图3所示的模型作为单向碳纤维增强复合材料的代表性体积元.因此本文采用图3所示模型作为带基体碳纤维束的微观模型.图3中圆柱和4个1/4圆柱均为碳纤维,其余部分为碳化硅基体. c 为微观模型截面正方形边长, l 为微观模型长度, r_f 为单根碳纤维的半径.

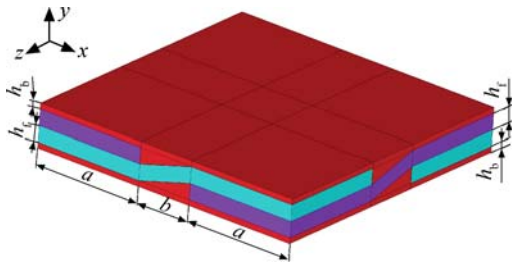


图2 单胞模型

Fig. 2 Single-cell model

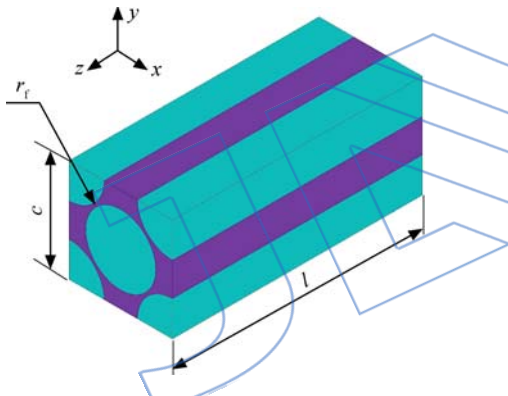


图3 带基体碳纤维束的微观模型

Fig. 3 Microscopic model of carbon fibre bundles with matrix

1.2 导热方程

按常物性、无内热源、稳态热传导计算材料等效导热系数.通过自底向上的计算方法逐步计算出带基体碳纤维束和平纹编织结构复合材料的等效导热系数.即已知碳纤维和碳化硅的等效导热系数,然后计算出带基体碳纤维束的等效导热系数,最后根据带基体碳纤维束和外围基体的等效导热系数计算出复合材料的等效导热系数.

在常物性、无内热源、稳态条件下,温度 t 的分布遵循导热方程^[21]

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

边界条件可分为以下3类:

第1类边界条件规定了边界上的温度值 t_w ,最简单的情况是 t_w 为常数.

$$t_w = \text{const} \quad (2)$$

第2类边界条件规定了边界上的热流密度值,最简单的情况是热流密度为常数, n 为表面的法线方向, κ 为导热系数.

$$-\kappa \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = \text{const} \quad (3)$$

第3类边界条件规定了边界上物体与周围流体间表面传热系数 h 以及周围流体的温度 t_f .

本文仅用到前两类边界条件.

对于简单的模型可直接求解,而对于复杂模型,一般都是通过有限元法、有限差分法或边界元法等数值计算方法求解,其中有限元法应用最广.本文采用基于有限元法的ANSYS软件^[22]热分析模块对复合材料的导热问题进行求解.

1.3 等效导热系数

根据傅里叶定律^[21]

$$\Phi = -\kappa A \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

可知

$$\kappa = -\frac{\Phi}{A} \frac{dt}{dx} \quad (5)$$

其中 Φ 为热通量, A 为导热面积, $\frac{dt}{dx}$ 为温度梯度.

参照式(5),对于平纹编织C/SiC复合材料细观单胞模型和微观模型,如果温度梯度为常数,且单胞表面的单元边长相同,则可定义 κ_{equ} 为等效导热系数,则 x 轴方向的等效导热系数为

$$\kappa_{\text{equ},x} = -\frac{\Phi_x}{A_x} \frac{dt}{dx} = -\frac{\sum_{i=1}^m q_i a_i}{\sum_{i=1}^m a_i} \frac{dt}{dx} \quad (6)$$

其中 a_i 是第 i 个单元垂直于 x 轴的平面的表面积, q_i 是通过该表面的热流密度.通过控制单元边长可以保证 a_i 为一个常数,于是得

$$\kappa_{\text{equ},x} = -\frac{\sum_{i=1}^m q_i}{m} \frac{dt}{dx} \quad (7)$$

同理可得 y, z 轴方向的等效导热系数为

$$\kappa_{\text{equ},y} = -\frac{\sum_{i=1}^m q_i}{m} \frac{dt}{dy} \quad (8)$$

$$\kappa_{\text{equ},z} = -\frac{\sum_{i=1}^m q_i}{m} \frac{dt}{dz} \quad (9)$$

其中 m 为面内网格数, q 为热流密度.

2 带基体碳纤维束等效导热系数的计算

2.1 带基体碳纤维束微观模型的建立

带基体碳纤维束的微观模型由碳纤维和基体组成. 将碳纤维简化为圆柱体, 根据对角排列方式建立微观模型. 碳纤维体积分数 φ_f 的计算公式为

$$\varphi_f = \frac{2\pi \times r_f^2}{c^2} \quad (10)$$

由此可推导出 c 的表达式

$$c = \sqrt{\frac{2\pi}{\varphi_f}} \times r_f \quad (11)$$

已知单根碳纤维的半径 r_f 为 $3.5 \mu\text{m}$, 碳纤维束中碳纤维的体积分数 φ_f 为 72% , 求得 c 为 $10.34 \mu\text{m}$. 取 l 为 $25 \mu\text{m}$, 在 ANSYS 中建立带基体碳纤维束的微观模型, 如图 3 所示. 单元类型为 SOLID70(三维各向异性 8 节点热分析单元), 单元边长为 $0.2 \mu\text{m}$, 单元数量为 33 万. 由于基体和碳纤维完全贴合, 界面上两种材料的单元一一对应, 节点共用.

2.2 带基体碳纤维束导热等效系数计算

微观模型中碳纤维轴向和法向导热系数分别为 $4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, SiC 基体导热系数为 $70 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [5].

边界条件定义: 微观模型相对两个面的壁面温度分别为 1000°C 和 100°C , 另外 4 个面绝热. 依次计算沿 x, y, z 轴 3 个方向的稳态导热情况. x 轴方向导热计算结果如图 4 所示.

根据式(7)~式(9), 可计算出微观模型沿 x, y, z 轴 3 个轴方向的等效导热系数, 详见表 1.

计算结果显示, 等效导热系数沿 x 轴方向和 y 轴方向的数值非常接近, 而与 z 轴方向的数值有明显差异, 这与带基体碳纤维束的微观结构特征相吻合.

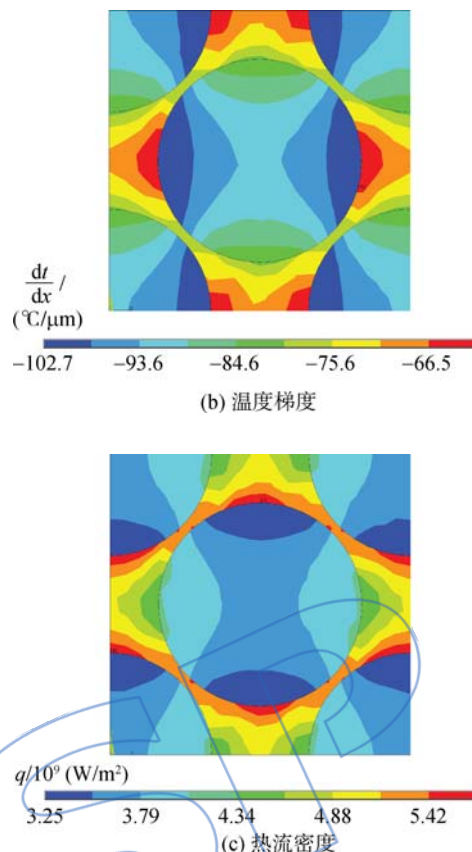
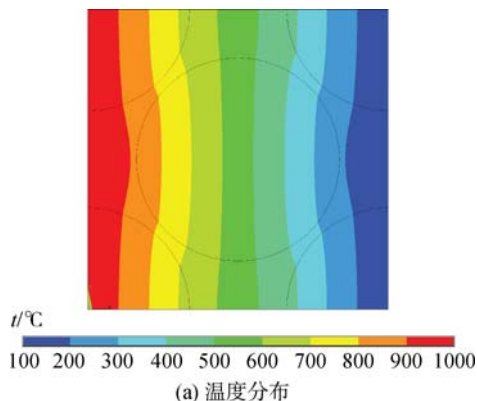


图 4 带基体碳纤维束 x 轴方向导热计算结果
Fig. 4 Calculation result of thermal conductivity of carbon fiber bundles with matrix in direction of x axis

表 1 微观模型当量导热系数计算结果

Table 1 Calculation results of equivalent thermal conductivity coefficient of microscopic model

轴方向	$\sum_{i=1}^m q_i / 10^{13} (\text{W}/\text{m}^2)$	m	$d/\mu\text{m}$	$\kappa_{\text{equ}} / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$
x	2.7021	6 625	10.34	46.84
y	2.7024	6 625	10.34	46.86
z	0.2201	3 358	25.00	22.48

3 平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的计算

3.1 材料单胞模型的建立

根据图 1 所示微观结构, 建立图 2 所示的复合材料单胞模型.

对比图 1 和图 2, 观察可知在实际结构中在碳纤维束平纹编织的过程中碳纤维的走势为曲线, 而简化的模型中碳纤维束的走势为折线; 同时

在实际结构中碳纤维层与碳纤维层之间的基体的厚度是不均匀的而在简化的模型中 h_b 为一个定量,不随位置的改变而改变.这两个简化都将对模拟结果产生影响并产生少许误差,其中对碳纤维束走势的简化导致了碳纤维长度变短,使沿碳纤维方向的等效导热系数略小于实际值;对层与层之间基体厚度的简化对各个方向等效导热系数产生影响,不过从宏观角度分析,编织结构大致均匀,所以这种简化对等效导热系数影响较小.所产生的误差可通过试验进行对比分析,试验之前可以运用这个模型对平纹编织 C/SiC 复合材料的等效导热系数进行预测.

整个模型由带基体碳纤维束和基体组成.建立的带基体碳纤维束的三维模型如图 5 所示,建立的基体的三维模型如图 6. 单胞模型建立的过程中,采用的单元类型也为 SOLID70,单元数量为 45 万.边界面处理方法与微观模型相同.模型中的碳纤维束有横、纵两个走向,由于碳纤维导热的各向异性,对于两个走向的碳纤维束分别赋予不同的等效导热系数值;SiC 基体导热为各向同性,导热系数为固定值.

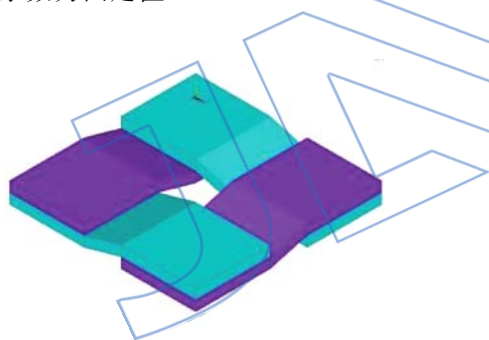


图 5 带基体碳纤维束的三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of carbon fiber bundles with matrix



图 6 基体三维模型

Fig. 6 Three-dimensional model of matrix

在图 2 的单胞模型中除了带基体碳纤维束之外的所有体积都充满了基体.建立单胞模型时,需确定单层带基体碳纤维束厚度 h_f 、带基体碳纤维束的宽度 a 、层与层之间基体厚度 $2h_b$ 和平行碳纤维束之间的距离 b 共 4 个几何参数.单胞模型几何参数^[5]见表 2.

表 2 单胞模型几何参数(单位:mm)

Table 2 Geometric parameters of single-cell model (unit:mm)

h_f	a	$2h_b$	b
0.056	0.4	0.04	0.2

3.2 单胞模型有限元导热计算

采用映射网格划分,单元边长为 $0.01 \mu\text{m}$.带基体碳纤维束导热等效系数采用表 1 的计算结果,轴向等效导热系数为 $22.48 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、法向等效导热系数取 x 和 y 轴方向的平均值为 $46.85 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,SiC 基体的导热系数仍为 $70 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

边界条件:单胞模型相对两个面的壁面温度分别为 1000°C 和 100°C ,另外 4 个面绝热.依次计算沿 x, y, z 轴 3 个方向的稳态导热情况.单胞模型 x 轴方向导热计算结果如图 7 所示.

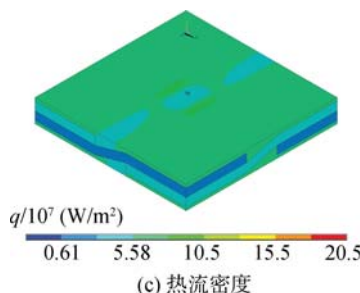
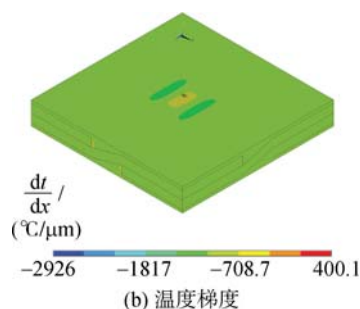
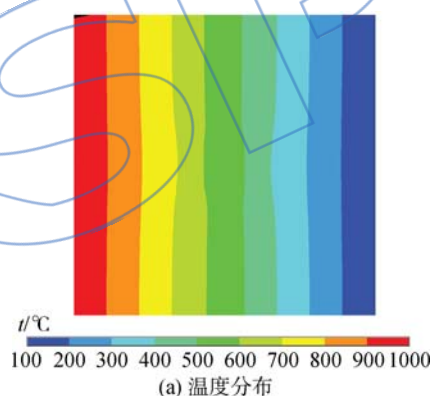


图 7 单胞模型 x 轴方向导热计算结果

Fig. 7 Calculation result of thermal conductivity of single-cell model in direction of x axis

3.3 单胞模型等效导热系数计算

根据式(7)~式(9),可计算出单胞模型沿 x , y , z 轴 3 个方向的等效导热系数,计算结果见表 3.

计算结果显示,等效导热系数沿 x 轴方向和 z 轴方向的数值非常接近,而与 y 轴方向的数值有明显差异,这与单胞模型的微观结构特征相吻合.

表 3 单胞模型等效导热系数计算结果(单位:W/(m·K))

Table 3 Calculation results of equivalent thermal conductivity coefficient of single-cell model
(unit: W/(m·K))

$K_{\text{equ}, x}$	$K_{\text{equ}, y}$	$K_{\text{equ}, z}$
40.13	54.62	40.11

4 碳纤维体积分数对等效导热系数的影响

采用所建立的参数化计算模型,改变带基体碳纤维束理想微观模型中纱线碳纤维体积分数,依次计算获得不同碳纤维体积分数时带基体碳纤维束理想微观模型和平纹编织 C/SiC 复合材料单胞模型的等效导热系数.图 8 所示为两个模型的等效导热系数随碳纤维体积分数的变化规律.可以看出随着碳纤维体积分数从 54% 增加到 78% 的过程中,材料 y 轴方向的等效导热系数呈线性规律下降了 12.8%, x 与 z 轴方向的等效导热系数同时下降了 8.6%.这是由于碳纤维导热系数小于 SiC 基体导热系数所导致的.等效导热系数变化较大说明碳纤维体积分数是影响等效导热系数的一个很重要的因素.

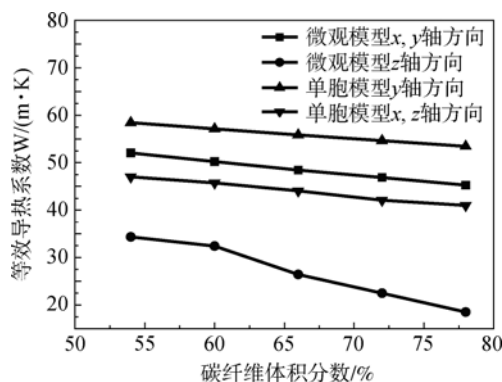


图 8 等效导热系数随碳纤维体积分数的变化规律

Fig. 8 Variation law of equivalent thermal conductivity coefficient with carbon fiber volume fraction

5 孔隙率对等效导热系数的影响

在制备的平纹编织 C/SiC 复合材料中,基体内不可避免地会存留孔隙.由于孔隙内气体的导热系数远低于基体和碳纤维的导热系数,所以孔隙的存在也会影响复合材料的等效导热系数.基体内孔隙的分布微观是随机的,宏观是均匀的,所以在预测计算存在孔隙的平纹编织 C/SiC 复合材料的等效导热系数时,可以采用在基体中孔隙分布随机生成的单胞模型.

5.1 随机分布孔隙的基体模型

为使孔隙随机地分布,用 C 语言编制生成随机数组的程序,输出为 ANSYS 的命令流文件.图 9 为建立的随机分布孔隙的有限元基体模型,模型是边长为 20 mm 的立方体,图中深色部分为孔隙,浅色部分为纯基体,共有 8000 个单元.

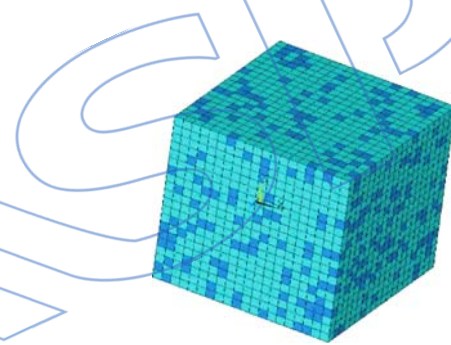
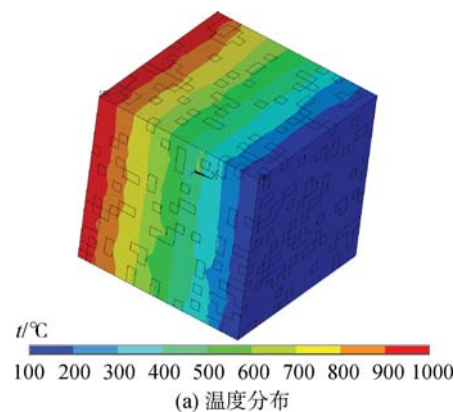


图 9 随机分布孔隙的基体模型

Fig. 9 Matrix model with random distribution of pore

5.2 随机分布孔隙的基体模型的导热计算

令边界条件仍然是模型相对两个面的壁面温度分别为 1000 °C 和 100 °C,另外 4 个面绝热.依次计算沿 x , y , z 轴 3 个方向的稳态导热情况.模型 x 轴方向导热温度分布、温度梯度、热流密度如图 10 所示.



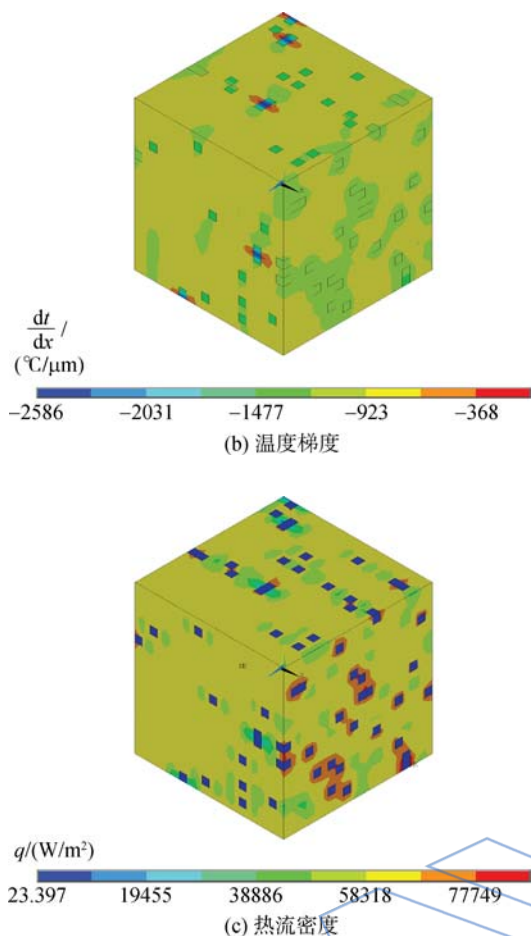


图 10 随机分布孔隙的基体模型 x 轴方向导热计算结果

Fig. 10 Calculation result of thermal conductivity of matrix model with random distribution of pore in direction of x axis

由于所编的程序生成的是随机数组,所以有可能出现极端的情况,比如孔隙集中.为了避免这种情况的出现,每个孔隙率数值都进行多次孔隙的随机生成,分别计算各次等效导热系数取平均值.

5.3 孔隙率对基体等效导热系数的影响分析

工程上平纹编织 C/SiC 复合材料的孔隙率基本在 15%~25% 范围内.为了涵盖工程中出现的多种情况,所研究的孔隙率变化范围设定在 10%~30% 之间.利用图 9 所示的随机分布孔隙的基体模型,计算了基体等效导热系数 κ_{equ} 随孔隙率 P 变化的规律,各轴方向等效导热系数相同,数据见表 4.计算结果显示,孔隙率增加时基体等效导热系数减小.

5.4 孔隙率对平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的影响分析

利用前述单胞模型,通过引入受孔隙率影响

的基体等效导热系数数据,研究了孔隙率对平纹编织 C/SiC 复合材料各轴向等效导热系数的影响.计算结果见表 5 和图 11.结果表明,孔隙率增加时,平纹编织 C/SiC 复合材料的等效导热系数也减小.

表 4 基体等效导热系数随孔隙率的变化规律

Table 4 Variation law of equivalent thermal conductivity of matrix with porosity

$P/\%$	$\kappa_{\text{equ}}/(W/(m \cdot K))$
10	55.10
15	47.68
20	40.27
25	32.92
30	25.64

表 5 各轴向等效导热系数随孔隙率的变化规律

Table 5 Variation law of equivalent thermal conductivity coefficient of every axial directions with porosity

$P/\%$	$\kappa_{\text{equ},x}/(W/(m \cdot K))$	$\kappa_{\text{equ},y}/(W/(m \cdot K))$	$\kappa_{\text{equ},z}/(W/(m \cdot K))$
10	39.35	49.98	39.28
15	37.40	47.19	37.35
20	35.36	43.98	35.34
25	33.21	40.18	33.21
30	30.92	35.69	30.94

孔隙率从 0 增加到 30% 的过程中,平纹编织 C/SiC 复合材料的 x 和 z 轴方向的等效导热系数减小 22.91%, y 轴方向的等效导热系数下降 34.66%.下降过程呈现出非线性并有逐步加速的趋势,如图 11 所示.

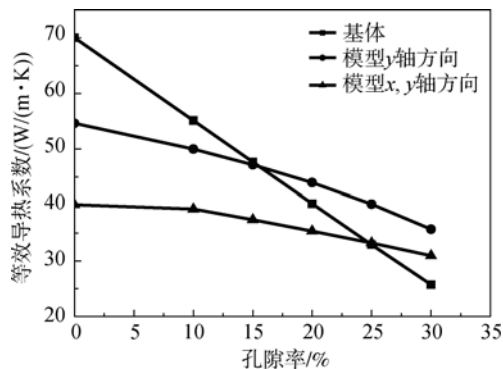


图 11 等效导热系数随孔隙率的变化曲线

Fig. 11 Variation curve of equivalent thermal conductivity coefficient with porosity

6 结 论

本文使用有限元方法建立了平纹编织 C/SiC 复合材料的参数化微观模型、单胞模型和含孔隙的基体模型,提出了用 ANSYS 软件进行平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的预测计算方法,研究了碳纤维体积分数和孔隙率对平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的影响。通过研究,得出如下结论:

1) 采用对参数化微观模型进行精细有限元热传导分析获取 C/SiC 复合材料不同方向等效导热系数的方法是可行的。

2) 随着碳纤维体积分数的增大,带基体碳纤维束微观模型等效导热系数线性减小。

3) 当其他参数不变时,平纹编织 C/SiC 复合材料单胞模型等效导热系数随着碳纤维体积分数的增加而线性下降,碳纤维体积分数的变化对模型各方向等效导热系数影响均明显,对垂直于碳纤维方向的等效导热系数影响最明显。

4) 孔隙率增加时,基体等效导热系数线性减小,平纹编织 C/SiC 复合材料的等效导热系数呈现出加速下降的趋势。

参考文献:

- [1] 甘永学,张志民.纤维增强陶瓷基复合材料的研究及其在航空航天领域的应用[J].宇航材料工艺,1994,24(5):1-5.
GAN Yongxue, ZHANG Zhimin. Research of CMC and its applications in the aerospace field[J]. Aerospace Materials and Technology, 1994, 24(5): 1-5. (in Chinese)
- [2] 张立同,成来飞,徐永东.新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展[J].航空制造技术,2003(1):24-32.
ZHANG Litong, CHENG Laifei, XU Yongdong. Progress in research work of new CMC-SiC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(1): 24-32. (in Chinese)
- [3] 聂荣华,矫桂琼,王波.二维编织 C/SiC 复合材料的热膨胀系数预测[J].复合材料学报,2008,25(2):109-114.
NIE Ronghua, JIAO Guiqiong, WANG Bo. Prediction on coefficient of thermal expansion for 2-D braided C/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 109-114. (in Chinese)
- [4] 邵将,温卫东,崔海涛.纺织陶瓷基复合材料力学性能研究进展[J].硅酸盐学报,2007,35(1):114-122.
HAO Jiang, WEN Weidong, CUI Haitao. Research progress on mechanical properties of ceramic matrix textile composite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(1): 114-122. (in Chinese)
- [5] 聂荣华,矫桂琼,王波.二维编织 C/SiC 陶瓷基复合材料的热传导系数预测[J].复合材料学报,2009,26(3):169-174.
NIE Ronghua, JIAO Guiqiong, WANG Bo. Prediction on coefficient of thermal conductivity for 2D braided C/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3): 169-174. (in Chinese)
- [6] 程伟,赵寿根,刘振国,等.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 Wei, ZHAO Shougen, LIU Zhenguo, et al. Thermal property of 3-D braided fiber composites: experimental and numerical results[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 102-105. (in Chinese)
- [7] 程耿东,刘书田.单向纤维复合材料导热性预测[J].复合材料学报,1996,13(1):78-85.
CHENG Gengdong, LIU Shutian. Prediction of thermal conductivity of unidirectional fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1996, 13(1): 78-85. (in Chinese)
- [8] 彭浩,樊栓狮,黄骥子.瞬变平面热源法测定常压下四氢呋喃水合物的导热系数[J].化学通报,2005,68(12):45-49.
PENG Hao, FAN Shuanshi, HUANG Juzi. The determination of thermal conductivity of tetrahydrofuran hydrate at atmospheric pressure by transient plane source method[J]. Chemistry, 2005, 68(12): 45-49. (in Chinese)
- [9] Loeb A L. Thermal conductivity: a theory of thermal conductivity of porous materials[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1954, 37(2): 96-99.
- [10] Farooqi J K, Sheikh M A. Finite element modelling of thermal transport in ceramic matrix composites[J]. Computational Materials Science, 2006, 37(3): 361-373.
- [11] XU Yibin, Yagi K. Automatic FEM model generation for evaluating thermal conductivity of composite with random materials arrangement[J]. Computational Material Science, 2004, 30(3/4): 242-250.
- [12] Tzou D Y. A universal model for the overall thermal conductivity of porous media[J]. Composite Materials, 1991, 25(8): 1064-1084.
- [13] 李龙,高希光,史剑,等.考虑孔隙的针刺 C/SiC 复合材料弹性参数计算[J].航空动力学报,2013,28(6):1257-1263.
LI Long, GAO Xiguang, SHI Jian, et al. Calculation of needed C/SiC composite elastic parameters in consideration of the porosity[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1257-1263. (in Chinese)
- [14] 高希光,宋迎东,孙志刚.纤维尺寸随机引起的复合材料性能分散性研究[J].材料科学与工程学报,2005,23(3):335-340.
GAO Xiguang, SONG Yingdong, SUN Zhigang. Research on variation of effective performances of composites induced by the stochastic fiber size[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(3): 335-340. (in Chinese)
- [15] 高希光,宋迎东,孙志刚.陶瓷基复合材料高精度宏细观统一本构模型研究[J].航空动力学报,2008,23(9):1617-

- 1622.
- GAO Xiguang, SONG Yingdong, SUN Zhigang. Multi-scale constitute model for ceramic matrix composite by high fidelity generalized method of cell[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9): 1617-1622. (in Chinese)
- [16] 宋迎东, 雷友锋, 孙志刚, 等. 一种新的纤维增强复合材料细观力学模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(4): 435-440.
- SONG Yingdong, LEI Youfeng, SUN Zhigang, et al. A new micro-mechanics model for fibrous composite [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(4): 435-440. (in Chinese)
- [17] 孙志刚, 宋迎东, 高希光, 等. 细观结构对复合材料热膨胀系数的影响研究[J]. 应用力学学报, 2004, 21(2): 146-150.
- SUN Zhigang, SONG Yingdong, GAO Xiguang, et al. Influence of micro-structural geometry on thermal expansion coefficient of composites[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(2): 146-150. (in Chinese)
- [18] 孙志刚, 宋迎东, 高德平. 纤维增强复合材料细观温度场计算[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 595-599.
- SUN Zhigang, SONG Yingdong, GAO Deping. Temperature fields calculation of fiber reinforced composite at micro level[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 595-599. (in Chinese)
- [19] GAO Xiguang, SONG Yingdong, SUN Zhigang, et al. Numerical simulation of dynamic response of fiber reinforced ceramic matrix composite beam with matrix cracks using multiscale modeling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(5): 537-548.
- [20] 孙志刚, 宋迎东, 高希光, 等. 改进算法的三维通用单胞模型及其应用[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(9): 1029-1032.
- SUN Zhigang, SONG Yingdong, GAO Xiguang, et al. An efficient implementation of the three dimensional GMC model and its application [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(9): 1029-1032. (in Chinese)
- [21] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.