第 16 卷 第 1 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 1
1999 年 2 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA February 1999

纤维增强复合材料断裂的宏微观结合模型

郭玉翠 (北京邮电大学基础科学部, 北京 100088)
范天佑 (北京理工大学材料科学研究中心, 北京 100081)

摘 要 由于纤维增强复合材料内部结构固有的复杂性, 目前还没有一种理论和方法能很好地解决带缺陷的复合材料的断裂问题。本文发展了一种宏微观结合模型, 用有限元方法计算复合材料的断裂问题, 得到了一些有意义的结果。

关键词 纤维增强复合材料, 裂纹, 内区, 外区, 有限元
中图分类号 TB33, O242 21

纤维增强复合材料由纤维, 基体, 纤维/基体界面三相组成, 在制造和使用过程中难免出现这样或那样的缺陷, 这些缺陷往往形成宏观裂纹, 成为材料的破坏源, 它们的扩展很可能导致材料失效, 这就需要研究复合材料中缺陷的扩展规律, 但由于复合材料内部结构固有的复杂性, 对复合材料的断裂行为进行分析, 不能套用现有的断裂力学方法。因为纤维增强复合材料是典型的各向异性和非均匀材料, 这与建立在经典弹性力学基础上的断裂力学基本假定相矛盾。本文采用宏微观结合模型, 用有限元方法来计算和模拟带有裂纹的纤维增强复合材料的断裂过程, 得到了一些有意义的结果。

1 模型综述

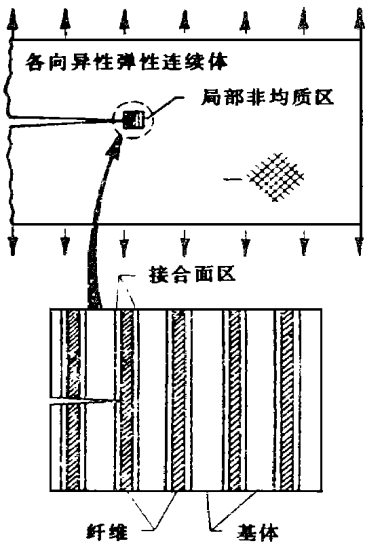
为了直接考虑裂纹尖端区材料的非均匀行为, 使数学模型和复合材料的各种微观机理失效过程结合起来, 我们发展了一种将材料分区的所谓宏微观结合模型。这个方法在概念上与流体力学中熟知的奇异摄动和匹配渐进展开技术[1]相类似, 即将带缺陷的复合材料体分成“内”、“外”两个区, 在每一个区中材料按不同的方式来模拟。内区包括裂纹的尖端或其他高应力奇点。在这个区内, 在微观尺度上考虑, 并把材料当作非均匀的来处理。外区是指围绕裂纹尖端以外的区域, 外区的材料当作均质各向异性连续体来处理(图1)。

2 有限元方法及材料参数

这种模型的有限元网格如图2所示。内区的单元采用一种“类弹簧”单元[2](图3), 每个单元具有八个自由度, 并且在四个角点连接在一起, 拉伸刚度由四个拉伸连接器提供。这些连接器类似于简单的拉伸弹簧, 但是它们也有横向收缩或泊松效应。由一组这样连接器组成的材料在单向拉伸时的行为就象均匀正交各向异性材料一样。单元的剪切刚度由弹簧的转动来体现, 弹簧常数是材料弹性常数, 单元尺寸和形状的函数。

收修改稿、初稿日期: 1998-05-12, 1998-05-26。邮电部切块基金资助项目

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



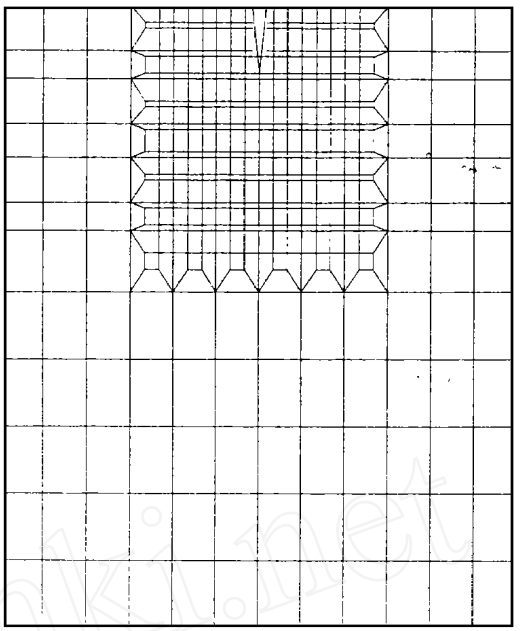
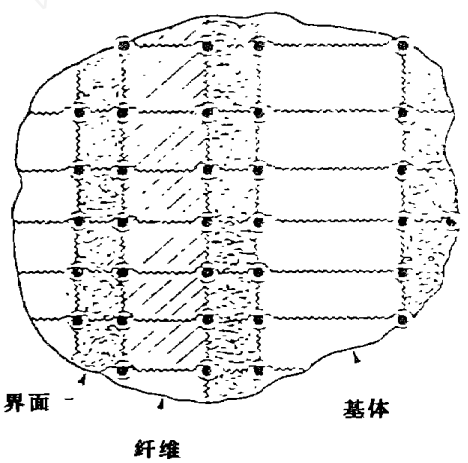


图1 复合材料断裂力学分析的宏微观结合模型

Fig. 1 The macro-micro model for analyzing the fracture of composite materials

图2 有限元网络划分情况

Fig. 2 Nets of finite element factor



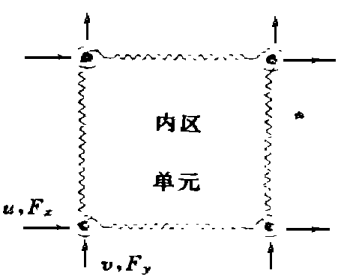


图3 内区单元的详细情况

Fig. 3 Detailed representation of an LHR element

外区是裂纹尖端区以外的区域, 其材料作为均匀正交各向异性连续体来处理, 并用"混合原则"[3]来定义弹性摸量, 即

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= E_f V_f + E_m V_m \\ 1/E_2 &= V_f/E_f + V_m/E_m \\ \nu_{12} &= \nu_f V_f + \nu_m V_m \\ 1/G_{12} &= V_f/G_f + V_m/G_m \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

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

其中 E_1, E_2, ν_{12}和 G_{12}分别为复合材料的纵向模量(即纤维方向的模量), 横向模量, 主泊松比(即由于纤维方向的拉伸引起横向的收缩比)和面内剪切模量。E_f, V_f, ν_f, 和 G_f 分别为纤维材料的弹性模量, 体积百分比, 泊松比和剪切模量; 而 E_m, V_m, ν_m 和 G_m 分别为基体材料的弹性模量, 体积百分比, 泊松比和剪切模量。在一般的纤维复合材料中, 纤维的体积占60～65%, 在我们的计算中取 V_f= 63%。计算所用的材料是石墨纤维和环氧树脂基体, 它们的性质是从Brinson 和 Yeow [4]的实验中得到的。这些性质列在表1中。纤维和基体间界面的性质不能直接从文献[4]中得到。因此在计算中, 简单地假设它们的性质与基体的性质相同, 这意味着内区只由纤维和基体两种材料组成。

表1　计算中所用的石墨/环氧树脂复合材料的弹性性质

Table 1　Elastic properties used in the simulation of a graphite epoxy composite

组分	弹性模量 E/MPa	泊松比(ν)	临界应变能密度/MN·m·m^{-3}
纤维	193053	0.3	4.528
基体	3413	0.3	0.0855
界面	3413	0.3	0.0855

断裂力学中习惯于取裂纹方向作为 x 方向, 垂直于裂纹方向为 y 方向建立坐标系, 对于有一垂直于纤维方向的裂纹的问题, 外区等效的材料常数为:

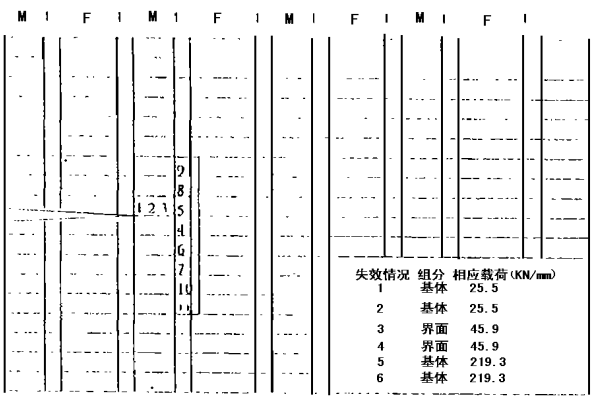
$$E_x = 9.1 \times 10^3 \text{MPa},\quad E_y = 1.24 \times 10^5 \text{MPa}$$

$$\nu_{xy} = 0.3,\quad G_{xy} = 3052 \text{MPa}$$

外区单元采用精度较高的八节点四边形等参单元来模拟。

3　计算结果与分析

(1) 通过改变每种组分的断裂特性, 纤维增强复合材料的各种局部断裂都可以用此模型来进行模拟, 例如纤维折断, 界面破坏和基体劈裂等。图4表明纤维/基体界面脱粘损伤扩展的计算结果。从图中可以看出, 损伤扩展从起始裂纹正前方的基体破坏开始, 然后出现轴向劈裂或界面脱粘形成的纵向裂纹。在这个例子中, 界面元相对薄弱, 而纤维和基体被设计成具有适中的强度。图4中的数字表示在载荷逐渐增加过程中, 每个单元断裂的发生顺序。载荷水平(相对于起始断裂的载荷水平)也记录在图中。(图形上方的大写字母F,M,I分别表示纤维, 基体和界面, 下同)



注: 图中其余各位置7、8、9、10、11处组分和相应载荷分别为界面、界面、界面、界面和界面和151.5, 220.5, 220.5, 231.3, 231.3

图4　纤维/基体界面脱粘损伤的计算结果

Fig. 4　Example of calculation with weak interface showing matrix-fiber debonding

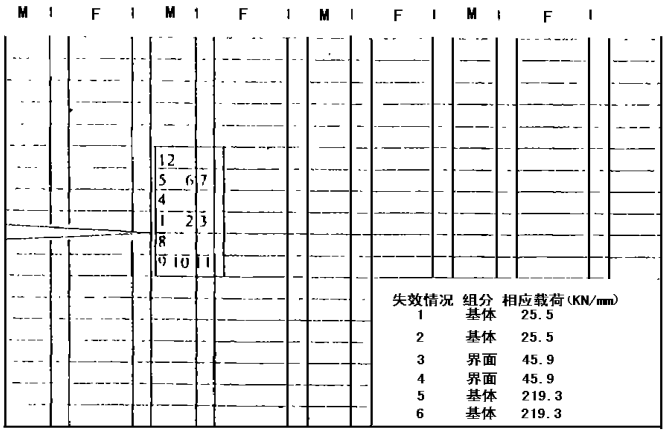
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

典型的基体劈裂发生在纤维材料相对于基体材料强度和刚度都较高的复合材料中。图5是有关例子,发生在基体内的大量局部破坏被近似地看成是基体断裂或称劈裂(Shattering)。如图5所表明,在平行或垂直于载荷方向上形成裂纹以引起损伤扩展。在这个例子中,纤维的强度和刚度都很好,但基体和界面的强刚度适中。

图6表示纤维跨越。这种现象自然发生在纤维的强度比基体的强度足够高的情况下。这时,即使基体材料足够坚强,纤维也有能力抵抗更大的延伸,在基体破坏时,它们仍能保持完整。

(2) 本文针对单向层板组成的带双边裂纹的受拉板情况进行了计算。作为裂纹长度函数的计算结果与 Brinson 和 Yeow 的实验结果及 Griffith 和 Kanninen 等人[5]的计算结果的比较示于表2中。由表中可见,模型的预测结果与前人实验及计算结果吻合较好。

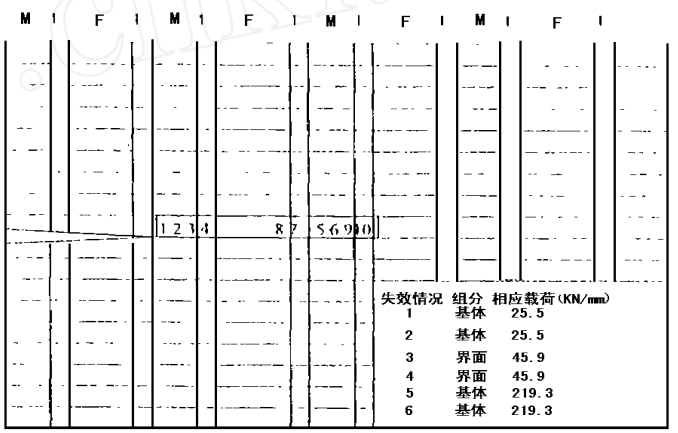
(3) 本文的结果主要是根据与纤维方向垂直的锐裂纹给出的,但是方法本身也适用于任何形式和方向的高应力问题。当然也适用于包括冲击在内的任何载荷。



注: 图中其余各位置7、8、9、10、11、12处组分和相应载荷分别为界面、基体、基体、基体、界面、基体和733.6, 754.5, 754.5, 754.5, 754.5, 1061.1

图5 基体劈裂损伤扩展的计算结果

Fig. 5 Example of calculation with strong stiff fibers showing matrix crazing



注: 图中其余各位置7、8、9、10处组分和相应载荷分别为界面、界面、界面、界面和219.3, 219.3, 219.3, 219.3

图6 跨越纤维损伤扩展的计算结果

Fig. 6 Example of calculation with stiff matrix showing fiber bridging

表2 模型预测结果与前人实验及计算结果比较

Table 2 Comparison of predicted and experimental and calculation results

裂纹长度的两倍与试件宽度之比($2a/W$)	本文预测的断裂应力/MPa	实验所得的断裂应力/MPa	文献[5]预测的断裂应力/MPa
0.11	481.2	490.2	435.0
0.22	417.1	443.3	317.8
0.33	261.3	274.4	262.0

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

参 考 文 献

1 Van Dyke M. Perturbation Methods in Fluid Mechanics. New York: Academic Press, 1964

2 Kanninen M F. An analysis dynamic crack propagation and arrest for a material having a crack speed dependent fracture toughness. In: Prospects of Fracture Mechanics, G C Sih, *et al* Eds. Noordhoff, Leyden, Netherlands, 1974. 251～266

3 [澳] 霍斯金 B C, 贝克 A A 著. 复合材料原理及其应用. 北京: 科学出版社, 1992

4 Brinson H F, Yeow Y T. An experimental study of the fracture behavior of laminated graphite/epoxy laminates. Composite Materials: Testing and Design (Fourth Conference) ASTM STP 617, American Society for Testing and Materials, Philadephia, 1977. 18～38

5 Griffith W I, Kanninen M F, Rybicki E F. A fracture mechanics approach to the analysis of graphite/epoxy laminated precracked tension panels. Nondestructive Evaluation and Flaw Criticality for Composite Materials, ASTM STP 696. 1979, 185～201

MACRO-MICRO MODEL FOR ANALYZING THE FRACTURE OF FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIAL

Guo Yucui
(Basic Science Department, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100088)

Fan Tianyou
(Research Center of Materials Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract　Because the conventional approach to fracture analysis is not capable of coping with the degree of complexity required for composite materials, a proper fracture mechanics analysis method for composite material is necessitated. This paper proposes a macro-micro model which divides a composite material containing a flaw into local and global regions and deals with the problem in each region by different methods. By means of the finite element analysis, more useful results are obtained.

Key words　fibre reinforced composite material, crack, local and global regions, finite element analysis

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