

短纤维增强脆性基复合材料破坏过程和力学性能研究*

刘 浩¹, 张亚芳², 齐 雷²

(1. 合乐中国, 香港;
2. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 研究短纤维增强脆性基复合材料在单轴拉伸荷载下的力学性能和断裂机理。采用基于细观损伤力学基础上开发的针对材料破坏过程的数值分析软件, 考虑材料细观非均匀性, 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, 加入短纤维后, 材料试件的强度和韧性都比基体材料显著提高。短纤维强度的变化对复合材料试件的强度和刚度没有明显影响; 而短纤维弹性模量的变化对复合材料试件的强度、刚度和韧性均影响明显, 随着短纤维弹性模量的增加, 复合材料试件的强度和刚度不断增加, 但韧性却逐步降低。

关键词: 短纤维; 破坏过程; 复合材料; 声发射; 应力-应变曲线

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 06-0124-05

混凝土、陶瓷等一类脆性材料因具有优异的性能而广泛应用于工程实际中, 但这类材料所固有的高脆性也大大限制了其使用领域, 常采用复合短纤维的方法以提高其韧性。短纤维对基体裂纹扩展的阻滞作用是短纤维复合材料高强度高韧性的一个主要原因, 但由于短纤维的加入使得材料的应力分布变得非常复杂, 导致对短纤维增强脆性基复合材料损伤和破坏的研究异常困难。Kelly^[1-2]、Taya^[3]、杨庆生^[4]、蔡四维^[5]、唐春安^[6]等国内外学者分别对短纤维增强复合材料的破坏机理和力学性质进行研究, 得到一些有价值的结论。短纤维增强复合材料破坏过程是一个极其复杂的问题, 能进行理论分析的范围非常狭窄, 现有的理论分析都加入了简化和限制条件。而同时考虑各相材料力学性质的非均匀分布和纤维与裂纹、纤维与纤维、裂纹与裂纹等之间耦合效应的短纤维增强复合材料的损伤破坏过程研究则是一个非常复杂的问题, 目前还少见该方面的研究文献。

本文将利用 RFPA^{2D} (Realistic Failure Process Analysis) 数值分析软件针对短纤维力学性能的变化与复合材料试件的破坏过程和力学性能的影响进行分析和探讨。

1 模型介绍

RFPA2D 包括应力分析和破坏分析两个功能模

块。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小于抗压强度, 因此采用修正后的库仑准则作为单元破坏的强度判据^[7-8]。文中考虑了材料介质的非均匀分布, 假设纤维增强复合材料中各材料相的力学性能满足式 (1) 所示的 Weibull 分布。

$$\varphi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m} \quad (1)$$

式中, α 代表材料细观单元的力学性质 (强度、弹性模量、泊松比等); α_0 代表材料细观单元力学性质的平均值; 形状参数 m 也叫均质度, 它定义了 Weibull 分布密度函数的形状, 其物理意义反映了材料细观力学的均质性。

图 1 为带缺口短纤维增强脆性基复合材料数值计算模型, 尺寸为 15 mm × 5 mm, 划分为 300 × 100 共 30 000 个细观单元。网隔单元即是有限元分析计算单元。假设短纤维平行分布如图 1 所示。试件单边开的三角形槽的角度为 60°, 深为 1.2 mm。采用竖向拉伸位移荷载的加载方式, 加载步长为 0.000 01 mm/步, 共加载 100 步, 考虑平面应变情况。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°。

本文研究了短纤维力学参数的变化对纤维增强

* 收稿日期: 2008-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (NSFC 50778046); 广东省科技计划资助项目 (2006B14601004); 广州市教育局科技资助项目 (62047)

作者简介: 刘浩 (1966 年生), 男, 博士, 高工; E-mail: liu.hao.hk@gmail.com

复合材料破坏形式以及宏观力学性能的影响。分别进行了两组模拟分析:一组考察短纤维强度变化的影响,即短纤维极限强度与基体极限强度的比值 f_t/f_m 分别为 2、5、10、30、50,另外还包括一个纯基体试件的情况;另一组考察短纤维弹性模量变化的影响,即短纤维弹性模量与基体弹性模量的比值 E_t/E_m 分别为 1.5、3、4.5、10 以及纯基体试件的情况。假设短纤维和基体之间的界面是理想粘结的情况。

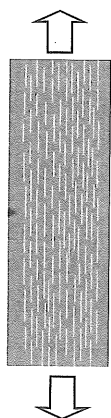


图1 短纤维增强复合材料数值模拟模型

Fig. 1 Model of composite with short fibers

2 数值模拟结果分析与讨论

2.1 短纤维强度变化对复合材料力学性能的影响

图2是短纤维极限强度与基体极限强度的比值 f_t/f_m 分别为 2、5、10、30 和 50 时的复合材料试件以及纯基体试件在竖直拉伸位移荷载作用下的全应力-应变曲线。

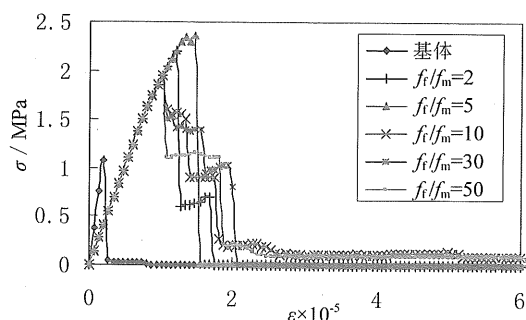


图2 不同强度短纤维下的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves with different strength of fibers

从图2可以看到,加入短纤维后,复合材料的弹性模量比纯基体试件低。但针对短纤维增强复合材料试件而言,短纤维强度的变化对复合材料的

刚度没有显著影响。究其原因,在于复合材料中短纤维的体积分数和弹性模量均保持不变。哈里斯^[10]认为,复合材料的弹性模量只与基体和纤维的弹性模量和体积分数相关,本文结果与之有很好的一致性。

由图2还可知,纯基体试件发生很小的应变就产生了脆性破坏,复合材料达到峰值强度后的应力降现象非常显著,材料试件的强度很低。当在脆性基体中加入短纤维后,纤维增强复合材料的宏观力学性能,无论是峰值强度还是断裂韧性都有了显著提高。复合材料试件的宏观强度近似为纯基体的两倍,而且当纤维/基体的强度比 f_t/f_m 大于某个临界值(本文为10)时,复合材料的强度逐渐趋于稳定。同时纤维增强复合材料的韧性也大为改善,当试件达到峰值强度时,应力不是发生突降的现象,而是呈阶梯状逐步下降,在本数值模拟中,复合材料的变形能为基体材料的13倍。所以,在脆性基体材料中复合短纤维增强相后,复合材料的强度与韧性都有明显提高和改善。

图3为含不同强度短纤维的纤维增强复合材料的破坏过程图,由于篇幅所限,本文只给出 $f_t/f_m = 2$ 和 $f_t/f_m = 10$ 的破坏过程图。

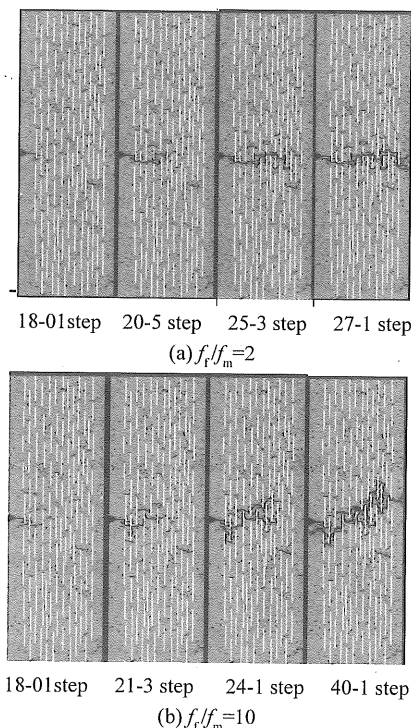


图3 破坏过程图

Fig. 3 Pictures of failure process

由图3可见,无论短纤维的强度是高还是低,裂纹都是从试件缺口处开始萌生的。随着荷载的增

加, 裂纹不断扩展, 当裂纹遇到短纤维后, 其扩展情况视短纤维的强度不同而呈现不同的路径。如图 3a 所示, 当增强短纤维的强度较低时, 裂纹多数贯穿纤维扩展, 扩展路径较短, 纤维并没有起到应有的阻裂作用, 材料的强度由纤维的强度以及贯穿短纤维的数量控制。而当纤维的强度很高时, 裂纹无法穿过纤维, 只能绕过短纤维扩展, 形成与图 3 (a) 完全不同的扩展方式, 如图 3 (b) 所示, 裂纹的扩展路径较长, 耗散较多的断裂能, 此时短纤维能够有效地起到阻裂作用。

另外, 在纤维/基体强度比 f_f/f_m 较大时, 裂纹难于贯穿纤维, 只能在基体中扩展, 使得复合材料的强度主要由基体的强度来控制, 这也解释了图 2 的全应力 - 应变曲线中, 当纤维/基体强度比 f_f/f_m 达到一定值后, 复合材料的强度趋于稳定的原因。文献 [9] 曾对金属基复合材料的有限元分析得到过相似结论, 本文的数值模拟结果说明在纤维增强脆性基复合材料中也有相同的结果。同时这也是文献 [10] 中提到的“短纤维的增强效率较低”的重要原因, 因为一般情况下短纤维的强度远高于基体材料。

2.2 短纤维弹性模量变化对复合材料力学性能的影响

图 4 是短纤维与基体的弹性模量比 E_f/E_m 分别为 1.5、3、4.5、10 的复合材料试件以及纯基体试件在竖直方向拉伸位移荷载作用下的全应力 - 应变曲线。从图 4 可见, 纯基体表现出明显的脆性特性, 而加入短纤维后, 纤维增强脆性基复合材料的强度和韧性均有明显提高。随着短纤维弹性模量的增加, 复合材料试件的弹性模量不断增加。

根据纤维增强复合材料微观力学模型得出的 Reuss 算法^[10] 如式 (2) 所示:

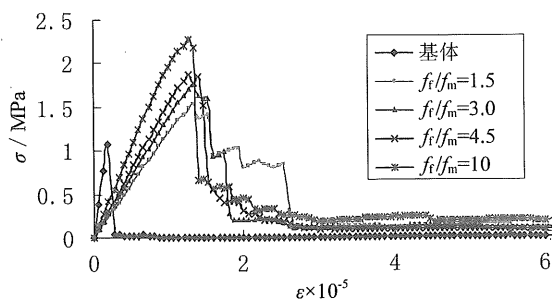


图 4 不同弹性模量短纤维下的应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves with different elastic modulus of fibers

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2)$$

其中, V 为体积分数, E 为弹性模量。下标 c、f、m 分别表示复合材料、纤维材料和基体材料。

式 (2) 从理论上说明复合材料的弹性模量是随着纤维弹性模量的增加而增加的, 本文的数值模拟结果与上述理论分析的结论是吻合的。

由图 4 还可知, 复合材料试件的强度随着纤维弹性模量的增加而增加; 但是材料试件的断裂韧性却随纤维弹性模量的增加而减少, 材料的脆性增加。

复合材料任何形式的破坏与结构突变, 如基体开裂、纤维断裂、快速脱粘都会引起能量以弹性波的形式从源点开始向各个方向传播, 形成弹性应力波损耗, 即发生声发射现象。RFPA^{2D} 软件假设材料的声发射次数与破坏单元的个数成正比, 对复合材料的声发射行为进行模拟研究。

图 5 为纤维与基体的弹性模量比 E_f/E_m 分别为 1.5、3、4.5、10 的纤维增强复合材料试件的荷载 - 声发射 - 加载步曲线图。

从图 5(a) - (d) 可以看到, 试件在第 1 加载步与第 19 加载步之间声发射的极值数目虽逐步递减, 但对应的荷载 - 加载步曲线并没有发生明显变化, 其上行趋势相似, 说明纤维弹性模量的变化对复合材料试件弹性阶段的影响不显著, 此时复合材料的刚度逐步降低但影响有限。Bechel 等^[12] 在做纤维压出试验时也得到过相同的结果。

但对于试件的非线性破坏阶段而言, 纤维弹性模量的变化对复合材料试件宏观力学性能的影响明显不同。当纤维与基体的弹性模量比 E_f/E_m 为 1.5 的较低值时, 如图 5(a) 所示, 材料试件的损伤破坏阶段共出现了 4 次集中大量的声发射现象, 分别发生在 20、24、30、39 加载步。值得一提的是, 在第 20 加载步时, 材料发生的集中声发射次数最大, 意味着在该加载步发生了大量的单元破坏, 其荷载曲线出现一个明显的突降。此时由于纤维的弹性模量较小, 可以产生较大的变形, 当遇到宏观扩展的裂纹时, 不易产生脆性断裂, 裂纹穿过短纤维, 在基体中蜿蜒扩展, 增加了裂纹扩展路径, 同时造成大量基体单元的破坏, 延长了纤维断裂的时间间隔, 如图 6(a) 复合材料的破坏过程图所示。

随着短纤维弹性模量的增加, 图 5(b) 和 5(c) 均出现了 3 次集中大量的声发射现象, 且图 5(c) 中 3 次声发射的时间间隔比图 5(b) 显著减小, 说明材料试件的韧性在逐步降低。而图 5(d) 的荷载 - 加载步曲线中仅在第 21 步出现一次集中

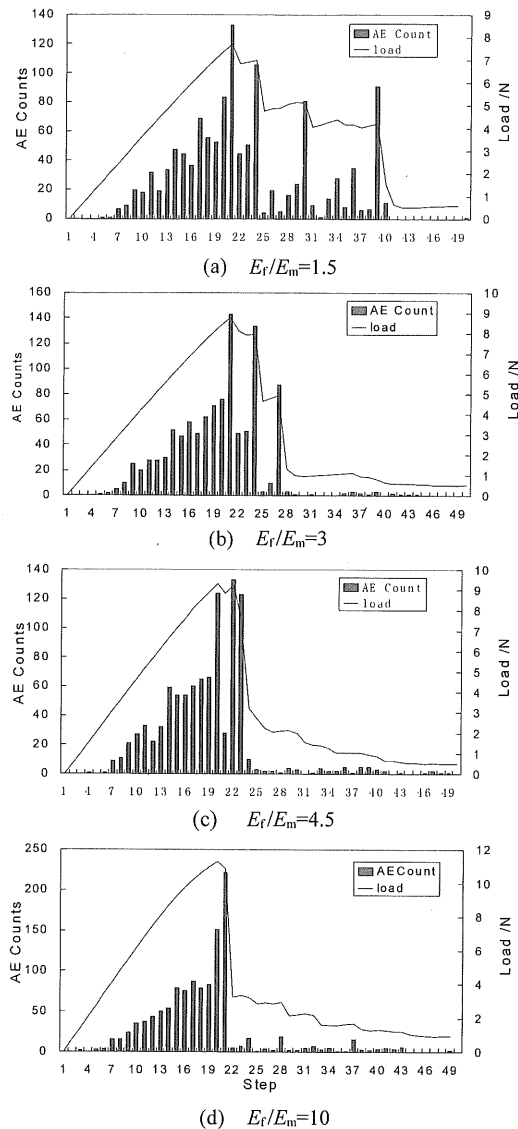
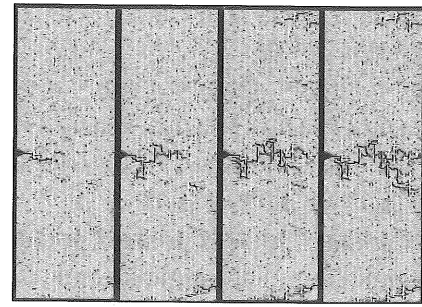


图5 不同纤维弹性模量下的荷载/声发射与加载步曲线
Fig.5 Load/AE-step curve with different elastic modulus

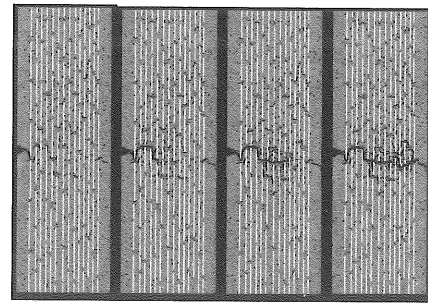
大量的声发射事件,声发射事件数为220,明显高于其它三个试件的最大声发射事件数,并伴随着明显的“荷载降”,说明在该加载步复合材料产生了大量的单元破坏。此时由于短纤维的弹性模量较大,当材料达到强度极限时,纤维产生的变形较小,易于断裂,因而形成贯穿纤维的裂纹,此时纤维的阻裂作用较弱,导致复合材料试件的脆性破坏。

总之,随着短纤维与基体弹性模量比的增加,声发射现象发生得越来越集中,材料的脆性不断增加,如图6(b)复合材料的破坏过程图所示。

所以,在用短纤维作为增强相复合脆性基体材料时,可选择强度达到设计要求但弹性模量相对较低的材料作为增强相,这样可显著改善材料的脆性,增强复合材料的韧性性能。



21-13step 24-20step 36-05step 55-01step
(a) $E_f/E_m=1.5$



17-5step 20-01step 20-16step 21-8step
(b) $E_f/E_m=10$

图6 破坏过程图

Fig.6 Pictures of failure process

3 小结

本文通过 RFPA^{2D} 软件对纤维增强脆性基复合材料损伤破坏全过程和声发射行为进行了数值模拟,分析研究了纤维的力学性质改变对短纤维增强脆性基复合材料宏观力学性能和破坏过程的影响。当脆性基体中复合短纤维增强相后,材料试件的强度和韧性都比基体材料显著提高。但短纤维强度的变化对复合材料试件的强度和刚度没有明显影响。而短纤维弹性模量的变化对复合材料试件的强度、刚度和韧性均影响明显,随着短纤维的弹性模量增加,复合材料试件的强度和刚度不断增加,但材料韧性却逐步降低。

参考文献:

- [1] KELLY A, TYSON W R. Fiber-strengthened materials [M] //Zackay V F ed. High Strength Materials. John. Wiley and Sons Inc, 1965:578.
- [2] KELLY A, DAVIES G J. The principles of the fiber reinforcement of metals[J]. Mat Rev, 1965, 10(1):25 - 28.
- [3] TAYA M. On stiffness and strength of an aligned short-fiber reinforced composite containing penny-shaped cracks in the matrix[J]. Composite Materials, 1981, 15(5): 198 - 210.
- [4] 杨庆生,唐立民,陈浩然. 短纤维增强金属基复合材料

- 的细观塑性变形与宏观性能[J]. 复合材料学报, 1995, 12(3): 76-81.
- YANG Q S, TANG LM, CHEN H R. . Microplastic deformation and average behaviour of metal matrix composites reinforced by short fibers[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 1995, 12(3): 76-81.
- [5] 杨四维, 蔡敏, 王慧, 等. 短纤维对基体微裂纹扩展的阻滞效应分析[J]. 复合材料学报, 1995, 12(3): 101-107.
- Yang S W, CAI M, WANG H, et al. Mechanics of crack arrest in short fiber reinforced composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 1995, 12(3): 101-107.
- [6] 唐春安, 傅宇方, 林鹏. 短纤维增强复合材料破坏过程的数值模拟[J]. 力学学报, 2000, 16(3): 373-377.
- TANG C A, FU Y F, LIN P. Numerical simulation of failure process in short fiber reinforced composite material [J]. Acta Mechanica Sinica, 2000, 16(3): 373-377.
- [7] 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[J]. 力学与实践, 1999, 21(2): 21-24.
- TANG C A. Numerical tests of progressive failure in brittle materials [J]. Mechanics and Engineering, 1999, 21(2): 21-24.
- [8] 张亚芳. 脆性基复合材料破坏过程细观力学研究[D]. 辽宁沈阳: 东北大学, 2006.
- [9] 康国政. δ - Al_2O_3 短纤维增强 Al 合金复合材料的拉伸力学行为研究[J]. 力学与实践, 2000, 22: 22-24.
- KANG G Z. Tensile behavior of δ - Al_2O_3 short fiber reinforced Al alloy composites [J]. Mechanics and Engineering, 2000, 22: 22-24.
- [10] 布赖恩·哈里斯(Bryan Harris). 工程复合材料[M]. 陈祥宝, 张宝艳, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [11] BRYAN H. Engineering Composite Materials [M]. 2nd. IOM Communication Ltd, 1999.
- [12] BECHEL V T, SOTTOS N R. The effect of residual stresses and sample preparation on progressive debonding during the fiber push-out test [J]. Composites Sci Technol, 1998, 58: 1741-1751.

Effect of Short Fiber's Mechanism on Macro Properties of Composites

LIU Hao¹, ZHANG Ya-fang², QI Lei²

(1. Halcrow China, Hongkong, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The failure mechanism and mechanical property of a brittle composite matrix, reinforced with short fibers under the uniaxial tensile load, have been studied. A numerical program developed based on meso-damage mechanics and with consideration of heterogeneousness is adopted to simulate the whole failure process of the fiber reinforced composite including transformation, damaging and cracking down. From the simulation result, the strength and toughness of the composite increase sharply when it is added with short fibers. However there is little affect on the strength and toughness of the composite when the strength of short fibers changes. When the elastic modulus of fibers is different, the strength and the toughness even the stiffness of composite are influenced greatly. Moreover, strength and stiffness enhance, while toughness reduces with the increasing elastic modulus.

Key words: short fibers; failure process; composites; AE (acoustic emission); stress-strain curves