

纤维增强脆性基复合材料的力学性能和破裂过程研究^{*}

张亚芳^{1,2}, 唐春安¹, 陈树坚³, 常旭¹, 杨天鸿¹

(1 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110006;
2 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006
3 中山大学 应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 研究了弱界面长纤维增强脆性基复合材料在单轴拉伸荷载下的力学性能及其破裂机理和破坏过程。采用基于细观损伤力学基础上开发的针对材料破坏过程分析的 MFPA^{2D} 数值模拟程序, 考虑材料物理力学参数在细观尺度上的非均匀性, 对复合材料的变形、损伤直至失稳破坏的全过程进行数值模拟。结果表明当脆性基体复合纤维后, 复合材料的强度、刚度都随之提高, 并随纤维的增加而增加; 复合材料的韧性也大为增强, 可观察到界面脱粘、裂纹偏折、纤维桥联和拔出等现象, 并得到相应的声发射模拟结果。

关键词: 纤维增强; 弱界面; 复合材料; 破坏过程; 数值模拟

中图分类号: TB33 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2006) 01-0046-04

脆性材料由于具备诸多优良性能在航空航天、汽车制造、采矿工程等领域得到越来越广泛的应用。但这类材料的一个共同缺陷是其韧性差, 其失效往往在瞬间发生, 造成灾难性的后果, 严重限制了该类材料的使用。通过对该类材料复合增强纤维是提高这类材料韧性的一个行之有效的途径。但复合纤维后材料内部的应力场分布以及由细观损伤直至失稳破坏的机制也因为材料各相间的耦合效应而变得非常复杂。很多学者包括伍章健^[1]、Gaffney^[2]、杨庆生^[3]、Kim RY^[4] 等对这类问题进行了研究, 得到一些有价值的结论。本文应用近年由东北大学材料破坏力学数值实验室开发的材料破坏过程分析 MFPA^{2D} (Material Failure Process Analysis) 软件从细观尺度分析弱界面纤维增强脆性基复合材料在单轴拉伸时的损伤破坏机制, 模拟了复合材料破坏的全过程, 包括裂纹的萌生和扩展规律, 为复合材料的破裂分析提供一种有效的分析方法。

1 数值计算模型的建立

本文从材料的细观非均匀性入手, 将材料的非均匀性引入到细观单元中, 假设材料单元的弹性模量、强度、泊松比等力学参数服从 Weibull 分布, 用细观的非均匀性来实现材料的宏观非线性。MFPA 2D 包括应力分析和破坏分析。应力分析采用有限元方法; 破坏分析则是根据破坏准则检查材料中是否存在破坏单元, 对破坏单元采用刚度退化或

重建的方法进行处理。考虑到脆性材料的抗拉强度远远小于抗压强度, 因此采用修正后的库仑准则 (包含拉伸截断 Tension cut off) 作为单元破坏的强度判据。细观尺度的单元满足弹-脆性本构关系^[5,6]。

本文数值模型采用的试件尺寸为 40 mm × 15 mm, 连续长纤维的尺寸为 40 mm × 0.2 mm, 考虑纤维与基体之间存在弱界面层的情形, 每一弱界面层尺寸为 40 mm × 0.1 mm。试件单边开个三角形的槽, 其角度为 60°, 深为 1.2 mm。分别模拟计算了纯基体和五个带单边开槽纤维增强复合材料的计算模型, 五个试件中的纤维间距分别为 3、2.4、2、1.5、1.2 mm, 即分别对应纤维数为 4、5、6、8、10 根的试件。试件中基体和纤维的物理参数平均值如表 1 所示, 弱界面层的弹性模量和强度分别为纤维的 15% 和 6.5%。

表 1 基体和纤维的力学参数¹⁾

Tab. 1 Mechanical parameters of matrix and fibers

组分材料	弹性模量 MPa	拉伸强度 MPa	泊松比
基体	7000 (4)	7 (4)	0.25 (100)
纤维	40000 (5)	70 (5)	0.35 (100)

1) 材料参数为“平均值 (均质度系数)”形式。

设单元的强度判据准则中材料单元的拉、压强度比为 1/10 摩擦角为 30°。采用竖直方向的拉伸

^{*} 收稿日期: 2005-08-28
基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (05001885); 建设部科技基金资助项目 (05-K4-4)
作者简介: 张亚芳 (1966 年生), 女, 副教授; E-mail: zhangyafang2004@163.com
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

位移加载方式，加载步长为 0.000 2 mm，加载 120 步。考虑平面应力情况。

2 数值模拟结果及讨论

通过 MFPA^{2D}数值模拟计算，可得到上述 6 个试件从线弹性阶段到损伤、最后到破坏的全过程模拟结果，以及复合材料试件的宏观力学特性。

纯脆性基体试件在外荷载的作用下，首先出现随机无序的破坏单元，由于开槽处的应力集中，该处的单元损伤破坏点不断积聚，终于萌生了裂纹，裂纹一经产生，迅速沿试件横向扩展，产生一条贯通裂纹，试件在拉应力的作用下彻底破坏。而当复合纤维后，会观察到裂纹扩展方向的偏折、沿弱界面层的脱粘、纤维的桥联和拔出等现象。因篇幅所限，图 1 仅给出了纤维间距为 2 mm，即复合 6 根增强纤维的复合材料试件损伤破裂过程的 MFPA^{2D}数值模拟图。可看到试件开槽处基体中首先出现随机无序的损伤单元，随后裂纹萌生并逐步沿垂直于纤维排列的方向扩展到第一根纤维处，由于纤维与基体间弱界面的存在，裂纹改变扩展的方向，由垂直于纤维排列的横向扩展偏折为沿着弱界面层的扩展，可看到弱界面的脱粘；裂纹在第一层弱界面中扩展一定长度后，裂纹重又在试件的横向萌生并向前发展。裂纹从左至右不断由横向扩展到纤维处时发生偏转，裂纹扩展方向转向沿弱界面层的竖向，引起该弱界面层的脱粘，随着外载的增加，上述裂纹横向扩展、竖向偏折、再横向扩展的过程不断交替进行，直至复合材料试件的破裂。这种现象与文献 [2] 的物理实验推测相吻合，由于物理实验条件所限，文 [2] 对于纤维增强复合材料破裂过程无法得到直接的观察结果，只能进行推测，本数值模拟的结果说明文 [2] 中对破裂过程推测的正确性；本结果和文献 [7] 的理论分析和实验研究结论是相一致的。其它试件的扩展路径有的和图 1 相似，也有的不同。试件的破裂过程之所以呈现不同的路径，是由于试件的物理参数是根据 Weibull 函数分布的，在细观尺度上具有很大的随机性。尤其在脆性材料中，裂纹的扩展路径更是具有较大的分散性和随机性，所以试件的破裂过程具有很大的不同，这与文献 [8] 中的结论是一致的。

图 2 是包括纯基体试件的上述 6 个复合材料试件的荷载 - 加载步曲线图（λ 为纤维间距）。从中可以看到，基体试件的刚度最小，峰值荷载也最小，最先发生灾难性的脆性破坏。基体试件在达到峰值荷载前一直是线弹性的，几乎不存在明显的非线性过程，当达到峰值荷载后，发生一个非常显著

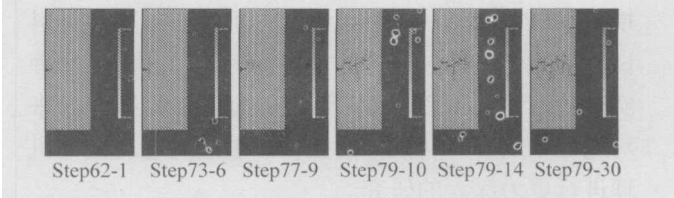


图 1 含 6 根增强纤维的复合材料试件损伤破裂过程（MFPA^{2D}弹性模量）

Fig. 1 MFPA^{2D} simulation on failure mechanisms of composite containing six fibers (material properties)

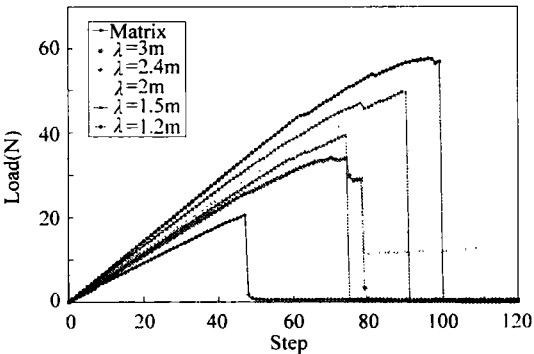


图 2 纤维增强复合材料的荷载 - 加载步曲线

Fig. 2 The load step curves of the composites with the reinforcing fibers

的“荷载降”，试件瞬间发生完全破坏，残余荷载值很小，曲线表现出脆性材料的特征。加入增强纤维后，由于纤维和基体之间的弱界面层的存在，使得试件的荷载 - 加载步曲线出现了显著的非线性段，并且加入的纤维越多，即试件中纤维的间距越小，非线性段就越长；曲线还出现了一系列的“拐折”，这是由于裂纹在弱界面层中的扩展引起界面层的脱粘从而使荷载略有松弛造成的。但因为裂纹没有贯通整个模型，所以曲线略有下降后又重新上升，形成一个拐折。图 2 还表明，增强纤维的加入不仅提高了试件的刚度，还提高了试件线弹性的范围，和纯基体试件相比，纤维的加入将复合材料试件的破裂应变提高了近一倍。实际上，复合材料的刚度、峰值强度都随着纤维数目的增加而增加。

复合材料任何结构的突变，如基体开裂、纤维断裂、快速脱粘和层间开裂都会引起能量以弹性应力波的形式从源点开始在各个方向上传播，形成弹性应力波损耗^[9]。所以有学者尝试运用声发射 AE 技术研究复合材料的损伤和破裂行为^[2]，但却难于确定复合材料中的准确的损伤位置和破裂过程以及脱粘、桥联、纤维拔出等机制对复合材料试件声发射行为的贡献，无法确定声学行为和特定损伤之间的关联，而只能确定声发射的整体能量范围，这主要是由于物理实验本身的局限性造成的。本数值

模拟 MFPA^{2D} 的一个显著特点是可以模拟复合材料试件的损伤破裂过程中的声发射行为, 弥补了物理实验的不足, 可以将 MFPA^{2D} 和物理实验结合起来对脆性基复合材料试件的损伤、破裂过程与破坏机理进行更为深入的研究。

图 3 是含 6 根增强纤维的试件与图 1 加载步相对应的声发射图。其中黑色代表已损伤破坏的单元, 而红色代表在当前步损伤破坏的单元和声发射, 圆的半径越大表示声发射的能量越大。从图 3 可看到, 基体开裂、层间快速脱粘开裂、纤维拔出和纤维断裂等损伤的产生和发展都伴随着复合材料试件的声发射 AE 过程。

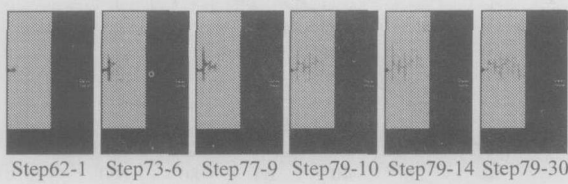


图 3 含 6 根增强纤维的复合材料试件损伤破裂过程的声发射图 (MFPA^{2D} 模拟)

Fig 3 MFPA^{2D} simulation on AE of composite containing six fibers

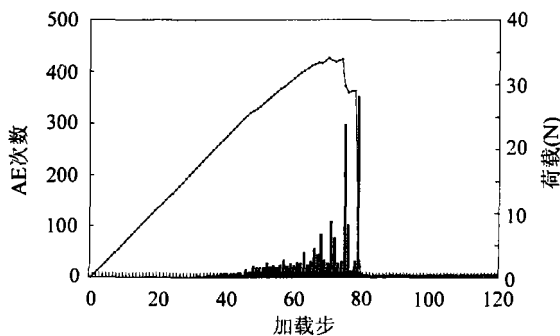


图 4 含 4 根增强纤维复合材料试件的荷载和声发射与加载步曲线

Fig 4 Load & AE counts curves of the composite reinforced with four fibers

为了清楚地展现声发射行为与损伤破裂现象的关联, 图 4 给出了含 4 根增强纤维试件的荷载 - 加载步 - 声发射事件数关系图。可知在加载初期, 试件中没有破坏单元产生, 也就没有 AE 次数的记录, 荷载 - 加载步曲线表现为线弹性。声发射开始于纤维和基体的脱粘或滑移而造成的荷载 - 加载步曲线的非线性起点处, 此时, 试件中开始有声发射 AE 产生。而当声发射次数大量发生时, 荷载 - 加载步曲线出现波动, 出现拐折, 曲线有一个放缓或下降的过程, 意味着材料中有大量的单元破坏, 但因为裂纹只存在于其中的弱层, 并没有造成贯通模型的裂纹, 随后曲线又重新上升。一般认为, 基体

的损伤, 是低的声发射事件的来源; 纤维和基体的分离、脱粘、分层和摩擦等是中等声发射事件的来源; 而纤维和基体的破裂则是高声发射事件数的来源^[10]。由图 4 可知, 从第 46 加载步开始, 裂纹偏折进弱界面层并引起界面的脱粘, 在图 4 中声发射事件有一个显著提高, 荷载 - 加载步曲线则相应地有一个波动; 在第 68 加载步时, 裂纹从沿界面扩展的方向重又转到基体中横向扩展, 声发射事件数又出现一个高值; 试件破裂前不久的第 75 加载步, 记录了一个相对次高的声发射事件数, 此时裂纹再一次从沿着纤维 - 基体的界面层方向扩展至基体中横向发展, 并伴随有基体其它位置处的裂纹产生和扩展; 最终荷载 - 加载步曲线达到了峰值且随之有较大的下降, 意味着此处荷载有一个较大的松弛, 就在荷载达到峰值后的第 79 加载步, 试件随之产生灾难性的破坏, 纤维在很短时间内相继断裂, 复合材料试件整体破坏, 声发射事件数达到了最大。数值模拟结果证实了文献 [10] 中所说纤维和基体的破坏是高声发射事件数来源的结论。

3 结 论

本文利用材料破坏过程数值模拟系统 MFPA^{2D} 分析研究了含弱界面纤维增强复合材料试件在单轴拉伸荷载作用下的裂纹扩展路径和失稳模式与破坏机理以及复合材料宏观力学特性。可以得到以下结论:

(1) 单边开槽纯脆性基体试件在单轴拉伸荷载作用下首先在开槽处出现损伤破坏, 随后由于拉应力作用而产生横向劈裂裂纹, 试件发生显著的脆断;

(2) 在脆性基体中复合含弱界面的增强纤维后, 在外载作用下裂纹的扩展路径不断发生偏折, 扩展路径大为增加, 试件的脆性得到改善而韧性提高, 可以看到弱界面的脱粘、纤维的桥联和拔出现象;

(3) 复合材料试件的峰值强度和刚度随着试件中纤维数 (即纤维间距减小) 的增加而增加, 材料试件的线弹性范围也随之提高;

(4) MFPA^{2D} 还可以模拟材料试件的声发射 (AE) 行为, 材料中裂纹的萌生和扩展、弱界面的脱粘、纤维的断裂等都和相应的声发射事件密切相关, 是物理实验的重要补充。

本文运用 MFPA^{2D} 研究了含弱界面单边开槽长纤维增强脆性基复合材料在单轴拉伸荷载作用下的破裂机理和宏观力学特性。脆性材料复合增强纤维后的脆性大为改善, 模拟了裂纹扩展过程中的界面

脱粘、纤维桥联和拔出、纤维断裂以及声发射行为。为脆性基纤维增强复合材料的可靠性分析和破裂机理研究提供了一种行之有效的方法。

参考文献:

- [1] 伍章健, 余寿文. 界面性能对陶瓷基复合材料桥联增韧的影响[J]. 中国科学: A 辑, 1999 25(1): 98 - 106
- [2] GAFFNEY K M, BOTSIS J. Deformation and fracture of a uniaxially reinforced composite material [J]. Composites Science and Technology 1999 59 1847 ~ 1859.
- [3] 杨庆生, 杨卫. 纤维复合材料损伤过程的数值模拟[J]. 计算力学学报, 1998 15(2): 154 - 160
- [4] K M R V, PAGANO N J. Crack initiation in unidirectional brittle matrix composite[J]. J Am Ceram Soc 1991 74 1082 - 1090
- [5] TANG C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity[J]. Int J Rock Mech Min Sci 1997 3(4): 249 - 262
- [6] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂—数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [7] MICHEL S, KARA B, JOHN B. Method for determination of crack bridging parameters using long optical fiber Bragg grating sensors[J]. Composites Part B 34 2003 347 - 359.
- [8] AHMED A, WONA J. Crack initiation and propagation in materials with randomly distributed holes [J]. Engineering Fracture Mechanics 1997 58(5 6): 395 - 420
- [9] BRYAN H. Engineering Composite Materials [M]. 2nd ed. By DM Communication Ltd 1999.
- [10] M STRAS 2000. Users manual[M]. Princeton (NJ): Physical Acoustics Corporation 1995

Study on Failure Process and Mechanical Properties of Brittle Composite Matrix with Fiber Reinforcement

ZHANG Ya-fang^{1, 2}, TANG Chun-an¹, CHEN Shu-jian³, CHANG Xu¹, YANG Tian-hong¹

(1. Faculty of Resource & Civil Engineering Northeastern University, Shenyang 110006, China

2. Faculty of Civil Engineering Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3. Department of Mechanics & Engineering Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract The failure process and mechanism of a brittle composite matrix reinforced with long fibers with weak interface is studied. Heterogeneity is applied to each mechanical parameter in mesoscale. Then MFPA^{2D}, a numerical programme developed based on meso damage mechanics, is adopted to simulate the whole failure process under uniaxial tensile load. From the simulation result, the fiber reinforcement with weak interface could bring out not only higher strength and stiffness but also higher toughness of the composite. Some important phenomena, such as the interface debonding and sliding, crack deflexion, fiber bridging and pulling out, and etc, have been successfully reproduced and revealed. Finally, the accompanied result of acoustic emission is also presented.

Key words fiber reinforcement; weak interface; composite; failure process; numerical simulation