

纤维增强脆性基复合材料界面脱粘过程的数值模拟^{*}

齐 雷¹, 张亚芳¹, 陈树坚²

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

2. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 研究了纤维增强脆性基复合材料界面脱粘过程中剪应力的变化规律。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, 对界面脱粘过程进行了模拟。结果表明, 材料的非均匀性条件对界面脱粘过程有很大的影响。

关键词: 纤维增强; 界面; 脱粘; 剪应力; 非均匀性

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 06-0048-04

纤维增强脆性基复合材料具有比强度高, 抗疲劳性能好等优点, 是目前工程中应用最广泛的复合材料之一, 纤维增强复合材料中的应力是通过纤维和基体之间的界面进行传递的。因此界面强度是评价纤维增强复合材料强度的一个重要指标。纤维拔出测试法是测试界面强度的常用方法^[1-2]。具体方法为将单根纤维部分埋入基体, 制成拉伸试件, 试验时在基体上加固定约束, 在纤维自由端施加轴向荷载, 然后根据纤维拔出时的荷载来确定界面的剪切强度^[3]。由于这种方法简单方便, 受到科技工作者的重视和研究, 得到一批重要的成果。

同时, 纤维拔出模型也是大多数数值模型的原型, 很多学者利用有限元方法对纤维拔出模型进行应力应变分析。但目前大多数拔出试验的数值模型都认为材料介质是均匀分布的, 多采用轴对称模型, 而实际上材料介质是非均匀分布的, 且已有的纤维拔出过程的物理试验也很难出现对称脱粘现象。在纤维脱粘拔出过程中, 裂纹扩展情况非常复杂, 其中包括有基体与增强纤维间、裂纹与增强体间、裂纹与裂纹间等的耦合影响。且传统的断裂力学方法很难描述裂纹从萌生到扩展的全过程。

本文通过由大连理工大学唐春安教授拥有自主知识产权的 RFPA^{1D} (Realistic Failure Process Analysis) 软件, 从细观角度来模拟分析界面脱粘的过程及在此过程中界面应力的变化情况。另外, 本文中的基体材料与增强纤维都为一种概念材料, 并不特指某种具体材料。

1 模型建立

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。RFPA^{1D} 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^[4-9]。

数值模型如图 1 所示, 共采用了埋入长度与纤维直径比分别为 5、10、20 三组试件。基体尺寸为

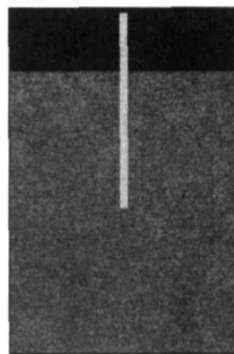


图 1 纤维拔出模型

Fig 1 The model of fiber pullout test

^{*} 收稿日期: 2007-04-26

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

作者简介: 齐雷 (1982年生), 男, 硕士; 通讯联系人: 张亚芳; E-mail: zhangyafang2004@163.com

2.5 mm×2 mm，纤维直径为 0.06 mm。考虑界面为第三相，并假设界面厚度为 0.002 mm。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°。复合材料各相的力学参数见表 1。采用竖直拉伸加载方式，加载步长为 5×10⁻⁵ mm，加载 30 步。考虑平面应力情况。

表 1 复合材料模型的力学参数
Tab 1 Mechanical parameters of the composite model

	弹性模量 /MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比
基体	7 000	7	0.25
纤维	40 000	200	0.3
界面	4 000	3.5	0.25

2 数值模拟结果及讨论

2.1 试件界面剪应力的分布

图 2 a 为 RFPA^{2D}模拟的纤维拔出试验，当纤维自由端受到一个竖直向上的位移荷载时，试件中剪应力的分布图。

由图 2 看到界面的应力集中主要发生在纤维的埋入端和纤维末端。这个结果与文献 [6] 中光弹性测试得到的界面剪应力分布图一致。

在以往的数值模拟分析中，研究者对界面处应力的模拟较多，却很少涉及到试件整体的应力分布。而本文采用 RFPA^{2D}数值程序弥补了此方面研究的不足。

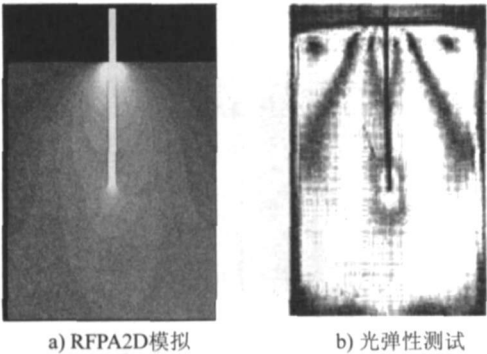


图 2 剪应力分布图
Fig 2 Map of shear stress

很多情况下，研究者在用数值方法对界面处应力分布研究的时候常常把复合材料各相当作理想的均匀、各向同性、连续介质来处理。毫无疑问，这种假设在一定程度上推动了复合材料力学的发展，著名的剪滞理论就是在这个前提下得出的^[7]。然而，复合材料在制造过程中，由于制作工艺差

异，使得材料内部的空隙和缺陷的存在，事实上复合材料不可能是均匀的。随着复合材料的发展和广泛应用，人们越来越迫切的要求建立更合理完善的理论来预测复合材料的强度或断裂韧性等有关性能。而复合材料的强度取决于材料细观的损伤演化过程，包括基体开裂，界面脱粘，纤维拔出等。这些破坏机理都需要从细观的角度去分析，这时如果再把材料看作是均匀的，无疑会对计算结果的精确性产生一定的影响。为了更接近实际的材料，本文引入均质度的概念。均质度越大，参数分布越均匀；均质度越小，分布越不均匀，详细内容参考文献 [8]。在本文模型中假设基体的均质度为 5，纤维的均质度为 15，界面的均质度为 12。

图 3 为 RFPA^{2D}模拟得到的不同的埋深长度沿界面方向剪应力的分布情况。

从图 3 可以看到，界面剪应力在埋入端最大，然后沿着纤维的方向减小，最后在纤维的末端有少量的提高。这三组不同埋入长度的剪应力分布与彭细荣，杨庆生^[9]用 Ansys 软件分析得到的界面剪应力分布相似，这又一次验证了利用 RFPA^{2D}模拟复合材料界面计算应力分布结果方法的可行性。

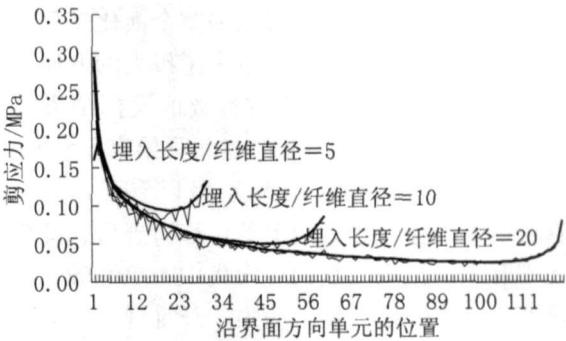


图 3 非均匀假设和均匀假设条件下，沿界面方向剪应力的变化趋势
Fig 3 The curves of the interfacial shear stress in different cases of heterogeneity and homogeneity

再来对比一下图 3 和图 4，发现尽管运用 RFPA^{2D}与运用 Ansys 计算得到的曲线分布相似，但是仍存在着不同。用 RFPA^{2D}模拟的界面剪应力分布是一条波浪线，而 Ansys 分析得出的剪应力分布是一条光滑的曲线。这个差别是由于两种软件基于不同的前提条件而产生的。Ansys 软件分析是将基体、纤维和界面看作均匀分布的连续介质来考虑；而 RFPA^{2D}却考虑了复合材料介质的细观非均匀性。两种结果的差异，说明材料的非均匀性会造成界面上剪应力的分布呈现一定的不规则性，材料破坏位置的随机性增加，破坏点不一定发生在应力最高的

位置, 而是当单元的应力达到单元的极限强度时, 就会发生损伤破坏。

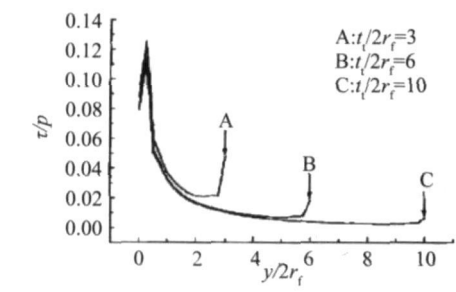


图 4 Ansys模拟得到的剪应力沿界面的分布图
Fig 4 The curves of shear stress along the interface simulated by Ansys

2.2 单丝纤维拔出过程的数值模拟

目前, 多数研究缺乏对纤维增强复合材料界面损伤形成与发展的观察和研究, 从而使得界面损伤机理的研究工作多停留在对损伤结果的研究上, 而少有进行界面损伤的形成及界面裂纹扩展机理的研究。

本文采用的 RFPA^{2D}的一个显著的特点就是能够从细观角度模拟材料在外荷载作用下, 试件的裂纹萌生、扩展以及宏观破裂的整个过程, 同时模拟得到相对应的应力场和变形场的整个演化过程。这给复合材料的损伤过程研究带来了极大的方便。

图 5 是单丝纤维拔出过程数值模拟结果的剪应力分布图, 由于篇幅原因, 这里只给出 5 个子步。

从剪应力分布图 (图 5 a) 可以看到, 当在纤维自由端施加一个竖直向上的位移荷载后, 纤维的埋入端和末端出现明显的应力集中, 单元破坏首先在这两处位置开始产生, 但由于纤维埋入端的剪应力更大, 从而导致界面在此处出现大量破坏单元, 逐渐形成裂纹, 发生界面脱粘。紧接着由于界面强度的不均匀性, 右侧的裂纹扩展较快, 从而导致了界面上剪应力分布的不均匀, 从子步 8—5 发现此时右侧裂纹尖端附近的剪应力很大, 而左侧裂纹尖端的剪应力较小, 这是由于随着右侧界面脱粘的不断扩展, 右侧裂纹尖端的剪应力不断增加。随着拔出位移荷载的继续增加, 右侧的裂纹与埋入纤维下端在加载初期产生的破坏单元相连, 裂纹再向纤维的左侧界面, 自下向上不断扩展, 最后完全脱粘, 导致纤维拔出。这一现象很好地说明了单丝纤维脱粘拔出的过程并不是对称进行的, 由于材料力学参数的不均匀分布, 以致应力的分布也不均匀, 萌发后的裂纹, 会自动地寻找一条最薄弱的路径进行扩展。这说明利用轴对称模型来模拟纤维拔出过程得到的结果与实际应力变化是有一定出入的。

文献 [10] 曾提到复合材料任何结构的突变, 如基体开裂、纤维断裂、快速脱粘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。本文使用的 RFPA^{2D}软件具有模拟复合材料试件的损伤破裂过程中的声发射行为的功能, 从而是对运用物理实验来观察损伤破坏单元时空分布不足的补充。

图 5 b是与图 5 a剪应力图相对应的声发射图。其中颜色较深的圆代表前面已损伤破坏、发生过声

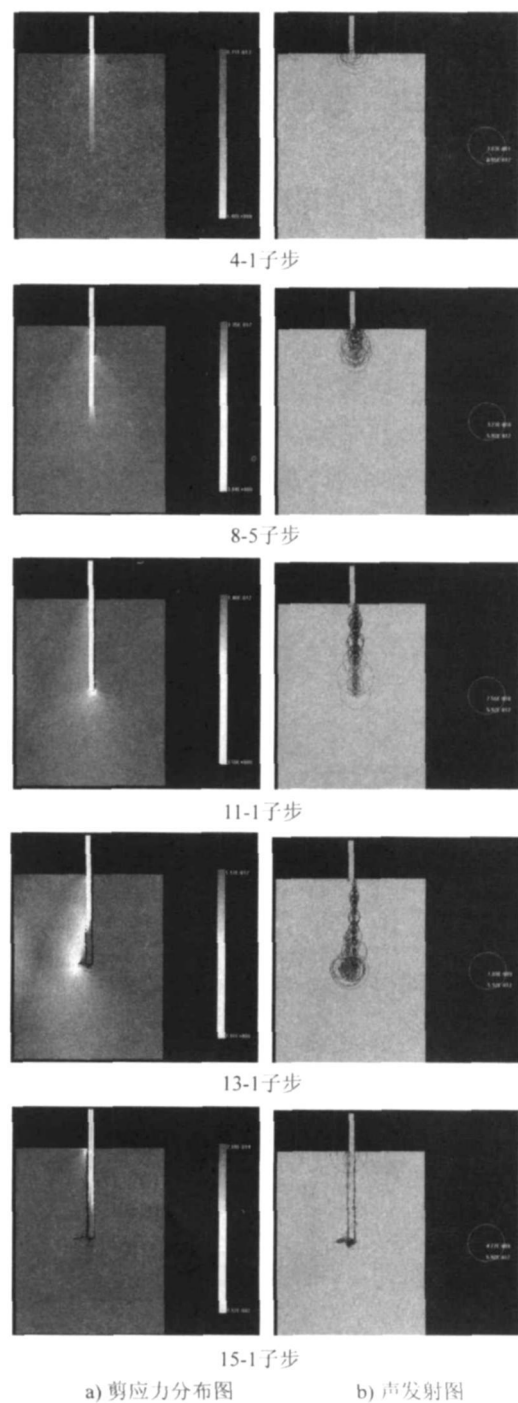


图 5 纤维拔出过程数值模拟
Fig 5 Numerical simulation of the fiber pullout test

发射的单元, 而颜色稍浅的圆代表在当前步下的当前子步所产生的损伤破坏单元以及当前子步所发生的声发射, 圆的半径越大表示声发射的能量越大。由图 5b 可以看到界面脱粘和裂纹扩展都伴随着试件的声发射过程。

为了清楚地展现声发射行为与纤维脱粘拔出现象的关联。图 6 给出了纤维拔出试件的声发射次数/荷载—荷载步曲线。可以看到, 加载初期试件中没有产生损伤破坏单元, 相应的也没有声发射次数的记录, 从荷载—加载步曲线来看, 此时处于线弹性阶段。声发射现象随着界面脱粘的开始而产生, 由小量的声发射次数可以看到一开始时界面只产生了微量的脱粘, 对界面粘结强度并没有造成影响, 在荷载—加载步曲线上表现为荷载继续增加。到图 6 中的第 9 子步时, 声发射次数明显增加, 也就是说, 界面出现大量脱粘现象, 界面粘结强度开始下降, 荷载—加载步曲线出现明显的非线性。随着位移荷载的继续增加, 由于界面粘结强度的减弱, 产生大量单元损伤, 界面脱粘加速, 裂纹扩展迅速, 荷载—加载步曲线出现明显的“荷载降”, 最后导致纤维完全拔出。

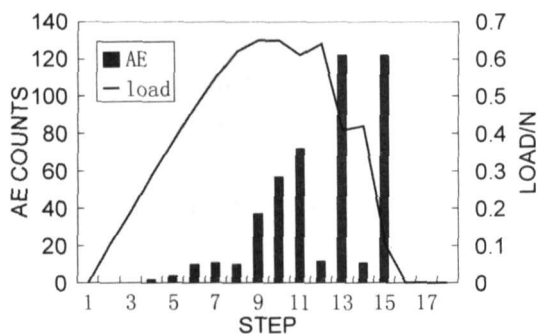


图 6 声发射次数/荷载—荷载步曲线
Fig 6 AE counts/load-step curves

3 结 论

通过本模拟试验得出以下结论: ①在非均匀的条件下, 界面剪应力的分布为一条上下波动的曲线, 增加了试件破坏位置的随机性。②在复合材料的力学性能的随机分布情况下, 复合材料界面的脱粘过程是非对称的。③通过本文数值模拟和 Ansys 的分析结果、物理实验结构的比较, 说明利用这种数值模拟方法来预测复合材料的强度是有效的。

参考文献:

- [1] DESARMOT G, FAVRE J P. Advance in pull-out testing and data analysis [J]. Composite and Technology 1991, 42: 151—187.
- [2] GRAY R J. Analysis of the effect of embedded fiber length on fiber debonding and pull-out from an elastic matrix [J]. Review of theories [J]. Journal of Materials Science 1984, 19: 861—870.
- [3] KELLY A, JYSON W R. Tensile properties of fiber reinforced material copper/molybdenum [J]. J Mech Phys Solids 1965, 13: 329—350.
- [4] TANG C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity [J]. Int J Rock Mech Min Sci 1997, 34(4): 249—262.
- [5] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂—数值模拟试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 王安强, 万建松. 单纤维界面强度光弹性实验和理论研究 [J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 147—150.
- [7] COX H L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials [J]. Brit J Appl Phys 1952, 3: 72.
- [8] 张亚芳. 脆性基复合材料破坏过程细观力学研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [9] 彭细荣, 杨庆生. 纤维拔出实验的样本尺寸效应 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(5): 84—89.
- [10] BRYAN H. Engineering Composite Materials [M]. 2nd ed. BY DM Communication Ltd 1999.

Simulation of Interface Debonding Progress of the Brittle Composite Matrix Reinforced by Fiber

QI Lei, ZHANG Ya-fang, CHEN Su-jian

(1. Faculty of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

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

Abstract: The interfacial shear stress of a brittle composite matrix that reinforced with fibers is studied. Based on meso-damage mechanical, a numerical program is adopted to simulate the whole process of the debonding. Heterogeneity is applied to each mechanical parameter. From the simulation, it can be concluded that the heterogeneity greatly influences the progress of the interfacial debonding.

Key words: fiber reinforcement; interface; embed; shear stress; heterogeneous