

DOI: 10.7511/jslx20200729003

利用结构基因法研究非线性周期性板结构的等效力学性能

贾贻然, 韩灵芝, 雷金成, 刘子顺*

(西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 国际应用力学中心, 西安 710049)

摘要:非线性周期性板结构是一类在智能复合材料领域具有巨大应用潜力的结构, 因其构成材料的非线性特性, 以及结构中经常包含增强纤维、肋板和空洞等复杂微结构导致的材料几何非线性, 利用常规的有限元方法进行建模和分析较为困难。本文提出了一种结构基因法, 通过提取非线性周期性板结构的最小模型单元作为其结构基因, 将异质周期性板结构等效为均质板结构, 便捷地求解了非线性周期性板结构的微观力学性能和整体等效力学性能。算例表明, 结构基因方法可用来分析复杂非线性复合材料结构问题, 计算结果精度足够, 为复合材料微观力学研究提供了有价值的参考。

关键词:周期性复合材料板; 等效力学性能; 结构基因

中图分类号: O342; O242.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2021)05-0631-07

1 引言

近年来随着工程技术的飞速发展, 人们对结构的比强度^[1]、比刚度及抗疲劳性^[2]提出了更高的要求, 研究人员通过选取不同的原材料或者合理的结构来设计力学性能更好的复合材料。如橡胶类的超弹性材料^[3], 具有良好的柔软性、延展性^[4]和高弹性^[5,6]等优异性能, 广泛应用于复合材料的设计中^[7]。复合材料的内部结构与其力学性能关系密切, 当结构特征尺寸远大于微观尺度时, 可以在宏观尺度上使用均质材料代替非均质材料, 通过微观尺度求解实际模型的等效力学性能是双尺度研究的关键问题。采用结构基因法求解实际周期性结构等效力学性能的优势在于通过在微观尺度上分析各相材料, 在结构基因和实际模型的等效均质模型之间进行交互, 可以减少大量建模时间和计算时间。

求解等效力学性能的方法是基于均匀化的思想发展而来, 即寻找一种均匀材料代替原来的非均匀材料。目前, 学者们已经提出了多种求解复合材料等效力学性能的模式及方法, 主要包括代表性体积单元法(RVE)^[8,9]、间接均匀化法^[10,11]、二尺度展开法^[12,13]及多级别有限元法(FE²)^[14,15]等。本

文方法主要是基于代表性体积单元法(RVE)和多级别有限元法(FE²)发展而来的。(1) RVE法的主要思想为直接平均思想, 通过在周期性结构中提取代表性体积单元, 施加拉伸和剪切等加载, 得到不同加载情况下的应力场和应变场, 场量对体积进行直接平均计算得出等效应力和等效应变, 通过两者之间的关系求解出均质板的等效刚度矩阵。(2) FE²法求解的中心思想为在宏观尺度上每一个高斯积分点处关联一个微观模型。通过宏观模型求解微观模型时, 将高斯积分点处的应变作为边界条件, 研究微观模型的局部变形。从微观尺度向宏观尺度的转变是通过微观模型的应力场和应变场均匀化实现的。

本文通过将 RVE 法和 FE²法结合起来, 可以预测非线性周期性复合板结构的等效力学性能, 概念清晰, 易于理解。本文将这种方法命名为结构基因法, 就像将生物基因定义为控制生物生长发育的基本单位, 把基因一词扩展到非生物学领域, 将周期性结构中包含整体结构中的所有组成成分和形状的基本构件块称为结构基因^[16,17]。

2 计算理论

在微观力学的研究中, 实际周期性板结构的研究可以分为对等效二维均质板结构和多相微观结构两部分的研究。两尺度分离如图 1 所示, 域 Ω 表示宏观尺度模型, 域 ω 表示结构基因。利用微观

收稿日期: 2020-07-29; 修改稿收到日期: 2020-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金(11820101001)资助项目.

作者简介: 刘子顺* (1963-), 男, 博士, 教授

(E-mail: zishunliu@mail.xjtu.edu.cn).

结构的等效力学行为来表示宏观结构中相对应连续点的行为,这就是多尺度问题的中心思想。

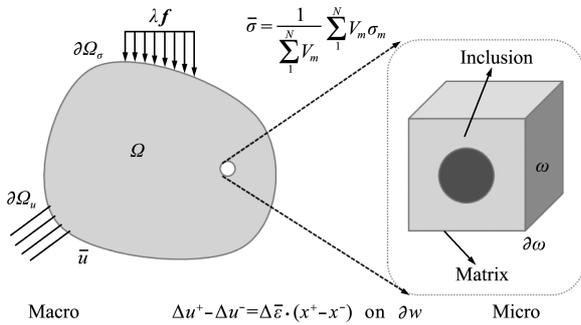


图1 周期性异质复合材料宏观模型和微观模型的概念
Fig. 1 Basic schematic diagram of macroscopic and microscopic of a periodic heterogeneous composite

可以看出,当前构型下域 $\Omega \in R^D$ 描述宏观结构,外边界通过 $\partial\Omega$ 表示, $\partial\Omega_\sigma$ 和 $\partial\Omega_u$ 分别表示宏观结构上的力和位移边界,域 ω 描述微观结构,外边界通过 $\partial\omega$ 表示。之后的阐述主要基于更新拉格朗日公式,以描述结构的非线性大变形问题。为了区分宏观量和微观量,使用 $\langle \cdot \rangle$ 表示宏观量。忽略体力,平衡方程可表示为

$$\nabla \cdot \bar{\sigma}(\bar{x}) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

式中 $\bar{\sigma}(\bar{x})$ 为当前构型下宏观模型中点 \bar{x} 的柯西应力张量。

基于更新的拉格朗日公式,在分析中需要不断修改参考构型,当前构型 $(t+dt)$ 是基于参考构型 (t) 计算得到的。在商业有限元软件 ABAQUS 中,通常使用应变率的形式定义材料的本构关系,应变率计算可表示为

$$\bar{D} = \frac{1}{2} (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) \quad (2)$$

式中 \bar{v} 为速度场。

在边界 $\partial\Omega_u$ (狄利克雷边界) 上的边界条件可以通过式(3)定义。

$$\bar{u}(\bar{x}) = \hat{u}(\bar{x}) \quad \text{on } \partial\Omega_u \quad (3)$$

在边界 $\partial\Omega_q$ (纽曼边界) 上的边界条件可以通过式(4)定义,

$$\bar{\sigma} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{F} \quad \text{on } \partial\Omega_q \quad (4)$$

式中 \hat{u} 为规定位移, \mathbf{N} 为边界 $\partial\Omega$ 的单位外法线向量, \mathbf{F} 为规定载荷。

虚功可以通过式(5)表达,

$$\int_{\Omega} \bar{\sigma} : \delta \bar{D} \, d\Omega = \lambda \int_{\partial\Omega_q} \mathbf{F} : \delta \bar{v} \, d\Gamma \quad (5)$$

式中 $:$ 表示张量双点积运算, δ 分别表示微小应变和微小位移, λ 为拉格朗日乘子,一般等于1。

可认为式(5)是与平衡方程等效的积分弱形式。

在等效均质模型中,由于复合材料包含多种组分且比例及结构不同,所以宏观尺度下 $\bar{\sigma}$ 和 \bar{D} 之间的本构关系是未知的。宏观应力张量 $\bar{\sigma}$ 、线性本构下的刚度矩阵 $\bar{\mathbf{C}}$ 及非线性本构下的剪切刚度矩阵 $\bar{\mathbf{C}}_t$ 需要在微观模型中计算。

在等效均质模型中,特殊点 \bar{x} 处的等效应力 $\bar{\sigma}$ 和等效应变 $\bar{\epsilon}$ 是基于直接平均理论计算得到的。宏观尺度下的平均应力应变和微观尺度下模型的应力应变关系可表示为

$$\bar{\sigma} = \langle \sigma(x) \rangle = \frac{1}{|\omega|} \int_{\omega} \sigma \, d\omega = \frac{1}{\sum_1^N V_m} \sum_1^N V_m \sigma_m \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon} = \langle \epsilon(x) \rangle = \frac{1}{|\omega|} \int_{\omega} \epsilon \, d\omega = \frac{1}{\sum_1^N V_m} \sum_1^N V_m \epsilon_m \quad (7)$$

式中 N 为结构基因中的单元总数, V_m 是结构基因中第 m 个单元的体积, σ_m 是结构基因中第 m 个单元的应力, ϵ_m 是结构基因中第 m 个单元的应变。平均应力可以转换为等效均质模型中高斯积分点 \bar{x} 处的应力,平均应变作为结构基因的边界条件来模拟点 \bar{x} 处的变形。

在本文的假设中,如果结构基因存在非线性弹性相,则模型整体的应力应变关系为非线性,所以可以将宏观模型等效为非线性弹性模型,材料行为可表示为

$$\Delta \sigma = \bar{\mathbf{C}}_t \Delta \epsilon \quad (8)$$

式中 Δ 为加载过程中应力应变的微小增量, $\bar{\mathbf{C}}_t$ 为宏观模型的弹性常数矩阵, ϵ 为结构基因的应变。

通过施加周期性边界条件假定结构基因处于整体模型中。施加的周期性边界条件需要使得相邻结构基因满足下列连续性边界条件,一为相邻结构基因连续且产生变形后不可分离,二为结构基因相对面或相对边上相对应的节点变形的位移相同。满足上述两个边界条件才会假定结构基因位于一个完整的周期性连续体中。在结构基因边界上引入的周期性边界条件可表示为

$$\Delta \mathbf{u}^+ - \Delta \mathbf{u}^- = \Delta \bar{\epsilon} (x^+ - x^-) = \Delta \bar{\epsilon} \Delta x \quad (9)$$

式中 \mathbf{u} 为结构基因的位移向量, $\bar{\epsilon}$ 为宏观尺度上高斯积分点处的应变张量,上标+和-分别指代结构基因相对面上位置相同的相对节点。如在 x 向相对面上一对节点的 y 和 z 坐标相同。

在双尺度分析中,非线性问题的结构基因可以通过式(10)迭代的形式表达。

$$\begin{cases} \int_{\omega} \Delta \sigma \cdot \delta \epsilon d \omega = 0 \\ \Delta \sigma = \bar{C}_i \Delta \epsilon \\ \Delta u^+ - \Delta u^- = \Delta \bar{\epsilon}(x^+ - x^-) = \Delta \bar{\epsilon} \Delta x \end{cases} \quad (10)$$

具体计算非线性等效切线刚度 \bar{C}_i 的流程及有限元实现在第3节将会详细介绍。

该模型中包含两个基本假设。

假设1 通过微观力学分析时,在 $\xi = x/X \ll 1$ 时有效 (x 为微观模型长度, X 为宏观模型长度)。通过微观尺度求解的等效力学性能独立于宏观尺度下的加载情况及几何形状,是材料的内在属性。

假设2 如果在微观结构中存在非线性材料相,该复合材料为非线性周期性复合材料,不可以通过简单的等效刚度矩阵或者等效柔度矩阵来描述其等效力学性能^[18,19]。

3 有限元求解

在商业有限元软件 ABAQUS 中,有很多种方法来描述所使用的材料属性,对于超弹性材料来说,本文可以直接赋予本构模型参数,还可以编写 UMAT 或输入通过实验获取的一系列名义应力和名义应变数据。在本文的计算中,将 ABAQUS 假定为试验平台,对结构基因进行单轴拉伸试验,通过平均化的思想求解加载过程中每一个分析步下的名义应力和名义应变数据^[20]。通过结构基因法求解非线性复合周期性板结构等效力学性能的具体流程如图2所示。

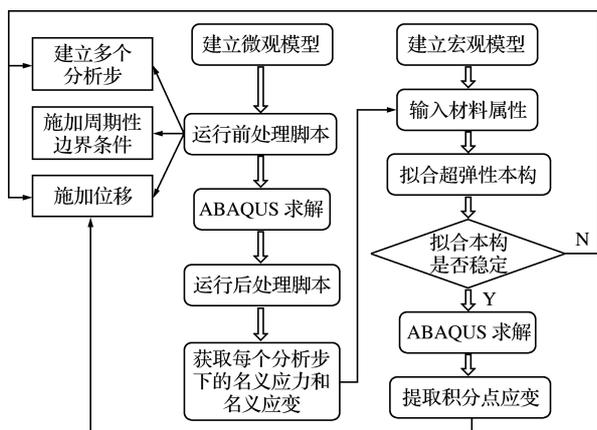


图2 求解等效力学性能的流程

Fig. 2 Flowchart for processing equivalent mechanical properties

求解流程主要是基于商业软件 ABAQUS 及二次开发脚本 Python 实现的,假设结构基因中各相材料均为各向同性材料,且在 x 向和 y 向分布相同,则将结构基因沿 x 向和 y 向周期性排布之后构

成的周期性复合板结构可以在宏观尺度上等效为各向同性均质板。在 ABAQUS 中,可以将试验名义应力和名义应变数据拟合超弹性材料本构模型,本文的方法充分利用该功能,将 ABAQUS 作为黑箱,拟合出稳定又精确的应变能函数。

具体操作步骤如下。

(1) 在 ABAQUS 中建立结构基因部件,为结构基因中每一相赋予材料属性并合理划分网格。

(2) 运行二次开发语言 Python 编写的前处理脚本,从流程图可以看出,主要包括施加周期性边界条件、施加位移及约束刚体位移。周期性边界条件的施加主要为在周期性排布方向上面和边的每一个节点保存为独立的集,分别通过约束方程施加多点约束。在模拟单轴拉伸试验时,需要在 ABAQUS 中建立多个分析步,并在每一个分析步设置合理的位移值,以保证总的拉伸值符合实际模型的实际变形。在 ABAQUS 中对结构基因进行单轴拉伸时,还需要约束其刚体位移。

(3) 在 ABAQUS 中进行求解,处理非线性问题时,容易出现不收敛的情况,所以需要监控计算时的分析步数量。运行二次开发语言 Python 编写的后处理脚本,主要通过处理计算结果文件,得出每一个分析步下的名义应力和名义应变数据。

(4) 建立与实际模型尺寸相当的均质板模型,将上一步得出的一系列名义应力和名义应变数据作为材料属性输入到模型中,并通过这些数据拟合出合理的本构模型。ABAQUS 可以自动评估拟合出的本构是否稳定,如果超弹性模型不稳定,可以根据实际模型的变形选择另一种本构模型或者修改第二步设置的分析步数量和每一个分析步下的拉伸值,来获取更多的名义应变和名义应力数据,在 ABAQUS 中重新评估拟合出的本构模型是否稳定。

(5) 在宏观均质板中添加载荷,研究模型的宏观响应。如果需要研究局部问题,可以将高斯积分点处的应变作为边界条件赋予微观模型,来观察局部变形。

在通过结构基因法研究两尺度交互问题时,有几个注意事项。

(1) 单轴拉伸时结构基因的收敛问题。为了获取更多的数据,可以通过修改网格、设置不同的求解器等方法来改善模型的收敛问题。

(2) 验证通过名义应力和名义应变数据拟合的本构模型稳定性问题。通过增加分析步的量及

降低每一个分析步设置的位移量来保证获取足够的样本数据,测试拟合出稳定的本构方程。

4 数值计算模型

4.1 实际模型与等效模型对比

考虑一种周期性排布的复合板结构,基体是普通的超弹性橡胶材料,增强体为线弹性材料。本文已经提出一个假设,如果结构基因中存在非线性相,整体结构可视为非线性结构。基体材料选用的模型为 Mooney-Rivlin 模型,本构方程如式(11)所示,系数值为 $C_{10}=3.2, C_{01}=0.8, D_1=0$, 增强体为线弹性材料,材料属性为 $E=68.3 \text{ MPa}, \mu=0.3$ 。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (11)$$

本算例中,实际研究的周期性板结构如图3所示,结构基因的尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的立方块,其中增强体的半径为 0.3 mm ,增强体的体积率为 0.283 。

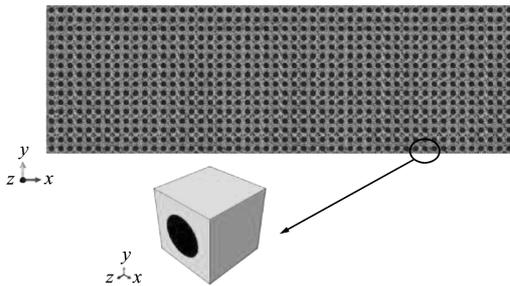


图3 周期性复合板结构及其结构基因

Fig. 3 Periodic composite plates and the corresponding structural genome

首先将结构基因和立方橡胶块在 ABAQUS 中模拟单轴拉伸实验,设定多个分析步,获取每个分析步下的名义应力和名义应变数据。因为存在超弹性橡胶材料,为了避免不收敛现象并实时监控计算进程,可以把每一个分析步下的位移增量值设置为较小的值。研究结构基因及立方橡胶块的原因为观察两者之间名义应力及名义应变曲线变化趋势是否一致,从而初步判断结构基因法对于非线性问题计算的准确性。

图4分别为模拟单轴拉伸实验下,获取的几种不同情况下的名义应力和名义应变数据的拟合曲线。在计算非线性问题时,非常容易出现不收敛的现象,当划分网格数量较少时,拉伸到一定长度就会因为计算不收敛而中断计算,获取的名义应力和名义应变数据较少。当网格划分较合理时,拉伸长度较大,获取的数据更多。在本节中,同时也对

$1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的均质橡胶立方块进行单轴拉伸。将三种情况下的计算结果绘制于图4,可以看出,超弹性基体材料和线弹性增强体材料所构成复合材料的曲线变化趋势和均质超弹性材料的曲线变化趋势一致。

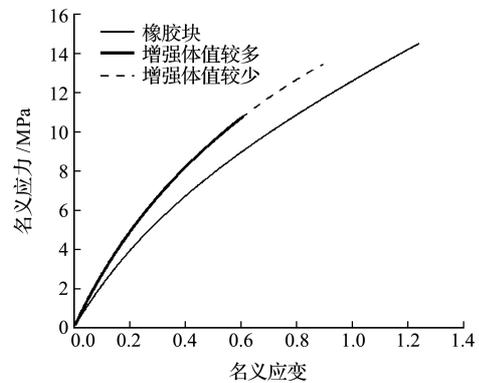


图4 模拟单轴拉伸实验下的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve under uniaxial tensile experiment

在 ABAQUS 中评估上述数据,可以发现通过这些数据拟合出的本构模型是较为稳定的。将上述求解出的本构模型赋予等效均质板作为其材料属性,通过三点弯曲实验对实际周期性板结构和拟合出的不同等效均质板进行机械性能的研究,对实际计算结果和等效计算结果进行对比,分析结构基因法求解的准确性。等效理论选取的本构模型主要为 Mooney-Rivlin 模型、Neo Hookean 模型、Ogden 模型和 Yeoh 模型。本文分别列出实际模型和上述三种等效模型的计算结果,并进行对比分析,主要提取计算结果为三点弯曲实验下实际板和等效均质板的最大应力。图5为模拟三点弯曲实验下实际模型位移云图,图6为模拟三点弯曲实验下等效均质模型位移云图。

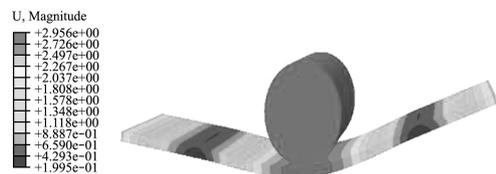


图5 实际模型的位移云图

Fig. 5 Displacement contour of actual structure



图6 等效均质模型的位移云图

Fig. 6 Displacement contour of equivalent homogeneous structure

图7分别给出了实际周期性板结构和等效的不同本构模型均质板在受到不同载荷时三点弯曲实验下的最大应力。通过分析可知,随着载荷的增大,板最大应力也逐渐增大,在变形较大时,实际模型和等效均质模型的计算结果差值略大,但在可接受的范围内。通过将四种本构模型进行对比,可以发现 Neo Hooken 模型和 Ogden 模型的计算结果更为准确,Mooney-Rivlin 模型误差略大,是因为 Mooney-Rivlin 模型只考虑线性部分的应变能量。在变形较大(应变>0.45),且只有单轴拉伸试验数据时,选择多项式模型和 Ogden 模型计算更易收敛,计算效率和精度更高。通过计算,不同载荷下实际周期性板结构和等效均质板结构上最大应力的差值均低于10%,证明通过结构基因法求解非线性周期性板结构等效力学性能较为精确。

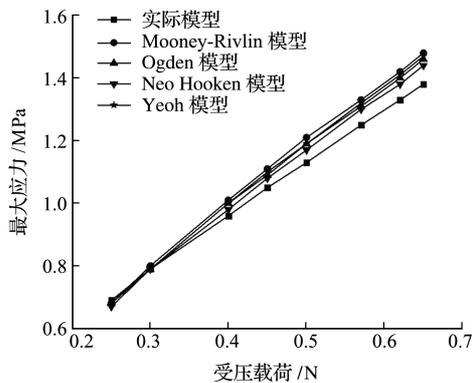


图7 不同本构模型中受压载荷与板上最大应力曲线
Fig. 7 Curves of compressive load and maximum stress on the plate in different constitutive models

4.2 实验模型与等效模型对比

为了进一步验证结构基因法的合理性,对不同体积分数的球形颗粒增强超弹性橡胶复合材料进行单轴拉伸实验,与实验值和理论值进行对比。结构基因是中心为球形的立方体块,结构基因的尺寸为 1 mm×1 mm×1 mm 的立方体,基体材料选用 Yeoh 本构模型,本构方程如式(12)所示,系数采用文献[21]纯橡胶实验数据拟合得到的参数,具体值为 $C_{10}=0.2313, C_{20}=-0.004686, C_{30}=0.0003787$, 增强体颗粒为线弹性材料,材料参数为 $E=2100\text{ MPa}, \mu=0.3$ 。体积分数分别为 1.69%, 3.33% 和 6.44%。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (12)$$

对三个不同体积分数的结构基因在 ABAQUS 中模拟单轴拉伸实验,设定多个分析步,获取每个分析步下的名义应力和名义应变数据。将结构基因法的模拟值与文献[21]的理论值和实验值进行

对比,如图8所示,在颗粒体积分数较小时,模拟值与实验和理论结果吻合较好;当颗粒体积分数较大,变形载荷较小时,结果吻合较好,但是随着变形载荷的增大,出现了模拟结果和理论结果大于实验结果的情况,主要是因为模拟计算中,没有考虑大变形引起的界面脱粘的情况,而且在变形较大时(大于100%),网格畸变也会对结果造成很大的误差。但是总体来说,结构基因法能够准确表征橡胶类材料大变形时的应力应变响应。

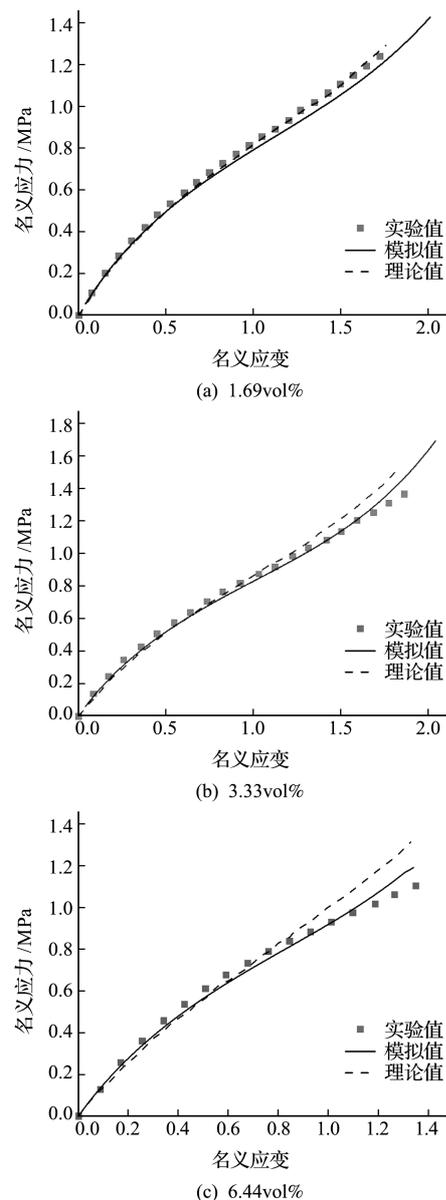


图8 颗粒增强橡胶复合材料模拟值、实验值和理论值的比较
Fig. 8 Comparison of simulation data, experimental data and theoretical data for spherical-particle reinforced rubber composites

结果证明了本文提出的方法用于研究超弹性复合材料力学性能的可靠性和可行性,计算方法简

单,具有一定的工程实用价值。

5 结 论

本文提出了一种用来求解非线性周期性板结构等效力学性能的结构基因法。该方法基于代表性体积单元法(RVE)和多级别有限元法(FE²)发展而来。考虑在周期性板结构中存在超弹性材料相时,结构整体的等效力学性能无法仅通过弹性模量与泊松比获得,本方法可以便捷地求取非线性周期性板结构的等效切线刚度并实现变形的模拟。本方法将 ABAQUS 作为黑箱,对提取出的结构基因进行多分析步单轴拉伸实验,用求解出的一系列名义应力和名义应变数据拟合出合适的本构模型,作为等效模型的等效力学性能。将等效切线刚度看作微观模型和宏观模型之间的桥梁,通过结构基因法进行双尺度交互,可以节省大量建模时间和计算时间,并节省测试的成本,提高计算速度及精度。

6 附 录

本文详细计算的 Python 脚本将发布在 <http://icam.xjtu.edu.cn>。

参考文献(References):

- [1] Shahid Z, Glatman A L, Ryu S C. Design of a soft composite finger with adjustable joint stiffness[J]. *Soft Robotics*, 2019, **6**(6):722-732.
- [2] Liu H W, Zhang Z C, Jia H B, et al. A modified composite fatigue damage model considering stiffness evolution for wind turbine blades [J]. *Composite Structures*, 2020, **233**:111736.
- [3] Huang R, Zheng S J, Liu Z S, et al. Recent advances of the constitutive models of smart materials—hydrogels and shape memory polymers[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2020, **12**(2):2050014.
- [4] Zheng S J, Li Z Q, Liu Z S. The fast homogeneous diffusion of hydrogel under different stimuli[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, **137**:263-270.
- [5] Liu Z S, Toh W, Ng T Y. Advances in mechanics of soft materials: A review of large deformation behavior of hydrogels[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2015, **7**(5):1530001.
- [6] Zheng S J, Liu Z S. Constitutive model of salt concentration-sensitive hydrogel[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, **136**:103092.
- [7] Hu J Y, Zhou Y, Liu Z S. The friction effect on buckling behavior of cellular structures under axial load [J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2018, **10**(2):1850013.
- [8] Kanit T, Forest S, Galliet I, et al. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, **40**(13-14):3647-3679.
- [9] Sun C T, Vaidya R S. Prediction of composite properties from a representative volume element [J]. *Composites Science and Technology*, 1996, **56**(2):171-179.
- [10] Eshelby J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1957, **241**(1226):376-396.
- [11] Huang Y, Hu K X, Wei X, et al. A generalized self-consistent mechanics method for composite materials with multiphase inclusions [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1994, **42**(3):491-504.
- [12] Cheng G D, Cai Y W, Xu L. Novel implementation of homogenization method to predict effective properties of periodic materials [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, **29**(4):550-556.
- [13] Yi S N, Xu L, Cheng G D, et al. FEM formulation of homogenization method for effective properties of periodic heterogeneous beam and size effect of basic cell in thickness direction [J]. *Computers & Structures*, 2015, **156**:1-11.
- [14] Feyel F. A multilevel finite element method (FE²) to describe the response of highly non-linear structures using generalized continua [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, **192**(28-30):3233-3244.
- [15] Xu R, Bouby C, Zahrouni H, et al. A multiscale analysis on the superelasticity behavior of architected shape memory alloy materials [J]. *Materials*, 2018, **11**(9):1746.
- [16] Yu W B. A unified theory for constitutive modeling of composites [J]. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2016, **11**(4):379-411.
- [17] Yu W B. Simplified formulation of mechanics of structure genome [J]. *AIAA Journal*, 2019, **57**(10):4201-4209.

- [18] 钟轶峰,张亮亮,周小平,等. 复合材料热传导性能的变分渐近均匀化细观力学模型[J]. 复合材料学报, 2015, **32**(4):1173-1178. (ZHONG Yi-feng, ZHANG Liang-liang, ZHOU Xiao-ping, et al. Variational asymptotic homogenization micromechanics model for thermal conductivity of composites[J]. *Acta Materialae Compositae Sinica*, 2015, **32**(4):1173-1178. (in Chinese))
- [19] 潘 静. 复合材料细观力学模型及相关材料性能研究[D]. 燕山大学, 2018. (PAN Jing. A Study on Micro-mechanical Model of Composite Materials and Related Properties of Materials [D]. Yanshan University, 2018. (in Chinese))
- [20] Jia Y R, Lei J C, Liu Z S, et al. Determination of the equivalent properties of periodic heterogeneous composite plates using the structural genome approach [J]. *International Journal of Computational Materials Science and Engineering*, 2019, **8**(4):1950017.
- [21] Li D H, Yao Y. An approximate method to predict the mechanical properties of small volume fraction particle-reinforced composites with large deformation matrix [J]. *Acta Mechanica*, 2019, **230**(9):3307-3315.

Study on the equivalent properties of nonlinear periodic heterogeneous composite plates using the structural genome approach

JIA Yi-ran, HAN Ling-zhi, LEI Jin-cheng, LIU Zi-shun*

(International Center for Applied Mechanics, State Key Laboratory for Strength and

Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A nonlinear periodic plate structure is a promising structure in intelligent composite materials. These structures often include complex microstructures such as ribs, holes and reinforcing fibers. Due to the existence of these complex members, it is difficult to model and analyze this type of structures directly. In order to solve the problems, these structures are usually modeled as equivalent macroscopic homogeneous plates. Thus the key problem is to obtain the equivalent mechanical properties of the macro model. In this study, we propose a structural genome approach to obtain the equivalent mechanical properties of the nonlinear periodic heterogeneous plate structures. We regard the smallest structure building block of the nonlinear periodic plate structure as its structural genome. The equivalent mechanical properties can be calculated through the structural genome. This work provides a convenient approach to analyze micromechanical and overall equivalent mechanical properties of the nonlinear periodic plate structure, and the results agree very well with the analysis results of the original nonlinear periodic plate structure. Structural genome method can provide a valuable reference for the micro-mechanical research of composite materials.

Key words: periodic composite plate; equivalent mechanical properties; structural genome

引用本文/Cite this paper:

贾贻然,韩灵芝,雷金成,等. 利用结构基因法研究非线性周期性板结构的等效力学性能[J]. 计算力学学报, 2021, **38**(5):631-637.

JIA Yi-ran, HAN Ling-zhi, LEI Jin-cheng, et al. Study on the equivalent properties of nonlinear periodic heterogeneous composite plates using the structural genome approach[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(5):631-637.