



1. 导读

复合材料层合板在航空航天、国防等领域应用广泛，其损伤与断裂过程极其复杂，包含纤维断裂、基体开裂和分层损伤等多种模式。传统近场力学模型在模拟层合板时面临材料属性受限、刚度无法随纤维方向连续变化、缺乏应力应变概念以及数值不稳定等诸多局限。

近日，河北大学联合西北工业大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学，提出了一种复合材料层合板的单元型近场力学模型。该研究建立了包含面内作用与层间作用的单元型近场力学运动方程与平衡方程，并给出了相应的失效准则及数值求解方案。准确模拟了不同铺层顺序层合板的位移场、分层损伤、强度及失效模式。通过与有限元模型和实验结果对比，验证了该模型的有效性与优越性。论文题目为“Element-based peridynamic model for composite laminates”。论文第一作者为河北大学刘硕教授，通讯作者为西北工业大学车路副教授，合作者还包括哈尔滨工业大学方国东教授、北京理工大学梁军教授和西北工业大学研究生边堰杰。



Element-based peridynamic model for composite laminates

Shuo Liu¹, Yujie Bian²*, Qiaole Lu³, Guodong Fang⁴, Jun Liang⁵

¹ College of Civil and Environmental Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, PR China
² School of Civil Aviation, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, PR China
³ Yangtze River Delta Research Institute of APL, Taizhou 214000, PR China
⁴ Institute of Composite Materials and Technology, Key Laboratory of Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, PR China
⁵ Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, PR China

2. 内容简介

该研究提出的单元型近场力学(EBPD)的层合板模型，采用3节点三角形单元表征模型面内行为，通过横向键与剪切键描述层合板模型的面外法向作用和面外剪切作用，如图1所示。提出的模型克服了传统近场力学在模拟复合材料时的材料属性限制，能够描述刚度随纤维方向的连续变化，引入非局部应力应变概念，且不存在不稳定性问题。将三维Hashin准则作为面内作用的失效准则引入到EBPD模型，而外作用则采用临界伸长率准则作为层间键的失效准则。

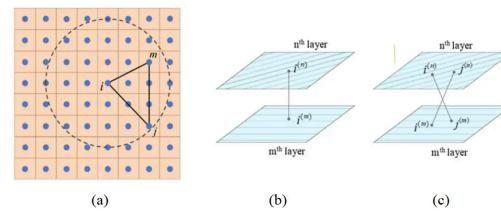


图1 复合材料层合板面内作用以及层间作用示意图。 (a) 面内作用, (b) 面外法向作用, (c) 面外剪切作用

(1) 层合板弹性变形预测

针对铺层顺序为 $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ]$ 的层合板(图2)，模拟其在轴向拉伸下的位移场(图3-5)。结果显示，EBPD模型预测的各层位移分量与有限元结果高度一致，平均误差均小于1%。同时，在相同硬件配置下，EBPD模型的计算时间(144秒)仅为有限元模型(407秒)的约35%。模型效率得益于EBPD模型层间粒子间距远远小于面内间距，避免了有限元模型为了避免网格畸形，必须保持层合板内部以及层间网格密度在同一数量级的限制，因此对于相同尺寸的层合板模型，EBPD模型中的粒子数量明显少于有限元模型中的节点数量。从而在保证精度的同时降低了计算规模。

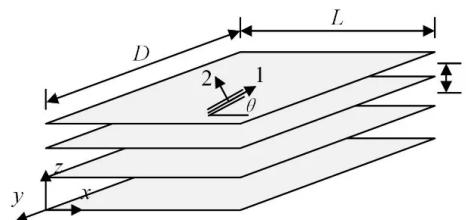


图2 复合材料层合板几何模型

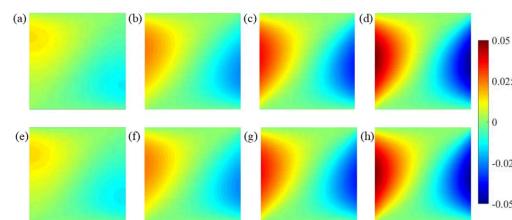


图3 使用EBPD模型和FEM预测的 $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ]$ 层合板中每个单独层沿x方向的位移场。(a)、(b)、(c)和(d)显示了从EBPD模型获得的预测结果。(e)、(f)、(g)和(h)说明了从FEM的结果。(a)和(e)对应于 0° 层，(b)和(f)对应于 30° 层，(c)和(g)对应于 60° 层，(d)和(h)对应于 90° 层

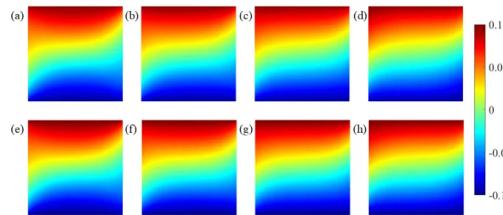


图4 使用EBPD模型和FEM预测的[0°/30°/60°/90°]s层合板中每个单独层沿y方向的位移场, (a)、(b)、(c)和(d)显示了从EBPD模型获得的预测结果, (e)、(f)、(g)和(h)说明了来自FEM的结果, (a)和(e)对应于0°层, (b)和(f)对应于30°层, (c)和(g)对应于60°层, (d)和(h)对应于90°层

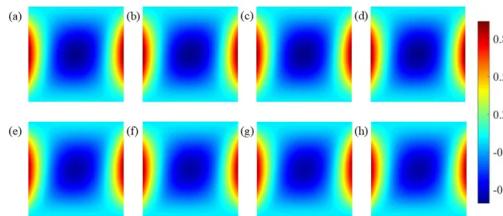


图5 使用EBPD模型和FEM预测的[0°/30°/60°/90°]s层合板中每个单独层沿z方向的位移场, (a)、(b)、(c)和(d)显示了从EBPD模型获得的预测结果, (e)、(f)、(g)和(h)说明了来自FEM的结果, (a)和(e)对应于0°层, (b)和(f)对应于30°层, (c)和(g)对应于60°层, (d)和(h)对应于90°层

(2) 分层损伤扩展模拟

为验证模型预测分层损伤的能力, 模拟了双悬臂梁试样的分层扩展过程。EBPD模型成功捕捉到分层前沿在扩展过程中保持凸曲率并沿面中推进的特征, EBPD模型的仿真结果与实验观察结果吻合良好 (图6)。

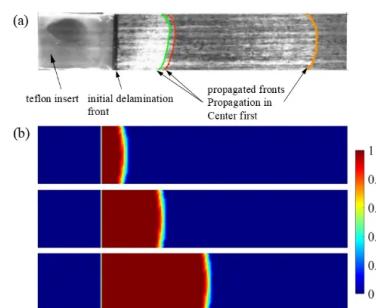


图6 [0°]s单向层合板DCB试样中面的分层扩展过程, (a)实验断层扫描结果, (b)EBPD模型模拟结果 (从上至下依次对应张开位移3.5mm、4.5mm和5.5mm)

(3) 不同铺层层合板断裂行为预测

最后, 对两种铺层顺序 (层合板1:[45°/0°-45°/0°/90°]s; 层合板2:[45°/0°₂-45°/0°/90°]s) 含中心裂纹层合板的拉伸失效进行了模拟 (图7和图8)。EBPD模型准确预测了层合板的面内基本开裂、层间分层以及最终的失效强度, 其预测结果与实验观测在损伤模式和载荷-位移响应上均表现出良好的一致性。

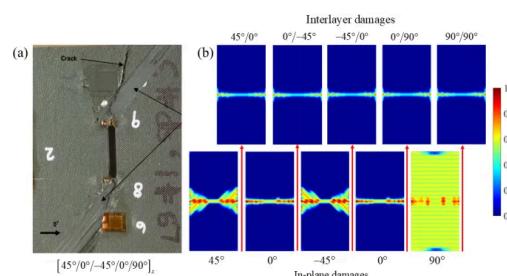


图7 层合板最终失效模式对比, (a)Laminate1实验观测结果, (b)Laminate1 EBPD模拟结果 (上图: 层间损伤, 下图: 面内损伤)

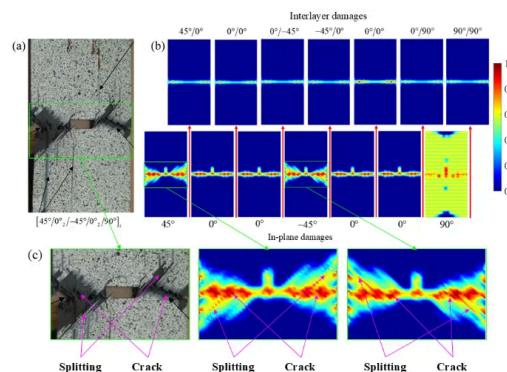


图8 层合板最终失效模式对比, (a) Laminate2实验观测结果, (b) Laminate1 EBPD模拟结果 (上图: 层间损伤, 下图: 面内损伤) (c) 从实验观察和模拟预测中局部放大的损伤区域视图

3.小结

本研究提出了单元型近场动力学层合板模型，突破了传统近场动力学在材料属性、刚度方向相关性及数值稳定性方面的限制。该模型在位移场预测、分层扩展描述以及最终失效强度和模式预测方面，均展现出优于传统方法的潜力和精度，为复合材料结构损伤分析提供了强有力的新型数值工具。

原始文献：

Shuo Liu, Yujie Bian, Lu Che, Guodong Fang, Jun Liang. Element-based peridynamic model for composite laminates. *International Journal of Mechanical Sciences*, 308 (2025) 110967.

原文链接：

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.110967>

责任编辑：夏小可

点击下方“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



投稿邮箱：mech.of.comps@yeah.net
投稿模板：公众号后台回复“前沿追踪模板”获取
微信号：mech.of.comps
QQ群：640676531, 540731372

复合材料层合板 · 目录

上一篇 · 哈工大《CST》：考虑交互作用的复合材料层压板高-低周疲劳渐进损伤模型

阅读原文