



纤维增强聚合物复合材料因其优异的性能，已成为航空航天、国防和汽车等领域的首选结构材料。然而，其微观结构具有复杂的多相异质性和固有缺陷，使得准确预测其宏观力学性能与损伤演化过程面临巨大挑战。传统的有限元方法在处理裂纹萌生、扩展及多损伤相互作用等不连续问题时存在局限性，亟需更有效的数值模拟工具。

近期，西北工业大学、北京理工大学和哈尔滨工业大学的研究团队在《Composites Part A》发表了相关研究成果。该研究提出了一种基于单元近场动力学的微观力学建模新方法，能够更精确地预测纤维增强复合材料的有效弹性性能与微观损伤演化过程，并在模拟应力分布和裂纹萌生方面展现出优于传统有限元像模型的优势。论文标题为“Micromechanical modeling for fiber-reinforced composites based on element-based peridynamics”。



Micromechanical modeling for fiber-reinforced composites based on element-based peridynamics

In Che^a, Shao Liu^{b,c}, Binbin Zhang^b, Guodong Fang^c, Jun Liang^b

^a School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, PR China
^b Institute of Advanced Structures Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, PR China
^c Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments Key Laboratory, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, PR China



该研究引入的单元近场动力学 (Element-based Peridynamics; EBPD) 模型，旨在克服传统近场动力学模型的不足。EBPD通过“单元”来描述材料点间的相互作用，能够区分体积变形与形状变形，并引入了非局部应力与应变的概念，同时避免了数值不稳定问题。更重要的是，EBPD能够将经典连续介质力学中的失效准则直接融入模型，从而便捷地表征复合材料微观结构的变形与裂纹扩展过程。

文章建立了包含随机分布纤维的微观代表体积单元 (RVE) 模型，并创新地在EBPD框架内实施了周期性边界条件。通过推导三节点三角形单元基于高斯数值积分形式的单元刚度密度矩阵，文章提出了一种针对纤维-基体界面的处理方案，提升了界面附近的计算精度。该模型采用最大主应力失效准则和失效后刚度折减技术来研究RVE的渐进损伤行为。

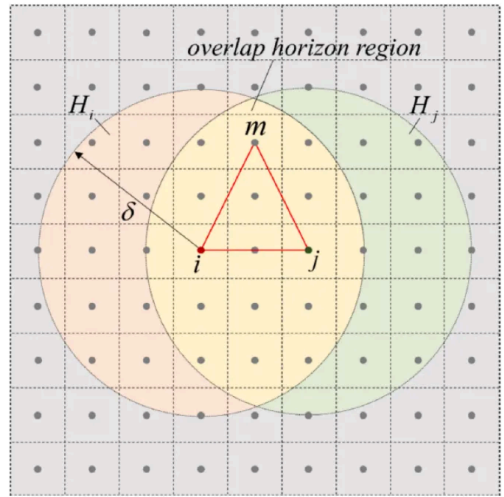


图1 材料点i近场范围内的单元 e_{ijk} 示意图

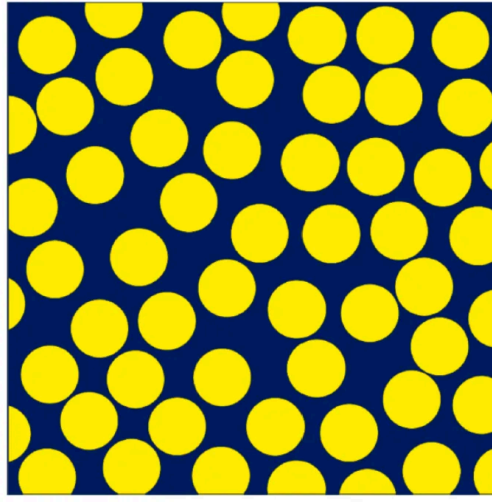


图2 随机分布纤维的微观代表体积单元

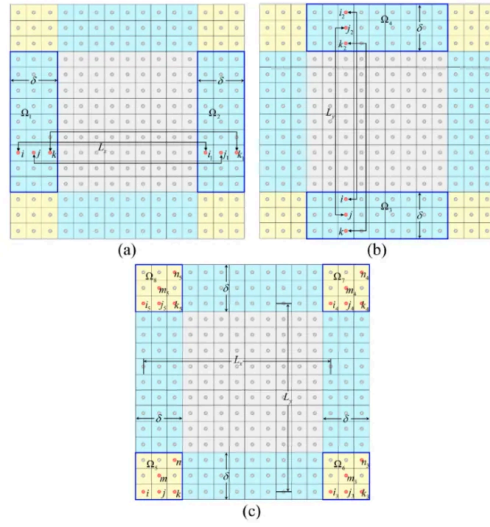


图3 应用于代表体积单元的周期性边界条件。(a) 左右边界层中材料点的对应关系。(b) 上下边界层中材料点的对应关系。(c) 左下角边界区域与其余角边界区域中材料点的对应关系

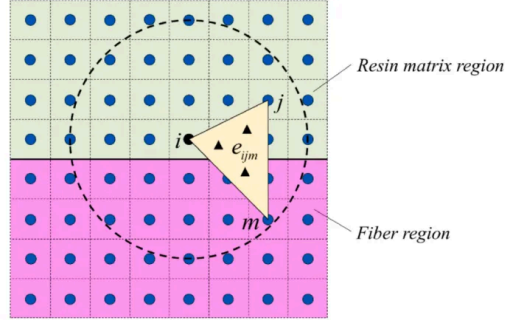


图4 单元近场动力学界面处理方案示意图

该研究基于EBPD模型，成功预测了碳纤维增强聚合物复合材料在垂直于纤维方向平面上的有效弹性性能矩阵，结果表明该平面具有各向同性特性。通过模拟不同随机纤维分布的RVE，发现纤维随机分布对有效弹性性能的影响不显著。

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 1.0083 \times 10^4 & 3.5750 \times 10^3 & 0 \\ 3.5692 \times 10^3 & 1.0369 \times 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 3.4130 \times 10^3 \end{bmatrix} \text{MPa}$$

在验证模型预测能力方面，文章将模拟结果与 $[90^\circ]_{16}$ 铺层层合板的横向拉伸试验数据进行了对比。数据显示，横向弹性模量的模拟值为9.89 GPa，实验值为9.68 GPa，误差仅为2.17%；拉伸强度的模拟值为43.1 MPa，实验值为47.6 MPa，绝对误差为9.45%。这些结果验证了EBPD模型在预测复合材料刚度和强度方面的准确性。

文章进一步展示了RVE在单轴拉伸下的损伤演化过程。损伤首先在纤维间距较小的基体应力集中区域萌生（应变0.431%），随后裂纹垂直于加载方向扩展，并在其他应力集中区域引发新的裂纹（应变0.433%），最终在应变达到0.435%时，裂纹贯穿整个RVE导致完全失效，主要失效模式为基体材料的脆性断裂。

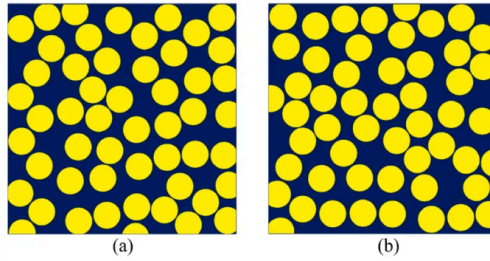


图5 具有随机纤维分布的两个微观代表体积单元，纤维体积分数为 (a) 55.04%和 (b) 55.08%

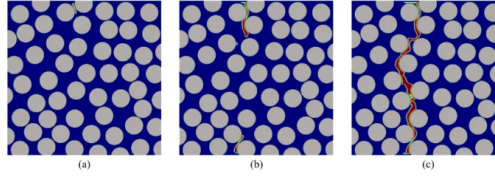


图6 不同应变历史下代表体积单元的损伤演化: (a) $\varepsilon = 0.431\%$, (b) $\varepsilon = 0.433\%$, (c) $\varepsilon = 0.435\%$

为阐明EBPD模型的优势，文章将其与有限元像素网格模型和有限元精细网格模型进行了对比。在模拟含纤维束微观模型的应力分布时，EBPD模型和FEM像素网格模型在界面附近均出现应力波动，但EBPD模型的波动幅度显著更低。以界面附近的x方向正应力 σ_x 为例，EBPD预测的最大应力约为77 MPa，而FEM像素网格模型预测值则超过90 MPa。

在预测裂纹萌生位置的示例中，EBPD模型和FEM精细网格模型均预测初始裂纹位于纤维-基体界面沿水平中心线附近，而FEM像素网格模型预测的起始位置则偏离了水平中心线。这表明EBPD模型在预测复合材料微观结构内的应力状态和裂纹起始位置方面，优于FEM像素网格模型，且其建模过程对复杂几何结构更友好，避免了精细网格划分的困难和界面网格奇异性问题。

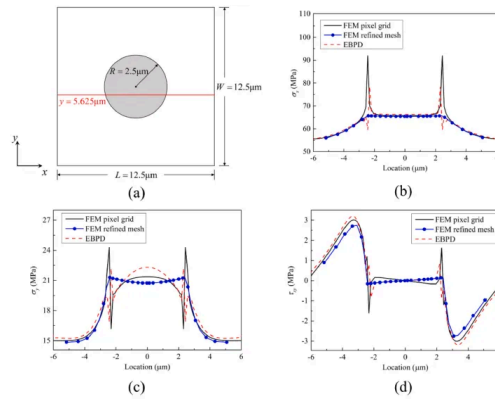


图7 使用单元近场动力学模型、有限元像素网格模型和有限元精细网格模型计算的沿 $y = 5.625 \mu\text{m}$ 线的应力分布: (a) $y = 5.625 \mu\text{m}$ 线位置, (b) x方向正应力 σ_x , (c) y方向正应力 σ_y , (d) 剪应力 τ_{xy}

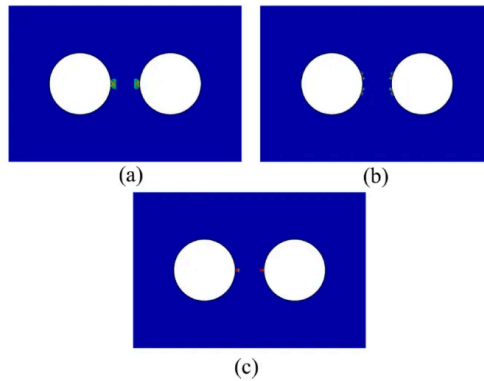


图8 使用 (a) 单元近场动力学模型、(b) 有限元像素网格模型和 (c) 有限元精细网格模型预测的初始裂纹位置

文章成功建立并验证了一种基于单元近场动力学的微观力学建模框架，用于预测纤维增强复合材料的有效弹性性能和渐进损伤行为。该模型不仅能够准确预测复合材料的宏观力学响应（如弹性模量和强度），还能清晰地揭示微观尺度下损伤始于基体应力集中区、并垂直载荷方向扩展直至最终断裂的失效机制。通过与有限元方法的对比，研究证明了EBPD在分析复合材料微观力学响应，特别是在处理应力集中和预测裂纹萌生方面具有独特优势。这项工作为理解和设计高性能复合材料提供了一种更精准、更强大的数值模拟工具，对推动复合材料在关键领域的可靠应用具有重要意义。

原始文献

Che, L., Liu, S., Zhang, B., Fang, G., & Liang, J. (2025). Micromechanical modeling for fiber-reinforced composites based on element-based peridynamics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 194, 108919.

原文链接:

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108919>

责任编辑: 夏小可

✦ 点击文末“阅读原文”查看原始文献

✦ 文章已开启快捷转载

✦ 文献求助及技术交流群: 640676531, 540731372

复合材料力学

| 公众号后台回复以下数字可获取相应信息 |

【01】：历史文章	【02】：投稿指南	【03】：视频资料
【04】：材料库	【05】：技术培训	【06】：项目合作
【07】：商务合作	【08】：文章转载	【09】：加入我们
【10】：联系我们	【11】：交流群	【12】：意见建议



投稿邮箱: mech_of_comps@yeah.net
投稿模板: 公众号后台回复“帮治道”获取
微 信: mech_of_comps
QQ 群: 640676531, 5407313

近场动力学 · 目录

上一篇 · 中科院宁波所 | 哈工大: 突破厚复合材料损伤模拟瓶颈, 三层离散近场动力学等效模型...

[阅读原文](#)