

# 基于 HFGMC 理论的复合材料协同多尺度损伤模拟

白连乙,周储伟,马伟杰

(南京航空航天大学 航空学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**为进行复合材料协同多尺度渐进损伤的分析,提出一种基于高保真通用胞元法和有限元相结合的方法。推导高保真通用胞元的计算格式,并通过一个典型周期性单胞的分析结果与有限元结果的对比,验证所建模型的精确性。采用所建立的方法对一个单向复合材料缺口试验件的渐进损伤过程进行协同多尺度模拟,揭示试验件宏观性能衰减与微观尺度损伤演化之间的内在联系。结果说明:该方法适用于复合材料多尺度分析。

**关键词:**高精度通用胞元;复合材料;多尺度分析;渐进损伤

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)01-0091-04

## Synergistic Multi-scale Damage Simulation of Composite Materials Based on HFGMC Theory

BAI Lianyi, ZHOU Chuwei, MA Weijie

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A method combining HFGMC and FEM was developed to simulate the progressive damage of composite material at multi-scales synergistically. The computational formulas of HFGMC were deduced, and their precision was verified by the comparison of the research results between unicellulars and finite elements in a typical periodic unit cell. The proposed combination method was used to simulate the progressive damage of a unidirectional composite notched panel at both macroscale and microscale synergistically, which reveals the intrinsic connections between macroscale mechanical degradation and microscale damage evolution of the composite. The results prove the validity of the proposed method in multiscale analysis of composite material.

**Keywords:** high precision universal cell; composite materials; multi-scale analysis; progressive damage

### 0 引言

复合材料是指由增/韧强相(纤维、颗粒等)和基体相两种或两种以上不同性质的材料用物理或化学方法在宏观尺度上组合成的新材料,其综合性能优于组分材料。随着复合材料在重要工程领域中应用的不断拓展,对性能的要求也愈来愈高。因此,须更深入了解其破坏机理,以便充分发挥其性能潜力,优化材料设计。

复合材料在微观层面是不均匀的,其结构方面具有明显的多尺度特征,其性能与微观结构、组分材料密切相关<sup>[1]</sup>。多尺度研究分析方法能够充分利用宏观的高效性及微观尺度的精确性,是复合材料性能研究的重要方法之一。目前多尺度分析方法可以分为3类:层级多尺度、协同多尺度和并发多尺度<sup>[2]</sup>。其中协同多尺度既可实现宏/微观之间的耦合分析,将复合材料结构的损伤破坏等分析建立在具体的损伤机制之上,且计算规模又不至于过大,是一种很具有吸引力的方法。

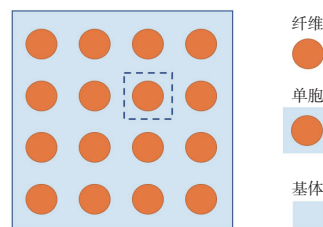
高精度通用胞元法(high fidelity general method cell, HFGMC)是一种兼顾性较高的求解精度与效率的微观力学模型,在复合材料多尺度分析中应用广泛。该方法在ABOUDI J提出的通用胞元法(GMC)<sup>[3]</sup>基础上发展而来,已被广泛应用于复合材料性能的分析。如ABOUDI J等<sup>[4]</sup>

采用 HFGMC 研究了复合材料非在力和温度载荷下的非线性性能,王明路等<sup>[5]</sup>基于修正的 HFGMC 对复合材料微观尺度进行了分析。美国 NASA 采用 HFGMC 对复合材料各种性能进行了大量的研究,促进了该理论的发展。

本文基于 HFGMC 提出了一种复合材料协同多尺度损伤分析方法,通过对比有限元结果,验证了本文方法的精度,进一步对复合材料缺口件进行渐进损伤分析,证明了本文方法在复合材料多尺度分析中的可行性。

### 1 HFGMC 理论

假设复合材料结构是由一系列周期性单胞(repeated unit cell, RUC)拼装而成,如图1(a)所示,此复合材料的性能可通过分析 RUC 获得。RUC 采用 HFGMC 分析,一个 RUC 划分成  $N_x \times N_y$  个方形子胞,如图1(b)所示。



(a) 复合材料RUC选取

基金项目:国家自然科学基金项目(11872205)

第一作者简介:白连乙(1997—),男,辽宁大连人,硕士研究生,研究方向为复合材料多尺度分析。



## 2 算例与分析

### 2.1 HFGMC 精度验证

本文选取单向纤维增强复合材料理想化的 RUC 为例,分别建立了 HFGMC 模型和 FEM 模型,两者网格剖分一致,如图 3 所示。有限元分析采用 ABAQUS 软件,组分材料参数如表 1 所示。

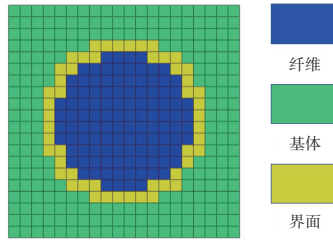


图 3 单向复合材料 RUC 子胞划分示意图

表 1 组分材料力学性能参数

名称	弹性模量/MPa	泊松比	强度/MPa
基体	3 500	0.38	70
纤维	72 000	0.22	3 400
界面	3 500	0.38	200

HFGMC 和 FEM 两种模型均施加平均 1% 的横向拉伸应变,并且对有限元模型施加周期性边界条件(HFGMC 自动满足周期性边界条件)。两种模型得到的应变、应力场分布如图 4 所示。从图中可以看出,两者的结果具有很好的一致性,对于受拉方向应变  $E_{11}$  的最大值,HFGMC 模型比 FEM 的误差小 2.3%,且发生的位置也相同,但 FEM 模型中  $E_{11}$  分布区域更宽一些。对于剪应变  $E_{12}$ ,两个模型预测的分布规律也是一致的,FEM 模型(绝对值)最大值的计算比 HFGMC 模型高出 6%,误差在工程应用的可接受范围之内。两种模型应力分析结果与应变分析类似,FEM 模型正应力  $S_{11}$  的最大值比 HFGMC 模型高 5.4%,正应力  $S_{12}$  的最大值则高 6.5%。图 5 为上述两种模型对于单向复合材料对应不同纤维体积含量下横向拉伸模量、泊松比和切变模量预测的对比,可以看出在所研究的纤维体积含量范围内,两者对上述弹性常数的预测均比较接近,横向拉伸模量、切变模量和泊松比,FEM 的预测值比 HFGMC 分别高出 1.2%、3.2%、2.5%。

### 2.2 基于 HFGMC 的复合材料多尺度分析

本节所采用的复合材料缺口件是  $90^\circ$  单铺层的玻璃纤维层合板,具体尺寸为  $200\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 。考虑到应力集中现象,在缺口处进行网格细化,并选取上节的 RUC 模型描述该复合材料的微观结构。试验件级的宏观分析采用 FEM 模型,在 ABAQUS 平台上计算,模型网格如图 6(a) 所示。假设 FEM 模型的每个单元(积分点)中包含了无数的微观 RUC,所以一个单元(积分点)的损伤分析就对

应于一个 HFGMC 的 RUC,见图 6(b)。基体子胞材料的破坏判断选用改进的 Tsai-Hill 失效准则,纤维与界面子胞材料采用最大应力准则,当子胞判定失效时,将该子胞的弹性矩阵中元素的数值折减为原来的 0.1。

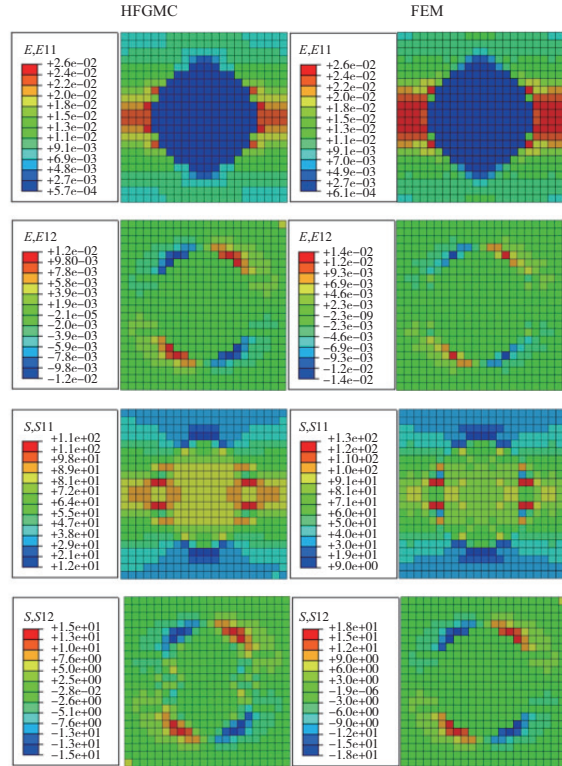


图 4 HFGMC 和 FEM 模型得到应变、应力场

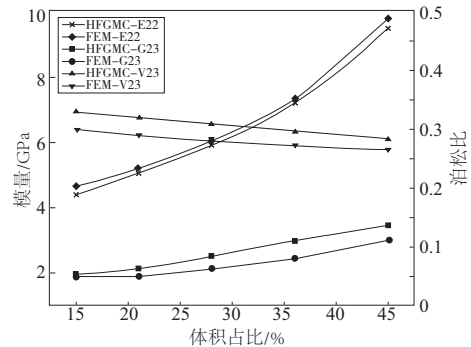


图 5 不同纤维体积含量下两种模型的平均弹性常数预测值

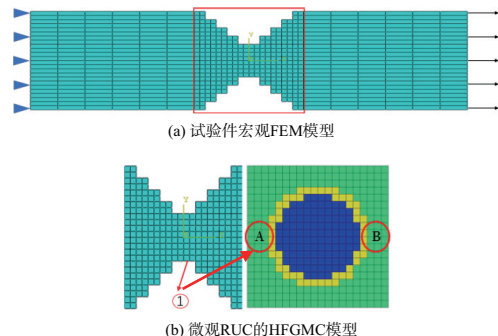


图 6 单向复合材料协同多尺度模型

试验件宏观有限元模型的左端约束  $x$  方向的平动,以及对左下角点的完全约束,分 16 步在右端共施加  $x$  方向的位移拉伸载荷  $u=0.16\text{ mm}$ 。试验件中宏观应力分布如图 7 所示。可以看出缺口边缘处的应力集中现象非常明显,缺口边单元将会率先发生损伤失效。图 8 展示了应力集中区域 1 号单元随拉伸载荷增加,其平均应力上升、模量折减和微观结构的损伤萌生、演化过程。图中可以看出当微观结构尚未发生损伤时,该单元的平均应力线性上升,弹性模量保持不变。随载荷的增大该单元中的基体子胞损伤基体处(图 6 中 A、B 区域),随后损伤在基体中沿加载方向扩展。当扩展至 RUC 边界时,基体损伤区域逐渐变宽,当宽度接近 RUC 边长时,界面随着发生损伤。界面损伤也是从 A、B 点处开始并逐渐向两边扩展,当 RUC 左右两边失效的基体子胞区域与 RUC 同宽时,RUC 完全失去承载能力。而此时纤维的应力水平还远低于纤维强度,因而并未发生纤维子胞的损伤失效。说明  $90^\circ$  层合板受横向拉伸载荷时,将发生由基体、界面材料断裂导致的破坏。当 RUC 中基体子胞开始发生损伤时,其所对应 FEM 模型中的单元(1 号单元)中的应力增长呈现出非线性。如图 8 所示,试验件宏观 FEM 模型中 1 号单元平均应力和模量折减曲线及所对应的微观 RUC 中子胞的失效过程。同时,其平均弹性常数  $E_{11}$  也开始降低。本算例说明 HFGMC 模型能够准确描述局部应力、损伤场,进而有效建立起结构发生损伤失效时不同尺度之间的联系,较为精准地反映出由局部场失效引起的宏观结构的破坏模式。

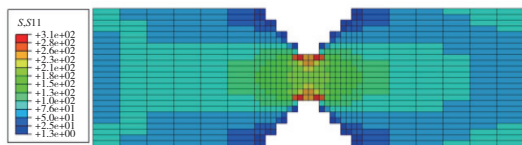


图 7 单向复合材料试验件应力分布图

### 3 结语

本文借助 ABAQUS 平台,利用 Umat 子程序建立基于 HFGMC 的复合材料多尺度模型,该模型能够建立起复合材料两个不同尺度之间的有效联系:

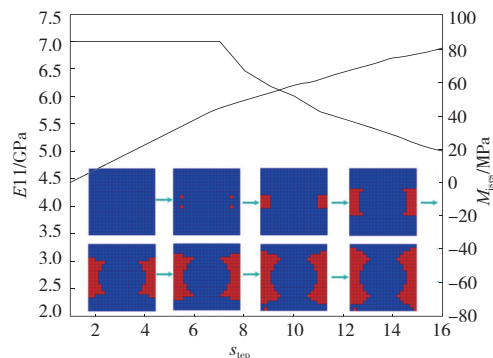


图 8 平均应力和模量折减曲线及所对应失效过程

1)通过对单向复合材料典型单胞结构进行分析并与有限元结果对比,HFGMC 能够准确反映 RVE 的应力应变等局部场,并且可通过均匀化理论准确得到 RVE 的平均弹性常数。

2)本文建立的分析模型能够将失效准则定义在微观结构上,可以准确预测复合材料的损伤萌生和演化规律,证明了高精度通用胞元模型在复合材料多尺度渐进损伤分析中的正确性和在工程中的较大应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] 马伟杰. 基于胞元法的复合材料协同多尺度损伤分析[J]. 江苏航空,2020,4(4):2-7.
- [2] 陈玉丽,马勇,潘飞,等. 多尺度复合材料力学研究进展[J]. 固体力学学报,2018,39(1):1-68.
- [3] ABOUDI J, PINDERA M J, ARNOLD S M. High-fidelity generalization method of cells for inelastic periodic multiphase materials [C]. Hanover: NASA Center for Aerospace Information,2002.
- [4] PALEY M, ABOUDI J. Micromechanical analysis of composites by the generalized cells model[J]. Mechanics of Materials,1992,14(2):127-139.
- [5] 王明路,冯森林. 基于修正高精度广义胞元法的复合材料细观力学分析[J]. 力学季刊,2020,41(1):51-58.
- [6] BANSAL Y, PINDERA M J. Finite-volume direct averaging micromechanics of heterogeneous materials with elastic-plastic phases[J]. International Journal of Plasticity,2006,22(5):775-825.

收稿日期:2021-09-17