

短纤维增强复合材料破坏过程的数值模拟¹⁾

唐春安^{*†} 傅宇方[†] 林 鹏[†] 孙旭东

^{*}(中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080)

[†](东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110006)

(东北大学材料科学与工程系, 沈阳 110006)

摘要 利用一个材料破坏过程分析程序 MFPA^{2D} 系统, 研究了短纤维增强复合材料的破坏过程。研究表明, 对于非均匀粘性材料而言, 纤维与基体的强度、弹性模量比及纤维的弹塑性性质对宏观材料的强度和韧性有很大的影响。数值模拟再现了短纤维增强复合材料的变形、破坏全过程, 包括纤维的止裂与桥连作用及微裂纹的萌生、扩展直至最终宏观贯通。

关键词 复合材料, 纤维增强, 非均匀性, 破裂, 数值模拟

引 言

在纤维增强复合材料的强度设计中, 一个很重要的问题就是必须了解纤维的性质对复合材料变形及强度性质的影响。国内外已在这方面开展了大量的研究工作。如 Taya^[1] 研究了存在于基体中的微裂纹对单向短纤维增强复合材料强度的影响。Pacella 和 Erdogan^[2] 考察了在单向加强圆柱形短纤维的中心对称面的基体部位有一钱币形裂纹的情形。杨庆生等^[3] 研究了短纤维增强金属基复合材料的细观塑性变形与宏观性能。蔡四维等^[4] 利用细观力学方法研究了短纤维对基体材料微裂纹扩展的阻滞效应。

在短纤维复合材料中, 纤维与纤维、纤维与周围基体之间由于纤维的不连续性而存在着复杂的相互作用, 它会显著地影响局部变形和破坏的过程及宏观强度及韧性性质。因此, 研究短纤维复合材料的宏、细观变形和破坏过程显得特别重要。由于理论分析上的困难, 本文尝试利用作者近年研究开发的材料破坏过程分析 MFPA^{2D} 系统^[5,6], 通过数值模拟方法再现裂纹在短纤维复合材料中的萌生、扩展直至最终宏观贯通的全过程, 并进而研究纤维与基体的强度、弹性模量比对短纤维复合材料中强度性质的影响。模拟结果表明了这一方法在研究含增强相复合材料研究中是非常有效的。

1 数值模拟模型

1.1 材料破坏过程 MFPA^{2D} 概述

用计算机来模拟和预测复合材料结构的破坏过程是目前国际上的一个热点研究方向, 也具有极其重要的实用价值。与普通材料不同, 复合材料结构的破坏是一个十分复杂的问题, 它有多种破坏模式。如界面层破坏, 纤维断裂、桥连, 颗粒及其周边介质的破坏等等。对于不同的破坏模式, 复合材料有不同的强度, 因此如何知道一个实际的复合材料结构在复杂的外载荷条

1998-04-16 收到第一稿, 1998-10-05 收到修改稿。

1) 国家杰出青年科学基金 (59472018) 及中国科学院力学所非线性连续介质力学开放实验室基金资助项目。

件下的破坏模式及其破坏强度,一直是人们十分关心的问题。崔维成^[7]对复合材料结构破坏过程计算机模拟的研究现状进行了较详细的综述,本文不再赘述。

本文所用 MFPA^{2D} 系统,是一个能模拟材料逐渐破坏的数值模拟工具。与其它已有的逐渐破坏模型 (Progressive Failure/Fracture/Damage Model) 一样^[7], MFPA^{2D} 包括两个方面的功能: 应力分析和破坏分析。其中应力分析采用有限元法进行。破坏分析则是根据一定的破坏准则来检查材料中是否有单元破坏。对破坏单元则采用刚度特性退化 (处理分离) 和刚度重建 (处理接触) 的办法进行处理。为了模拟试验机加载情况,采用位移加载方式。对于每一步给定的位移增量,首先进行应力计算,然后根据破坏准则来检查模型中是否有破坏单元。如果没有,继续增加一个位移增量,进行下一步应力计算。如果有破坏单元,则根据单元的拉或剪破坏状态进行刚度退化处理。然后重新进行当前步的应力计算。重复上述过程,直至整个材料产生宏观破坏。考虑到大多数类脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度,因此本文采用了修正后的库仑 (Coulomb) 准则 (包含拉伸截断 Tension cut-off^[8]) 作为单元破坏的强度判据。根据这一准则,单元的破坏可能是拉坏也可能是剪坏。同时考虑拉、剪破坏准则对于单元划分不能足够小的情况下尤其重要。

1.2 模型简述

短纤维增强复合材料的种类很多,性质也各不一样,尺寸跨度也很大。如钢纤维混凝土,就比较粗犷。本文研究的短纤维增强复合材料,是一种概念模型,并不特指某种实际的复合材料。以短纤维增强复合材料及外加应力为均匀拉伸的情况为例,模拟短纤维复合材料的破坏过程。在实际的短纤维复合材料中,纤维有多种铺设方式,从而使复合材料具有复杂的微结构。本文考

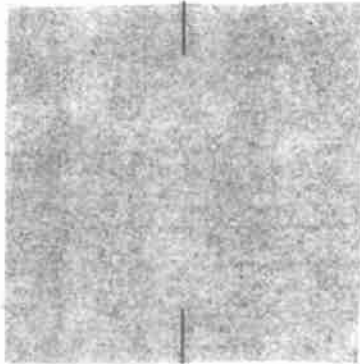


图 1 基本模型 (尺寸为 100 mm×100 mm, 共有 40 000 个等面积正方形单元, 图中单元的灰度代表强度的大小)

Fig.1 Matrix model (model size is 100 mm×100 mm. There are 40 000 same sized elements in the model. The gray color represents the values of the element strength)

虑短纤维随机各向增强体的情况。为了研究纤维的性质对复合材料增强增韧效果的影响,进行了三组不同的模拟。其中模型 I 为不含纤维的基体材料,模型 II 的纤维与基体弹性模量及强度比为 3,模型 III 的纤维与基体弹性模量及强度比为 6。此外,模型 III 的纤维比模型 II 的纤维短,但分布密度相对较大。采用平面应变分析,加载方式为位移控制。基体模型见图 1 所示。尺寸 100 mm×100 mm,划分为 $200 \times 200 = 40\,000$ 个等面积单元。本文仅限于研究纤维增强相为理想弹塑性和基体为弹脆性介质的情况,并假设纤维与基体之间为理想界面 (对于非理想界面的情况,将在有关界面影响的另文中讨论)。假定增强相介质是均匀材料,而基体的材料性质是非均匀性的。材料的非均匀性通过假定单元的力学参数 (如强度、弹模等) 服从韦布尔分布来给定,详细的处理方法请参见文献 [5, 6]。本文模型 I 即基体的弹模和强度分布的具体情况可见图 1 所示。图 1 中的灰度直接反映了参数值的大小。其中灰度由黑到白代表单元的弹模或强度参数由小到大。

2 数值模拟结果与分析

三种模型模拟得到的最后破坏形式见图 2 所示。图 3 是三种模型模拟得到的载荷与变形的

关系曲线. 模拟结果表明, 模型 I 由于没有添加增强增韧纤维, 因此显示出明显的脆性断裂性质. 模型 II 的载荷 - 变形曲线表明, 由于纤维的加入, 试样的韧性明显提高, 破坏的性质由模型 I 的脆性破坏向具有软化特征的韧性破坏过渡. 这一点也可以通过图 2 所示的裂纹扩展长度

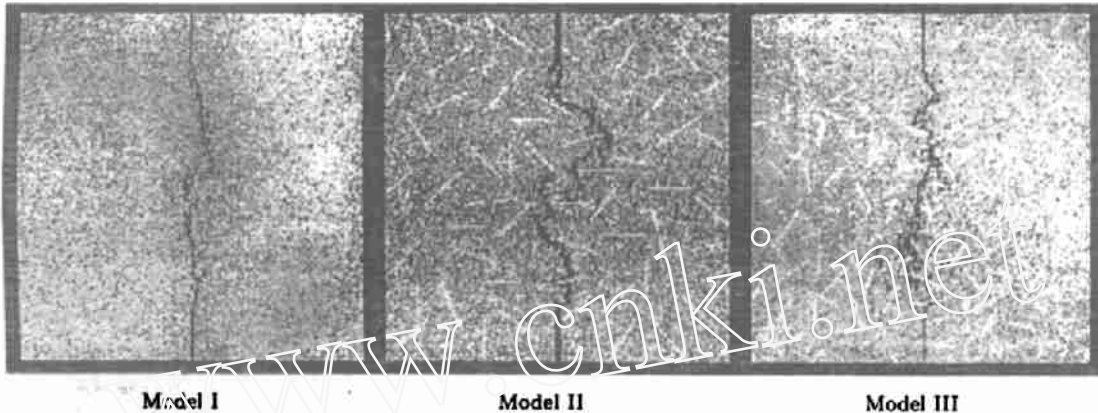


图 2 三种模型数值模拟得到的最终破裂形式 (水平拉伸加载)

Fig.2 The failure modes of three different models simulated by MFPA^{2D} (loaded horizontally by tension)

及迂回路径看出. 对于模型 II 而言, 由于裂纹的扩展路径最长, 整体试样拉伸所消耗的功要比裂纹扩展取直线路径时要高. 因此试样的韧性增加. 然而, 由于纤维的弹模及屈服极限相对模型 III 较小, 纤维对基体并没有达到增强的效果. 模型 III 则恰恰相反. 由于纤维的弹模和强度比模型 II 纤维弹模和强度都增加了一倍, 故使复合材料有明显的增强效果. 但由于纤维相对模型 II 的纤维较短 (见图 2), 故裂纹更容易取较短的路径扩展 (见图 3), 因此, 纤维并未达到对基体的增韧效果. 模拟结果表明, 纤维的力学性质及几何性质对复合材料的

增强增韧效果有极大的影响. 通过调整这些参数, 用本文的模拟方法, 可以达到进行复合材料强度和韧性设计的目的.

下面仅以模型 II 为例, 对纤维的增韧机制作一探讨. 图 4 给出的是模型 II 在拉伸载荷下的变形、破坏全过程数值模拟结果 (仅给出其中五步). 其中左边一列是破坏过程的实体图, 右边一列为破坏过程中的最小主应力场变化图.

从图 4 可以看出, 由于纤维增强相的存在, 裂纹的扩展路径呈现出复杂的图像. 当裂纹遇到纤维时, 出现如下几种情况:

- (1) 裂缝遇到纤维后发生偏转, 转向平行于纤维的方向, 并绕过纤维的端部扩展 (见图 4 试样中的上部裂缝扩展时遇到第一根纤维的情况, 及下部裂缝扩展时遇到第二根纤维的情况);
- (2) 裂缝遇到纤维后跨过纤维, 在另一侧或其它薄弱环节出现新的裂缝. 这时, 即使纤维达到屈服极限, 也不会立即断裂, 而是被继续拉长 (纤维为弹塑性材料), 纤维起到桥连的作用,

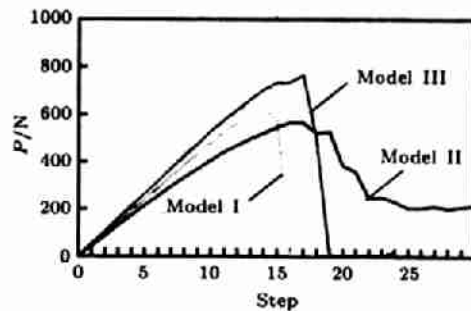
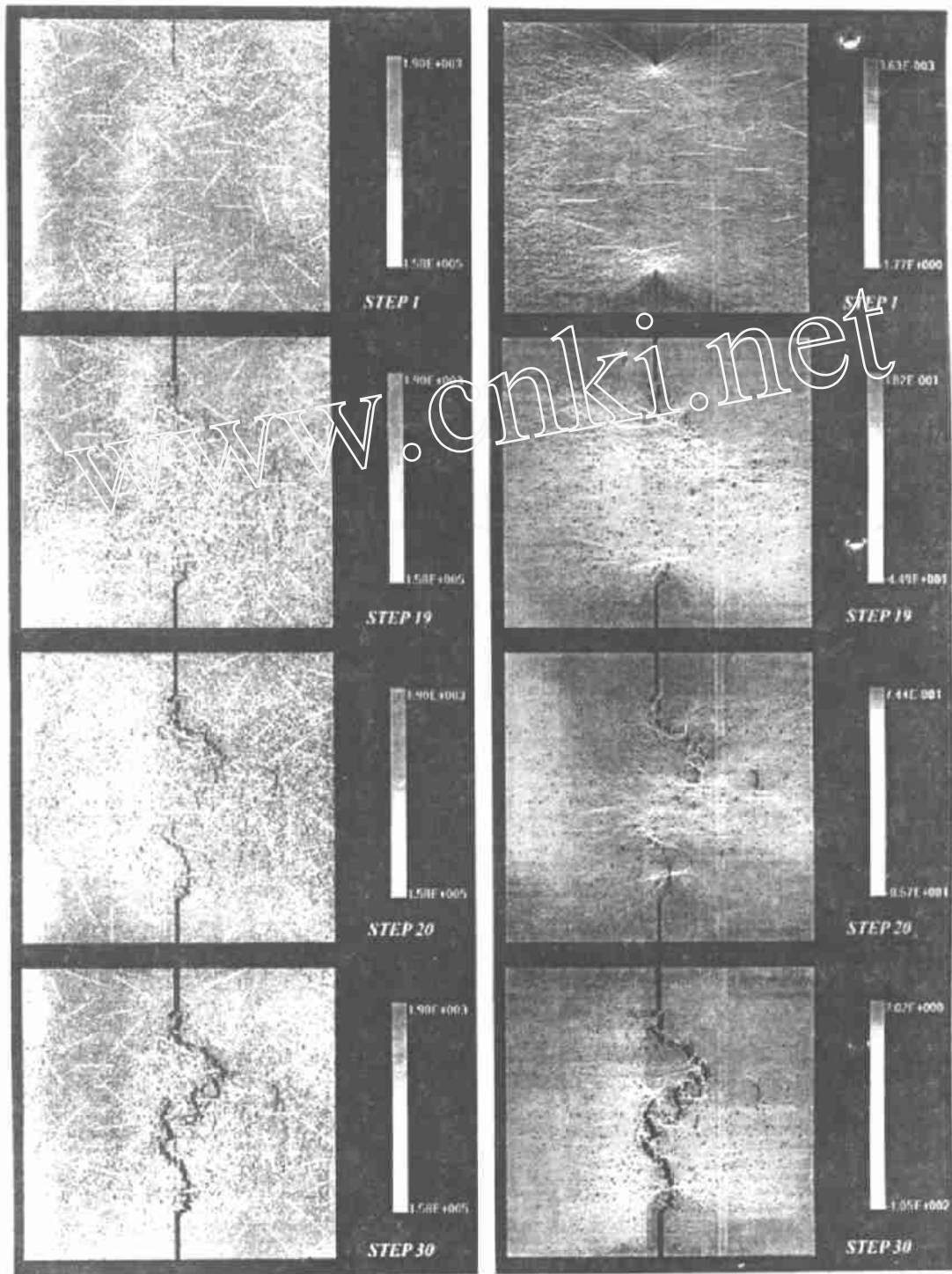


图 3 模拟得到的载荷 - 加载步曲线

Fig.3 Load-step curves from simulations



(a) 材料弹性模量分布图 (灰度表示弹模的大小, MPa)
 (a) Distribution of elastic modulus
 (Expressed by gray scale, in MPa)

(b) 材料拉应力分布图 (灰度表示应力的大小, MPa)
 (b) Distribution of tensile stress
 (Expressed by gray scale, in MPa)

图 4 模型 II 短纤维增强复合材料破坏过程的数值模拟 (MFPA^{2D}, 水平拉伸加载)

Fig.4 Failure process of short fiber enforced material simulated by MFPA^{2D} (loaded horizontally by tension)

承受了周围基体因破裂而转移的全部载荷(见图 4 试样中的下部裂缝扩展时遇到第一根纤维的情况);

(3) 裂缝遇到纤维后终止扩展(见图 4 试样中的上部和下部裂缝扩展到试样中部时均因纤维的阻碍而出现止裂的情况)。

以上几种裂缝扩展形式,纤维均起到了一定的增强增韧作用,主要是桥连和止裂作用。实际上,在材料的破坏过程中,几种破坏形式同时存在。纤维的增强增韧效果如何,在于几种破坏形式中,哪一种占主导地位。

在上述模拟中,由于纤维的强度及被拉断时的极限应变值取得很高,因此没有出现纤维被拉断的情况。但从图 4 可以看出,实际上基体已基本全部断裂,如果继续加载,纤维必然最终达到最大拉应变极限而断裂或被拔出的情况。

3 结 论

本文简单介绍了运用材料破坏过程分析 MFPA^{2D} 系统,对短纤维对非均匀脆性基体材料的增强增韧机制进行的初步数值模拟研究。模拟结果再现了短纤维增强复合材料的变形、破坏全过程,包括纤维的止裂与桥连作用及其微裂纹的萌生、扩展直至最终宏观贯通。研究结果表明,当加入纤维的长度可以改变基体中裂纹的扩展路径时,短纤维对基体有明显的增韧效果;当纤维的强度、弹性模量增加时,对基体的增强效果增加。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Pacella AH, Erdogan F. A penny-shaped crack in a filament-reinforced matrix—I. The crack problems. *Int J Solids Structures*, 1974, 10: 807~819
- 3 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. 复合材料学报, 1995, 12(3): 76~81 (Yang Qingsheng, Tang Limin, Chen Haoran. Meso plastic deformation and macro property in short fiber reinforced metal matrix composite. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1995, 12 (3): 76~81 (in Chinese))
- 4 蔡四维, 蔡敏, 王惠, 徐西林, 蔡健. 短纤维对基体微裂纹扩展的阻滞效应分析. 复合材料学报, 1995, 12(3): 101~107 (Cai Siwei et al. Mechanics of crack arrest in short fiber reinforced composites. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1995, 12(3): 101~107 (in Chinese))
- 5 唐春安. 岩石破裂过程声发射的数值模拟研究. 岩石力学与工程学报, 1997, 16: 368~378 (Tang Chun'an. Numerical simulation on acoustic emission in rock failure. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16: 368~378 (in Chinese))
- 6 Tang CA. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34: 249~262
- 7 崔维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟. 复合材料学报, 1996, 13(4): 102~111 (Cui Weicheng. Computational simulation of progressive failure in composite structures. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1996, 13 (4): 102~111 (in Chinese))
- 8 Brady BHG, Brown ET. *Rock Mechanics for Underground Mining*, Second Edition, London, UK: Chapman & Hall, 1993. 106~108

NUMERICAL SIMULATION OF FAILURE PROCESS IN SHORT FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIAL¹⁾

Tang Chunan^{*,†} Fu Yufang[†] Lin Peng[†] Sun Xudong

^{*} (*LNM Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China*)

[†] (*CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006, China*)

(*Department of Material Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006, China*)

Abstract In short fiber reinforced composite material, the mechanical interactions between fiber and fiber or fiber and matrix becomes very complicated due to fiber discontinuity. This interaction has a great influence on the centralization of deformation, the process of failure, and the properties of macro-strength and toughness of the material. Therefore, it is important to study the macro- and meso-deformation behavior and failure process in short fiber reinforced composite materials. To overcome the difficulties in analytical model studies, a numerical code, MFPA^{2D} (Material Failure Process Analysis), developed recently by CRISR, Northeastern University, China, is used to investigate the failure process in the fiber reinforced composite materials. In this way, the influence of fiber and matrix strength on the macro-strength of the composite material is addressed. Three kinds of models are simulated with Model I containing no fibers, Model II containing fibers with their elastic modulus and strength three times larger than the matrix, and Model III containing fibers with elastic modulus and strength six times larger than the matrix.

In the models, the matrix is assumed heterogeneous and brittle and fiber is ideal elasto-plastic. Heterogeneity in strength and elastic modulus in the matrix is accounted for by assuming a Weibull distribution.

Here we show by numerical simulations that for heterogeneous and brittle materials, the ratio of elastic modulus and strength of fibers and its plastic behavior have a great influence on the macro-strength and toughness of the fiber enforced composite materials. The deformation and failure process leading to unstable breakdown since the initiation of micro cracks, the propagation and the coalescence between cracks are modeled. A great many phenomena, such as crack stop and fiber bridge function, are demonstrated in the simulations.

Key words composite material, fiber reinforcement, heterogeneity, failure

Received 16 April 1998, revised 5 October 1998.

1) The project supported by the China National Natural Science Foundation (59472018) and LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.