

预测平纹编织 C/SiC 复合材料等效 导热系数的三维纤维随机模型

左可军, 闻 洁

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种能够刻画平纹编织 C/SiC 复合材料编织结构的三维纤维随机模型,探讨了微观结构影响宏观等效导热系数的机理。采用蒙特卡罗法模拟纤维位置的随机分布,用有限元法计算等效导热系数,通过数理统计方法分析在不同纤维体积分数下等效导热系数的随机分布规律;并且比较了相同纤维体积分数下,纤维随机模型平均等效导热系数与纤维周期排列模型等效导热系数的差别。结果表明:在不同体积分数下,纤维位置随机等效导热系数都呈高斯分布;纤维随机模型中纤维会出现聚集现象,形成局部“导热热障”,所以纤维随机模型平均等效导热系数小于纤维周期排列模型,这种差异在中等纤维体积分数下最明显。

关 键 词: 平纹编织 C/SiC 复合材料; 蒙特卡罗法; 等效导热系数; 有限元法;

三维 (3D) 纤维随机模型

中图分类号: V254; TB33

文献标志码: A

Three-dimensional fiber random model to predict effective thermal conductivity of plain braided C/SiC composites

ZUO Kejun, WEN Jie

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine
Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A random microstructure cell model was developed to predict the effective thermal conductivity of plain braided C/SiC composites material, so as to describe the real distribution of fibers and the braiding-structure. Then, the influence mechanism of microstructures on macroscopic effective thermal conductivity was discussed. The random distribution of fibers was simulated by Monte Carlo method, and the effective thermal conductivity was calculated based on finite element method, and the results were presented in statistical forms. It was shown that, the Gaussian distribution function described the distribution of effective thermal conductivity accurately. For a random fiber distribution, fibers segregated in a microscopic level; Portions of the fibers came into contact and formed some local “heat flow obstacles”, which led to a smaller effective thermal conductivity than that of the general cell model.

收稿日期: 2016-12-14

作者简介: 左可军(1992—),男,工程师,硕士,主要从事涡轮叶片冷却换热、陶瓷基复合材料导热特性方面的研究。

引用格式: 左可军, 闻洁. 预测平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的三维纤维随机模型[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1326-1335. ZUO Kejun, WEN Jie. Three-dimensional fiber random model to predict effective thermal conductivity of plain braided C/SiC composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1326-1335.

Key words: plain braided C/SiC composites material; Monte Carlo method; effective thermal conductivity; finite element method; three-dimensional (3D) fiber random model

随着对高推质比发动机的需求,对涡轮叶片进口温度提出了更高的要求,迫切需要寻找一种耐热材料以替代传统的金属材料。陶瓷基复合材料具有优异的耐高温特性和低密度特性,是一种很有潜力的材料,可用于航空发动机燃烧室、尾喷管和涡轮叶片等部位。且在涡轮叶片中使用陶瓷基复合材料不仅可以承受更高的温度,而且可以减少冷气量的使用,从而提高循环热效率并且降低污染物 NOx 的排放^[1-4],所以陶瓷基复合材料在航空发动机中具有广阔的应用前景。

导热系数是陶瓷基复合材料的重要的物性参数,国内外许多学者都有研究。陈则韶^[5]将复合材料各部分等效为热阻,将整个复合材料等效为热阻的串并网络,用最小热阻力法则计算复合材料的等效导热系数;聂荣华等^[6]利用相同的方法预测了平纹编织 C/SiC 的结构参数、纤维体积分数、空洞体积分数对复合材料等效导热系数的影响;陆思达等^[7]用有限元方法研究了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规律。纤维在基质中的位置是随机分布的^[8-10],上述研究没有考虑纤维位置随机分布的问题,对于纤维位置随机的研究:康博奇等^[11]发展了一种随机微结构胞元模型对单向纤维增强复合材料横向等效导热系数进行了预测;高希光、宋迎东等^[12-15]采用蒙特卡洛方法对复合材料中纤维位置的随机分布进行模拟,用 GMC (通用单胞)模型计算复合材料物性参数,通过数理统计的方法得到了等效导热系数和力学性能参数的分布规律;Wongsto 等^[16]通过先对纤维位置初始化,然后在此基础上让纤维随机移动建立纤维随机的二维模型;YAN Dongfan 等^[17]用相同的方法建立二维纤维随机模型,用有限元方法计算复合材料的等效导热系数,得到了复合材料等效导热系数的随机分布规律。

上述建立的纤维随机模型都是二维模型,只能模拟一个截面上的纤维随机分布,不能反映平纹编织复合材料的编织结构。本文提出了一种三维纤维随机模型,能够刻画纤维在平纹编织单胞中的交叉编织结构,并且探讨了微结构影响宏观等效导热系数的机理。

1 模型的建立

1.1 平纹编织单胞模型

平纹编织单胞由纤维束和外层基质组成,其中纤维束中既有基质又有纤维,经向纤维束与纬向纤维束交叉分布,形成平纹编织结构,参考文献[6]建立本文的平纹编织单胞模型。 x 方向的纤维束为经向纤维束, y 方向的纤维束为纬向纤维束, z 轴垂直于编织平面,如图 1 所示,图 2、图 3 分别为外层其质壳、正交编织纤维束模型。图中 h_b 为外层基质的厚度, h_f 为纤维束的厚度, a 为带基质纤维束的宽度, b 为平行带基质纤维束之间的距离,具体数值见表 1。

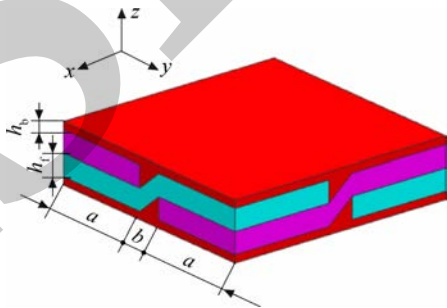


图 1 平纹编织单胞模型
Fig.1 Plain braided unit cell model

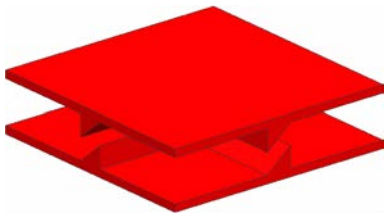


图 2 外层基质壳模型
Fig.2 Model of outer matrix shell

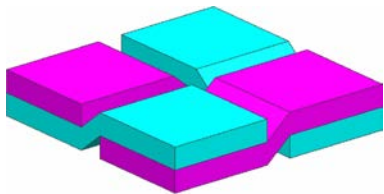


图 3 正交编织纤维束模型
Fig.3 Model of orthogonality braided fiber bundles

表 1 平纹编织单胞的几何参数

Table 1 Geometric parameters of plain braided unit cell

mm

参数	数值
h_f	0.089
a	0.42
h_b	0.01
b	0.11

1.2 蒙特卡罗法建立三维纤维随机模型

文献[8]指出,纤维在纤维束中的位置是随机分布的。

本文采用蒙特卡罗方法生成一组随机数,一个随机数对应着一根纤维,然后通过算法让纤维的位置分布与这组随机数对应,最后建立三维纤维随机模型(random cell model,RCM)。具体原理如下,以一个经向纤维束为例

1) 取垂直于纤维轴向的截面如图 4 所示,该截面被划分为 M 行 N 列个网格,根据纤维体积分数计算纤维的根数 P ,也是要生成的随机数的个数。关于网格尺寸 L 和 P 的计算后面会详细说明。

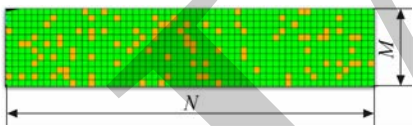


图 4 二维截面中纤维单元的随机分布

Fig. 4 Random distribution of fibers elements in two-dimensional section

2) 将这些网格依次编号:第 i 行网格从左到右依次编号为 $(i-1) \times N + 1$ 到 $i \times N$ 。

3) 从 1 到 $M \times N$ 个整数中随机生成 P 个互不相同的随机整数,这 P 个整数对应的网格为纤维单元(图 4 中的黄色单元格)。

4) 上一步得到了纤维在平面上的随机分布,将黄色的纤维单元沿纤维走向拉伸,形成 P 根三维纤维,如图 5 所示。

同理,可以得到其他 3 个带基质纤维束中纤维的随机分布,图 6 是平纹编织单胞中的纤维交叉编织的形态。

图 7(a)是真实的随机纤维增强复合材料横截面,图 7(b)是用本文中的随机算法生成的纤维在截面随机分布图。后者的纤维分布反映了前者

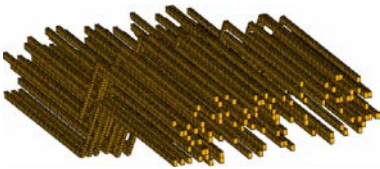


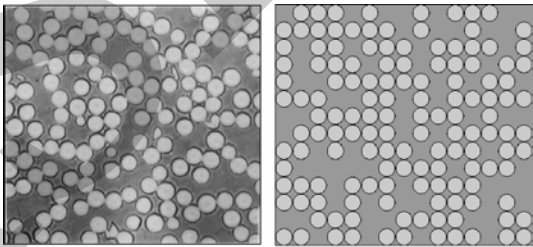
图 5 随机分布的三维纤维单元

Fig. 5 Random distributional three-dimensional fiber elements



图 6 具有十字交叉结构的三维纤维单元

Fig. 6 Three-dimensional fiber elements with braiding-structure



(a) 真实纤维分布图 (b) 模拟纤维分布

图 7 实际纤维分布与随机模拟的纤维分布

Fig. 7 Real fiber distribution and random simulation fiber distribution

的主要关键特征,如纤维的随机分布、局部偏聚。

需要说明的是,在本文中纤维单元是方形的,并不表示纤维是方形的。纤维单元也是有微观结构的,方形纤维单元中的内切圆是纤维,周围是一薄层基质,关于纤维单元的微观结构后面有详细介绍。图 8 中的黄色单元是纤维单元,黄色单元中的白色内切圆即是真正的纤维,图 8 中描述的纤维分布就是图 7(b)中的情况。

1.3 纤维单元坐标系贴合纤维走向

纤维单元的轴向等效导热系数和法向等效导热系数不同,本文建立的纤维是三维纤维,纤维单元的轴向和法向不再是固定的方向,而是不同的纤维单元有不同的轴向和法向,所以纤维单元的单元坐标系要贴合纤维走向,以一根经向纤维为例,如图 9 所示。在图 9 中,蓝色的 z 轴,纤维的法向;黑色的 x 轴与 z 轴垂直,纤维的轴向; y 轴

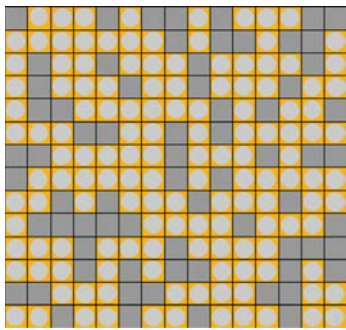


图 8 纤维单元的分布与纤维的分布
Fig. 8 Distribution of fiber elements and fiber



图 9 纤维单元坐标系贴合纤维走向
Fig. 9 Element coordinate systems align with the fiber's direction

垂直于 x 轴和 z 轴,纤维的法向。不同单元局部坐标系的 x 轴连在一起,表达了纤维的轴向,同理,纤维的法向也得到表达。

2 有限元方法计算等效导热系数

借助于 ANSYS 软件,用有限元方法计算复合材料等效导热系数。以平纹编织单胞的等效导热计算为例:计算 x 方向的等效导热系数 κ_x 。

2.1 边界条件

对于法向方向是 x 的两个截面,分别加载 100 K 和 1000 K 的第 1 类边界条件,其他 4 个面绝热。

2.2 等效导热系数

根据傅里叶定律

$$\phi = -\kappa A \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

所以

$$\kappa = -\frac{\phi}{A} \bigg/ \left(\frac{dT}{dx} \right) \tag{2}$$

其中 ϕ 是热通量, A 是导热面积, $\frac{dT}{dx}$ 是温度梯度。因为平纹编织单胞模型已知,所以 A 已知;又两侧温差已知,所以温度梯度 $\frac{dT}{dx}$ 也已知;通过 ANSYS 后处理,热通量 ϕ 也已知。根据式(2),可以等到 x 方向的等效导热系数

$$\kappa_{\text{equ},x} = -\frac{\phi_x}{A_x} \bigg/ \left(\frac{dT}{dx} \right) \tag{3}$$

同理可得 y 方向和 z 方向的等效导热系数

$$\kappa_{\text{equ},y} = -\frac{\phi_y}{A_y} \bigg/ \left(\frac{dT}{dy} \right) \tag{4}$$

$$\kappa_{\text{equ},z} = -\frac{\phi_z}{A_z} \bigg/ \left(\frac{dT}{dz} \right) \tag{5}$$

3 纤维随机模型,平纹编织单胞等效导热系数的计算

3.1 不同材料单元赋导热系数

平纹编织单胞的基质单元和纤维单元需要分别赋导热系数。基质单元由纯基质构成,直接赋 C 基质的导热系数,如图 10 所示;纤维单元由 SiC 纤维和 C 基质两种材料构成,圆柱形纤维主体外面包裹一薄层基质,形成六面体,纤维单元需要先计算出一个等效导热系数,再赋给纤维单元,如图 11 所示。C 基质的导热系数为 70 W/(m·K), SiC 纤维轴向导热系数为 40 W/(m·K),法向导热系数为 4 W/(m·K)^[6]。

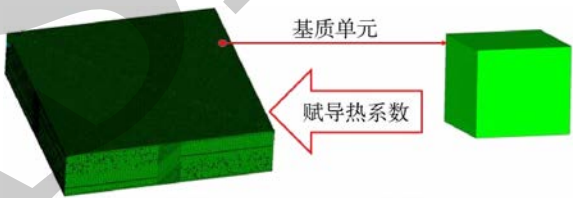


图 10 纯基质单元赋导热系数
Fig. 10 Assign thermal conductivity to the matrix element



图 11 纤维单元赋等效导热系数
Fig. 11 Assign effective thermal conductivity to the fiber element

3.2 纤维单元等效导热系数的计算

纤维单元的微观结构如图 12 所示,纤维直径 $d=7\mu\text{m}$ ^[6],六面体边长 $L=7.4\mu\text{m}$,纤维在纤维单元占得体积分数为 70%。用尺寸为 $0.1\mu\text{m}$ 的网格划分纤维单元,网格数量为 155 万。用有限元方法计算纤维单元等效导热系数,结果见表 2。

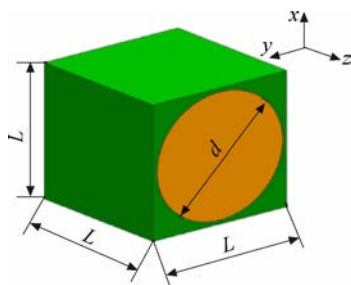


图 12 纤维单元微观结构

Fig. 12 Microstructure of fiber element

表 2 纤维单元等效导热系数

Table 2 Effective thermal conductivity of fiber element

W/(m·K)

$\kappa_{\text{equ},x}$	$\kappa_{\text{equ},y}$	$\kappa_{\text{equ},z}$
13.985	13.985	49

3.3 不同纤维体积分数下,各带基质纤维束中纤维数目 P 的计算

以纤维单元的边长 ($7.4\mu\text{m}$) 为网格尺寸 (量符号同为 L) 对编织单胞模型进行网格划分,共 92 万个网格。纤维在整个编织单胞中的体积分数为 φ_f ,则在各带基质纤维束中纤维的体积分数也为 φ_f 。根据纤维体积分数 φ_f 确定各纤维束中纤维的根数 P ,以一个经向纤维束为例。

纤维束垂直于纤维轴向的截面被划分成 $M \times N$ 个网格,则

$$P = \frac{M \times N \times L^2 \times \varphi_f}{\pi \times r^2} \tag{6}$$

其中 r 是纤维的半径 ($3.5\mu\text{m}$)。纤维数目确定后,由文中第 2.2 章节的算法就可以随机生成纤维的位置了。

3.4 平纹编织单胞等效导热系数的计算

用蒙特卡罗法,研究了纤维体积分数 φ_f 为 10%、20%、30%、40%、50%、60% 情况下,纤维位置随机带来的纤维等效导热系数的分数特性,图 13 是纤维体积分数为 40% 情况下 x 方向等效导热系数随样本空间数量变化的曲线,从图中可以看出当样本空间达到 600 组以后,平均导热系数已经稳定。

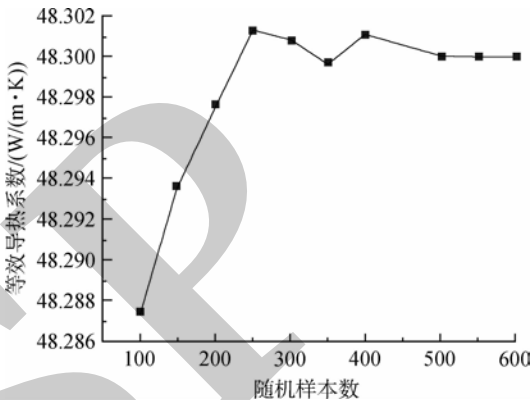


图 13 平均等效导热系数随样本空间的变化

Fig. 13 Variation of average effective thermal conductivity with sample space

所以对于每一个纤维体积分数,生成 600 组纤维随机位置,对于每一组计算等效导热系数,然后用数理统计的方法分析等效导热系数的随机分布。由于平纹编织结构的对称性,平纹编织单胞 x 向的等效导热系数与 y 向的等效导热系数相同。图 14~图 19 是不同纤维体积分数的 $\kappa_{\text{equ},x}$ 和 $\kappa_{\text{equ},z}$ 的概率分布,可以看到正态分布能够很好地描述随机分布规律。对于不同的纤维体积分数,取概率密度最大的等效导热系数作为平纹编织单胞在该体积分数下的等效导热系数,见表 3。

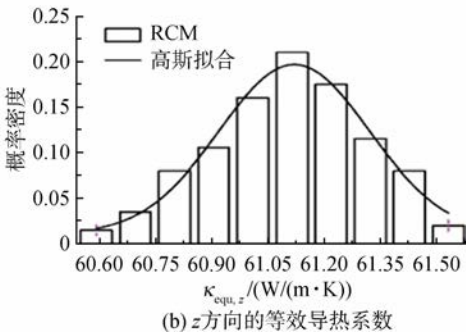
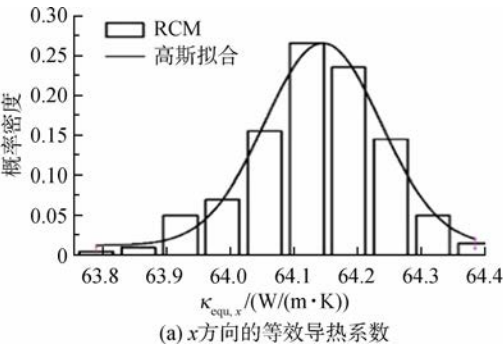


图 14 10% 纤维体积分数等效导热系数分布

Fig. 14 Distribution of effective thermal conductivity in the fiber volume fraction of 10%

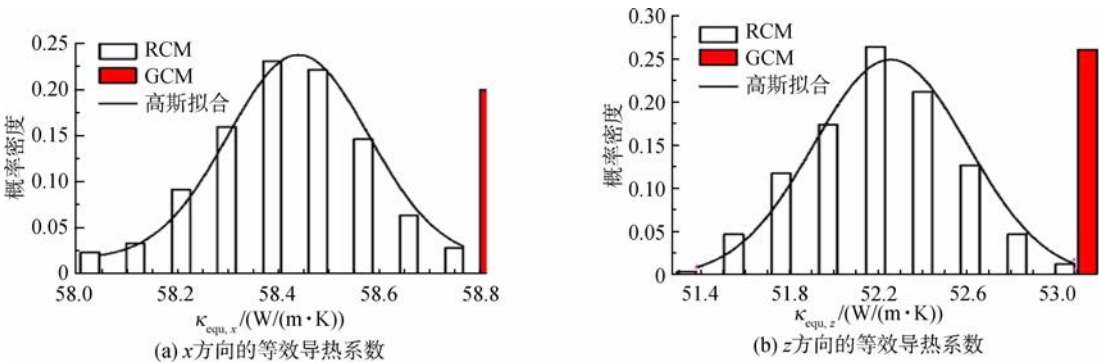


图 15 20%纤维体积分数等效导热系数分布

Fig. 15 Distribution of effective thermal conductivity in the fiber volume fraction of 20%

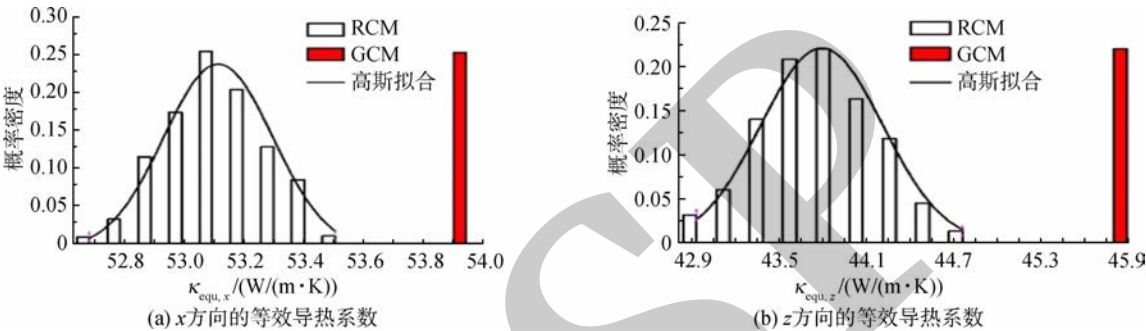


图 16 30%纤维体积分数等效导热系数分布

Fig. 16 Distribution of effective thermal conductivity in the fiber volume fraction of 30%

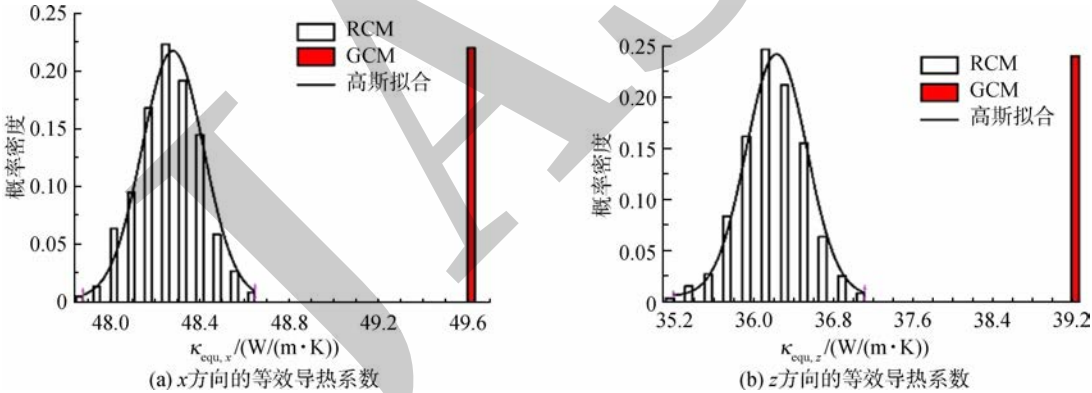


图 17 40%纤维体积分数等效导热系数分布

Fig. 17 Distribution of effective thermal conductivity in the fiber volume fraction of 40%

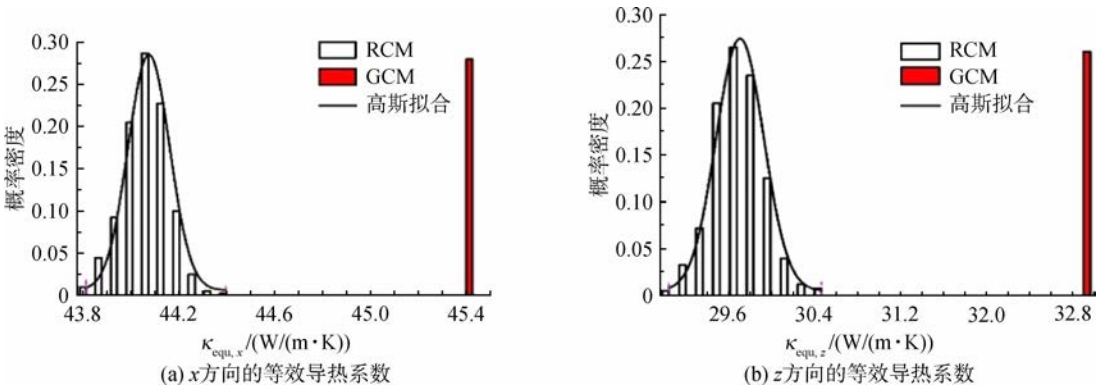


图 18 50%纤维体积分数等效导热系数分布

Fig. 18 Distribution of effective thermal conductivity in the fiber volume fraction of 50%

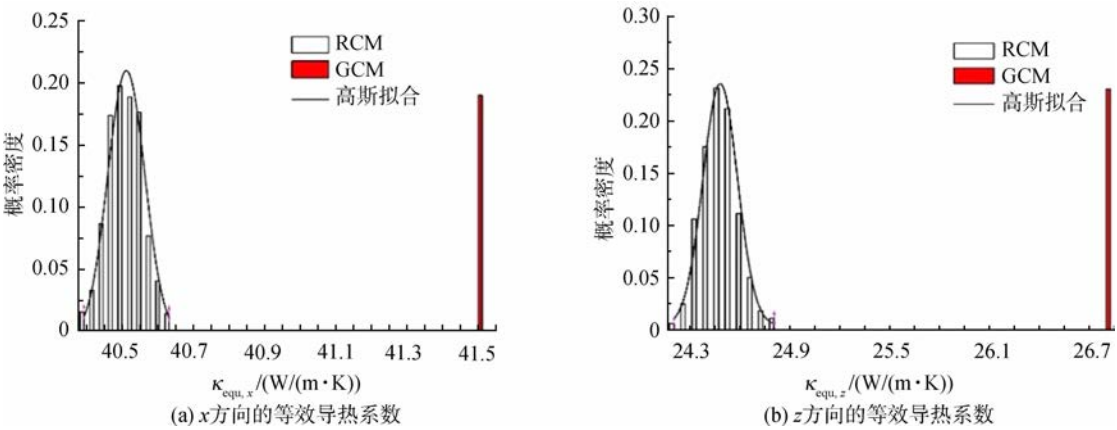


图 19 60%纤维体积分数等效导热系数分布

Fig. 19 Distribution of effective thermal conductivity in the fiber volume fraction of 60%

表 3 RCM 计算的平纹编织单胞不同纤维体积分数下等效导热系数

Table 3 Effective thermal conductivity of plain braided unit cell with different fiber volume fractions by RCM calculation

参数	RCM calculation					
	W/(m·K)					
	φ _f /%					
	10	20	30	40	50	60
κ _{equ,x}	64.1	58.5	53.0	48.3	44.1	40.5
κ _{equ,y}	64.1	58.5	53.0	48.3	44.1	40.5
κ _{equ,z}	61.2	52.2	43.8	36.1	29.6	24.5

$$\varphi_f = \frac{2\pi \times r^2}{c^2} \tag{7}$$

可以推导出 c 的表达式

$$c = \sqrt{\frac{2\pi}{\varphi_f}} \times r \tag{8}$$

其中 $r=3.5\mu\text{m}$, c 是纤维束单胞的长度。

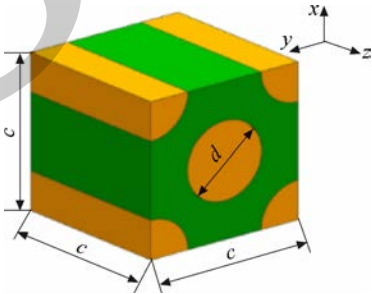


图 20 纤维束单元微观结构

Fig. 20 Microscopic structure of fiber bundle element

4 纤维随机模型与纤维周期排列模型等效导热系数的比较

纤维周期排列模型 (general cell model, GCM)认为纤维在基质中周期性排列,复合材料具有周期性结构,以具有代表性的纤维束单元模型作为分析对象,该模型不考虑纤维位置的随机分布。纤维周期模型通过改变纤维束单元模型的尺寸来体现纤维体积分数的不同,纤维随机模型中是通过改变纤维的根数 P 来体现纤维体积分数的不同。下面将比较对于同一平纹编织单胞,纤维随机模型和纤维周期排列模型计算出的平纹编织单胞等效导热系数的差异。

4.1 纤维周期模型,平纹编织单胞等效导热系数的计算

4.1.1 不同纤维体积分数,纤维束单元模型

纤维束单元的微观结构如图 20 所示。纤维束单元纤维体积分数 φ_f 的计算公式为

4.1.2 不同材料单元赋导热系数

在周期排列模型中,平纹编织单胞分为两部分:一部分是外层的基质壳;另一部分是带基质的纤维束。外层的基质壳是纯基质,直接赋基质的导热系数,纤维束单元需要先计算一个等效导热系数,再赋给纤维束单元。

4.1.3 纤维束单元等效导热系数

纤维束单元的等效导热系数用有限元方法计算,不同纤维体积分数下,纤维束单元等效导热系数如表 4 所示。

4.1.4 平纹编织单胞等效导热系数

平纹编织单胞的等效导热系数同样用有限元方法计算,不同纤维体积分数下,平纹编织单胞等效导热系数如表 5 所示。

表 4 纤维束单元不同纤维体积分数下等效导热系数
Table 4 Effective thermal conductivity of fiber bundle element with different fiber volume fractions
W/(m·K)

参数	$\varphi_f/\%$						
	10	20	30	40	50	60	70
$\kappa_{\text{equ},x}$	58.6	48.8	40.4	33.1	26.4	20.2	13.9
$\kappa_{\text{equ},y}$	58.6	48.8	40.4	33.1	26.4	20.2	13.9
$\kappa_{\text{equ},z}$	67	64	61	58	55	52	49

表 5 平纹编织单胞不同纤维体积分数下等效导热系数
Table 5 Effective thermal conductivity of plain braided unit cell with different fiber volume fractions
W/(m·K)

参数	$\varphi_f/\%$						
	10	20	30	40	50	60	70
$\kappa_{\text{equ},x}$	64.1	58.8	53.9	49.6	45.4	41.5	37.4
$\kappa_{\text{equ},y}$	64.1	58.8	53.9	49.6	45.4	41.5	37.4
$\kappa_{\text{equ},z}$	61.1	53.1	45.8	39.2	32.9	26.8	20.3

4.2 纤维分布影响等效导热系数的机理

纤维周期排列模型(GCM)不考虑纤维的聚集现象,是一种理想的模型;纤维随机模型(RCM)考虑了纤维的聚集现象。纤维聚集现象对等效导热系数的影响是两种模型预测的等效导热系数不同的根本原因。

纤维导热系数小于基质与纤维导热系数大于基质两种情况下,纤维聚集现象对等效导热系数产生的影响不同。

4.2.1 纤维导热系数小于基质

本文的研究对象 C/SiC 复合材料就属于纤维导热系数小于基质的这一情况,首先研究在二维平面中纤维聚集对等效导热系数的影响。图 21 为两种模型的温度分布与热流密度分布,图 21(a)与图 21(c)是在相同纤维体积分数(50%)、相同边界条件下两种模型的温度分布,图 21(b)和图 21(d)是对应得热流密度分布,图中 T 表示温度, q 表示热流密度。纤维周期排列模型算得的 y 方向等效导热系数为 $26.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,纤维随机分布模型计算了 600 组随机情况,算得的平均等效导热系数为 $25.7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

从图 21 中可以看到,纤维周期排列模型的温度场线性分布,而纤维随机分布模型中因为纤维

的随机分布使得温度场具有波动性。

并且从图 21(b)和图 21(d)中可以看到,纤维处的热流密度明显小于纤维周围基质的热流密度,这是因为纤维的导热系数小于基质,因此在纤维部分的热阻大,热量主要通过纤维空隙处的基质通道流过。在纤维周期排列模型中,无论纤维体积分数有多大,纤维与纤维之间总会有均匀的基质通道;而在纤维随机分布模型中,由于纤维的偏聚现象,会出现纤维与纤维间基质通道很小的情况,当纤维体积分数较大,纤维偏聚现象比较明显,使得热流密度小的地方就连成了一片,形成了“导热热障”,导致等效导热系数变小。即在纤维导热系数小的情况下,纤维的偏聚现象使等效导热系数变小。

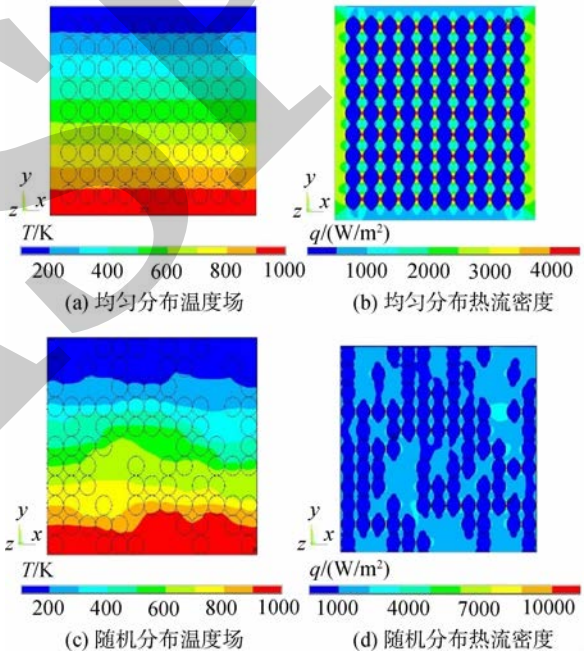


图 21 两种模型的温度场分布与热流密度分布
Fig. 21 Temperature field and heat flux density distribution of two different models

由上述分析可知,当热流量沿着纤维法向流过时,会因为纤维的偏聚效应,使得热流量变小,从而使等效导热系数变小。在平纹编织复合材料中,由于编织结构的存在, z 方向的等效导热系数的减小程度和 x 与 y 方向的减小程度不一样。

用 Δx 表示纤维随机模型与纤维周期排列模型相比 x 方向等效导热系数的相对减小量, Δz 表示 z 方向等效导热系数的相对减小量。其中

$$\Delta x = \frac{\kappa_{\text{gcm},x} - \kappa_{\text{rcm},x}}{\kappa_{\text{gcm},x}} \tag{9}$$

$$\Delta z = \frac{\kappa_{\text{gcm},z} - \kappa_{\text{rcm},z}}{\kappa_{\text{gcm},z}} \quad (10)$$

表 6 列出了不同方向等效导热系数的相对减小量。

表 6 不同方向导热系数的相对减小量

Table 6 Relative reduction of thermal conductivity in different directions

参数	$\varphi_i / \%$						
	10	20	30	40	50	60	70
$\Delta x / \%$	0	0.51	1.66	2.62	2.86	2.41	0
$\Delta z / \%$	0	1.69	4.37	7.91	10.1	8.58	0

从表 6 中可以看到,当纤维体积分数在 20%~60%时,同纤维体积分数下, z 方向等效导热系数的相对减小量要高于 x 方向的相对减小量,因为 z 方向的热流量在 4 个带基质纤维束中都是沿着纤维法向流过, x 和 y 方向的热流量在 4 个带基质纤维束中只有 2 个是沿着纤维法向流过,所以 z 方向等效导热系数的减小程度比 x 和 y 方向的大。同时在表中可以看到,两种模型最多相差达到 10%,可见考虑纤维随机分布的必要性。

当纤维体积分数为 10%和 70%时,纤维随机模型和纤维周期排列模型预测值相同。出现这种现象的原因是:在低纤维体积分数下,纤维数很少,纤维的偏聚效应不明显,所以两个模型的值相同;在高纤维体积分数下,纤维的随机分布不明显,随机分布模型中纤维的分布趋近于周期排列,所以两个模型的值相同。

在图 14~图 19 中,红色的是纤维周期模型预测的等效导热系数,是一个固定的值。图中,周期排列模型的等效导热系数在随机模型的右侧,周期排列模型等效导热系数大于随机模型。

4.2.2 纤维导热系数大于基质及实验验证

研究对象为氧化铝(等效导热系数为 27 W/(m·K))/聚酰亚胺(等效导热系数为 0.146 W/(m·K))纤维增强复合材料,纤维周期模型和纤维随机分布模型预测的横向等效导热系数和实验值^[18]的对照图见图 22。

从图 22 中可以看出,纤维随机模型预测的等效导热系数更加贴近于实验值,而纤维均匀分布模型与实验值差距较大。因为纤维的位置随机分布是一个影响等效导热系数的重要因素,纤维随机模型考虑了这个因素而纤维均匀分布模型没有

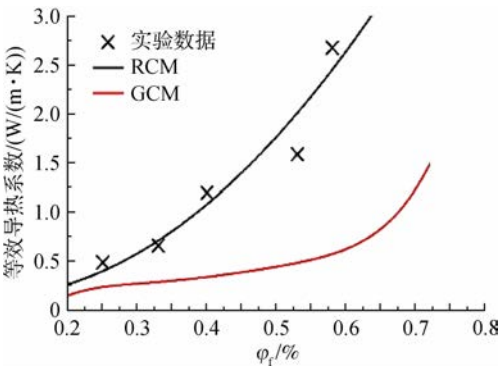


图 22 不同模型预测值与实验值对比

Fig. 22 Comparison of predictional data and experimental data of different models

考虑,所以纤维随机模型具有更高的精度。同时,纤维周期排列模型的等效导热系数小于纤维随机模型,与纤维导热系数小于基质时的情况相反。出现这种现象的原因是,当纤维导热系数大于基质时,纤维的偏聚效应使得热流密度大的地方连成一片,形成“热流通道”,使等效导热系数增大。

5 结 论

- 1) 纤维位置随机使平纹编织单胞的等效导热系数也出现随机分布的现象,并且等效导热系数的随机分布规律可以用正态分布很好的描述。
- 2) 探讨了纤维随机分布影响等效导热系数的机理。当纤维导热系数小于基质时,纤维随机分布带来的纤维偏聚效应会形成“导热热障”,减小等效导热系数;当纤维导热系数大于基质时,纤维的偏聚效应会形成“热流通道”,增大等效导热系数。
- 3) 本文提出的三维随机模型考虑了纤维的位置随机分布,是一种更精确的模型。纤维体积分数在 20%~60%时,纤维位置的随机效应明显,用本文的模型预测等效导热系数更精确。

参考文献:

[1] BOYLE R J, NAGPAL V K, DICARLO J A, et al. Ceramic matrix composites for high pressure turbine vanes[R]. ASME Paper GT2014-27136, 2014.

[2] VEDULA V, SHI J, JARMON D, et al. Ceramic matrix composite turbine vanes for gas turbine engines[R]. ASME Paper GT2005-68229, 2005.

[3] BOYLE R J, HALBIG M C, NAGPAL V K, et al. Design considerations for ceramic matrix composite vanes for high pressure turbine applications[R]. ASME Paper GT2013-95104, 2013.

[4] 邵将,温卫东,崔海涛. 纺织陶瓷基复合材料力学性能研究[J]. 硅酸盐学报,2007,35(1):114-122.
SHAO 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] 陈则韶,钱军,叶一火. 复合材料等效导热系数的理论推算[J]. 中国科学技术大学学报,1992,22(4):416-424.
CHEN Zeshao, QIAN Jun, YE Yihuo. Predicting theory of effective thermal conductivity of complex material[J]. Journal of China University of Science and Technology, 1992,22(4):416-124. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 陆思达,高希光,宋迎东. 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[J]. 航空动力学报,2014,29(7):1574-1582.
LU Sida, GAO Xiguang, SONG Yingdong. Prediction method on equivalent thermal conductivity coefficient of plain braided C/SiC composites material based on finite element method[J]. Journal of Aerospace Power, 2014,29(7):1574-1582. (in Chinese)

[8] CHEN Xiaoming, PAPATHANASIOU T D. On the variability of the Kozeny constant for saturated flow across unidirectional disordered fiber arrays[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing, 2006,37(6):836-846.

[9] XU Yibin, YAGI K. Automatic FEM model generation for evaluating thermal conductivity of composite with random materials arrangement[J]. Computational Materials Science, 2004,30(5):242-250.

[10] YI Y B. The role of interparticle contact in conductive properties of random particulate materials[J]. Acta Materialia, 2008,56(12):2810-2818.

[11] 康博奇,严鹏,蒋持平. 预报纤维增强复合材料有效热导率的随机微结构胞元模型[J]. 复合材料学报,2012,29(5):140-145.
KANG Boqi, YAN Peng, JIANG Chiping. A random microstructure cell model to predict the effective thermal conductivity of fiber reinforced composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2012,29(5):140-145. (in Chinese)

[12] 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):335-339.
GAO Xiguang, SONG Yingdong, SUN Zhigang. Research on variation of effective performance of composites induced by the stochastic fiber size[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005,23(3):335-339. (in Chinese)

[13] 高希光,宋迎东,孙志刚. 纤维位置随机引起的复合材料性能分散性研究[J]. 航空动力学报,2005,20(4):584-589.
GAO Xiguang, SONG Yingdong, SUN Zhigang. Research on the discrepancy of composite effective properties induced by the stochastic fiber location[J]. Journal of Aerospace Power, 2005,20(4):584-589. (in Chinese)

[14] 宋迎东,孙志刚,高希光. 纤维增强复合材料有效性能分散性[J]. 航空动力学报,2005,20(2):230-235.
SONG Yingdong, SUN Zhigang, GAO Xiguang. Research on discrepancy of fiber reinforced composite effective performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2005,20(2):230-235. (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] WONGSTO A, LI S. Micromechanical FE analysis of UD fibre-reinforced composites with fibres distributed at random over the transverse cross-section[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing, 2005,36(9):1246-1266.

[17] YAN Dongfan, WEN Jie, XU Guoqiang. A Monte Carlo simulation and effective thermal conductivity calculation for unidirectional fiber reinforced CMC[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,94(8):827-835.

[18] ZHANG H, ONN D G, BOLT J D. Ceramic fiber composites for electronic packaging[J]. Thermal Transport Properties, 1989,167(6):187-192.

(编辑:王碧珺)