第 16 卷 第 3 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 3
1999 年 8 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA August 1999

# 颗粒增强复合材料基体破坏过程的数值模拟分析*

唐春安[1,2] 傅宇方[2] 林 鹏[2]

([1] 中国科学院力学研究所LNM 开放实验室, 北京 100080) ([2] 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110006)

**摘 要** 运用一个材料破坏过程分析MFPA[2D]系统, 研究了高强度圆形颗粒增强复合材料在拉伸载荷作用下经变形、损伤直至失稳破坏的全过程。分别研究了含刚性颗粒和柔性颗粒基体的不同破坏机制。数值模拟再现了颗粒增强复合材料在变形、破裂过程中的裂纹萌生、扩展规律以及颗粒间的相互作用。模拟结果清晰地显示了在脆性基体中加入刚性粒子和柔性粒子的增强增韧机制。

**关键词** 复合材料, 颗粒, 增强, 增韧, 破裂, 数值模拟

**中图分类号** TB33, O242.1

颗粒增强复合材料是目前倍受重视的新型复合材料之一。由于颗粒的加入使基体材料的力学性质得到强化或增韧, 在基体材料中加入增强颗粒已成为工程材料改性的主要手段。一般认为, 加入柔性颗粒可能使基体材料增韧, 而加入刚性颗粒则可能使材料强化[1]。这一认识为实现复合材料的强韧设计提出了一条新的研究途径。但是, 强化和增韧往往是一对难以克服的矛盾。某些增韧材料的加入可能会导致材料强度下降[2]。而由于高强度刚性粒子的加入, 使复合材料在强度增加的同时, 韧性也在下降[3,4]。例如, SiC 颗粒在金属基体中的存在, 可能会严重干扰正常的微裂纹产生和扩展, 使材料整体的韧性下降[5]。

由于增强颗粒在基体中产生的力学效应与充填后基体材料内部的应力分布及由此产生的细观损伤和演化密切相关, 已有许多有关的增强颗粒及其周围基体应力场分析的报道。张茀、卢锡年[1]、Tirosh 等[6]采用有限元分析方法, 对颗粒填充复合材料进行了受力分析, 给出了相应的基体内部应力场的分布形式, 并定性地分析了产生界面脱粘等损伤破坏形式的力学条件。本文运用一个近年由东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的材料破坏过程分析MFPA[2D]系统[7,8], 进一步研究了颗粒增强复合材料基体的破坏过程。分别研究了在高强度刚性颗粒和高强度柔性颗粒条件下基体的不同破坏机制。数值模拟再现了这种复合材料的变形、破坏全过程, 包括裂纹的萌生、扩展规律以及颗粒间的相互作用等等。

## 1 数值计算模型

### 1.1 材料破坏过程分析MFPA[2D]系统概述

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

收修改稿、初稿日期: 1998-08-04, 1998-05-10。* 本研究得到国家杰出青年科学基金(59472018)和中科院LNM 开放实验室开放基金资助

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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[9]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, 是一个近年由东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的模拟材料逐渐破坏的数值模拟工具。其最大特点是可以考虑材料的非均匀特性。与其它已有的逐渐破坏模型(Progressive Failure/Fracture/Damage Model)一样[9], MFPA$^{2D}$包括两个方面的功能: 应力分析和破坏分析。实践表明, 对于非均匀脆性材料而言, 只要抓住以下四点, 就可以对更复杂的问题进行研究:

(1) 当单元变形使应力达到一定强度值时即作破坏处理(即假定单元性质近似为弹脆性的, 但由于考虑了材料的非均匀性, 材料的宏观性质则可能是具有软化或弱化关系的非线性性质);

(2) 破坏单元不具备抗拉能力, 但具备一定的抗挤压能力;

(3) 材料的非均匀性可以通过单元力学参数分布的非均匀性来表达;

(4) 破坏单元的力学特性变化是不可逆的。

以上第一点可以处理裂纹萌生问题, 第二点可以处理裂纹的形成问题, 第三点可以处理裂纹的非规则路径问题, 第四点则可以处理裂纹的扩展与演化问题。这样, 我们就可以用数值计算方法, 研究脆性材料断裂力学的复杂问题。

本文的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。

正如崔维成所指出的[9], 逐渐破坏模型计算结果的好坏主要取决于破坏准则以及刚度矩阵退化规律选择得是否适当。到目前为止, 对于如何选择破坏准则, 还没有一个统一的认识[9]。考虑到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[10])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。因为在单元尺寸不能足够小的情况下, 仅仅用抗拉准则描述材料的破坏是不够的,

### 1.2　数值计算模型

本文模拟单轴拉伸情况下含有增强颗粒的复合材料试样。首先模拟两种仅含单颗粒的试样, 主要探讨不同颗粒性质对基体破坏形式的影响。其中一种为含高强度刚性颗粒的情况。另一种为含高强度柔性颗粒的情况。然后再模拟两种含多颗粒的情况, 用以考察颗粒的相互作用对基体破坏模式的影响。

实验观测发现[1], 单向拉伸时损伤和破坏大都发生在粒子与基体相接的界面靠近基体一侧。本文采用高强度颗粒主要是为了将问题集中在基体破坏过程的研究。

对于单颗粒情况, 采用方形试样, 加载方式为拉应力条件下的位移控制。模型划分为 150×150= 22500 个单元。对于多颗粒情况, 模型划分为 220×140= 30800 个单元。颗粒为均匀材料。对于刚性颗粒, 其弹性模量和强度分别为基体材料的 10 倍。对于柔性颗粒, 其弹性模量和强度则分别为基体材料的 1/10 倍。为了研究材料非均匀性的影响, 假设基体单元的弹性及强

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度性质服从韦布尔分布, 通过调整韦布尔分布的参数改变材料的非均匀性(在模型中如何考虑材料非均匀性, 请参见文献[7, 8])。因采用修正的库仑判据作为单元破坏的准则, 设准则中基体材料的拉、压强度比为 1/10, 摩擦角为 30°。

## 2 数值模拟结果及讨论

### 2.1 单颗粒情况

图 1a 和图 1b 分别是刚性单颗粒和柔性单颗粒在竖直方向受拉伸载荷条件下的变形破坏过程数值模拟结果。因篇幅所限, 每种模拟仅给出五步的计算结果。图中的灰度代表试样中拉应力的分布情况。

从图 1a 可以看出, 对于刚性颗粒的情况, 最大拉应力分布主要集中在颗粒的上下即极区位置。尽管应力是对称分布的, 但由于基体非均匀性的影响, 在颗粒上部极区附近首先诱发微破裂, 并立即造成局部应力集中和变形的局部化(见图 1a-2)。由于本模拟仅考虑颗粒与基体之间为理想界面的情况, 相当于颗粒与基体之间的连接良好, 因此模拟结果中的裂纹起始点并不出现在界面上, 而是出现在界面附近的基体一侧。随着载荷的增加, 裂纹不断扩展, 最后导致试样沿颗粒的下部极区产生贯通破坏。

对于柔性颗粒而言, 情况则大不一样。从图 1b 可以看出, 最大拉应力分布主要集中在颗粒的左右即赤道线附近, 并在此位置引发裂纹。随着载荷的增加, 裂纹不断扩展, 最后达到左右边界。尽管模拟结果表明, 柔性颗粒情况下试样整体的最大拉应力仅为刚性颗粒情况时的 0.63 倍, 但柔性颗粒的加入却增加了试样整体的韧性。

### 2.2 多颗粒情况

以上单颗粒模拟分析的结果与张芮、卢锡年[1]由应力场分析所预示的结果是一致的。对于多颗粒的情况, 应用通常的应力分析方法则变得难处理得多, 因为颗粒之间的相互作用过程是极其复杂的, 尤其是裂纹的扩展将不断调整应力的重新分布, 使得复合材料的破坏有着极其复杂的图象。目前还未见有关多颗粒相互作用对基体破坏过程影响理论研究方面的报道。

本节在单颗粒模拟的基础上, 进一步应用MFPA$^{2D}$系统模拟分析了多颗粒按一定的体积百分比随机地分布在基体中的复合材料的破坏过程。仍然采用刚性颗粒和柔性颗粒两种情况。图 2a 和图 2b 是含刚性颗粒试样完整破坏过程的数值模拟结果。图中的加载方式为水平拉伸加载。图 2a 中的灰度仍然代表单元当前步的最大拉应力情况, 图 2b 中的灰度则代表单元的力学性质情况(弹性模量)。由图 2b 可以更清楚地看到裂纹在材料中的扩展情况。

由图 2a 可以看出, 对于多颗粒的情况, 颗粒之间的相互作用过程是极其复杂的。从图中可以清晰地看到, 所谓相互作用, 就是颗粒与颗粒周围的应力场之间产生相互影响。比较图 2a-1 中的高应力区与图 2a-2 至图 2a-4 中逐渐萌生的微裂纹可以发现, 对于刚性颗粒的情况, 裂纹的萌生主要发生在颗粒的极区附近(颗粒左右高应力区)且颗粒间距较小的位置。图 2a-2 和图 2b-2 中显示的诱发裂纹已达到五条。随着载荷的增加, 左侧一条裂纹不再活跃, 而右侧四条裂纹则沿着颗粒间的基体不断扩展, 直至最后相互贯通。

图 3a 和图 3b 是含柔性颗粒试样完整破坏过程的数值模拟结果。模拟的加载方式与图 2 一样, 即为水平拉伸加载。与刚性颗粒的情况一样, 柔性颗粒之间的相互作用过程同样是极其复杂的。比较图 3a-1 中的高应力区与图 3a-2 至图 3a-4 中逐渐萌生的微裂纹可以发现, 对于柔性颗粒的情况, 裂纹的萌生主要发生在颗粒的赤道附近(颗粒上下高应力区)且颗粒间距较小的位置。图 3a-2 和图 3b-2 中显示的诱发裂纹已达到五条。随着载荷的增加, 裂纹沿着颗粒间

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

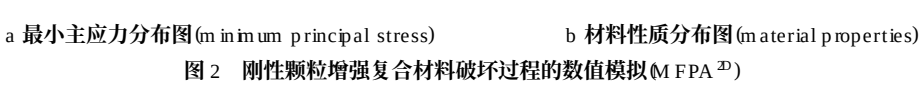
a 刚性颗粒情况(stiff particle)　　b 柔性颗粒的情况(soft particle)

图 1　高强度颗粒增强复合材料破坏机制的数值模拟拉应力分布图(颗粒与基体为理想界面情况)

Fig. 1　Numerical simulation on failure mechanisms of composite containing high strength particle (minimum principal stress, ideal interface between particle and matrix)

的基体垂直于界面扩展。与刚性颗粒复合材料相比, 裂纹的分布比较分散, 且大部分裂纹均被柔性颗粒阻断, 这显然提高了复合材料的韧性。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a 最小主应力分布图(minimum principal stress) b 材料性质分布图(material properties)

图 2 刚性颗粒增强复合材料破坏过程的数值模拟(MFPA$^{2D}$)

Fig. 2 MFPA$^{2D}$ simulation on failure mechanisms of composite containing stiff particles (ideal interface)

图 4 是数值模拟结果给出的宏观应力-应变曲线。结果表明,刚性颗粒的加入增大了材料整体的刚性,而柔性颗粒的加入则降低了材料的刚性。值得注意的是,尽管含柔性颗粒试样的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

www.cnki.net

a 最小主应力分布图(minimum principal stress)　　b 材料性质分布图(material properties)

图 3　柔性颗粒增强复合材料破坏过程的数值模拟(MFPA$^{2D}$)

Fig. 3　MFPA$^{2D}$ simulation on failure mechanisms of composite containing stiff particles(ideal interface)

宏观整体强度只及基体试样强度的 0. 6 倍, 但破裂所消耗的能量却比 2 倍还多。由此可见, 脆性基体中加入柔性颗粒大大增强了材料的韧性。然而, 由于柔性颗粒的加入, 引起了在颗粒赤

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

道附近的应力集中(见图 3), 使得基体过早萌生裂纹而降低了材料的宏观强度。对于刚性颗粒复合材料而言, 由于本例中的颗粒排列并未明显起到对裂纹扩展的阻碍作用(图 2 中的裂纹扩展路径沿基体贯通), 因此刚性颗粒的增加并未起到增强材料的效果。显然, 调整模型中颗粒的大小、形状、力学性质等, 便可以对颗粒增强复合材料的变形和破坏性质进行全面的研究。

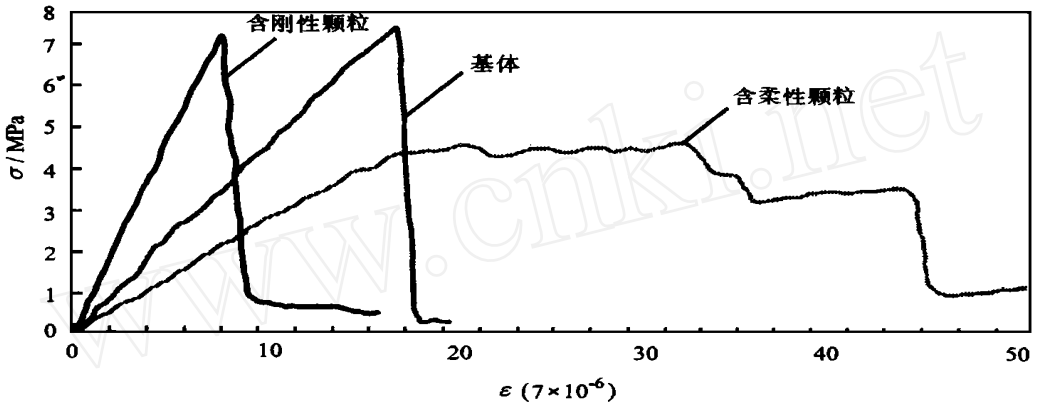



图 4 基体、含刚性颗粒和含柔性颗粒复合材料在拉伸载荷下的宏观应力-应变曲线数值模拟结果

Fig. 4 Stress-strain curves for matrix and composite containing stiff or soft particles under tensile loading conditions

## 3 结 论

通过运用MFPA$^{2D}$系统对脆性基高强度刚、柔颗粒增强复合材料破坏过程的数值模拟研究, 可以得到以下结论:

(1) 对于刚、柔圆形颗粒填充的复合材料来说, 在承受同样外载时其内部应力场有很大差异, 从而导致损伤和破坏的部位及模式有根本的不同;

(2) 单颗粒和多颗粒的模拟结果都表明, 在刚性颗粒复合材料中, 裂纹首先在颗粒极区附近的基体一侧萌生, 并沿颗粒间的基体扩展。而在柔性颗粒复合材料中, 裂纹首先在颗粒赤道附近的基体一侧萌生, 并在基体中垂直颗粒边界扩展;

(3) 本例中在脆性基体中加入刚性粒子未能使材料强化, 但加入柔性粒子的模拟结果则显示出明显的材料增韧效果;

(4) 模拟结果表明, 用MFPA$^{2D}$系统研究颗粒增强复合材料的变形、损伤直至破坏全过程是有效的。由于本方法可以随意设置材料(包括颗粒)的力学性质和几何尺寸, 因此可以很方便地研究颗粒的力学性质(弹模、强度)和几何性质(颗粒大小、形状、分布等)对基体破坏过程的影响, 从而为颗粒增强复合材料的强度和韧性设计提供一种新的方法。

本文仅研究了脆性基体高强度颗粒增强复合材料, 且颗粒与基体为理想界面的情况。对于不同强度的颗粒, 不同性质的基体, 且颗粒与基体为非理想界面的情况, 将在另文中讨论。

## 参 考 文 献

1 张 芮, 卢锡年. 球形粒子填充复合材料微观应力场的有限元分析, 复合材料学报, 1995, 12(4): 91~93

2 王俊奎, 周施真. 陶瓷基复合材料的研究进展. 复合材料学报, 1990, 7(4): 1~8

3 Nair S V, Tien J K, Bates R C. SiC reinforced Al metal matrix composites. *Int Metals Reviews*, 1985, 30(6): 275~284

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 Logsdon W A, Liaw P K. Tensile fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of silicon carbon whisker and particle reinforced Al matrix composites. *Eng Fracture Mechanics*, 1986, 24(5): 737～751
5 葛晓陵, 吴东棣, Schmauder S. Al/SiC$_P$复合材料微裂纹产生的原位研究. 固体力学学报, 1994, 15(4): 340～344
6 Tirosh J, Nachlis W, Hunston D. Strength behavior of toughened polymers by fibrous (or particulate) elastomers. *Mechanics of Materials*, 1995, 19: 329～342
7 唐春安, 赵　文. 岩石破裂过程分析RFPA 系统. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507～508
8 Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34: 249～262
9 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
10 Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining. Second Edition, Chapama & Hall, London, UK: 1993, 106～108

## NUMERICAL APPROACH TO FAILURE PROCESS IN BRITTLE AND HETEROGENEOUS MATRIX FILLED WITH PARTICLES

Tang Chunan　　Fu Yufang　　Lin Peng
(CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006)

**Abstract**　The deformation, damage, and failure process in particle filled composite are studied by using a numerical code, MFPA$^{2D}$, newly developed by CRISR at Northeastern University, Shenyang, P. R. China. Two kinds of particles, rigid and soft with high strength, are considered. The single particle is studied firstly, then multi-particles are modeled. The results from both the single particle model and the multi-particle model show that the failure mechanisms are strongly dependent on the particle stiffness. The simulations reproduce the crack initiation, propagation and coalescence in brittle and heterogeneous matrix. Interactions between the particles are also modeled. The numerical analysis elucidates the effect of the particle stiffness on the anticipated strength and toughness of the matrix.

**Key words**　composite, particle, strength, toughness, failure, numerical simulation

(上接第 128 页)

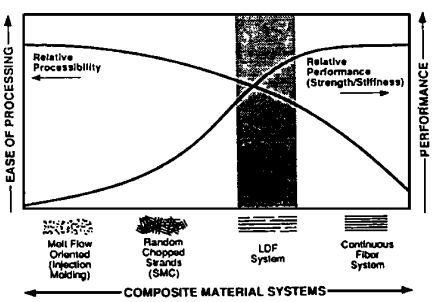



图 8　LDF[15]

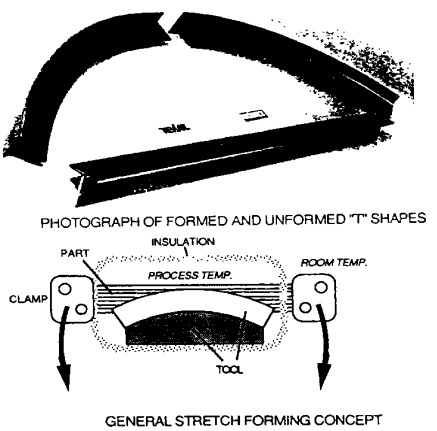



图 9　FRTP 型材的弯曲成型[14]

(下转第 123 页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net