

基于 Python-Abaqus 复合材料代表性 体积元的数值模型

章继峰¹ 王振清¹ 周健生¹ 张博明²

(1 哈尔滨工程大学航天工程系, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工业大学复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

文 摘 代表性体积元法是研究复合材料这类具有多尺度、离散分布多相体的有效手段。本文考虑复合材料增强体几何离散分布特征, 通过引入增强体的离散分布函数, 应用 Python 语言实现了 Abaqus 的二次开发, 建立了长纤维增强结构复合材料代表性体积元的参数化自动生成方法。结果表明: (1) 应用 Python-Abaqus 建立复合材料 RVE 随机特征模型是可行的; (2) 该方法生成的模型纤维体积分数达 65%, 满足一般工艺的要求; (3) 应用移动窗法给出代表性体积元的尺寸, 体积元内应力的分布特征与一般合理预计是相符的。该研究为多尺度复合材料微结构提供了一种分析方法, 可应用于复合材料微结构增效设计。

关键词 代表性体积元, Python-Abaqus, 二次开发, 复合材料

Numerical Modeling of Composite Representative Volume Element (RVE) Based on Python-Abaqus

Zhang Jifeng¹ Wang Zhenqing¹ Zhou Jiansheng¹ Zhang Boming²

(1 Department of Aerospace Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(2 Center for Composites & Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Representative volume element (RVE) is an effective method for analyzing composites with characters of multi-scale and random distribution. In this paper, Geometrical random characters of reinforced fibers were considered, by introducing fibers' random distribution function and secondary development of Abaqus based on Python, a method was advanced to auto-generate composite RVE model without artificial labor. Several conclusions are drawn as follows: (1) The method is feasible to build RVE random model with Python-Abaqus. (2) The fiber volume fraction can reach 65%. (3) The size of RVE obtained by moving case method is reasonable as commonly intended. The studies provide a method to analyze composite multi-scale microstructures and can be used in the design of composite microstructures.

Key words Representative volume element, Python-Abaqus, Secondary development, Composites

0 前言

具有高比强、高比模以及良好的损伤容限等优良特征的复合材料一直是航空、航天结构材料的首选, 在船舶、汽车等工业中广泛应用, 然而, 复合材料内部构造复杂, 多相(基体相、增强相、界面相)夹杂, 分析尺度横跨微观、细观和宏观, 这些给问题的求解带来困难。研究人员针对复合材料提出了多种的多尺度

分析方法^[1~4], 其中, 代表性体积元法具有思路清晰、算法简洁等特点, 是一项分析复合材料多尺度问题的有效方法, 也是近年来复合材料微细观力学的研究热点之一^[5~6]。但传统的具有人工分布特征的代表性体积元阵列不能真正代表复合材料的微细观构造, 因为一方面复合材料本身的内部构造是离散随机分布的, 与阵列结构形态不一致, 不能模拟纤维分布的某

收稿日期: 2008-10-21

基金项目: 中国博士后基金; 黑龙江博士后基金

作者简介: 章继峰, 1976 年生, 博士, 主要从事复合材料微结构分析与设计。E-mail: jfzhang@hrbeu.edu.cn

些特征,如树脂富余区等特征;其次,这类阵列模型应用于高梯度特征区域,如自由边、界面、局部不连续区域、局部损伤点时,在预报某些性能,如剪切等性能时误差较大。

此外,具有均匀阵列分布代表性体积元尽管在预报材料的诸如抗拉强度与模量时效果较好,但无法预报诸如裂纹走向和损伤的渐进扩展^[7]。考虑材料微结构随机分布特征,采用不规则的代表性体积元代替规则的体积元单胞,建立复合材料“拟真实”代表性体积元模型是解决以上问题的必然手段。Sun 等人^[8]就应用一个随机分布的代表性体积单元预报了颗粒增强复合材料模量、泊松比等特征,与实验比较取得比阵列分布模型更一致的结果。Pan 等人^[9]应用随机序列吸附算法生成了具有复杂几何随机分布特征的短纤维复合材料代表性体积单元,并对体积元内纤维交叉、接触等问题进行了研究。本文利用 Python 脚本语言在 Abaqus 二次开发中的强大功能,应用 Python 实现了 Abaqus 的二次开发,通过引入纤维增强体的分布函数,针对长纤维增强结构复合材料建立其代表性体积元的参数化自动生成方法,通过算例讨论了该方法所生成模型的纤维体积分数极限值,并确定了长纤维增强复合材料代表性体积元的尺寸,在此基础上还研究了体积元内离散缺陷对复合材料应力分布的影响。

1 Python - Abaqus 二次开发的基本原理

Abaqus 软件是国际上公认最好的 CAE 大型通用分析软件之一,以精于分析复杂问题和非线性问题见长,采用部件—装配件的建模方式,尤其适用于系统级问题的分析。Python 是一种面向对象的脚本语言,支持诸如多态、操作符重载、多重继承等高级语言的概念,因此具有开源、自由等特征,还具有可读性强、便于学习和快速编程的特点,对于既要求 GUI 实现,又要求采用复杂例程、同时强调面向对象编程技术的项目具有明显的优势。Abaqus 有限元软件通过集成脚本语言 Python 向二次开发者提供了很多的库函数,并由于 Abaqus 自带 Python 解释器可对 Python 程序进行编译,通过调用这些库函数绕过 Abaqus/CAE 界面,直接操纵 Abaqus 的内核,实现建模、网格划分、材料属性、提交作业、后处理等功能,然后生成 inp 输入文件,提交给分析器进行有限元计算,流程如图 1 所示。

在应用 Python 脚本语言对 Abaqus 的二次开发时,可以直接实现 Abaqus 的功能扩展,自由修改 Abaqus 在分析过程中的内核程序,设计自己想要的分析界面,给一些特殊问题的分析带来了便利。图 1 为 Abaqus 软件的分析流程。

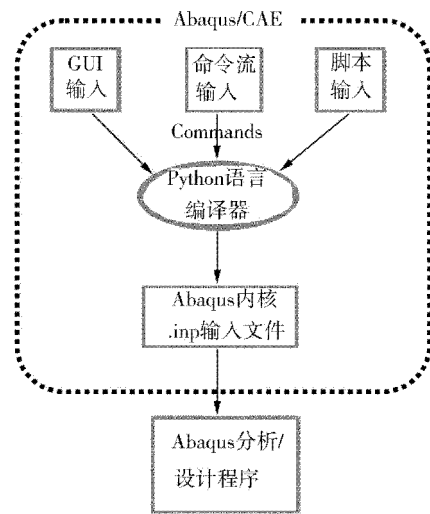


图 1 Abaqus 分析流程

Fig. 1 Analyzing flow of Abaqus software

2 纤维增强复合材料代表性体积元 (RVE) 生成算法

2.1 RVE

复合材料的增强相在基体内的分布是具有一定规律的,即具有统计学上的周期性。对此研究人员为了研究方便提出了复合材料细观结构具有周期性的假设,通过隔离出代表性体积元——RVE,将整个复合材料体看成是由 RVE 周期性排列构成。例如,对于 CF/PPE 长纤维假设在基体内呈方形排列或是正六角形矩阵排列的,由 RVE 周期性正六边形扩展构成的复合材料体,当承受均匀的远场外载荷时,因为所有的 RVE 单元都是相同的,它们表现出相似的应力应变场,于是可以用一个 RVE 单元上的应力应变场来反映复合材料的细观应力应变场,也就可以在一个 RVE 上运用细观力学有限元法,通过对 RVE 力学响应的计算,求得复合材料的等效弹性模量及其力学性能。

鉴于规则排列的矩阵单胞在研究复合材料性能存在的局限,本文的代表性体积单元考虑复合材料增强体几何离散分布特征,通过建立具有离散随机分布的代表性体积单元(包含一束增强纤维),以这种“拟真实”的代表性体积单元的数值模型来研究复合材料的力学性能。

2.2 生成算法

具有随机特征的代表性体积单元 RVE 在 Python - Abaqus 环境下生成算法如下(图 2):

import random 函数, Abaqus

(1) Start: getinputs 分布函数参量

(2) 生成所需随机参量,第一次生成 ($I=1$) 直接生成模型

(3) 比较 $\text{Center}(I)$ 与 $\text{Center}(1) \dots \text{Center}(i) \dots \text{Center}(I)$ 的距离

If $\text{Dis}(\text{Center}(I), \text{Center}(i)) > R(I) + R(i)$ and $R(i) \neq 0$

Abaqus 生成 CAE 模型. inp else $R(I) = 0$

(4) 判断纤维体积分数 ρ 是否达到设定值 ρ_{def} , 如达到预定值, 循环终止, 启动分析模块

(5) 若达到最大循环次数, 退出 While 循环, 循环终止, 启动分析模块

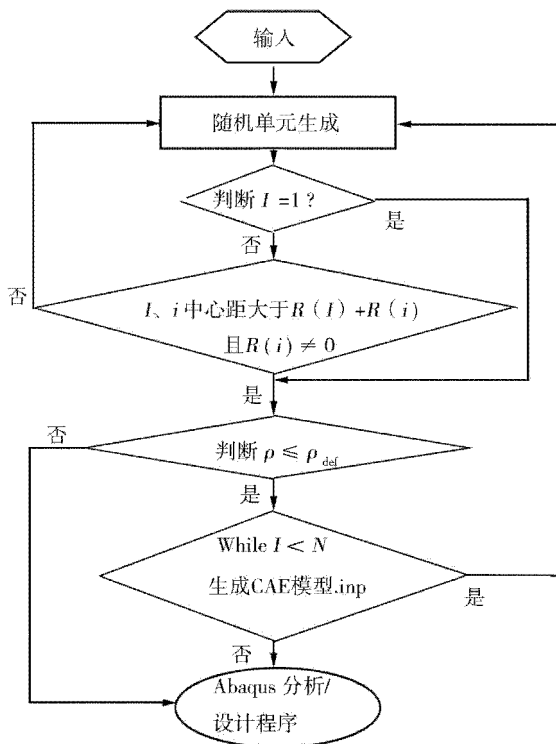


图2 具有随机特征的代表性体积单元生成算法流程

Fig.2 Generating arithmetic flows of RVE with random characters

3 算例与讨论

基于以上算法, 应用 Python 脚本语言对 Abaqus 进行二次开发, 所开发的程序界面如图 3 所示。根据所输入的参数分布类型和分布参数, 可对椭圆形纤维截面和圆形纤维截面的形态以及分布进行参数化自动生成。

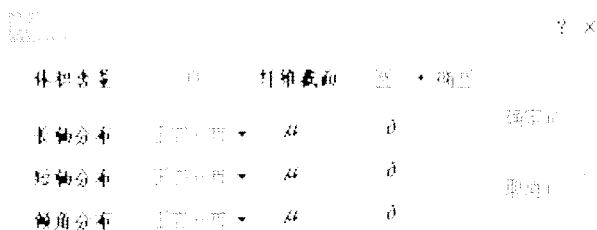


图3 二次开发程序界面

Fig.3 Program interface of secondary development

本文算例中, 分别生成了一组圆形(半径均值为 4.5, 方差为 1), 一组椭圆(长、短轴均值为 4.5, 方差为 1), 尺寸分布类型如图中所示, 纤维随机均匀地分布在一个 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 域内, 模型中的材料属性参数如下。

纤维: $E_{11} = 230 \text{ GPa}, E_{22} = 15 \text{ GPa}, G_{12} = 15 \text{ GPa}, \nu_{12} = 0.2$ 。

树脂: $E_{11} = E_{22} = 4.5 \text{ GPa}, G_{12} = 1.67 \text{ GPa}, \nu_{12} = 0.35$ 。

3.1 纤维体积分数

结构复合材料中, 纤维为承载相, 承受几乎所有的拉伸载荷, 因此纤维的体积分数在某种意义上决定着复合材料强度、刚度等特征。不同的工艺方法有着不同的纤维体积分数的域值, 表 1 给出了常规工艺方法中所能获得的最大纤维体积分数, 除干丝缠绕工艺外, 一般工艺方法的纤维体积分数都不超过 65%。

表 1 常规工艺下的纤维体积分数

Tab.1 Fiber volume fractions of common tooling

工艺	最大纤维体积分数/%
手工铺层	30 ~ 50
模压工艺	55
模塑工艺(RTM)	30 ~ 50
拉挤工艺	65
缠绕工艺	60 ~ 75

算例中对本文所提出自动生成模型中的纤维体积分数的域值范围进行了研究, 图 4 中为圆形分布截面的一组纤维体积分数, 可以看出, 随着生成次数的增加所生成的纤维体积分数呈收敛趋势, 循环次数 N 达 10 000 时, 所生成的模型中纤维体积分数达到 65%, 能够满足一般工艺复合材料的数值建模。

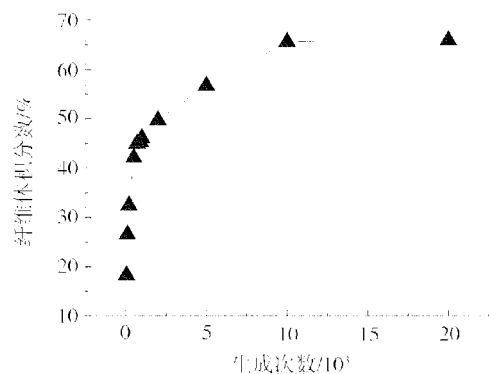
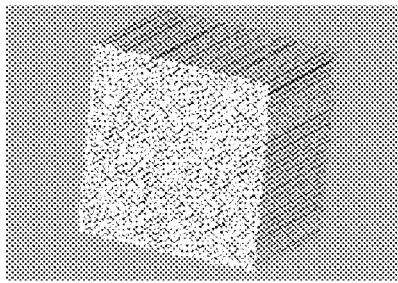


图4 生成的纤维体积分数与生成次数的关系
Fig.4 Relation between fiber volume fraction and repeating generating times

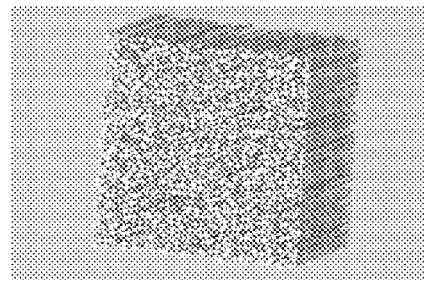
图 5 中给出一组圆形截面纤维分布图和一组椭圆形截面纤维分布图, 由于本文算法中, 椭圆分布采

用长轴占位算法生成,生成模型的最大纤维体积分数要低于圆形纤维截面的,按照算例中的分布参数应用

本文的自动生成算法所能获得的最大纤维体积分数为47.7%,如图5(b)所示。



(a) 圆形截面(65.5%)



(b) 椭圆形截面(47.7%)

图5 生成的纤维分布几何模型

Fig.5 Generated geometry models of fibers random distribution

3.2 确定 RVE 尺寸

对于具有周期分布或规则阵列体系,RVE 的确定是很明确的,就是周期特征的单胞体。对于随机分布体系,RVE 的确定是要经过印证的,取得过大就会增大计算量,甚至造成计算的无法进行,范围取得过小就会有失代表性。

为了确定具有随机分布特征的代表性体积元大小,本文提出了移动框函数法,即在已生成的纤维非规则分布区设置一个移动的矩形框,不断移动矩形框研究框内微结构力学性能的变异性,并逐步改变移动矩形框的大小,研究矩形框大小与框内微结构力学性能变异性的关系,找到一个可接受的矩形框尺寸,使其在满足框内性能变异性的条件下使得移动框的面积最小,如图6所示。

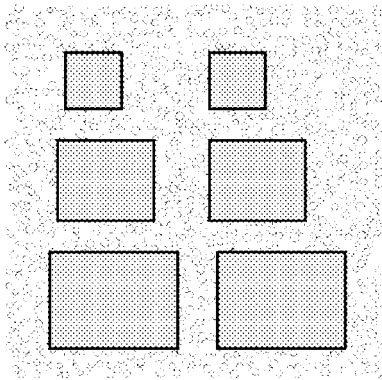


图6 移动框法示意图

Fig.6 Sketch of moving case method

算例中以移动框内纤维/树脂复合体系的纵向拉伸模量为评价标准,不断改变移动框的大小(边长分别为0.8、0.6、0.4、0.3、0.2 cm)并不断改变移动框的位置,计算框内纤维/树脂复合体的纵向拉伸模量,得出图7,可以看出,移动框的边长为0.3和0.2 cm时,框内复合体力学性能的变异性较大,当移动框的边长大于0.4 cm时,这种变异趋于平缓,在可接受范

围内,选取0.4 cm×0.4 cm纤维分布区作为纤维/树脂复合材料代表性单元进行研究。

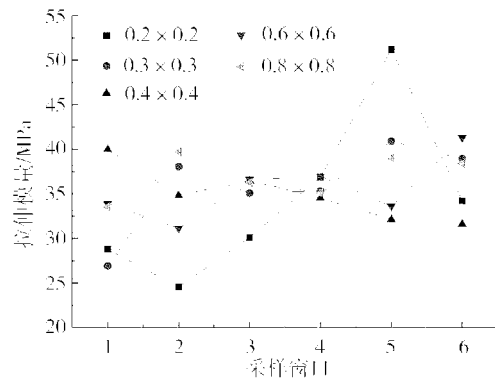


图7 移动框尺寸对性能预报的影响

Fig.7 Effect of size of moving case on performance prediction

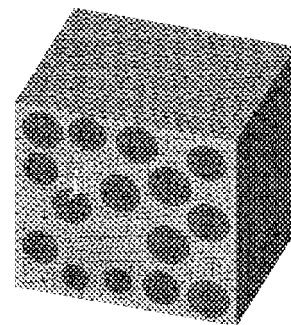


图8 0.4 cm×0.4 cm RVE 的有限元模型

Fig.8 Finite element model of 0.4 cm×0.4 cm RVE

3.3 预损伤的影响

取截面尺寸为0.4 cm×0.4 cm的代表性体积单元如图8所示,其内部预设有一纤维纵向的损伤,对其在承受拉伸载荷下的受力状况进行了分析,图9为在纵向拉伸载荷作用下,带缺陷纤维纵向剖面上的Mises 应力分布云图,可以看出在缺陷处 Mises 应力

是很小的,而沿着损伤纤维纵向缺陷的应力在逐渐增大,由于纤维上的应力是通过界面上的剪切应力传递的,这种现象是纤维和树脂间剪力传递载荷的结果,而树脂上的最大应力区是由剪应力产生的,因而该处也是潜在的脱粘点。图 10 为带损伤纤维附近区域增强纤维上的应力分布云图,可以看出纤维在纵向发生损伤后,承载作用明显降低,在损伤的周围形成高应力区,并显著影响周围纤维上的应力分布,在复合材料的渐进损伤过程中也是一个潜在的初始失效区。

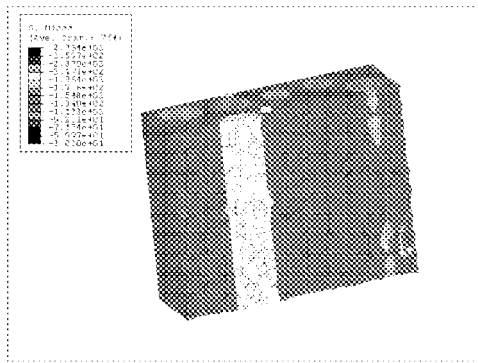


图 9 带损伤纤维纵向剖面上 Mises 应力分布
Fig. 9 Stress distributions on longitudinal section with damage

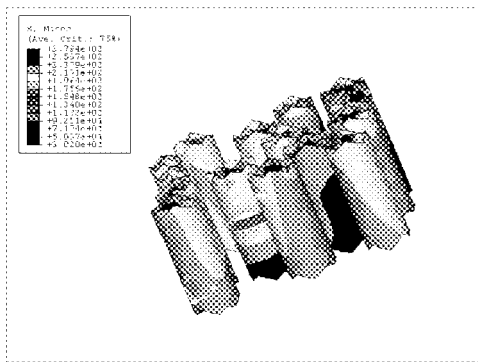


图 10 损伤附近区域纤维上的应力分布
Fig. 10 Stress distributions on fibers nearby to damage

4 结论

应用 Python 语言实现 Abaqus 的二次开发,建立了纤维增强复合材料代表性体积元的参数化自动生成方法,并通过算例对该方法的可行性进行了验证。得出如下结论:(1)应用 Python - Abaqus 建立复合材料 RVE 随机特征模型是可行的;(2)该方法生成的模型纤维体积分数达 65%,满足绝大多数工艺的要求;(3)应用移动框法给出代表性体积元的尺寸,体积元内应力的分布特征与一般合理预计是相符的。

参考文献

- 1 Shek F K. Multiscale analysis of composite materials and structures. *Comput. Sci. Technol.*, 2000;60:2 547 ~ 2 556
- 2 Raghavan P, Ghosh S. Concurrent multi-scale analysis of elastic composites by a multi-level computational model. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2004;193:497 ~ 538
- 3 张洪武,余志兵,王鲲鹏. 复合材料弹塑性多尺度分析模型与算法. *固体力学学报*, 2007;28(1):7 ~ 12
- 4 宋士仓,崔俊芝,刘红生. 复合材料稳态热传导问题多尺度计算的一个数学模型. *应用数学*, 2005;18(4):560 ~ 566
- 5 Shan Zhaohui, Gokhale A M. Representative volume element for non-uniform micro-structure. *Computational Materials Science*, 2002;24: 361 ~ 379
- 6 Aghdam M M, Dezhsetan A. Micromechanics based analysis of randomly distributed fiber reinforced composites using simplified unit cell model. *Composite Structure*, 2005;71: 327 ~ 332
- 7 Trias D, Costa J et al. A two-scale method for matrix cracking probability in fibre-reinforced composite based on a statistical representative volume element. *Composites Science and Technology*, 2006;66:1 766 ~ 1 777
- 8 Sun Changjie, Saffari Payman et al. Finite element analysis of elastic property bounds of a composite with randomly distributed particles. *Composites: Part A*, 2007;38:80 ~ 86
- 9 Pan Y et al. Analysis of 3D random chopped fiber reinforced composites using FEM and random sequential adsorption. *Comput. Mater. Sci.*, 2008;43(3):450 ~ 461

(编辑 李洪泉)