

# C/C-SiC 缎纹编织复合材料孔隙缺陷的建模及其拉伸性能仿真

张兆杭<sup>1</sup>, 崔少康<sup>1</sup>, 谭志勇<sup>2</sup>, 杨振宇<sup>\*1</sup>, 卢子兴<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京临近空间飞行器系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 主要研究了随机孔隙缺陷在 C/C-SiC 缎纹编织复合材料中的有限元建模方法及其对拉伸性能的影响。基于 C/C-SiC 缎纹编织复合材料的细观结构和实验观察所得的微观形貌, 得出孔隙缺陷具有随机分布特征, 提出了一种三维随机碰撞算法模拟孔隙在复合材料中的分布, 建立了含随机孔隙缺陷的 C/C-SiC 缎纹编织复合材料的有限元模型。采用有限元软件 ABAQUS 模拟了其在拉伸载荷下的力学行为, 讨论了孔隙缺陷的尺寸和分布形式对材料拉伸性能的影响, 并对试样进行了单轴拉伸实验测试, 验证了数值模拟的有效性。结果表明, 用本文方法建立的有限元模型符合含孔隙缺陷 C/C-SiC 缎纹编织复合材料的真实细观结构, 相应的数值模拟结果也与试验数据吻合较好。本文的研究结果为含孔隙缺陷的缎纹编织复合材料及具有相似结构特征的复合材料的力学分析与优化设计提供了一种有效的方法。

**关键词:** 编织复合材料; 渐进损伤模型; 缺陷尺寸; 孔隙率; 随机碰撞算法; 拉伸性能; C/C-SiC

中图分类号: TB330.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2020)08-1969-12

## Modeling of void defects in C/C-SiC satin weave composites and simulation of their tensile properties

ZHANG Zhaohang<sup>1</sup>, CUI Shaokang<sup>1</sup>, TAN Zhiyong<sup>2</sup>, YANG Zhenyu<sup>\*1</sup>, LU Zixing<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Institute of Nearspace Vehicle's Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The finite element modeling method of random void defects in C/C-SiC satin weave composites and their influence on tensile mechanical properties were studied. Based on the microstructure of C/C-SiC satin weave composites and the micro morphology observed by experiments, the random distribution characteristic of the void defects was concluded. A three-dimensional random collision algorithm was proposed to reconstruct the void distribution in the composite, and a finite element model of the C/C-SiC satin weave composite with random void defects was established. The finite element analysis software ABAQUS was used to simulate the mechanical behavior of the material under tensile load, and the influence of the size and distribution form of the void defects on the tensile mechanical properties was discussed. The uniaxial tensile test of the sample was carried out to verify the effectiveness of the numerical simulation. The results show that the finite element model established by this method is consistent with the real microstructure of C/C-SiC satin weave composites with void defects, and the corresponding numerical simulation results are also in good agreement with the test data. This paper provides an effective method for the mechanical analysis and optimal design of satin weave composites with void defects and other composites with similar structural characteristics.

收稿日期: 2019-09-16; 录用日期: 2019-11-22; 网络首发时间: 2019-12-16 16:40:16

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191216.001>

基金项目: 国家自然科学基金(11972057; 11972058)

通信作者: 杨振宇, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料力学 E-mail: [zyyang@buaa.edu.cn](mailto:zyyang@buaa.edu.cn)

引用格式: 张兆杭, 崔少康, 谭志勇, 等. C/C-SiC 缎纹编织复合材料孔隙缺陷的建模及其拉伸性能仿真 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1969-1980.

ZHANG Zhaohang, CUI Shaokang, TAN Zhiyong, et al. Modeling of void defects in C/C-SiC satin weave composites and simulation of their tensile properties[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(8): 1969-1980(in Chinese).

**Keywords:** weave composites; progressive damage model; defect size; void fraction; random collision algorithm; tensile properties; C/C-SiC

SiC 陶瓷基复合材料具有低密度、高强度、高热稳定性、抗热震性等一系列优越性能, 是发展高推重比航空发动机、火箭发动机不可缺少的耐热结构材料<sup>[1-2]</sup>。与传统的复合材料层压板相比, 编织复合材料由于具有优异的比强度和较低的制造成本而被广泛应用于结构中<sup>[3]</sup>。同时, 可以通过设计组分材料和编织参数, 达到所需要的力学性能<sup>[4]</sup>。SiC 陶瓷基编织复合材料可以通过纤维预制体的聚合物先驱体浸渍裂解、化学气相渗透 (Chemical vapor infiltration, CVI) 等方法来制造<sup>[5]</sup>。但是由于工艺条件的限制, 材料内部通常会产生很多缺陷, 如孔隙、裂纹、分层、褶皱等, 这些缺陷对材料力学性能和热物理性能都会有所影响<sup>[6-8]</sup>, 其中孔隙缺陷是较普遍和典型的一种形式。

目前, 已有学者就如何模拟孔隙缺陷及其对复合材料力学性能的影响开展了一些工作<sup>[9]</sup>, 如: 卢子兴等<sup>[10]</sup>使用随机选取单元的方法对含孔隙缺陷的平纹机织复合材料的拉伸行为进行了数值模拟, 为该类材料的优化设计提供了一种有效的分析方法; AI 等<sup>[11]</sup>采用实验和数值模拟的方法, 研究了孔隙位置与孔隙率对 C/C 复合材料力学性能的影响, 并得出纱线中的孔隙对力学性能尤其是拉伸强度影响最大的结论; 齐泽文等<sup>[11]</sup>采用 Monte-Carlo 仿真技术在三维四向编织复合材料模型中投入气孔单元, 分别在纤维束和基体中模拟干斑和孔穴, 讨论了两种孔隙缺陷对三维四向编织复合材料力学性能的影响规律; 李波等<sup>[12]</sup>研究分析了不规则形状孔隙对复合材料单向板横向拉伸力学性能的影响。但是以往的孔隙模型的建立都是选取单个单元的方式来实现, 受限于网格的尺寸、形状和密度, 不能真实地反映细观结构。而孔隙缺陷的尺寸和分布对材料力学性能有较大影响, 因此如何建立更加合理且接近真实结构的含孔隙缺陷的单胞模型对预测孔隙缺陷的影响具有重要意义。

含孔隙缺陷单胞模型的建立方法与颗粒增强复合材料类似, 关键在于确定孔隙或增强体的尺寸和位置分布<sup>[13]</sup>。随着计算机计算能力的飞速发展, 人们已经能建立更加接近真实的复合材料微观结构的有限元模型。通常, 建立含孔隙缺陷单胞几何模型的基本原则是孔隙在单胞基体内随机

分布, 孔隙之间既不互相重叠也不相互接触, 且划分网格时不产生畸变单元。孔隙的几何形状可以根据实际情况设定为球体、椭球体或多面体<sup>[14]</sup>。

单胞中孔隙缺陷的尺寸和位置分布都可以通过随机函数给出, 其中随机序列吸附 (Random sequential adsorption, RSA) 方法是最常用的方法<sup>[15]</sup>。该方法逻辑简单, 适用范围广, 可以用于建立孔隙、颗粒及纤维位置和取向随机分布的三维单胞模型。但是, 当孔隙含量达到一定数目后, 单胞内部的空间趋向饱和, 剩余空间难以刚好配合新位置, 需要反复试错运行多次才能生成一个新的孔隙, 因而难以生成孔隙率较高的模型<sup>[16]</sup>。

基于编织复合材料的孔隙率较大及其随机分布的特征, 本文提出了一种改进的三维随机碰撞算法, 建立了含较大孔隙的 C/C-SiC 缎纹编织复合材料三维单胞模型, 通过数值模拟研究了孔隙缺陷对其力学性能的影响规律, 并利用实验对模拟结果的有效性进行了验证。

## 1 随机碰撞算法

### 1.1 整体思路

与 RSA 方法<sup>[13]</sup>有所不同, 随机碰撞算法的总体思路是预先在封闭区域内生成指定数目的实体, 然后使这些实体模拟物理碰撞反弹的过程, 经过一定次数的循环后, 使区域内的实体位置呈现随机分布的状态<sup>[17]</sup>, 从而获得所需的随机位置及尺寸等信息。如图 1 所示, 随机碰撞算法的具体过程可大致分为以下四步: (1) 初始化: 在域内生成实体并赋予初速度; (2) 碰撞循环: 包括周期性特征处理、碰撞分析与动量交换、边界控制等过程; (3) 收敛判断: 如果实体状态满足收敛条件, 则跳出循环; (4) 循环结束: 输出所有实体的位置和尺寸信息。

根据封闭区域的维度, 可将随机碰撞算法分为二维碰撞算法和三维碰撞算法, 三维碰撞算法可认为是二维碰撞算法的推广。二维碰撞算法的封闭区域一般为矩形区域, 也可为圆形、椭圆形, 其碰撞实体为二维小圆。二维碰撞算法可用于可简化为平面问题的几何建模, 如模拟编织复合材料中由纤维单丝和基体构成的纱线结构, 基于二维碰撞算法获得的纱线单胞模型, 其孔隙率可以高达 80%, 甚至无限接近于孔隙率理论最大值<sup>[18]</sup>。

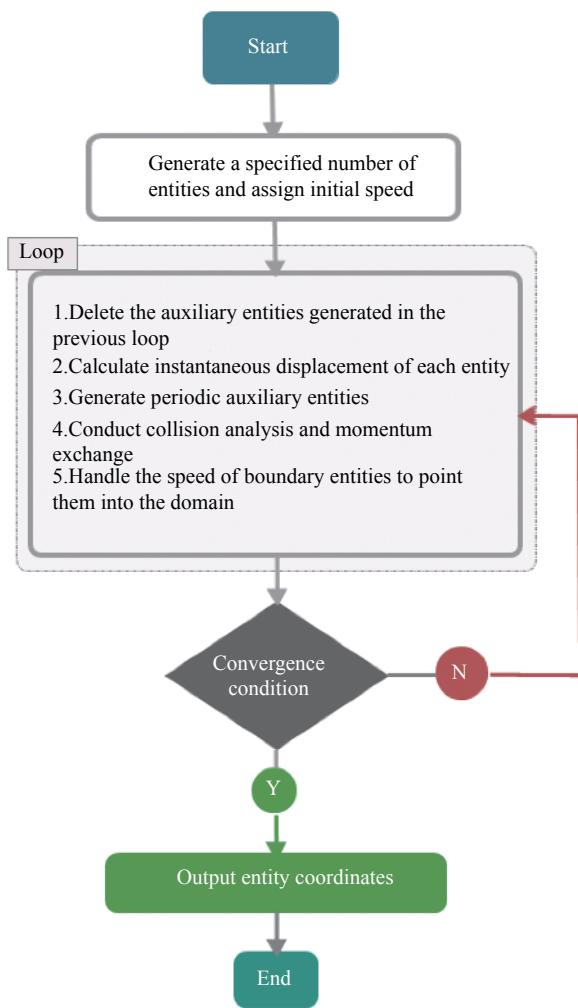


图 1 随机碰撞算法流程

Fig. 1 Flow chart of random collision algorithm

三维碰撞算法的封闭区域则是三维的，通常是长方体形区域，也可为球形或其他指定形状。相应地，区域内的实体则可简化为小球。可见，碰撞算法不仅可以实现较大体积分数的建模，还可以适用于多种场景，如孔隙或者颗粒增强体的建模。此外，具有很强的可扩展性，封闭区域和实体的形状与大小均可根据实际问题的需要灵活调整。

## 1.2 初始话

初始化过程主要是在域内生成指定数目的实体，具体数目可由指定的体积分数反推得到。对于二维碰撞问题，假设封闭区域为正方形，则初始化生成的小圆个数  $N$  为

$$N = \text{Int} \left[ \frac{L_a^2}{\pi r^2} k \right] \quad (1)$$

其中： $r$  是小圆半径； $k$  是单胞的孔隙率； $L_a$  是单胞模型的长度； $\text{Int}$  是一个取整运算。而对于三维

碰撞而言，假设封闭区域为长方体区域，则初始的小球个数  $N$  为

$$N = \text{Int} \left[ \frac{a^2 h}{4/3 \pi r^3} k \right] \quad (2)$$

其中， $a$ 、 $h$  分别为单胞模型长宽和厚度。其他情形下的实体数目均可根据实际情况反推或灵活调整。实体位置分布的初始化处理起来比较灵活，但是对于较高的体积分数则需要选择比较紧凑的排列方式，算法所能实现的最大体积分数取决于初始化时封闭区域内能够放置多少实体，如本文考虑到球的形状特点而采用的交错密排方式。

由于后续要模拟物理碰撞的过程，因此还需要给域内实体赋予初始速度。理论上，实体初速度的大小和方向均可随机生成，为了简化模型，赋予实体大小相等、方向随机的初始速度。假设速度大小为  $V$ ，对于小圆而言，初始速度如下式：

$$\vec{v} = (V \cos \theta, V \sin \theta) \quad (3)$$

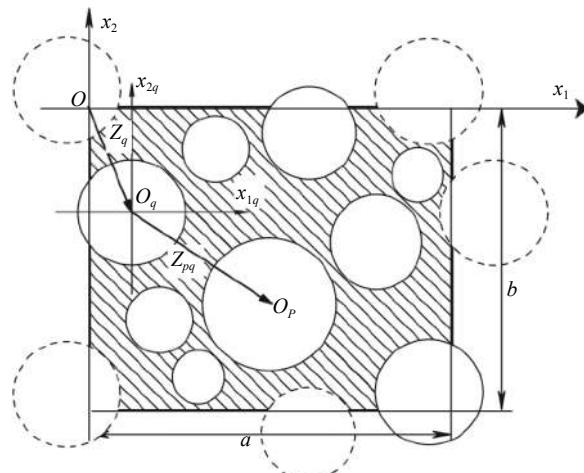
对于小球而言，初始速度则如下式：

$$\vec{v} = (V \cos \alpha, V \sin \alpha \cos \beta, V \sin \alpha \sin \beta) \quad (4)$$

其中， $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta \in (0, 2\pi)$  为随机的角度值。

## 1.3 含缺陷模型的周期性构造

考虑到单胞模型的周期性结构特征，需要针对模型边界上的实体生成一些辅助实体<sup>[19]</sup>。对于二维模型，如图 2 所示，对于单胞模型左(右)边界的小圆，在对应的右(左)边界生成一个对应的辅助小圆，组成一个集合对，中心距离为单胞边长  $a$ ；类似地，上下边界集合对距离为单胞边长  $b$ ；对于模型顶点处的小圆，在对应的其他三个顶点

图 2 二维模型的辅助实体<sup>[19]</sup>Fig. 2 Auxiliary entities of 2D model<sup>[19]</sup>

都生成一个小圆，组成边界小圆集合组，四圆中心水平和垂直距离分别对应  $a$  和  $b$ ；以此模拟实体超出区域边界的部分从另一侧边界再次进入区域内的效果，保证区域内小圆的面积恒定，从而保证体积分数恒定。对于三维模型边界上的小球，需要分别对面、棱、顶点边界处的小球做类似的处理，在此不再赘述。

#### 1.4 碰撞分析

碰撞分析需要对任意两个实体之间（包括辅助实体）都进行一次运算。例如，对于模型中编号分别为  $i$  和  $j$  的两个实体，如果发生碰撞且具有继续互相靠近的趋势，就具有进行动量传递的必要，即满足下式：

$$\begin{cases} |\vec{r}_i - \vec{r}_j| < d \\ (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_j) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中： $d$  表示两实体之间的距离； $\vec{r}_i$  和  $\vec{r}_j$  分别表示实体  $i$  和实体  $j$  的位置矢量； $\vec{v}_i$  和  $\vec{v}_j$  则分别表示实体的速度矢量。动量传递的物理依据为小球的完全弹性碰撞反弹机制，假设碰撞过程中能量和动量守恒，并且作用时间很短。当两球质量相等时或者为了简化计算时，两球间的动量传递则可退化为径向速度发生交换，而切向速度保持不变，如下式所示：

$$\begin{cases} v'_1 = v_2 \\ v'_2 = v_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中： $v_1$ 、 $v_2$  分别表示两球碰撞前的径向速度； $v'_1$ 、 $v'_2$  分别表示两球发生动量传递后的新径向速度。

退化后的动量传递用向量形式表达为

$$\begin{aligned} \vec{v}_{i\text{new}} &= \vec{v}_i + (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \cdot \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \cdot \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \\ \vec{v}_{j\text{new}} &= \vec{v}_j + (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \cdot \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \end{aligned} \quad (7)$$

其中： $\vec{r}_i$ 、 $\vec{r}_j$  分别为球  $i$  和球  $j$  的位置向量； $\vec{v}_i$ 、 $\vec{v}_j$  分别为两球碰撞前的速度向量； $\vec{v}_{i\text{new}}$ 、 $\vec{v}_{j\text{new}}$  分别为两球发生动量传递后的速度向量。特别地，如果动量传递发生在边界实体集合对或组，位于边界实体集合对或组中其他实体速度需要更新以使集合对或组中速度保持一致。

#### 1.5 收敛条件及离散程度描述

碰撞算法的收敛条件为区域内实体没有发生新的碰撞及达到所需的离散度要求。特别地，由于初始状态的实体是紧密排布的，因此需要循环足够次数（如 500 次）后，才能保证实体运动遍布

域内。但是为了保证满足离散度要求，需要提出新的参数对碰撞后实体的离散程度进行量化<sup>[20]</sup>，在此采用平均间距<sup>[21]</sup>参数来刻画。

平均间距  $\bar{d}$  则表示点集中的点两两之间的离散程度，具有长度量纲，下式中  $d_{ij}$  为点  $i$  与点  $j$  的距离。该数值越大，说明点集的位置分布越分散：

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (8)$$

对于由  $n$  个点组成的空间点集，可以计算出空间间距矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

该空间间距矩阵对角线上的元素为 0，于是点集中所有点之间的平均间距为

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i \neq j} d_{ij}}{n} \quad (10)$$

平均间距可以在一定程度上描述随机碰撞后实体的离散程度。而且，在随机碰撞过程趋于稳定后，这两个数值也应该趋于稳定，具体数值与区域和实体的尺寸有关。

## 2 材料与实验

### 2.1 材料微观形貌表征

本文所采用的材料为五枚段缎纹 C/C-SiC 编织复合材料，T300 碳纤维的体积分数为 41.5%，基体为 C-SiC 双基体。使用电子显微镜对材料剖面进行观察，得出如图 3 所示的含孔隙缺陷的微观形貌照片图像。通过编织复合材料的实验观察可知，材料基体内部存在着大量尺寸、形状不一的较大孔隙，而且这些孔隙多发生在多根正交纤维束的交叉区域<sup>[5]</sup>。通过对缎纹编织复合材料的观测结果分析得出，孔隙的包络球半径集中在 0.25 mm 左右，此外通过实验测得孔隙率为 5%~10%。

### 2.2 拉伸试验

本试验的拉伸测试方法参考标准 ASTM-C1275<sup>[22]</sup>，在常温、准静态加载条件下，使用液压伺服疲劳试验机（英斯特朗试验设备贸易有限公司，Instron8801）对如图 4 所示的哑铃状拉伸试样进行了单轴拉伸实验。基于编织复合材料的宏、细观结构，在试样设计和制备中严格保证增强纤维贯穿整个试样，尽量保证纤维束平行于试样中

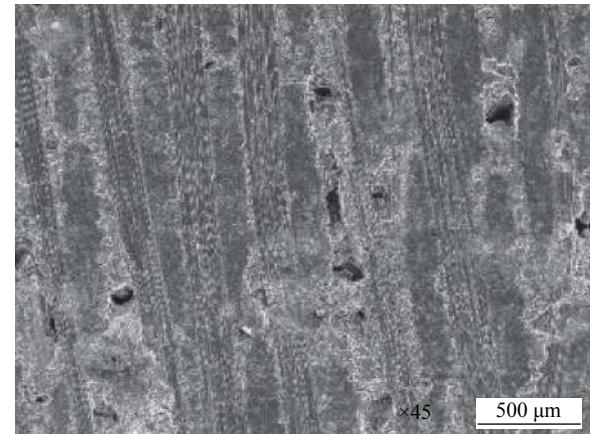
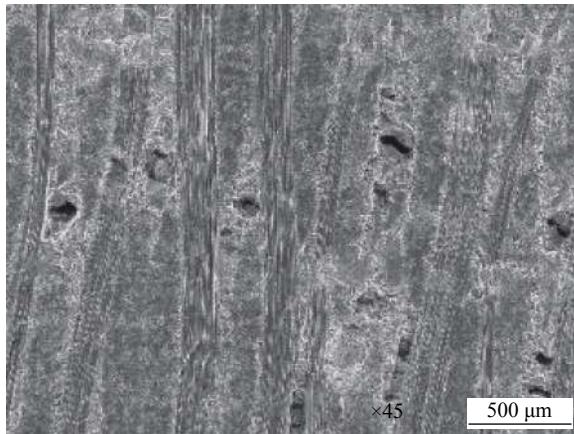


图 3 C/C-SiC 编织材料孔隙缺陷的微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphologies of the void defects in C/C-SiC weave composites



图 4 C/C-SiC 编织复合材料单轴拉伸试样

Fig. 4 Specimen of the C/C-SiC weave composite under uniaxial tension

心线。实验首先采用载荷分段加载, 当载荷超过 5 kN 后采用位移加载。为了测量拉伸破坏过程中的应变, 在拉伸试样的中心区域粘贴应变片(中航工业电测仪器股份有限公司, BF350), 通过动态应变仪(江苏东华测试技术股份有限公司, DH3818)测量应变。

### 3 有限元模型

#### 3.1 C/C-SiC 编织复合材料细观模型

基于实验观察和测量, 使用有限元软件 ABAQUS 建立了如图 5 所示的编织复合材料单胞的几何模型。该单胞模型为五枚缎纹, 并假设经纱和纬纱的几何尺寸相同, 截面形状为椭圆形。

如果忽略表面单胞和角单胞的影响, 编织复

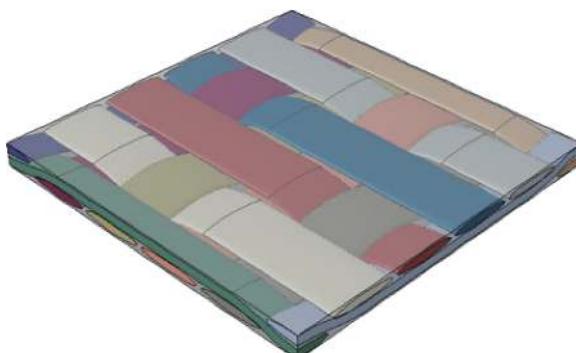


图 5 C/C-SiC 编织复合材料单胞的几何模型

Fig. 5 Geometric model of C/C-SiC weave composite unit-cell

合材料可认为是由多个内部单胞组合而成的周期性结构。为了保证单胞在边界上应力和位移的连续性, 在模拟过程中, 需要在单胞的各个表面上将对应节点耦合起来, 建立周期性的位移边界条件<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 失效准则与损伤演化

在单向拉伸载荷作用下, 随着载荷的增加, 材料中的损伤逐步产生、发展直至破坏, 因而, 本文采用 Linde 准则作为失效准则<sup>[24]</sup>, 通过用户子程序 UMAT 在材料的本构关系中引入损伤模型和损伤演化模型。Linde 准则基于失效应变并假定材料是连续损伤失效的, 损伤演化则是通过纤维、基体中各自的应变能来控制, 不区分拉压破坏。该准则的具体形式如下。

##### (1) 纤维的损伤失效<sup>[24]</sup>

$$f_f = \sqrt{\frac{\varepsilon_{11}^{f,t}}{\varepsilon_{11}^{f,c}}(\varepsilon_{11})^2 + \left(\varepsilon_{11}^{f,t} - \frac{(\varepsilon_{11}^{f,t})^2}{\varepsilon_{11}^{f,c}}\right)\varepsilon_{11}} > \varepsilon_{11}^{f,t} \quad (11)$$

其中:  $\varepsilon_{11}^{f,t} = \sigma_L^{f,t}/C_{11}$ ;  $\varepsilon_{11}^{f,c} = \sigma_L^{f,c}/C_{11}$ 。 $\varepsilon_{11}^{f,t}$  和  $\varepsilon_{11}^{f,c}$  分别为纱线纤维束中沿纤维方向的拉伸失效应变与压缩失效应变;  $C_{11}$  为纤维束未损伤状态的刚度系数。当  $f_f$  达到失效应变  $\varepsilon_{11}^{f,t}$ , 纤维损伤开始, 若利用损伤因子  $d_f$  来描述纤维的损伤, 则  $d_f$  满足下式:

$$d_f = 1 - \frac{\varepsilon_{11}^{f,t}}{f_f} e^{[-C_{11}\varepsilon_{11}^{f,t}(f_f - \varepsilon_{11}^{f,t})L^c/G_f]} \quad (12)$$

其中:  $L^c$  为材料单元的特征长度;  $G_f$  为纤维的断裂能密度。

##### (2) 基体的损伤失效<sup>[24]</sup>

$$f_m = \sqrt{\frac{\varepsilon_{22}^{f,t}(\varepsilon_{22})^2 + \left(\varepsilon_{22}^{f,t} - \frac{(\varepsilon_{22}^{f,t})^2}{\varepsilon_{22}^{f,c}}\right)\varepsilon_{22} + \left(\frac{\varepsilon_{22}^{f,t}}{\varepsilon_{12}^f}\right)^2(\varepsilon_{12})^2}{\varepsilon_{22}^{f,c}}} > \varepsilon_{22}^{f,t} \quad (13)$$

其中： $\varepsilon_{22}^{f,t} = \sigma_T^{f,t}/C_{22}$ ； $\varepsilon_{22}^{f,c} = \sigma_T^{f,c}/C_{22}$ 且 $\varepsilon_{12}^f = \tau_{LT}^f/C_{44}$ 。 $\varepsilon_{22}^{f,t}$ 和 $\varepsilon_{22}^{f,c}$ 分别为垂直于纱线纤维方向的拉伸失效应变与压缩失效应变； $\varepsilon_{12}^f$ 为剪切失效应变。当 $f_m$ 达到失效应变 $\varepsilon_{22}^{f,t}$ 时，基体损伤开始，若利用损伤

$$C_d = \begin{bmatrix} (1-d_f)C_{11} & (1-d_f)(1-d_m)C_{12} & (1-d_f)C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ (1-d_m)C_{22} & (1-d_m)C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & (1-d_f)(1-d_m)C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 3.3 C/C-SiC 编织复合材料缺陷模拟

基于实验观察的微观形貌，做出以下假定：(1)材料内部的孔隙为近似球状；(2)材料内部孔隙随机分布于基体内部。

在确定了孔隙的位置分布之后，就可以在现有的三维单胞模型中引入孔隙缺陷。最简单的思路是分别建立出单胞模型和孔隙的几何模型，然后分别进行网格划分，但是这种方法会引入显著的几何奇异性，随着缺陷体积分数的增加会越来越明显，最终会严重影响有限元模型的网格划分。另外，比较常用的方法是随机选取单个单元刚度置零，但是受限于单个单元的尺寸和形状，不能

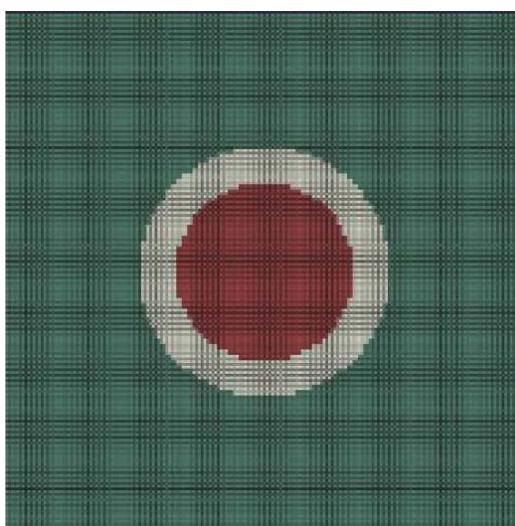
因子 $d_m$ 来描述基体的损伤，则 $d_m$ 满足下式<sup>[24]</sup>：

$$d_m = 1 - \frac{\varepsilon_{22}^{f,t}}{f_m} e^{-C_{22}\varepsilon_{22}^{f,t}(f_m - \varepsilon_{22}^{f,t})L^c/G_m} \quad (14)$$

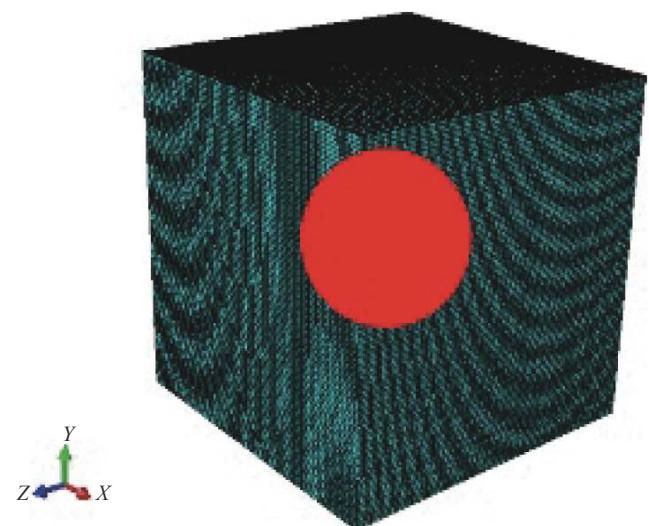
其中， $G_m$ 为基体的断裂能密度。基于上述失效准则，一旦组分材料的某单元积分点上材料出现损伤，则通过损伤因子 $d_f$ 和 $d_m$ 可将纱线的等效刚度矩阵退化成下式<sup>[24]</sup>：

很好地兼顾反映真实结构和计算效率。因此，本文对模型划分体素网格，通过已获取的随机位置以对应尺寸圆形或球形选择框选取基体中的一组单元，并将单元刚度置零的方法来模拟孔隙缺陷。如图6所示，选取小球包含的元素建立集合并将其刚度置零，从而引入孔隙缺陷，分别适用于二维和三维模型。

由实验观察可知，孔隙缺陷主要存在于基体中。首先采用三维随机碰撞算法生成随机位置，其平均间距标准设为3.6 mm。因此，在基体元素中使用球形选择框遍历小球位置选取单元，并计算体积分数，当体积分数达到设定值后，停止选



(a) 2D void defect



(b) 3D void defect

图6 C/C-SiC 编织复合材料有限元模型中的孔隙缺陷表征

Fig. 6 Characterization of void defects in finite element model of C/C-SiC weave composite

取单元。采用这种方法可以建立含不同孔隙率及不同孔隙大小的单胞模型, 如图 7 所示, 其中:  $V_p$  为孔隙率;  $R$  为球形选择框的半径。孔隙率相同时, 孔隙越小, 孔隙个数越多且分布越分散; 孔隙越大, 孔隙个数越少且分布越集中。本文采用编织复合材料的工艺参数及拉伸试验数据作为

数值模拟所需的参数, 表 1 为试件组分材料的性能参数。其中, 纤维的就位性能采用文献 [1] 中的参数, 再考虑纱线束的收敛率, 将纱线束等效为单向碳纤维增强 C-SiC 双基体的复合材料模型, 即可得到考虑纤维就位性能的纤维束基本力学性能参数。

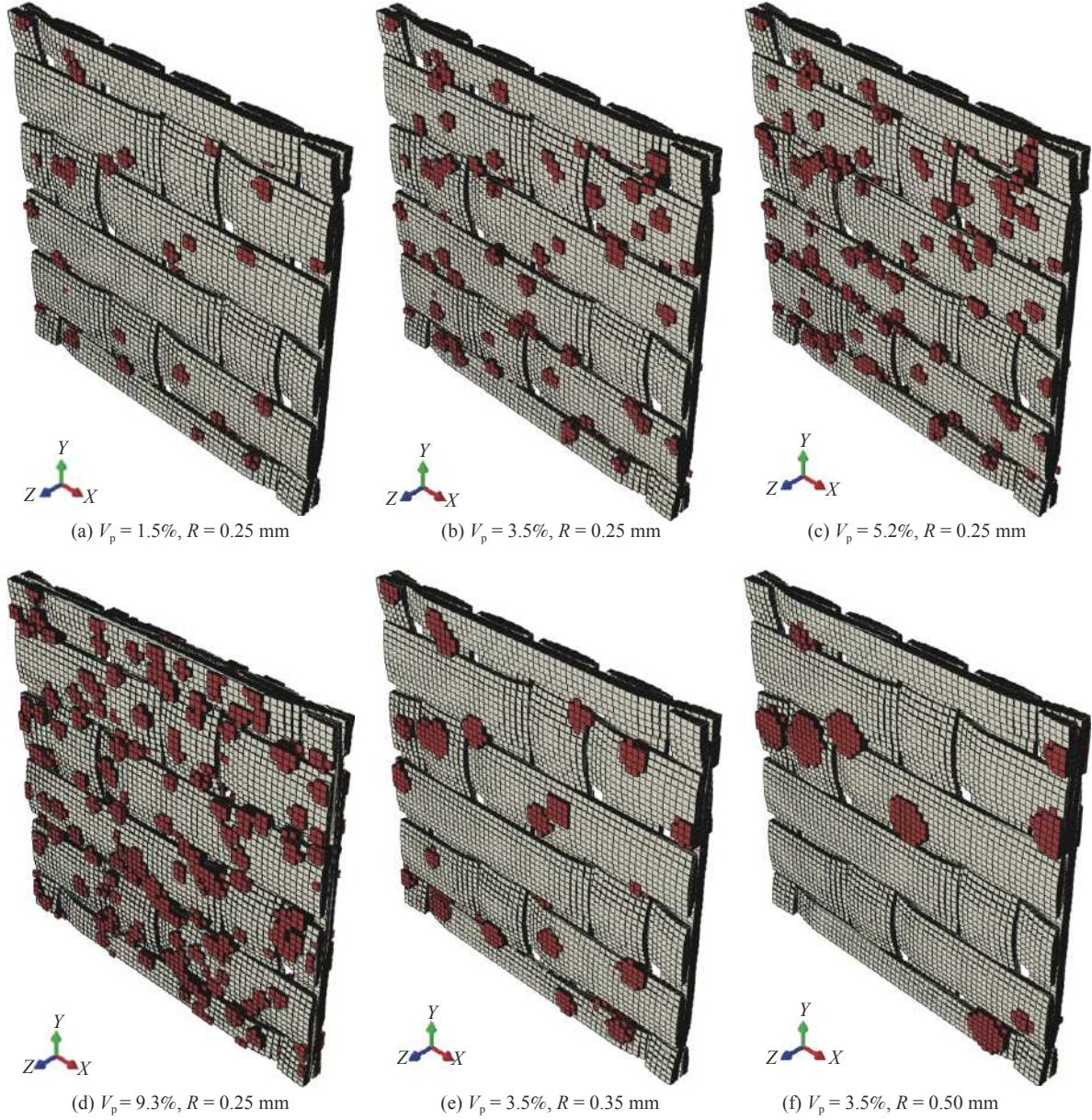


图 7 含随机孔隙缺陷的 C/C-SiC 编织复合材料单胞模型 (不含基体)

Fig. 7 Cell models of C/C-SiC weave composites with random void defects (Without matrix)

## 4 结果与讨论

### 4.1 随机碰撞算法所得二维和三维几何模型中缺陷的位置分布

二维碰撞算法可用于构建具有不同收敛率的纱线单胞模型, 结果如图 8 所示。其中, 小圆代

表纤维单丝, 其余部分则为基体。采用此种方法建立的纱线模型, 其收敛率可以非常接近理论最大值, 而理论最大值取决于初始状态时区域内能排列的小圆个数, 与小圆和区域的相对尺寸有关。三维碰撞算法在本文中则被用于在编织复合材料

表 1 C/C-SiC 编织复合材料的组分材料性能  
Table 1 Mechanical properties for the C/C-SiC weave composites

Material		$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$G_{12}$ /GPa	$G_{23}$ /GPa	$F_1$ /MPa		$F_2$ /MPa		$S$ /MPa	$\nu_{12}$
						$F_{1t}$	$F_{1c}$	$F_{2t}$	$F_{2c}$		
C <sup>[1]</sup>	Fiber	230	40	24	14.3	890	—	756	—	50	0.26
C-SiC	Matrix	81.0	81.0	35.2	35.2	40.0	45.0	40.0	45.0	30.0	0.15
C/C-SiC	Yarn( $V_f=80\%$ )	200.2	45.9	26.0	16.8	716.4	609.3	37.2	41.3	26.3	0.23

Notes: Constitutive models of fiber and yarn are both assumed to be transversely isotropic, and the constitutive model of matrix is assumed to be isotropic;  $E_1, F_{1t}, F_{1c}, G_{12}$  and  $\nu_{12}$ —Young's modulus, tensile strength, compressive strength, shear modulus and Poisson's ratio in the longitudinal direction, respectively;  $E_2, F_{2t}, F_{2c}, G_{23}$  and  $S$ —Young's modulus, tensile strength, compressive strength, shear modulus and shear strength in the transverse direction, respectively.

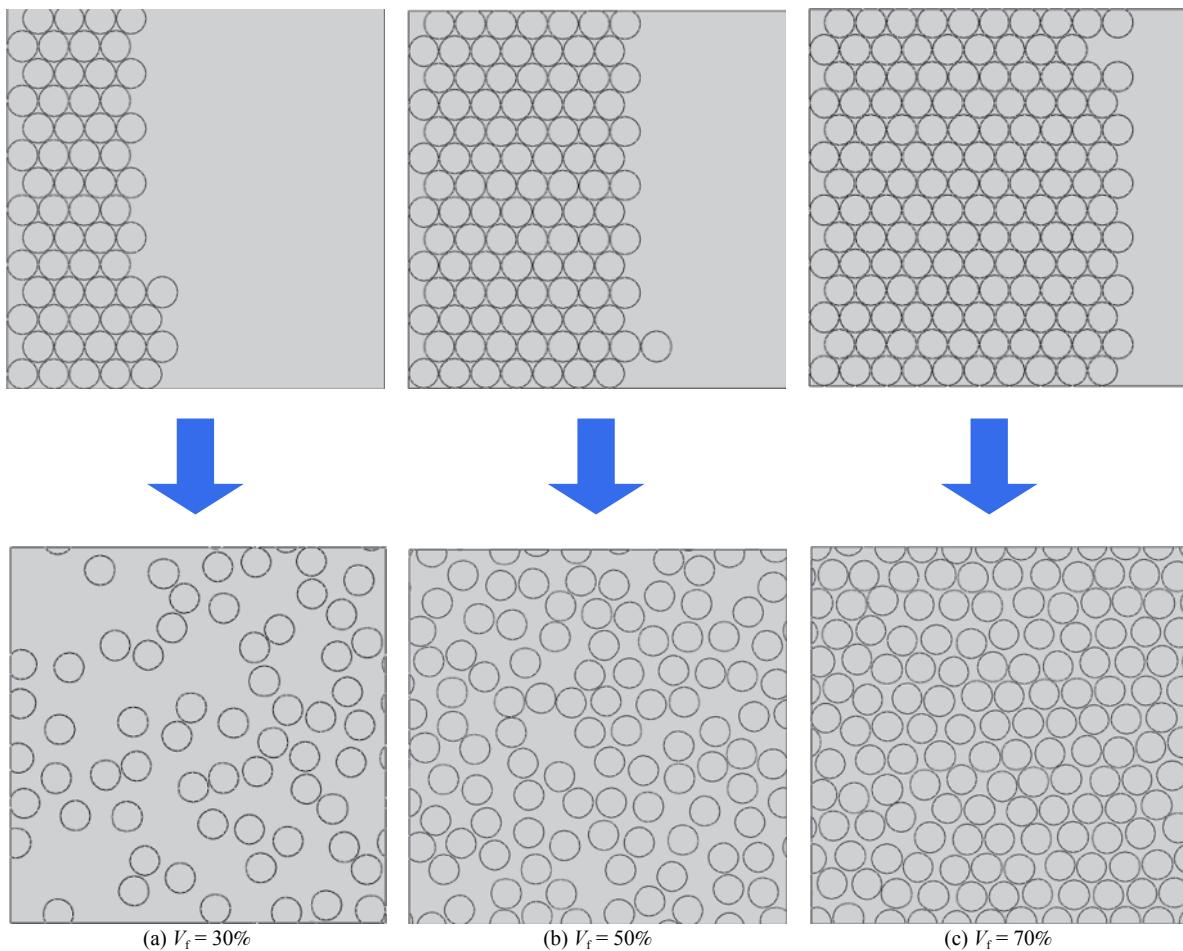


图 8 具有不同敛集率 ( $V_f$ ) 的 C/C-SiC 纱线单胞模型剖面

Fig. 8 Profiles of C/C-SiC yarn cell models with different pack factors ( $V_f$ )

三维单胞模型的基体中引入孔隙缺陷, 如图 9 所示。这种方法在三维孔隙的引入中更加灵活可靠, 但是不可避免地, 随着孔隙率的增大, 计算量也会大大增加。因而对于大孔隙率模型的建立, 可以考虑使用并行计算提高效率。

#### 4.2 C/C-SiC 编织复合材料单胞模型的损伤演化

对含  $V_p=3.5\%$ 、 $R=0.25$  mm 随机孔隙缺陷的单

胞模型进行了单轴拉伸数值模拟, 损伤演化过程如图 10 所示, 其对应的应力-应变曲线如图 11(c) 所示, 应变在 0.05% 前为弹性阶段, 纱线作为主要承载对象, 表现为较高的初始模量, 相应的基体和纱线应力云图如图 10(a) 和 10(b) 所示, 可见纱线上靠近孔隙的部分有明显的应力集中现象; 应变在 0.075% 处为应力-应变曲线的转折点, 其

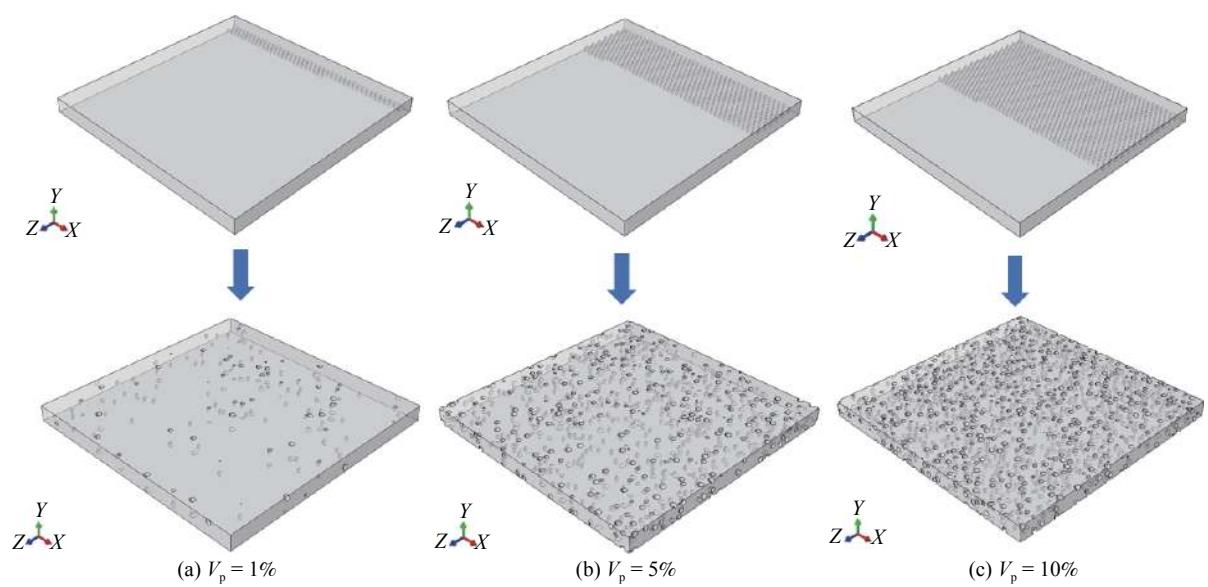
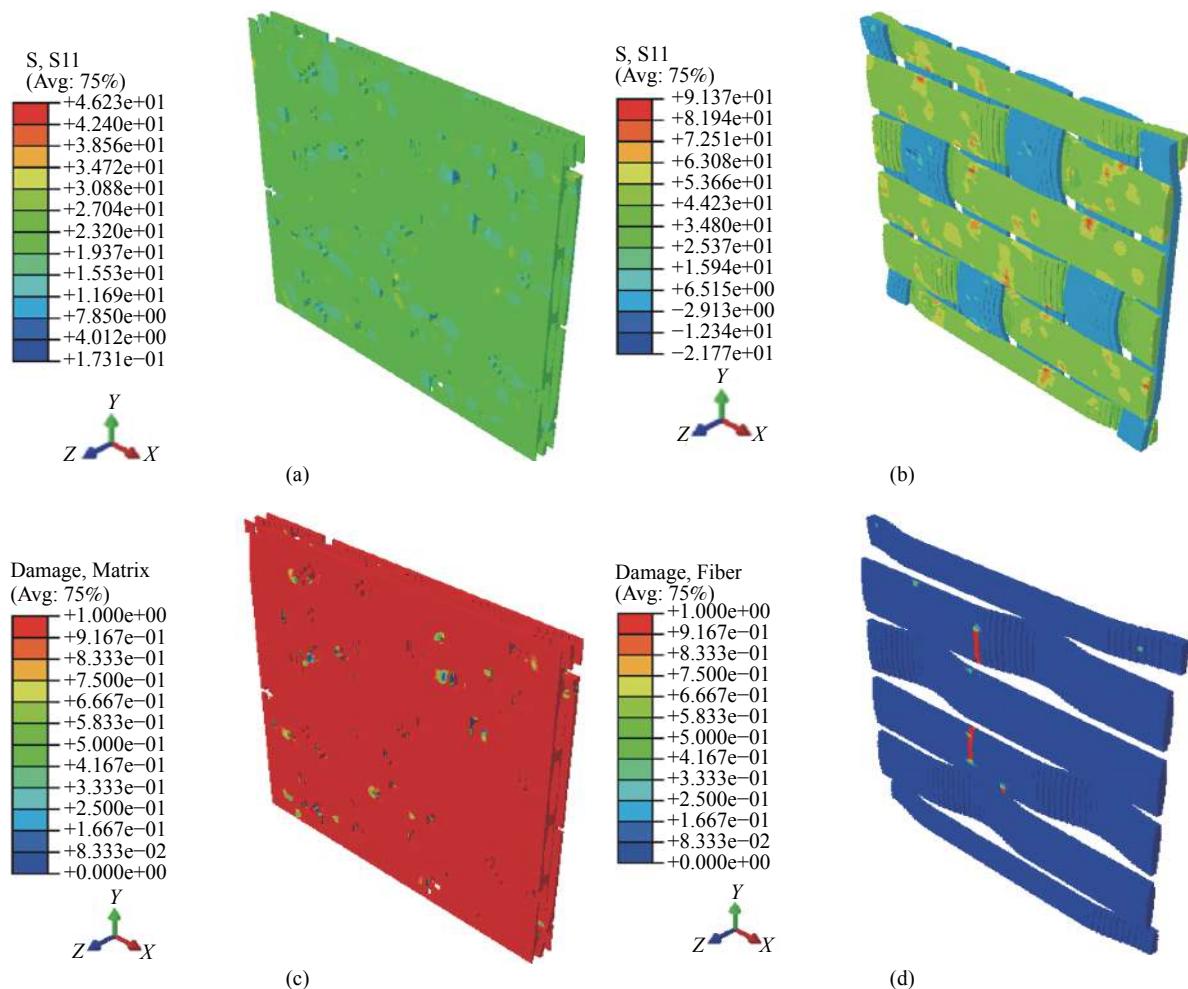
图 9 具有不同孔隙率( $V_p$ )的C/C-SiC 编织复合材料基体几何模型Fig. 9 Geometric models of C/C-SiC weave composite matrix with different porosities ( $V_p$ )

图 10 C/C-SiC 编织复合材料损伤演化

Fig. 10 Damage evolution of C/C-SiC weave composites

对于基体由于损伤而基本失去承载能力, 基体损伤云图如图 10(c) 所示; 曲线最高点为强度点, 纱线开始出现损伤, 主要起始于孔隙所在部位, 随后发生破坏性损伤, 如图 10(d) 所示, 承载能力骤降, 表现出明显的脆性破坏特征。还可以看出, 孔隙缺陷可以使单胞内部产生应力集中, 使单胞的应力重新分布, 从而加快损伤的产生和扩展, 使单胞的力学性能有所下降。整体来讲, 基体内的孔隙对单胞的面内变形趋势没有明显的影响, 只是进入非线性变形阶段整体的应力水平随之下降。

#### 4.3 参数讨论

为了进一步讨论孔隙缺陷相关参数对材料力学性能的影响, 在现有模型基础上, 分别进行了以下数值模拟。

孔隙缺陷体积分数对 C/C-SiC 编织复合材料应力-应变曲线的影响如图 11 所示。在随机孔隙尺寸基本保持不变的前提下, 随着孔隙率的增大, 刚度和强度都会下降, 但是总体来看降幅相对较小。这是由于纤维束作为主要的承载对象, 且基体的拉伸模量较低。如果纱线是完好的, 并且缺陷仅存在于基体中, 则孔隙缺陷对复合材料力学性能的影响有限, 这与文献 [1] 中所得规律是一致的。

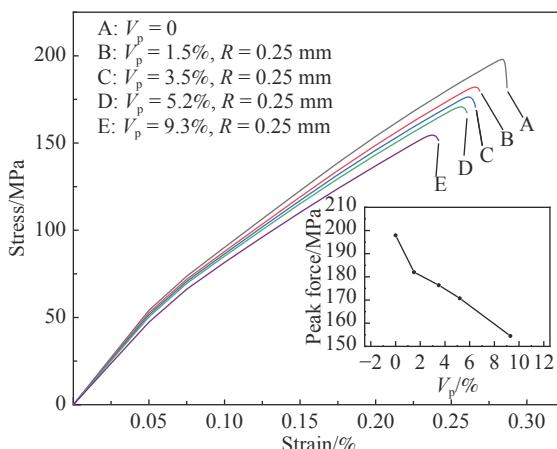


图 11 孔隙缺陷体积分数对 C/C-SiC 编织复合材料应力-应变曲线的影响

Fig. 11 Effect of the void fraction on tensile stress-strain curves of C/C-SiC weave composites

孔隙尺寸对 C/C-SiC 编织复合材料应力-应变曲线的影响如图 12 所示, 在孔隙率恒定、孔隙大小变化时, 三者刚度基本保持一致, 说明刚度主要受孔隙率的影响, 而尺寸和位置分布情况对其影响较小。但是随着孔隙尺寸的增大, 单胞强度逐渐降低。这可能是由于在同样孔隙率下, 孔隙

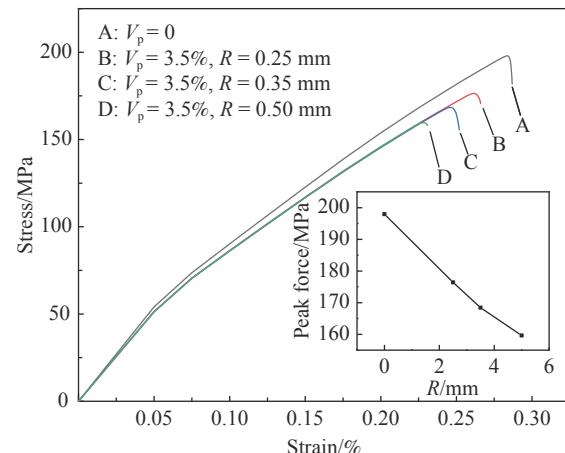


图 12 孔隙尺寸对 C/C-SiC 编织复合材料应力-应变曲线的影响

Fig. 12 Effect of void sizes on tensile stress-strain curves of C/C-SiC weave composites

尺寸越小则其分布越分散, 孔隙尺寸越大其分布则越集中, 产生类似于孔隙缺陷团簇的效果, 更容易引发应力集中, 影响应力的重新分布, 从而使强度降低。

#### 4.4 实验与数值模拟的对比

图 13 为试验所得应力-应变曲线及有限元模拟结果的比较。随着孔隙率的增大, 弹性模量有所下降, 但是和试验结果的刚度相差很小, 可以看出孔隙缺陷对编织复合材料的刚度影响非常有限。可见, 本文中采用三维随机碰撞方法建立的有限元模型的模拟结果与试验给出的应力-应变曲线整体上吻合较好, 说明所建立的含较大孔隙的细观单胞模型, 能够有效地预测含孔隙缺陷的缎纹编织复合材料的应力-应变行为。

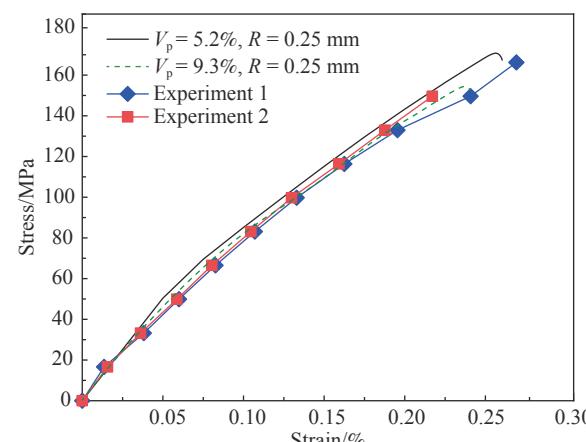


图 13 含孔隙缺陷 C/C-SiC 编织复合材料数值结果与试验曲线的对比

Fig. 13 Comparison of numerical results and experimental curves of C/C-SiC satin weave composites with random void defects

## 5 结论

(1) 三维随机碰撞算法灵活性大, 可扩展性强, 可用于多种场景下随机模型的建立。

(2) 三维随机碰撞算法可用于在 C/C-SiC 缎纹编织复合材料单胞模型中引入孔隙缺陷, 且不受单个单元尺寸和形状的限制, 更加符合真实的微观结构。

(3) 孔隙缺陷会降低编织复合材料的拉伸力学性能, 其中对弹性模量影响不大, 对强度影响相对较大。

(4) 当孔隙率恒定时, 孔隙尺寸越大则其分布越集中, 对强度性能影响越大, 对刚度基本没有影响。

## 参考文献:

- [1] AI S G, FANG D N, HE R J, et al. Effect of manufacturing defects on mechanical properties and failure features of 3D orthogonal woven C/C composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 71: 113-121.
- [2] 甄文强, 王波, 李潘, 等. 平纹编织C/SiC复合材料层合板偏轴拉伸性能研究[J]. 机械强度, 2014, 36(6): 856-861.  
ZHEN Wenqiang, WANG Bo, LI Pan, et al. Study of off-axis tensile properties of plain-woven C/SiC composites[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2014, 36(6): 856-861(in Chinese).
- [3] GARCÍA-CARPINTERO A, HERRÁEZ M, XU J, et al. A multi material shell model for the mechanical analysis of triaxial braided composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(6): 1425-1445.
- [4] 田俊, 周储伟. 纺织复合材料和结构多尺度耦合的数值分析[J]. *计算力学学报*, 2011, 2008: 1-5.  
TIAN Jun, ZHOU Chuwei. Multi-scale coupled numerical analysis of textile composites and structures[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 2008: 1-5(in Chinese).
- [5] 汪海滨, 曾庆丰, 张卫红, 等. 考虑孔隙和微裂纹缺陷的C/C-SiC编织复合材料等效模量计算[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 8-10.  
WANG Haibin, ZENG Qingfeng, ZHANG Weihong, et al. Numerical computing of effective modulus of woven C/C-SiC composites including porosities and micro-cracks[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(1): 8-10(in Chinese).
- [6] WANG C, ROY A, SILBERSCHMIDT V V, et al. Modelling of damage evolution in braided composites: Recent developments[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, 3(1): 15.
- [7] 左亚卓, 李红, 耿真真, 等. C/C-SiC复合材料的制备及其烧蚀性能[J]. 上海大学学报, 2017, 23(6): 2-11.  
ZUO Yazhuo, LI Hong, GENG Zhenzhen, et al. Preparation and ablation properties of C/C-SiC composites[J]. *Journal of Shanghai Universite*, 2017, 23(6): 2-11(in Chinese).
- [8] FANG G D, LIANG J, WANG Y, et al. The effect of yarn distortion on the mechanical properties of 3D four-directional braided composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier Ltd, 2009, 40(4): 343-350.
- [9] FANG G D, LIANG J. A review of numerical modeling of three-dimensional braided textile composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45(23): 2415-2436.
- [10] 卢子兴, 徐强, 王伯平, 等. 含缺陷平纹机织复合材料拉伸力学行为数值模拟[J]. 复合材料学报, 2011, 28(6): 200-207.  
LU Zixing, XU Qiang, WANG Boping, et al. Numerical simulation of plain weave composites with defects under unidirectional tension[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(6): 200-207(in Chinese).
- [11] 齐泽文, 胡殿印, 张龙, 等. 含孔隙三维四向编织复合材料力学性能的双尺度分析[J]. 推进技术, 2018, 39(8): 1873-1879.  
QI Zewen, HU Dianyin, ZHANG Long, et al. Two-scale analysis for mechanical properties of 3D four-directional braided composites with pore defects[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(8): 1873-1879(in Chinese).
- [12] 李波, 赵美英, 万小朋. 不规则孔隙对复合材料横向拉伸力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 188(2): 1-9.  
LI Bo, ZHAO Meiying, WAN Xiaopeng. Influence of irregular-void on transverse tensile mechanical properties of composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 188(2): 1-9(in Chinese).
- [13] 徐绯, 李玉龙, 郭伟国, 等. 颗粒形状、含量和基体特性对金属基复合材料压缩力学行为的影响[J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 36-41.  
XU Fei, LI Yulong, GUO Weiguo, et al. Influence of particle shape, volume fraction and matrix materials on the compressive behavior of MMCs[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(6): 36-41(in Chinese).
- [14] 邵军超, 刘越. 颗粒增强金属基复合材料力学行为有限元模拟研究现状[J]. 材料导报, 2007(9): 111-115.  
SHAO Junchao, LIU Yue. A review of finite element simulations on the mechanical behavior for particles reinforced metal matrix composites[J]. *Materials Reports*, 2007(9): 111-115(in Chinese).
- [15] LLORCA J, SEGURADO J. Three-dimensional multiparticle cell simulations of deformation and damage in sphere-reinforced composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 365(1-2): 267-274.

- [16] 金泉, 覃继宁, 张荻, 等. 颗粒和纤维混杂增强复合材料力学性能的三维有限元模拟[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(2): 14-20.  
JIN Quan, QIN Jining, ZHANG Di, et al. 3D FEM simulation of mechanics property of composites reinforced by both particles and fibers[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(2): 14-20(in Chinese).
- [17] ALFARO C M V, SUIKER A S J, VERHOOSEL C V, et al. Numerical homogenization of cracking processes in thin fibre-epoxy layers[J]. *European Journal of Mechanics/A Solids*, 2009, 29(2): 119-131.
- [18] 夏彪. 三维多向编织复合材料的力学与热物理性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.  
XIA Biao. Investigation on the mechanical and thermal-physical properties of the three-dimensional and multi-directional braided composites[D]. Beijing: Beihang University, 2013(in Chinese).
- [19] KUSHCH V I, SHMEGERA S V, MISHNAEVSKY L. Meso cell model of fiber reinforced composite: Interface stress statistics and debonding paths[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(9): 2758-2784.
- [20] CHEN S, ISAKSSON P. A note on the defect sensitivity of brittle solid foams[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, El-  
sevier, 2019, 206: 541-550.
- [21] 李贺颖, 王艳慧. 贫困县村级居民点空间分布离散度与农村居民纯收入关联格局分析[J]. *地理研究*, 2014, 33(9): 1617-1628.  
LI Heying, WANG Yanhui. Discrete degree on village settlement's spatial distribution and its correlation with net income of rural residents in poverty county[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(9): 1617-1628(in Chinese).
- [22] ASTM. Standard test method for monotonic tensile behavior of continuous fiber-reinforced advanced ceramics with solid rectangular cross-section test specimens at ambient temperature: ASTM Standard C 1275-00[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2000.
- [23] XIA Z, ZHOU C, YONG Q, et al. On selection of repeated unit cell model and application of unified periodic boundary conditions in micro-mechanical analysis of composites[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(2): 266-278.
- [24] LINDE P, PLEITNER J, BOER D H, et al. Modelling and simulation of fibre metal laminates[C]. ABAQUS Users' Conference, 2004: 421-439.