第 16 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 4
1999 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1999

界面性质对颗粒增强复合材料破坏模式影响的数值模拟分析

唐春安[1,2] 傅宇方[2] 朱万成[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 运用材料破坏过程分析MFPA^{2D}系统, 对颗粒增强复合材料的变形、损伤及破坏过程进行了数值模拟分析。主要分析了界面性质对破坏模式的影响。模拟结果表明, 增强颗粒与基体的界面对复合材料的宏观性能有很大影响。在理想界面条件下, 破坏模式以界面附近基体的破裂为主, 在非理想界面(且为弱界面)条件下, 破坏模式以颗粒与基体的脱粘较为明显。

关键词 填充粒子复合材料, 界面, 脱粘, 破裂, 数值模拟

中图分类号 TB330.1

用细观力学方法研究颗粒增强复合材料的宏观性能是一个发展方向。目前主要的进展是通过细观力学分析来研究颗粒及其周围基体介质的应力状态[1~3]。在理论上分析颗粒增强复合材料由变形、损伤到破裂全过程的文献还比较少。然而, 颗粒填充产生的力学效应不仅与填充后材料内部应力分布有关[1], 更与由此产生的细观损伤和演化密切相关。张芮、卢锡年[1]曾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, 定性地研究了产生界面脱粘等损伤破坏形式的力学条件。唐春安等[1]曾尝试用一个材料破坏过程分析MFPA^{2D}系统, 研究了在理想界面条件下高强度圆形颗粒增强复合材料基体的变形、损伤及破坏全过程, 分别研究了含刚性颗粒和柔性颗粒基体的不同破坏机制。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对材料的增强、增韧的机制。本文作者在此基础上, 继续应用材料破坏过程分析MFPA^{2D}系统[4,5], 进一步研究在非理想界面条件下颗粒增强复合材料中颗粒与基体界面性质对复合材料宏观强度性能的影响。

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[6]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, 本文中不再赘述。

收修改稿、初稿日期: 1998-10-02, 1998-05-10

国家杰出青年科学基金项目(59472018); 中科院LNM 开放实验室资助

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

本文中所用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[6],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[6], 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[6]。考虑到脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度, 因此本文中采用了修正后的库仑(Coulomb)准则(包含拉伸截断 Tension cut-off[7])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　数值模拟模型

本文中模拟单轴拉伸情况下含有增强颗粒的复合材料试样。首先模拟仅含单颗粒试样的情况, 主要探讨不同界面性质对破坏形式的影响。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破坏模式的影响。

为了研究颗粒与基体界面的影响, 本文中考虑高强度颗粒的情况。

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。两种情况下的颗粒均为均匀材料。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。设置两种界面性质, 一种为理想界面情况, 即颗粒与基体之间不存在弱界面层。第二种为非理想界面情况, 即颗粒与基体之间存在弱界面层。

为了研究材料非均匀性的影响, 假设基体单元的弹性及强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[4,

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

5])。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°。

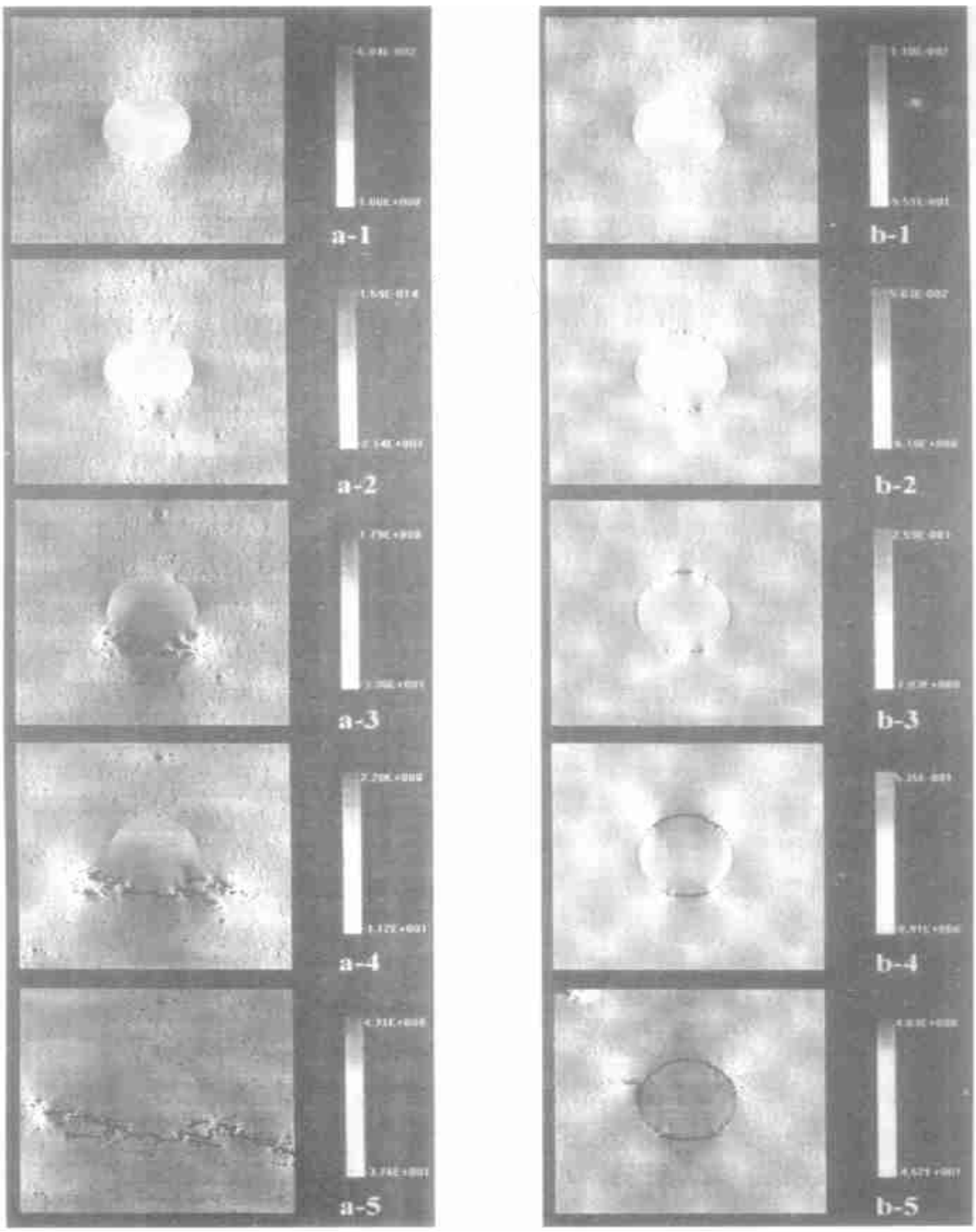

图 1 刚性颗粒增强复合材料破坏机制的数值模拟(MFPA 2D)

Fig. 1 Numerical simulation of the failure mechanism of rigid-particle filled composite

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

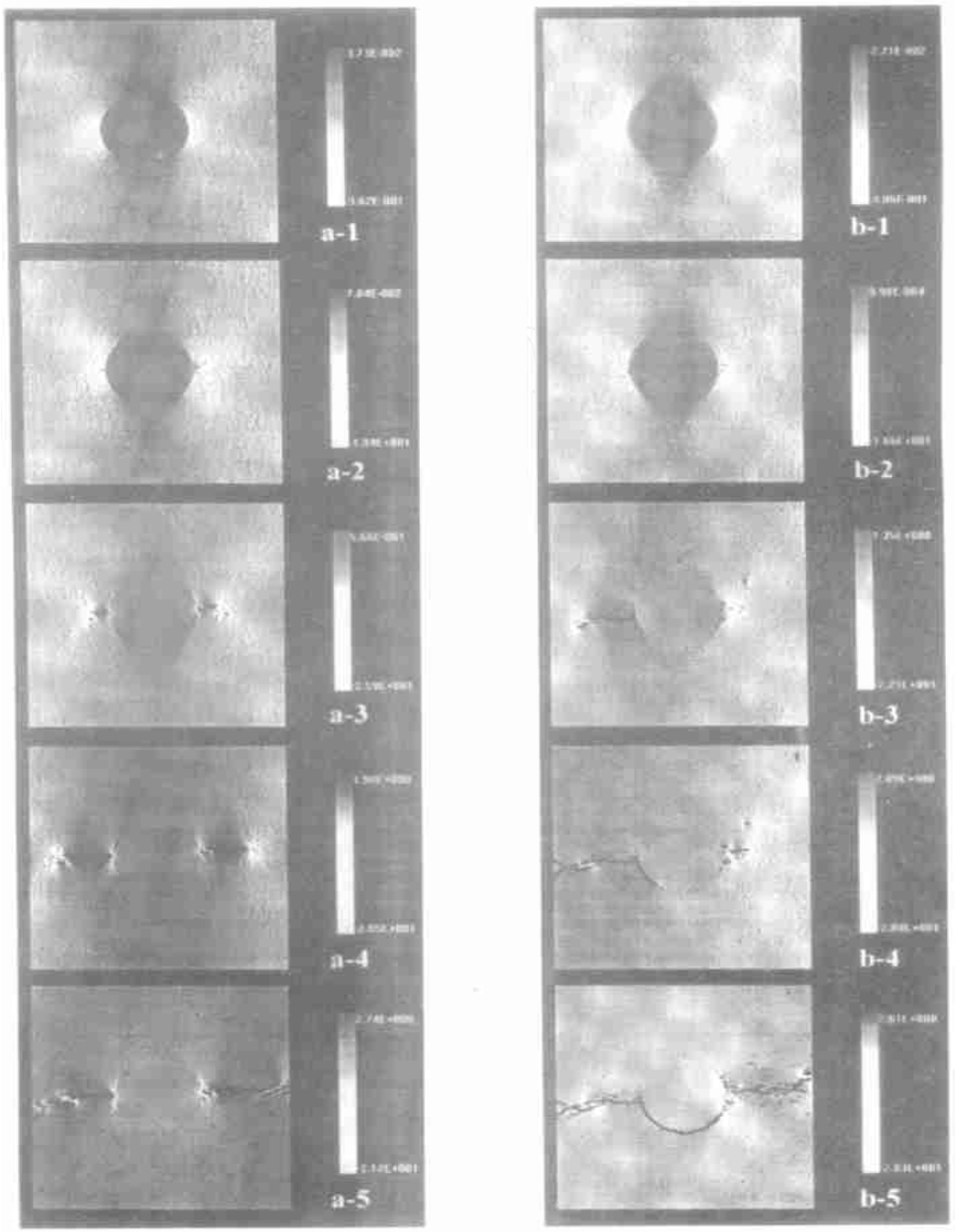

图 2　柔性颗粒增强复合材料破坏机制的数值模拟(M FPA [20])

Fig. 2　Numerical simulation of the failure mechanism of soft-particle filled composite

2　数值模拟结果及讨论

2 1　单颗粒情况

图 1(a) 和图 1(b) 是刚性颗粒分别在理想界面和非理想界面条件下竖直方向受拉伸载荷时的变形、损伤及破坏过程数值模拟结果。设弱界面层的弹模和强度为基体材料的 0. 5 倍。因

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

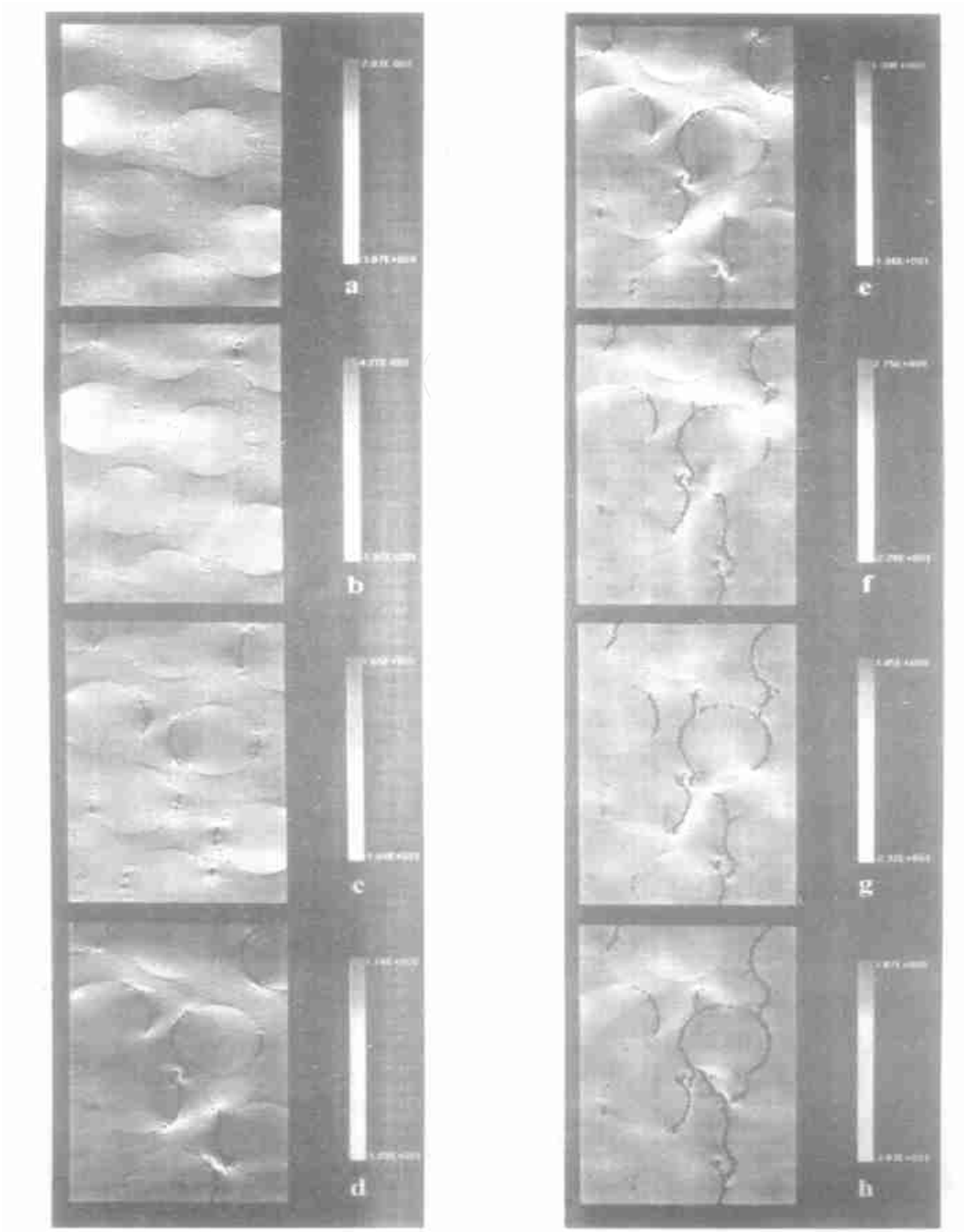

图 3 刚性颗粒非理想界面试样完整破坏过程的数值模拟结果(最小主应力图)

Fig. 3 Numerical simulation results of the complete failure process of rigid-particle nonideal-interface specimens (minimum principal stress)

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最小主应力的分布情况。

从图 1(a)可以看出,对于理想界面的情况,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,在颗粒下部极区附近首先诱发

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

微破裂, 并立即造成局部应力集中和变形的局部化(见图 1(a-2))。由于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。

对于非理想界面而言, 情况则大不一样。从图 2(b)可以看出, 由于界面强度较低, 裂纹直接在界面中诱发, 使颗粒与基体在上下极区发生脱粘。随着载荷的增加, 裂纹环绕颗粒周边向赤道不断扩展。模拟结果表明, 刚性颗粒情况下, 非理想界面的试样整体抗拉强度仅为理想界面情况时的 0.5 倍。

从图 2(a)、图 2(b)可以看出, 对于柔性颗粒试样的情况, 不管是理想界面还是非理想界面, 最大拉应力分布均集中在颗粒的左右区域即赤道位置附近。裂纹便在此位置首先诱发。随着载荷的增加, 裂纹不断扩展。对于理想界面的情况, 裂纹垂直于界面向左右边界扩展。而对于非理想界面情况, 裂纹在向左右边界扩展的同时, 还沿着颗粒的周边扩展, 最后导致试样沿颗粒的下部极区产生出现脱粘并使试样贯通破坏。值得注意的是, 模拟结果表明, 尽管图 2(a)所示的理想界面情况下, 试样并未发生贯通破坏, 相对非理想界面情况韧性增加, 但两种情况的最大抗拉强度则接近。

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界面破坏过程影响理论研究方面的报道。

本节在上述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。因篇幅所限, 仅给出刚性颗粒及颗粒与基体为非理想界面的详细结果, 对于刚性颗粒理想界面的情况, 仅给出模拟得到的最后破坏模式, 以便与非理想界面的情况进行对比。

图 3、图 4 是刚性颗粒非理想界面试样完整破坏过程的数值模拟结果。设弱界面层的弹模和强度为基体材料的 0.5 倍。图中的加载方式为水平拉伸加载。其中图 3 中的灰度仍然代表单元当前步的最小主应力情况, 图 4 中的灰度则代表单元的力学性质情况(此处为弹性模量)。由图 3 可以清晰地看到裂纹在扩展过程中的受力状态, 而图 4 则可以更清楚地看到裂纹在材料中的扩展情况。

图 3、图 4 的模拟结果表明, 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。因为是非理想界面情况, 颗粒与基体间的界面强度较弱, 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)的界面上。由于试样上部的三个颗粒比较靠近, 应力场相互作用较强(见图 3(a)), 因此裂纹首先在此处萌生(见图 3(b))。随着水平方向的加载增加(准确地说, 是位移的增加), 裂纹在多个颗粒的周边萌生和发展(见图 3(b))。当应力进入较高水平时, 颗粒间的相互作用增强。如图 3(d)所示, 有四个颗粒周边的裂纹出现明显的相互作用, 此时裂纹的发展方向析出界面, 并相向发展, 最后两两贯通, 出现明显的脱粘现象(图 3(e)～3(h)及图 4(e)～4(h))。

图 5 所示的则是理想界面条件下刚性颗粒增强复合材料的破坏过程数值模拟结果。对于理想界面而言, 裂纹的萌生虽然也发生在颗粒的极区附近(颗粒左右高应力区), 但却不是在颗

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

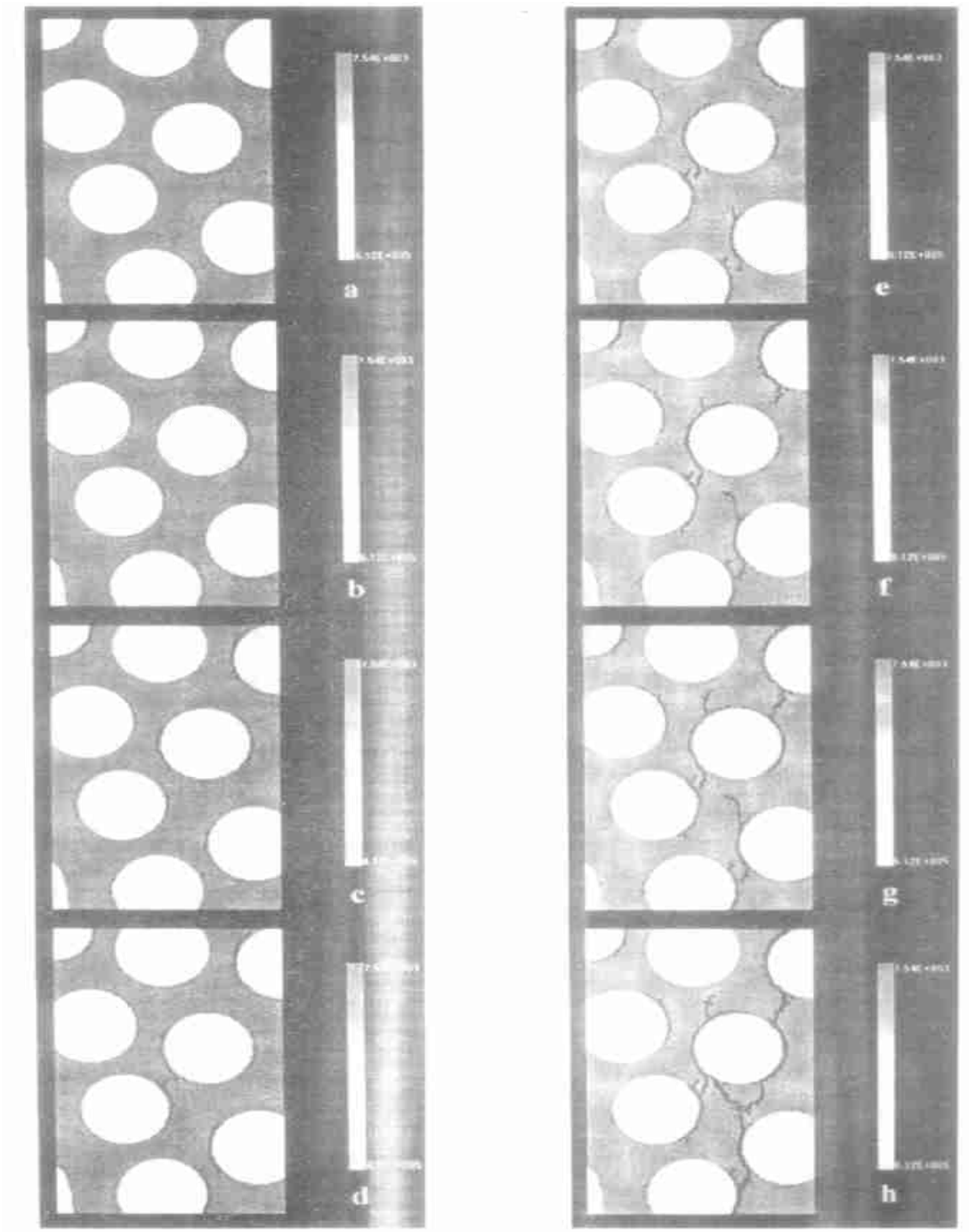

图 4 刚性颗粒非理想界面试样完整破坏过程的数值模拟结果(材料性质图)

Fig. 4 Numerical simulation results of the complete failure process of rigid-particle nonideal-interface specimens (material properties)

粒与基体的界面上,而是在界面附近靠近基体的一侧,并且裂纹是沿着颗粒间的基体不断扩展,直至最后相互贯通。在此例中,没有出现颗粒与基体的脱粘现象。

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

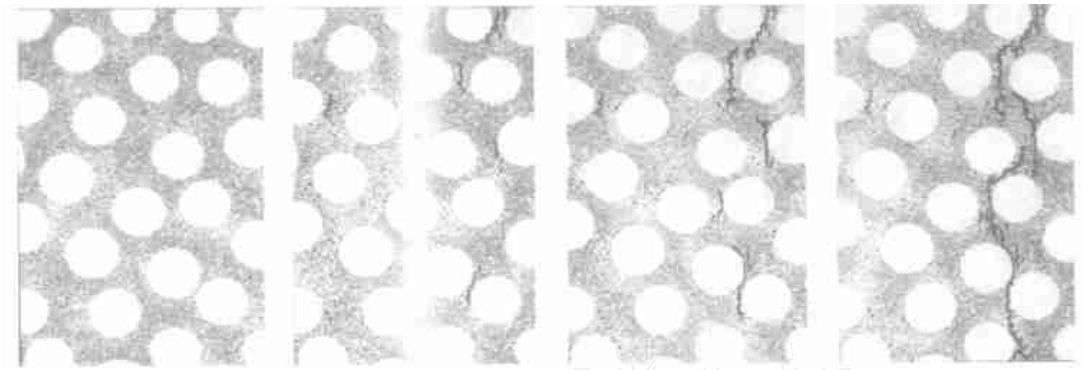

图 5　刚性颗粒增强复合材料破坏过程的数值模拟(理想界面)

Fig. 5　Numerical simulation of the failure process of rigid-particle filled composites (ideal interface)

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进行了数值模拟研究, 分析了颗粒与基体界面性质对复合材料破坏过程的影响, 可以得到以下结论:

(1) 对于不同界面性质的颗粒填充复合材料来说, 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) 对于颗粒与基体为非理想界面(且为弱界面)的情况, 裂纹的萌生主要发生在颗粒极区附近(颗粒左右高应力区)的界面上, 最后造成颗粒与界面的脱粘及其裂纹沿脱粘界面贯通导致宏观破坏。对于颗粒与基体为理想界面的情况而言, 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;

(3) 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、基体和界面)的力学性质和几何尺寸, 因此可以很方便地研究颗粒、基体及界面的力学性质(弹模、强度)和几何性质(颗粒大小、形状、分布等)对复合材料破坏过程的影响, 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。

本文仅研究了颗粒与基体界面性质对复合材料破坏模式的影响。对于不同强度的颗粒, 不同性质的基体, 颗粒与基体界面性质的影响, 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): 90～93

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　Tirosh J, Nachlis W, Hunston D. Strength behavior of toughened polymers by fibrous (or particulate) elastomers. *Mechanics of Materials*, 1995, 19: 329～342

4　唐春安, 傅宇方, 林　鹏. 颗粒增强复合材料基体破坏过程的数值模拟分析. 复合材料学报, 1999, 16(3): 110～117

5　Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34: 249～262

6　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

7　Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining, Second Edition. London: Chapama & Hall, 1993. 106～108

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

NUMERICAL APPROACH TO EFFECT OF INTERFACE PROPERTIES ON FAILURE MODES IN PARTICLE FILLED COMPOSITE

Tang Chun'an Fu Yufang Zhu Wancheng
(CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract The effect of interface properties on failure modes in particle filled composite is studied by using a numerical code, MFPA^{2D}, newly developed by CRISR at Northeastern University, Shenyang, P. R. China. Two kinds of interface, ideal and non-ideal, 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 interface properties. 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 interface properties on the anticipated failure modes. In the ideal interface condition, the failure mainly occurred in the location near to the interface. However, in the non-ideal interface condition, the failure mainly occurred in the interface, which results in the interfacial debonding.

Key words particle filled composite, interface, debonding, failure, numerical simulation

(上接第 111 页)

1.6 固化剂的使用注意事项

(1) 储存和取用

固化剂的有机过氧化物主要是消防法规定的危险品。

① 在指定温度下储存; ② 严禁烟火; ③ 避免微细金属片的混入, 否则会发生异常分解; ④ 绝对避免与萘酸钴等促进剂直接混合, 否则会在短时间内发生激烈分解反应; ⑤ 避免强冲击或摩擦; ⑥ 使用不锈钢、玻璃、聚乙烯制的清洁容器, 除此不用; ⑦ 为避免误食, 分装容器必须贴标签, 绝对不可与食物一起存放。

(2) 泼撒时的处理

如果量少, 可用废纱擦去, 而后烧掉。如果量多, 则用不燃性物吸附后烧掉, 或者用水冲洗, 将收集的液体进行碱分解后通过处理装置排水。

(3) 着火时的处理

通常用干粉或泡沫灭火器灭火。灭火后浇水冷却(保管温度低于 0℃的固化剂投入干冰冷却)。手头没有灭火器时与消防队联系, 尽快到安全场所避难。

(4) 固化剂的废弃方法

烧掉最好。在没有延烧危险的安全场所, 用废溶剂把有机过氧化物的浓度稀释到 20% 以下, 一次的最大处理量为 5kg 左右, 在半截筒内从上风处点火烧之。粉状及糊状物也要同样地溶于溶剂后烧掉。如果处理量多时, 应与固化剂厂家协商。

(5) 空容器的处理方法

在使用后的空容器中先倒少量水。用丙酮等溶剂洗净, 再用热水处理最好。烧时必须搞成半截再点火。量多时与固化剂厂家协商。

(下转第 129 页)

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