

基于微结构识别的单向复合材料 导热系数预估

江 华^{1,2}, 毛军逵^{1,3}, 屠泽灿¹, 沈 凯⁴, 宋金融⁴, 郭 文⁵, 黄维娜⁵

(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. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 200120;

3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

4. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016;

5. 中国航空发动机集团有限公司 中国燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 以 T300 碳纤维/环氧树脂基单向复合材料为例, 考虑纤维周围间隙缺陷的影响, 建立了基于微观图像识别的等效导热系数预估方法. 首先利用图像识别技术处理材料微观电镜照片, 然后依据纤维体积分数稳定性判据应用几何重构技术建立了代表性单元, 并通过在代表性单元(RVE)内部界面处添加接触热阻的方法引入间隙缺陷的影响, 最终利用有限元方法模拟得到等效导热系数(ETC). 研究发现: 间隙的位置对等效导热系数影响微弱; 随着间隙缺陷占比和厚度的增加, 等效导热系数显著降低; 间隙缺陷占比大于 0.8, 无量纲间隙缺陷厚度小于 0.15 时, 单向纤维增韧复合材料的等效导热系数受间隙影响最突出; 相对于纤维和基体理想接触的情况, 考虑间隙缺陷后, 等效导热系数最大降幅可达 52.1%.

关 键 词: 单向复合材料; 等效导热系数; 间隙缺陷; 代表性单元; 图像识别; 接触热阻

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Thermal conductivity prediction of unidirectional composites based on microstructure identification

JIANG Hua^{1,2}, MAO Jun-kui^{1,3}, TU Ze-can¹,

SHEN Kai⁴, SONG Jin-rong⁴, GUO Wen⁵, HUANG Wei-na⁵

(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. Shanghai Aircraft Design and Research Institute,

Commerical Aircraft Corporation of China Limited, Shanghai 200120, China;

3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing100191, China;

4. College of Materials Science and Technology,

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

5. China Gas Turbine Establishment,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: Taking the T300 carbon fiber/epoxy resin matrix unidirectional composites as an example, an equivalent thermal conductivity prediction method based on microscopic image recognition was established, in consideration of the influence of the interface defect. The microstructure scanning electron microscope photos were processed first through image rec-

ognition. Then according to the fiber volume fraction stability criterion, the representative volume element (RVE) were built by geometry reconstruction technique. Meanwhile, the thermal contact resistance was added at the interfaces in the RVEs to represent the influence of the interface defects. Finally, the prediction results of equivalent thermal conductivity (ETC) were obtained by the finite element method. Results show that the randomness of the interface defect's position affects ETC weakly, while ETC decreases significantly with the increasing proportion or the thickness of the interface defect. When the the interface defect proportion is greater than 0.8 and the dimensionless thickness of the interface defect is less than 0.15, the most significant influence on ETC appears. Compared with the simulations of ignoring the interface defect between fiber and matrix, the biggest drop of ETC can reach 52.1% considering the interface defect.

Key words: unidirectional composites; equivalent thermal conductivity (ETC); interface defect; representative volume elements (RVE); image recognition; thermal contact resistance

近些年来随着复合材料应用领域的不断拓展^[1-5],针对复合材料特性,如等效导热系数(equivalent thermal conductivity, ETC)、弹性模量等的研究也日益得到重视,并为复合材料部件的热分析、可靠性和寿命预估提供了重要的支撑。由于复合材料添加相种类众多,和基体结合模式也差异巨大,添加相和基体材质也往往不同,使得复合材料导热系数等特性会呈现出各向异性,准确预估难度大^[6-8]。目前已经有很多研究人员通过理论、数值计算等方法对各类复合材料等效导热系数开展了研究^[9-15]。这些研究工作的开展,为复合材料应用及性能评估提供了重要的工具,有效降低了试验测试投入和研究成本。

从现有研究来看,针对复合材料 ETC 预估问题,基于有限元(finite element method, FEM)的代表单元(representative volume element, RVE)法因其通用性与准确性成为目前应用最广泛的方法。

早期基于复合材料内部结构具有周期性的假设建立的 RVE,能够有效用于例如纤维形状、纤维体积分数等复合材料特征变量对复合材料热物性影响规律的研究^[16-19],但在实际情况中,纤维在复合材料中的排列往往具有离散性,为改进这一缺陷,Ganapathy、康博奇、田志红等^[20-22]通过建立包含较多增强相的随机 RVE 模型,来弱化增强相的离散性对材料宏观热物性预估结果的影响,取得了较好的效果。但以上随机 RVE 都是用规则图形替代增强相进行的近似研究,如将增韧纤维简化为圆柱形棒料^[20-21],或将颗粒简化为圆

球^[22],使得 RVE 模型和材料内部实际微观结构存在一定偏差。

针对这类问题,研究人员尝试将图像识别技术引入到 RVE 方法的建模过程,根据复合材料微观结构金相照片中基体与纤维区域像素灰度值的显著差异,运用图像分割与图形重构技术,建立了能够准确反映材料内部实际微观结构特征的 RVE 模型^[23-24]。其中,Jiang 等^[24]提出的基于微结构识别的单向复合材料 ETC 预估方法,不仅能够从微观结构电镜照片(scanning electron microscope, SEM)中自动提取具有非规则形状的纤维拓扑结构信息,而且能够提供考虑纤维位置随机变化时的宏观 ETC 的离散性分布规律,为单向复合材料的导热系数预估研究提供了一种解决思路。但文献^[24]研究中采用了纤维与基体理想接触的假设,使得在热分析过程中,由纤维与基体的间隙引起的接触热阻被忽略掉。虽然由纤维剥离或基体开裂导致的间隙尺度较小,但由于在大气环境中间隙内填充物为导热系数极小的空气,使得微小的间隙也能够形成较大的接触热阻,严重阻碍纤维与基体之间的热传递,从而降低材料 ETC。Youngblood, Lu 等^[25-26]的研究表明极限情况下,间隙能够使复合材料 ETC 降低 50%~70%。

本文的研究对象是复合材料中最基本也是最重要的类型——单向复合材料,其中单向指的是长纤维增韧复合材料中所有纤维丝的空间走向保持平行,互不相交,即复合材料中纤维丝只有一个空间走向。已有研究表明对于单向复合材料,其纵向导热系数运用混合率公式已经能够获得很高的

预估精度^[10],而横向导热系数的影响因素较多,预估难度较大,并且在工程应用中常用的复合材料薄壁结构中,设计人员更加关注横向导热系数,因此本文的研究内容仅针对单向复合材料的横向导热系数。

早期在考虑间隙的单向复合材料 ETC 预估方法的 FEM 计算中,通常会将间隙看作除纤维与基体外的第三相物质^[17,27],这就需要对间隙缺陷所在区域单独建模、划分网格和设置物性参数。不难推断,这类方法只对间隙缺陷达到一定尺度的模型适用,对于间隙相对纤维尺度较小的情况,这种方法会出现建模及划分网格困难的问题。此外,当 RVE 内纤维丝数量较大且纤维横截面不规则时,通过人工建立间隙模型缺陷的难度也会较大。在等效导热系数的模拟过程中,Hasselman 等^[7]认为间隙缺陷的存在导致温度连续的边界条件不再成立,而应该是热流连续边界条件,据此假设,Hasselman 等在 Rayleigh^[6]的工作基础上,通过将间隙缺陷对传热的影响等效为接触热阻引入到热流连续边界条件中,成功推导出适用于考虑间隙缺陷的单向复合材料 ETC 预估公式。Islam 等^[16]与 Youngblood 等^[25]也基于该思想,实现了对间隙厚度范围为 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的单向复合材料 ETC 预估。但是上述研究中,通常将间隙缺陷简化为完整包围纤维的薄层结构,再通过调整间隙缺陷的等效导热系数来反映间隙缺陷占比(下文简称间隙占比)变化带来的影响^[16,25],这样的操作虽然可以在 ETC 计算中引入间隙缺陷的影响,但该假设一方面难以体现间隙缺陷位置的影响,另一方面会导致热量传递与实际情况存在产生偏差,使得 ETC 预估存在偏差。

本文研究中,以单向长纤维增韧复合材料(T300 碳纤维/环氧树脂基复合材料)为对象,研究纤维和基体界面处间隙缺陷的描述方法,建立基于电镜拍摄实际微结构识别的代表性单元,并据此开展等效导热系数计算,分析间隙缺陷的位置、数量、厚度等特征参数对等效导热系数的影响规律,为同类型复合材料导热系数高精度预估提供技术参考。

1 计算方法

1.1 计算流程

本文基于微结构图像识别来获得单向纤维增韧复合材料的微观结构信息,重点针对间隙缺陷特征开展拓扑结构识别和建模,并利用 RVE 结

合有限元数值模拟方法来得到复合材料的等效导热系数,具体的操作流程如图 1 所示。其中关于 scanning electron microscopic (SEM) 图像自动识别和 RVE 建模的相关方法请参见文献^[24],限于篇幅本文就不再赘述了。

为满足依据 SEM 照片建立二维模型模拟三维结构的应用要求,需作如下假设:①纤维、基体、间隙内填充物为连续均质材料,各组分的导热系数为定值;②纤维丝轴线之间相互平行,不存在相交情况;③纤维横向导热系数、基体导热系数、间隙内填充物导热系数沿纤维丝轴向不发生变化;④间隙的位置与厚度等参数沿纤维丝轴向不发生变化。

本文输入照片为纤维体积分数 φ_f 为 50% 的 T300 碳纤维/环氧树脂基复合材料横向 SEM 照片(放大 1000 倍,记为 $\times 1000$),如图 2 所示,观察照片可以看到发生粘连的纤维簇与部分厚度较大的间隙缺陷。从复合材料细观结构来看,间隙缺陷出现的数量、厚度与位置均具有一定随机性^[17],这是由复合材料的特殊制造工艺决定的,这就要求本文建立的间隙缺陷特征参数能够反映这种随机性,具体实现方法和操作流程如下文所述。

第 1 步纤维边界微结构识别。如图 3(a)为经过随机取样后的系列 RVE 样本之一,取样本中

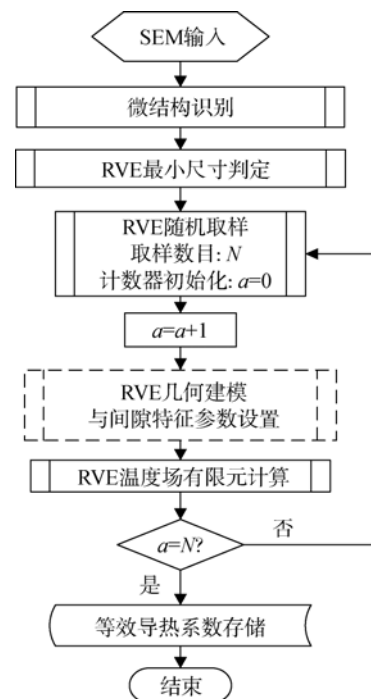


图 1 ETC 计算方法流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of ETC

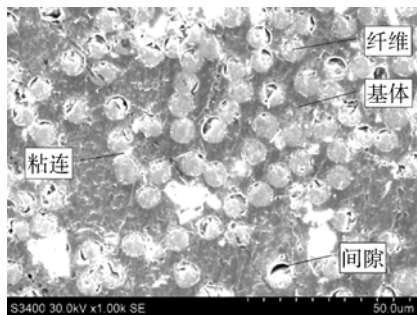


图2 T300 碳纤维/环氧树脂基复合材料横向 SEM 照片($\times 1000$)

Fig. 2 Transverse SEM photo of T300 carbon fiber/epoxy-resin composite ($\times 1000$)

一个目标体放大如图 3(b) 所示, 以该目标体为例, 分两步提取特征, 首先寻找边界像素点, 然后沿边界按序存储边界像素的坐标值, 如图 3(c) 中

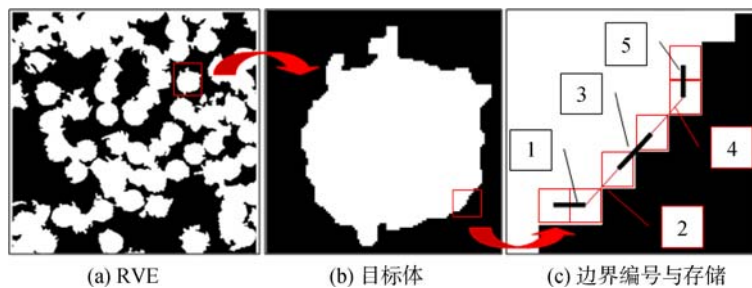


图3 微结构几何信息提取示意图

Fig. 3 Geometrical information obtaining of microstructure

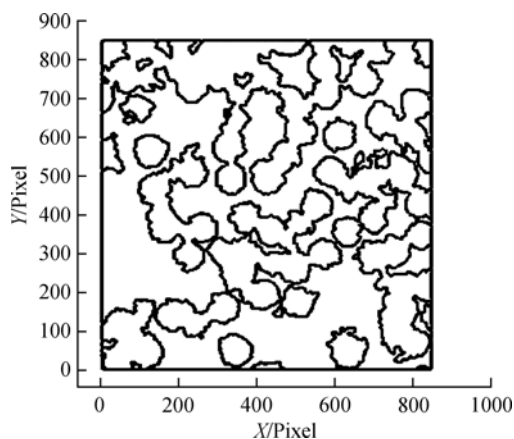


图4 RVE 几何模型

Fig. 4 Geometric model of RVE

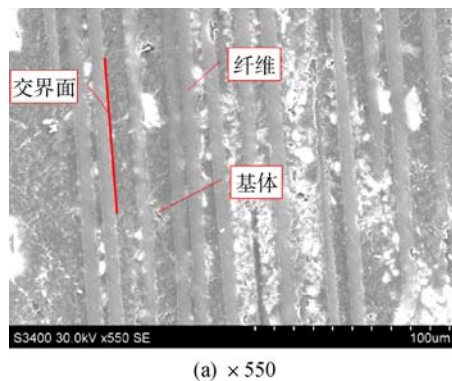
在得到间隙缺陷位置信息的基础上, 接下来确定间隙缺陷厚度(下文简称间隙厚度) t 的取值范围. 虽然图 2 中复合材料样本的横向 SEM 照片能够显示一定的间隙厚度信息, 但并不能提供间隙厚度沿纤维轴向的变化情况, 因此为保证最终获得的 t 取值范围具有代表性, 还需要对复合材

料所示, 线段 1~5 表示边界, 这些线段均由相邻边界像素连接而成, 按线段编号顺序存储像素坐标值, 即可在后续建模中还原出这些边界 1~5, 其中线段长度仅分为两种, 长度等于 1 倍像素与长度等于 $\sqrt{2}$ 个像素, 这是由边界像素位置关系决定的. 其他目标体的微结构信息提取按照相同步骤进行.

第 2 步 RVE 单元几何重构与间隙缺陷特征描述. 根据上一步存储的坐标值依次还原出目标体的所有边界信息, 即可得到 RVE 几何模型, 如图 4 所示, 图中横纵坐标分别表示 RVE 以像素(pixel)为单位时的长宽尺寸, RVE 几何模型中所有纤维与基体交界面均由已经编号的短线段按序构成, 根据线段与编号的一一对应关系, 利用线段的数量与编号就可以描述间隙缺陷的数量与位置.

料样本纵截面 SEM 照片进行图像分析. 图 5(a)、图 5(b) 均为纤维体积分数为 $\varphi_f = 50\%$ 的 T300 碳纤维/环氧树脂基复合材料样本纵截面 SEM 照片, 照片放大倍数分别为 550(记为 $\times 550$) 与 2000(记为 $\times 2000$), 分辨率为 1280×960 , 观察图 5(a) 中纤维与基体的交界面位置, 很难清晰地判定纤维与基体接触情况, 而在放大倍数更高的图 5(b) 中, 纤维和基体之间的间隙缺陷清晰可见.

由于图像识别的第 1 步是依据图像灰度值的阶跃变化来确定边界, 这意味着要清晰显示间隙



(a) $\times 550$

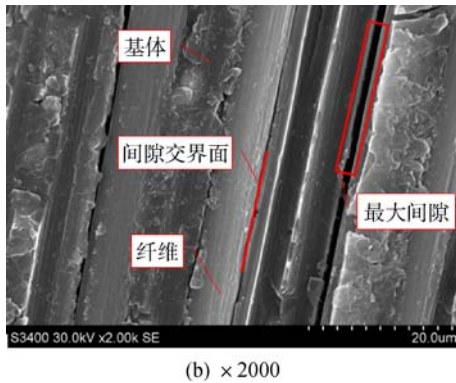


图 5 T300 碳纤维/环氧树脂基复合材料样本纵截面 SEM 照片

Fig. 5 Longitudinal SEM photo of T300 carbon fiber/epoxy-resin matrix composite

缺陷,就需要在间隙厚度的尺寸量级上出现显著灰度值差异,因此 t 的确定需要通过对材料样本纵截面的高倍 SEM 照片分析得到,图 2 所示的低放大倍数 SEM 照片是无法满足图像识别要求的。

依据图 5(b)中 SEM 照片右下角的比例尺,可知由白色斑点组成的刻度线全长为 $20\mu\text{m}$,相邻两个白点斑点组成最小刻度,值为 $2\mu\text{m}$,对图 5(b)进行图像分割和识别操作,可知图中最大间隙缺陷的宽度均值为 21.16 像素,即图 5(b)中间隙厚度最大值 $t_{\max} = 21.16/40 \times 2 = 1.058\mu\text{m}$ 。已知 T300 碳纤维丝直径为 $7.6\mu\text{m}$,用纤维丝半径 $r = 3.8\mu\text{m}$,将间隙厚度无量纲化为 t/r ,得到 5(b)中间隙厚度最大值为 $t_{\max}/r = 0.278$,为全面获取材料内间隙厚度信息,本文采用随机取样的方法,获得了多张类似图 5(b)的材料样本纵截面高倍 SEM 照片,对这些照片分别进行间隙厚度分析后,最终确定无量纲间隙厚度 t/r 取值范围为 $0 \leq t/r \leq 0.3$ 。

第 3 步间隙缺陷特征随机性描述方法,在 RVE 几何模型完成后,通过等概率随机选择 RVE 几何模型内交界面线段编号就能够随机设置间隙缺陷的位置与数量,同时可以给定间隙的厚度缺陷与相应导热系数,以上过程均由计算机自动实现。

本文间隙缺陷的数量用间隙占比 p 表示,即存在间隙缺陷的交界面占到总交界面的比例。在实际复合材料固化成型过程中,纤维与基体热膨胀系数的不匹配或在纤维浸渍过程中基体渗透不充分等,均会导致在纤维丝周围形成间隙,而这些现象的发生具有随机性导致间隙的出现也存在随机性^[17]。因此本文设置 p 取值范围为 $0 \leq p \leq 1$, $p=0$ 表示纤维与基体之间不存在间隙; $p=1$ 表示所有纤维与基体的交界面均存在间隙; $0 < p < 1$ 表示纤维与基体的部分交界面存在间隙。

图 6 为间隙占比 $p=0.2$ (组成交界面的所有线段的 20%为间隙),间隙位置随机时的一种生成结果,其中交界面处红色线段表示间隙存在位置,为清晰展现这一过程,特选取 RVE 中一个目标体进行放大显示在图 6 右侧区域,通过放大图可以看到间隙位置随机分布的特点。最后通过在交界面线段编号选择与间隙缺陷特征参数设置过程中引入随机操作,就能够实现模拟实际复合材料内间隙缺陷特征参数的随机性。

1.2 计算原理

为清晰表示复合材料内部间隙缺陷的相对位置关系,分别绘制间隙占比 $p=1$ (表示纤维被间隙完全包围)、 $p=0.4$ (表示纤维被间隙部分包围)的简化原理示意图,如图 7(a)、图 7(b)所示,图中黑色圆形部分表示纤维,环形阴影部分表示包围纤维的间隙缺陷,其余白色部分表示基体。 r

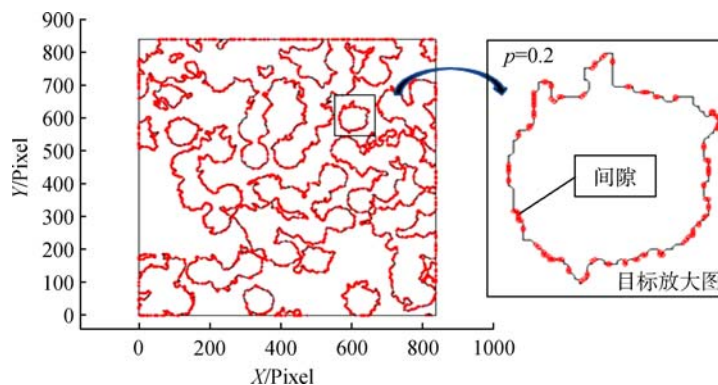


图 6 间隙占比 $p=0.2$ 时,间隙位置随机生成结果

Fig. 6 Random distribution of interface position when $p=0.2$

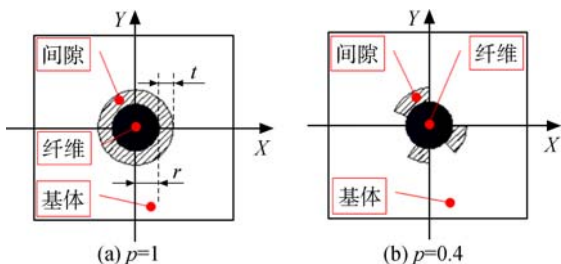


图 7 包含间隙缺陷、纤维和基体的 RVE 示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of RVE including interface defect, fiber and matrix

表示纤维半径, t 表示间隙的厚度.

借鉴 Hasselman 等^[7]的处理方法, 本文将间隙缺陷对导热的影响等效为在纤维与基体之间添加接触热阻, 避免了对间隙区域划分网格的操作, 但需要对界面处网格节点做特殊处理.

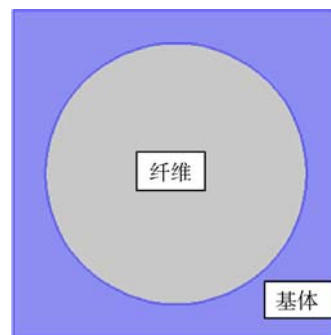
以图 8(a) 中正方形 RVE 模型为例进行说明, 首先对纤维与基体进行整体网格划分, 网格划分结果如图 8(b) 所示, 其中界面处节点被纤维与基体共用, 图 8(b) 中红色曲线与点标示出部分界面结点, 这类结点的特点是在有限元计算时, 同时被用作纤维相与基体相的温度场计算结点, 如图 8(c) 所示. 计算结束后, 接触热阻导致的纤维边界与基体边界的温度差异会反映到界面节点上, 这意味着每个界面节点将表示两个不同的数值, 即温度分布将在界面出现阶跃约束条件为纤维相与基体相在同一界面节点处热流保持相等, 数学表达如式(1)和式(2)

$$-n_f(-k_f \nabla T_f) = -k_c \frac{T_m - T_f}{t} \quad (1)$$

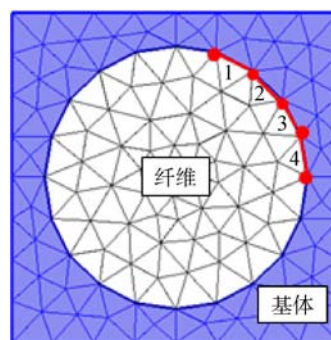
$$-n_m(-k_m \nabla T_m) = -k_c \frac{T_f - T_m}{t} \quad (2)$$

式中 n_f, n_m 分别表示纤维与基体在界面结点处的法向量, 对于同一界面结点, 这两个向量方向相反; k_c 表示间隙内填充物的导热系数, 由于复合材料样本的导热系数测量试验通常在常温常压下进行, 可认为间隙缺陷内充满空气, 因此本文 k_c 设置为常温常压空气的导热系数 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 本文 T300 碳纤维横向导热系数与环氧树脂基体的导热系数由材料供应商提供, 分别为 $k_f = 0.65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $k_m = 0.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\nabla T_f, \nabla T_m$ 分别为纤维与基体内温度梯度; T_f, T_m 表示薄热阻层结点分别被用作纤维与基体区域的温度场计算结点时代表的温度值; t 依据电镜照片识别出来的实际微结构信息来给定.

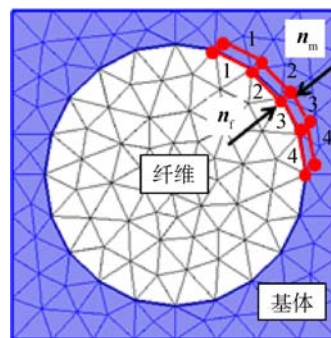
清楚间隙缺陷的特征描述参数以及等效接触



(a) 建模



(b) 网格划分



(c) 界面双节点示意

图 8 热分析模块中对间隙缺陷的处理过程示意图

Fig. 8 Processing procedure of the interface defect in the thermal analysis module

热阻计算方法后, 最终针对建立的 RVE 模型, 就可以采用有限元数值模拟的方法来开展 ETC 预估. Islam 等^[16]在利用周期性 RVE 对单向复合材料 ETC 的有限元计算中对多种边界条件进行了对比研究, 发现采用定温边界与绝热边界组合可以得到更符合实验值的等效导热系数, 所以本文采用类似的方法, 在 RVE 两个方向上分别设定定温边界与绝热边界, 最后利用计算得到的平均热流密度和温度梯度来获得复合材料的 ETC, 用 k_{eff} 表示, 具体式(3)如下:

$$k_{\text{eff}} = -\bar{q}L / \nabla T \quad (3)$$

式中 $\bar{q}$ 为平均热流密度, ∇T 为平均温差.

为获得纤维周围间隙缺陷各特征参数对

ETC 的影响规律,本文根据各间隙特征参数的特点设计了相应的计算工况,所有工况参数汇总在表 1 中.

表 1 计算工况
Table 1 Calculation cases

参数	影响因素		
	间隙位置	间隙占比	间隙厚度
t/r	0.1	0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3	
p	0.3, 0.4, 0.5, 0.75	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1	

2 结果分析

2.1 间隙位置对 ETC 的影响

按照本文提出的方法,在完成 RVE 几何重构后,RVE 内组成交界面的线段均已经被按序编号,即线段与编号一一对应,要研究间隙缺陷位置对 ETC 的影响,只需要针对同一 RVE 模型,根据间隙占比,依据等概率随机选择相应数量的线段编号,就可以获得多种间隙占比相等但间隙缺陷位置不同的计算工况.

本小节选择图 4 中 RVE 几何模型为计算对象,将间隙厚度 t/r 设定为 0.1,讨论不同间隙占比情况下间隙缺陷位置的随机分布对 ETC 的影响规律,本文讨论的间隙占比工况具体包括 $p=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75$,对于每一种特定间隙占比工况,分别重复计算 15 次,即每一种间隙占比对应 15 种间隙缺陷分布与 15 种 ETC 结果.以上工况计算结果汇总显示在图 9 中,图中横坐标 n 表示重复计算工况的序号,纵坐标表示用基体导热系数 k_m 无量纲化的 ETC 计算结果 (k_{eff}/k_m),以上同一 p 值工况下的重复计算结果连线组成的曲线称为间隙缺陷位置对 ETC 的影响规律曲线.

观察图 9 可以看到,不同 p 值工况下,ETC 的影响规律曲线之间差异较大,说明间隙占比的绝对数值对 ETC 影响较大.对于同一 p 值,除 $p=0$ 工况外,ETC 影响规律曲线虽然均出现波动,但幅度极有限.为进一步分析这种波动特征,本文以间隙占比 $p=0.75$ 工况为例,进行了概率统计分析,得到对应的均值 $\mu=1.566$ 、标准方差 $\sigma=2.299 \times 10^{-3}$,然后将其间隙位置对 ETC 影响

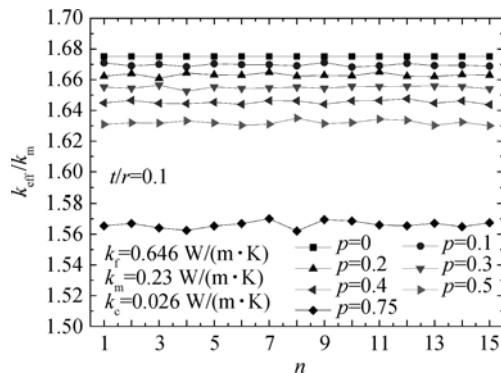


图 9 多种间隙占比工况下,间隙位置与 ETC 的关系曲线

Fig. 9 Relation curves between ETC and interface position under serval different p cases

规律曲线单独显示在图 10 中,同时也将均值用虚直线标识出来.对比观察规律曲线与均值线,可以清楚看到无量纲 ETC 围绕均值线出现波动,但波动幅度十分有限,说明纤维周围的间隙缺陷位置分布对材料 ETC 的影响很微弱.

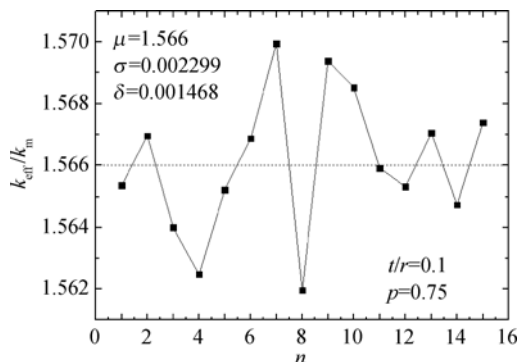


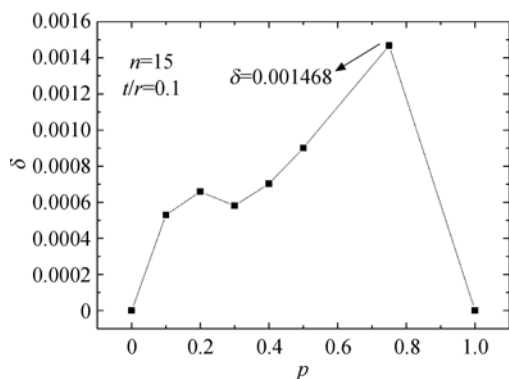
图 10 间隙位置对 ETC 的影响规律曲线 ($p=0.75$)

Fig. 10 Influence law curve of ETC with interface position ($p=0.75$)

为定量分析间隙缺陷位置对 ETC 的影响,定义变异系数 $\delta=\sigma/\mu$,其中 μ, σ 分别表示同一 p 工况下重复计算结果的均值与标准方差.对所有的不同的 p 工况(包含 $p=1$ 工况,即所有交界面均存在间隙缺陷,由于间隙缺陷位置分布唯一,因此该工况下 $\delta=0$)下的重复计算结果进行统计得到变异系数随间隙占比的变化曲线,如图 11 所示.

分析图 11 中曲线可知,变异系数最大值($\delta=0.001468$)在 $p=0.75$ 时获得.

本文研究的复合材料,其内部增韧纤维的导热能力($k_f=0.65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)远大于基体导热能力($k_m=0.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),而纤维与基体交界面处的接触程度直接决定了热量进入纤维相的模

图 11 变异系数 δ 随间隙占比 p 的变化曲线Fig. 11 Variation curve of δ with p

式. 显然增初纤维相参与热量传输越充分, 整个复合材料的导热能力就越强, 体现为 ETC 的数值越大. 而交界面上间隙的特征及分布, 将会显著影响 ETC. 当 p 较小, 纤维和基体的理想接触面相对比例较高, 即使间隙可能存在一定的随机性分布, 使得这些理想接触面的绝对位置发生变化, 但是接触面形成热流通道能力依然较强, 所以间隙存在所带来的导热能力越弱作用相对较弱, 意味着 p 较小时 k_{eff}/k_m 波动会很小. 随着 p 增大, 理想接触面的数量减小, 这些有限的理想接触面位置发生改变后, 对材料整体导热性能的影响会逐渐显现出来, 将会使得 k_{eff}/k_m 波动加剧.

本文的计算工况中, 当 p 小于 0.75 时, 该参数带来的影响一直在加剧, 即变异系数一直处于增长状态. 但是随着 p 进一步增大, 理想接触面数量过少, 此时已经难以为热流流经纤维形成有效的导热通道, 同时 k_{eff}/k_m 的绝对数值已经降至很低水平, 此时理想接触面位置的改变并不会引起 k_{eff}/k_m 的显著波动, 即变异系数降低. 直到 $p=1$, 即不存在理想接触面, 此时材料 k_{eff}/k_m 为稳定值, 变异系数为 0.

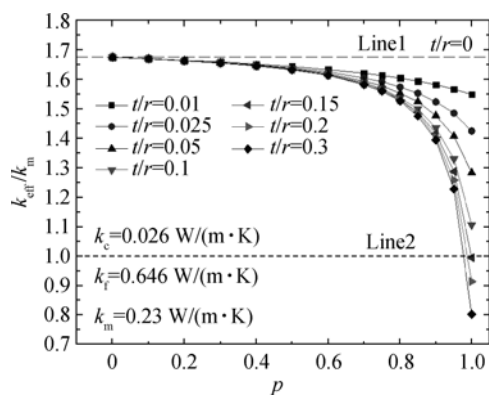
进一步分析数据可以发现, $p=0.75$ 时, 变异系数峰值仅为 0.001468, 即由于间隙位置的随机性给材料 ETC 带来的波动幅度约为材料 ETC 均值的 0.1468%, 因此可认为实际材料中间隙位置分布的随机性对材料宏观导热性能的影响很微弱, 基本可忽略.

2.2 间隙占比对 ETC 的影响

本节的研究内容是间隙占比对 ETC 的影响规律, 区别于文中第 2.1 节只针对单一 RVE 样本开展计算, 本节通过对一系列 RVE 样本(这些 RVE 均基于 SEM 照片识别, 且都满足体积分数稳定判据, 但是由于纤维的随机分布, 其内部微观

拓扑结构各不相同)进行有限元计算, 同时在计算中考虑间隙位置的随机性, 然后对所有计算结果统计分析, 取均值作为材料最终的 ETC.

为全面揭示间隙占比对 ETC 的影响规律, 本文对多个间隙厚度 ($t/r=0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3$) 工况下, 不同间隙占比的 ETC 进行了计算, 最终得到多条 ETC 均值与间隙占比关系曲线, 如图 12 所示. 其中纵坐标表示无量纲化的 ETC 计算结果, 另外还有两条虚线 Line1, Line2 被单独绘制在图中, Line1 表示不存在间隙情况下的 k_{eff}/k_m 数值线, Line2 表示 $k_{\text{eff}}/k_m=1$ (材料宏观 ETC 等于基体导热系数)的分界线.

图 12 ETC 与间隙占比 p 关系曲线 ($0 \leq p \leq 1$)Fig. 12 Relation curves between ETC and p ($0 \leq p \leq 1$)

从图 12 总体来看, 对于所有不同 t/r 工况, ETC 均随着 p 的增大而减小; ETC 减小的速率随着 p 增大而迅速加快; 例如 p 从 0 增加到 1, $t/r=0.01$ 对应 ETC 降低了 23.4%, 这一变化仅有 10.1% 发生在 $0 \leq p \leq 0.5$ 范围, 发生在 $0.5 \leq p \leq 1$ 范围占到 89.8%.

从不同 t/r 工况对应关系曲线的比较来看, 由 t/r 不同导致的 ETC 差异随着 p 的增大而增大, 只是在 p 较小时, 由 t/r 导致的 ETC 差异较小, 关系曲线较为重合, 约从 $p=0.8$ 开始, 由 t/r 造成的曲线间差异开始变得明显, 并且随着 p 的增大曲线间差异急剧增大.

本文研究的复合材料中, 尽管基体的导热能力远远小于纤维, 但其对整个复合材料的等效导热系数影响依然非常显著. 当 $p < 0.8$ 时, 虽然高导热系数的纤维能够发挥部分导热增强能力, 但基体相对较低的导热能力影响占据主导地位, 此时决定材料整体导热性能的主要是基体的导热能力, 因此对应曲线间差异不大, 而 $p > 0.8$ 后, 意味着能够形成有效热流通道的理想间隙占比小于

0.2, 纤维对材料对整体导热的贡献受到很大限制, 此时材料整体导热能力就取决于纤维被间隙缺陷包围的程度, 即间隙热阻成为了材料整体导热能力的主要影响因素, 且这种影响随着间隙占比的增加而愈趋明显。

观察图 12 还可以看到, 在 $p=1$ 情况下, 约从 $t/r=0.15$ 开始, ETC 的无量纲数值出现低于 $k_{\text{eff}}/k_m=1$ 分界线的现象, 即材料的宏观导热系数低于基体导热系数, 说明由导热系数较大的纤维相带来的导热强化作用完全被间隙引起的热阻抵消掉, 复合材料的宏观热物性被彻底改变。这一现象进一步证明了研究间隙缺陷对材料宏观 ETC 影响规律的必要性。

2.3 间隙厚度对 ETC 的影响

本小节将具体展示间隙厚度对 ETC 的影响规律, 采用类似 2.2 节的计算方法与制图方法, 只是自变量由间隙占比变为间隙厚度, 最终得到材料宏观 ETC 与间隙厚度关系曲线, 鉴于第 2.2 节研究结论: 约从 $p=0.8$ 开始, 由 t/r 造成的曲线间差异开始变得明显, 特别将 $0.1 \leq p \leq 0.8$ 与 $0.8 \leq p \leq 1$ 工况分别绘制在图 13(a) 与图 13(b) 中, 图中横坐标 t/r 表示间隙厚度, 纵坐标表示无量纲化的 ETC 计算结果, 另外图 13(a) 与图 13(b) 虚线 line1 均表示不存在间隙情况下的 k_{eff}/k_m 极大值线, 图 13(b) 虚线 line2 表示 $k_{\text{eff}}/k_m=1$ (材料宏观 ETC 等于基体导热系数) 的分界线。

从图 13 总体来看, 对于所有不同 p 工况, ETC 均随着 t/r 的增大而减小; ETC 减小的速率同样随着 t/r 增大而减小, 且这种变化速率的改变与 p 关系紧密。

对于 $p \leq 0.8$ 工况, ETC 随 t/r 增大而减小的幅度较小, 且 ETC 的减小主要发生在 $t/r \leq 0.1$ 范围内, 以 $p=0.8$ 工况为例, t/r 由 0 增加到 0.3, ETC 总共仅降低了 8.84%, 而其中降低幅度

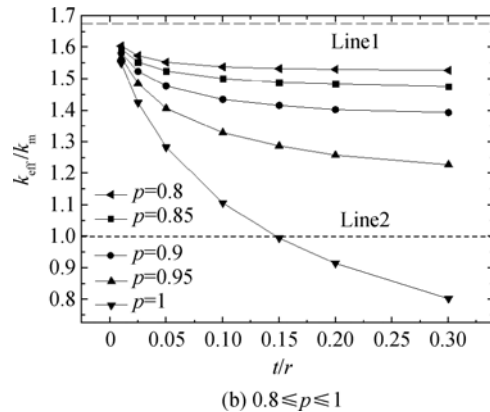


图 13 ETC 与间隙厚度 t/r 关系曲线

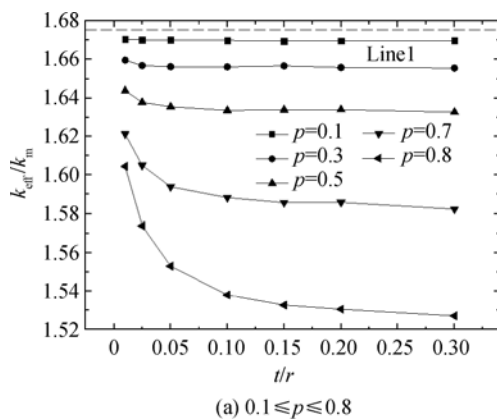
Fig. 13 Relation curves between ETC and interface thickness t/r

的 47.8% 发生在 $t/r \leq 0.01$ 范围, 降低幅度的 92.6% 发生在 $t/r \leq 0.1$ 范围。如前文解释, 当 $p \leq 0.8$ 时, 间隙缺陷并不是决定材料整体导热能力的主要因素, 因此即使间隙厚度变化较大, 材料整体导热能力的降低也是很有限的。

对于 $0.8 \leq p < 1$ 工况, ETC 随 t/r 增大而减小的幅度均较大, ETC 的减小主要发生在 $t/r \leq 0.15$ 范围内, 以 $p=0.95$ 工况为例, t/r 由 0 增加到 0.3, ETC 降低 26.7%, 而其中降低幅度的 24.2% 发生在 $t/r \leq 0.01$ 范围, 降低幅度的 44.3% 发生在 $t/r \leq 0.05$ 范围, 降低幅度的 86.7% 发生在 $t/r \leq 0.15$ 范围。当 $0.8 < p < 1$ 时, 间隙缺陷的影响逐渐成为了影响材料整体导热能力的主要因素, 因此 ETC 与 t/r 的相关程度更显著, 即随着 t/r 的增加 ETC 的改变幅度加大。

只有 $p=1$ 工况, 在 $0 \leq t/r \leq 0.3$ 整个范围内, t/r 的作用始终显著, ETC 近似线性下降, t/r 由 0 增加到 0.3, ETC 降低 52.1%, 而其中降低幅度的 45.0% 发生在 $t/r \leq 0.05$ 范围, 降低幅度的 78.0% 发生在 $t/r \leq 0.15$ 范围。当 $p=1$ 时, 间隙缺陷的影响已经成为了影响材料整体导热能力的最主要因素, ETC 与 t/r 的为一一对应关系, 因此才出现 ETC 随着 t/r 的增加近似线性下降现象。

以上数据分析说明, 在 $0 \leq t/r \leq 0.3$ 整个范围内, 当复合材料内部间隙缺陷占交界面比例低于 80% 时, 大部分的热阻产生于厚度极小的间隙, 最多使材料宏观 ETC 降低 8.84%, 影响较小。而当复合材料内部间隙缺陷占交界面比例高于 80% 时, 间隙导致的热阻显著使材料宏观 ETC 降低, 最大达到 52.1%, 因此如果复合材料中存在有足够数量的间隙缺陷, 将会彻底改变复合材



料的宏观热物性表现。

2.4 数据对比

本文所建立方法的一个核心就是,如何基于 SEM 照片,通过图像识别来获得微结构特征,描述间隙特征并引入 ETC 的计算.关于基于 SEM 图像识别,来预估 ETC 方法的有效性在文献[24]中已经有过详细验证,在此不再赘述.本文将进一步论证考虑间隙缺陷后,计算方法的适用性.为此特运用本文方法建立的 RVE、包含单根纤维的周期性正方形 RVE(图 8(a))以及目前应用较广的文献[7]中的 Hasselman-Johnson 公式,分别对 $\varphi_f=0.5$, $p=1$, $t/r=0\sim 0.3$ 工况进行了计算,结果对比如图 14 所示,图中横坐标 t/r 表示间隙厚度,纵坐标表示无量纲化的 ETC 计算结果,图中部虚线表示 $k_{\text{eff}}/k_m=1$ (材料宏观 ETC 等于基体导热系数)的分界线. Exp. 表示来文献[24]的横向 ETC 实测数据. SEM identification RVE 表示本文建立方法得到的结果,ideal periodic RVE 代表传统的、不考虑纤维粘连以及同基体交界面间隙的计算结果。

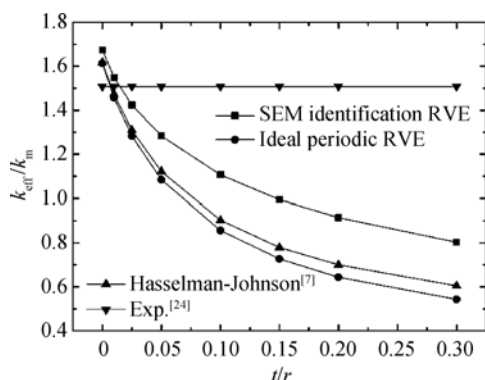


图 14 $\varphi_f=0.5$, $p=1$, $t/r=0\sim 0.3$ 工况,多种 ETC 预测方法比较

Fig. 14 Comparison of three different ETC prediction methods in the case of $\varphi_f=0.5$, $p=1$, $t/r=0\sim 0.3$

观察图 14 可得,3 种方法获得的 ETC 随间隙厚度的变化规律是一致的,但在数值上有差异,引入材料内部实际微观结构特征,以及考虑间隙影响后,ETC 预估精度进一步提升。

其中周期性 RVE 与 Hasselman-Johnson 公式计算结果很接近,这是因为 Hasselman-Johnson 公式是依据包含多根稀疏随机排列纤维的圆柱导热模型推导获得的,从模型中单根纤维来看,以上两种方法物理模型相似,所以这两种方法计

算结果接近是合理的.本文 RVE 对应的 ETC 计算结果显著大于周期性 RVE 与 Hasselman-Johnson 公式计算结果,且随着 t 的增加差异愈显著,最大误差超过了 20%,这主要是本文基于微结构识别建立的 RVE 能偶捕捉到纤维丝的粘连、聚集等现象,而这些现象往往能够形成利于导热的局部热流通道,同时纤维丝的直接接触也能够避免该处间隙的生成,这些利于导热的因素的随着 t 的增加作用愈加明显,而周期性 RVE 与 Hasselman-Johnson 公式均不能够捕捉这些因素的影响,因此随着 t 的增加,本文 RVE 对应的 ETC 计算结果领先越来越多.计算结果的显著差异进一步说明本文建立基于真实微结构拓扑信息的 RVE 模型的必要性。

3 结 论

根据本文研究内容,得到如下结论:

- 1) 间隙占比一定时,间隙位置的随机性对单向复合材料宏观 ETC 的影响很微弱,基本可以忽略;
- 2) 单向复合材料宏观 ETC 随着间隙占比的增加而降低,降低的速率随着间隙占比的增加而加快,其中间隙占比对材料宏观 ETC 影响主要发生在 $0.8 \leq p < 1$ 范围内。
- 3) 单向复合材料宏观等效导热系数随着间隙厚度的增加而降低,降低的速率随着间隙厚度的增加而放缓,其中间隙厚度对材料宏观 ETC 影响主要发生在 $0 < t/r \leq 0.15$ 范围内。
- 4) 当 $p=1$ 时,在 $0.15 \leq t/r \leq 0.3$ 范围内,材料宏观 ETC 开始低于基体导热系数,相对于无间隙的理想情况,间隙导致的热阻设置能够使材料宏观 ETC 降低达到 52.1%。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] Lewis D A, Hogan M T, McMahon J, et al. Application of uncooled ceramic matrix composite power turbine blades for performance improvement of advanced turboshaft engines[R]. Montreal: 64th Annual Forum-AHS International, 2008.
- [3] Min J B, Harris D L, Ting J M. Advances in ceramic matrix composite blade damping characteristics for aerospace turbomachinery applications[R]. AIAA-2011-178, 2011.
- [4] Morscher G N. Modeling the stress strain behavior of wov-

- en ceramic matrix composites[R]. Baltimore: The 107th Annual American Ceramic Society Conference, 2005.
- [5] Zhu D, Miller R A, Fox D S. Thermal and environmental barrier coating development for advanced propulsion engine systems[R]. AIAA-2007-2130, 2007.
- [6] Rayleigh L, On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium[J]. Philosophical Magazine: Series 5, 1982, 34(211): 481-502.
- [7] Hasselman D P H, Johnson L F. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance [J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(6): 508-515.
- [8] Gitman I M, Askes H, Sluys L J. Representative volume: Existence and size determination[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74(16): 2518-2534.
- [9] SHAN Zhaohui, Gokhale A M. Representative volume element for non-uniform micro-structure[J]. Computational Materials Science, 2002, 24(3): 361-379.
- [10] Springer G S, Tsai S W. Thermal conductivities of unidirectional materials[J]. Journal of Composite Materials, 1967, 1(2): 166-173.
- [11] Zou M, Yu B, Zhang D, et al. Study on optimization of transverse thermal conductivities of unidirectional composites[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(6): 980-987.
- [12] Hassani B, Hinton E. A review of homogenization and topology optimization I: homogenization theory for media with periodic structure[J]. Computers & Structures, 1998, 69(6): 707-717.
- [13] Hassani B, Hinton E. A review of homogenization and topology optimization II: analytical and numerical solution of homogenization equations[J]. Computers & Structures, 1998, 69(6): 719-738.
- [14] Hassani B, Hinton E. A review of homogenization and topology optimization III: topology optimization using optimality criteria[J]. Computers & Structures, 1998, 69(6): 739-756.
- [15] 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)
- [16] Islam M R, Pramila A. Thermal conductivity of fiber reinforced composites by the FEM[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(18): 1699-1715.
- [17] Klett J W, Ervin V J, Edie D D. Finite-element modeling of heat transfer in carbon/carbon composites[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(4): 593-607.
- [18] 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 effective 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)
- [19] 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 3D braided fiber composites: experimental and numerical result[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 102-105. (in Chinese)
- [20] Ganapathy D, Singh K, Phelan P E, et al. An effective unit cell approach to compute the thermal conductivity of composites with cylindrical particles [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(6): 553-559.
- [21] 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 Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 140-145. (in Chinese)
- [22] 田志红, 范华乐, 张浩, 等. ALN 填充有机灌封硅橡胶导热性能的数值模拟[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 217-222.
- TIAN Zhihong, FAN Huale, ZHANG Hao, et al. Numerical simulation of the thermal property of ALN filled silicon encapsulant[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(3): 217-222. (in Chinese)
- [23] 李宇罡, 王斐霏, 李险峰, 等. 纳米颗粒增强金属基复合材料微结构有限元模型研究[J]. 材料导报, 2011, 25(14): 134-138.
- LI Yugang, WANG Feifei, LI Xianfeng, et al. Study on the microstructure-based finite element model of metal matrix composites reinforced with nano-scaled particles[J]. Materials Review, 2011, 25(14): 134-138. (in Chinese)
- [24] Jiang H, Mao J K, Tu Z C, et al. Studies on thermal conductivity prediction of fiber reinforced material with microscopic structure identification[R]. AIAA-2015-2355, 2015.
- [25] Youngblood G E, Senor D J, Jones R H, et al. The transverse thermal conductivity of 2D-SiC_f/SiC composites[J]. Composites Science and Technology, 2002, 45(9): 1127-1139.
- [26] Lu T, Hutchinson J. Effect of matrix cracking on the overall thermal conductivity of fiber-reinforced composites[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society: A, 1995, 351(1697): 595-610.
- [27] Sevostianov I, Ramos R R, Diaz G R, et al. Connections between different models describing imperfect interfaces periodic fiber-reinforced composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(13): 1518-1525.

(编辑:王碧琚)