

复合材料界面对其断裂过程影响的有限元研究

李旭东¹ 张跃¹ 张凡伟¹ 张大海² 李仲平²

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100083)

(2 航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

文 摘 采用了有限元方法研究了裂纹在陶瓷基复合材料中扩展和偏转过程,探讨了界面对陶瓷基复合材料失效模式的影响。采用的界面模型考虑界面的分离势和基体与纤维间的摩擦。结果表明,在界面结合强度一定的条件下,随着基体弹性模量的不断增大,材料的断裂功也随之增大,材料的韧性和抗热震性能也就随之提高。

关键词 复合材料,界面,断裂,有限元法

Finite Element Research on Interface of Composites During Fracturing

Li Xudong¹ Zhang Yue¹ Zhang Fanwei¹ Zhang Dahai² Li Zhongping²

(1 School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

(2 National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials,
Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Finite element method was employed for the simulation of crack growth behavior of ceramics matrix composites and then the influence of interface was studied. Shear and tension potentials and friction between fiber and matrix were taken into account in the model. It is showed that the fracture energy increases when the interfacial bonding strength is not changed and the elastic modulus of matrix increases and hence the fracture toughness and thermal shock resistance of composites are improved.

Key words Composites, Interface, Fracture, Finite element method

0 引言

陶瓷复合材料中纤维/基体的界面对其断裂模式有很大的影响。一方面,界面对纤维与基体间的应力传递起着至关重要的作用,另一方面,界面也影响着复合材料在不同载荷作用下的力学性能和断裂方式。界面的脱粘和失效的数值模拟是研究的重点,而且绝大部分工作是在细观力学有限元的基础上展开的。近年来, Bao^[1]利用一个带三维界面损伤的体元模型模拟了界面脱粘中裂纹对复合材料强度和蠕变阻力的影响。Walte^[2]用包含粘结单元的体元模型分析了SiC纤维增强硅酸铝钙中的界面损伤。粘结单元代表在多个连续有限单元之间的一种表面单元,可以发生破坏,利用这种单元可以模拟材料的界面损伤。Hashin^[3]采用了广义自洽模型,把界面定义为应力和不连续位移存在线性关系的无厚度界面,这样的界面

被称为粘结带模型。Jones和Whittier^[4]的弹性界面模型也认为无厚度的界面上位移不连续而应力与位移成线性关系。Achenbach和Zhu^[5]考虑了界面连结强度,认为只有在界面局部应力超过界面强度时界面才会发生分离,应力与界面上不连续的位移成线性关系,并且讨论了界面强度对复合材料细观应力场分布以及宏观性能的影响。Needleman^[6]在实验的基础上提出了一种有分离强度的非线性界面分离模型,将界面应力表达成界面位移的三次函数的形式,可以较好地描述界面脱粘的完整过程以及应力卸载的情况。Lissenden和Herakovich^[7]将分离函数进行了改进并用有限元分析了复合材料的弹塑性问题。Ferrante^[8]考虑了界面粘结的能量势函数提出用指数函数的形式来描述界面分离,Nimmer^[9]基于有限元方法分析了界面粘结中残余应力对界面分离的影响。基于界

收稿日期:2007-10-16;修回日期:2008-04-23

作者简介:李旭东,1982年出生,硕士研究生,主要从事信息功能材料及计算材料学方面的研究。E-mail: lxd32010128@sohu.com

面应力和界面位移函数关系的粘结带模型在弱界面粘结的复合材料细观力学分析中取得了令人满意的结果。

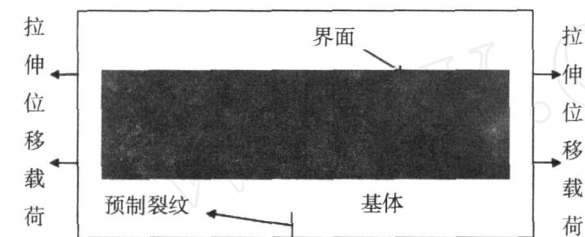
本文总结各种模型的优缺点,提出了应用微观第一原理计算所得界面分离势和剪切势,在有限元模型中采用非线性弹簧单元的位移—力曲线进行模拟,同时考虑纤维拔出与基体的摩擦,进而模拟有界面存在的陶瓷基复合材料的断裂过程。

1 建立界面模型

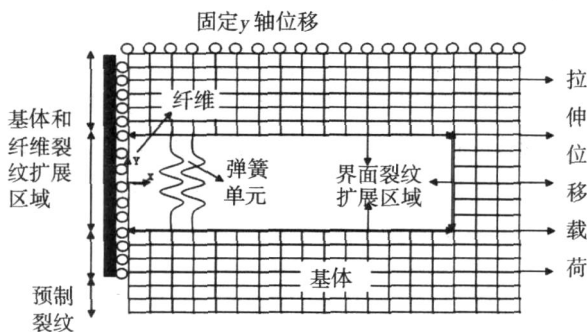
陶瓷基复合材料的增强纤维的模量和基体相当,有时甚至远低于基体,受力时基体往往比纤维更容易产生裂纹,如果基体与纤维形成强的界面结合,基体中裂纹将直接贯穿纤维而使纤维失去增强增韧作用。

复杂 2 5D 编织结构对复合材料的断裂模式本身没有质的影响,界面的结合强弱对复合材料的断裂模式的影响是研究的重点,因此可以忽略编织结构的影响,将利用界面势单独研究。

为模拟复合材料的失效断裂过程,建立复合材料单纤维二维模型(图 1)。纤维和基体都认为是线性材料,其性能参数如表 1 所示。



(a) 几何模型图



(b) 有限元网格图

图 1 计算模型图

Fig 1 Computational model

表 1 石英纤维和 SD₂ 基体的弹性性能

Tab 1 Elastic properties of quartz fiber and SD₂ matrix

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	拉伸强度 /MPa
石英纤维	78	0.15	1000
SD ₂ 基体	10~50	0.16	300

基体中存在一个切口,在模拟过程相当于一个预置裂纹,受拉伸载荷作用产生应力集中,裂纹从此处扩展蔓延至整个材料失效。采用 ANSYS 有限元软件计算模拟复合材料的失效破坏过程。四节点平面单元 plane182 用来模拟基体和纤维。这里的界面考虑无厚度的界面,纤维和基体的重复节点被应用非线性弹簧单元 COMB N39 连接起来模拟界面粘结。基体和纤维重复的节点用法向和径向的两根弹簧连接起来。弹簧的实常数由微观计算的数据给出(其值由拉伸势和剪切势而分为两组)。为了考虑纤维和基体间的摩擦作用,在界面平面单元上加入接触单元。对于基体和纤维中的裂纹扩展,通过释放边界约束条件,来模拟裂纹在对称中心处的扩展。几何模型和有限网格示意图见图 1。

裂纹扩展的判据主要有两种:强度判据、应变能释放率判据。这里选用第四强度理论(畸变能理论)来表征纤维、基体和界面的裂纹扩展,其相应的强度条件为:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad [1]$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别第一、第二、第三主应力; σ_e 为材料的本征强度。其中 σ_e 也就是有限元分析中的 Von Mises 应力。因此,在计算模拟过程中,裂纹扩展到纤维或基体处时,只要比较裂纹处的 Von Mises 和材料本征强度,来判定裂纹的扩展。当裂纹尖端的节点应力达到材料的强度时,释放该节点的约束,裂纹扩展一个单元长度。而对于裂纹扩展到界面处,则考虑弹簧单元的相对长度。当弹簧的相对长度大于设定值(由微观计算给出)时,基体与纤维间的分离势可忽略,删除弹簧,裂纹扩展一个单元长度。

另外,采用的二维平面应力模型,相当于三维的薄板模型,和三维单纤维的圆柱模型有一定的差别。为了更加真实地模拟三维条件下圆柱状的基体,纤维两侧基体上的节点采用弹簧单元相连接,从而使基体上、下两个部分连接起来,起到应力传递的作用。

2 有限元计算流程

模拟计算流程如图 2 所示,采用 ANSYS 的 APDL 编制计算程序。在裂纹扩展到基体或纤维处时,判断是否前端符合基体开裂判据或纤维断裂判据。如果符合,通过释放节点约束的方法使裂纹扩展一个单元长度,否则继续加载。而当裂纹扩展到界面时,则要用界面断裂判据,这里使用弹簧单元的相对长度的判据。如果符合判据,则删除弹簧单元来模拟裂纹的扩展,否则也继续加载。

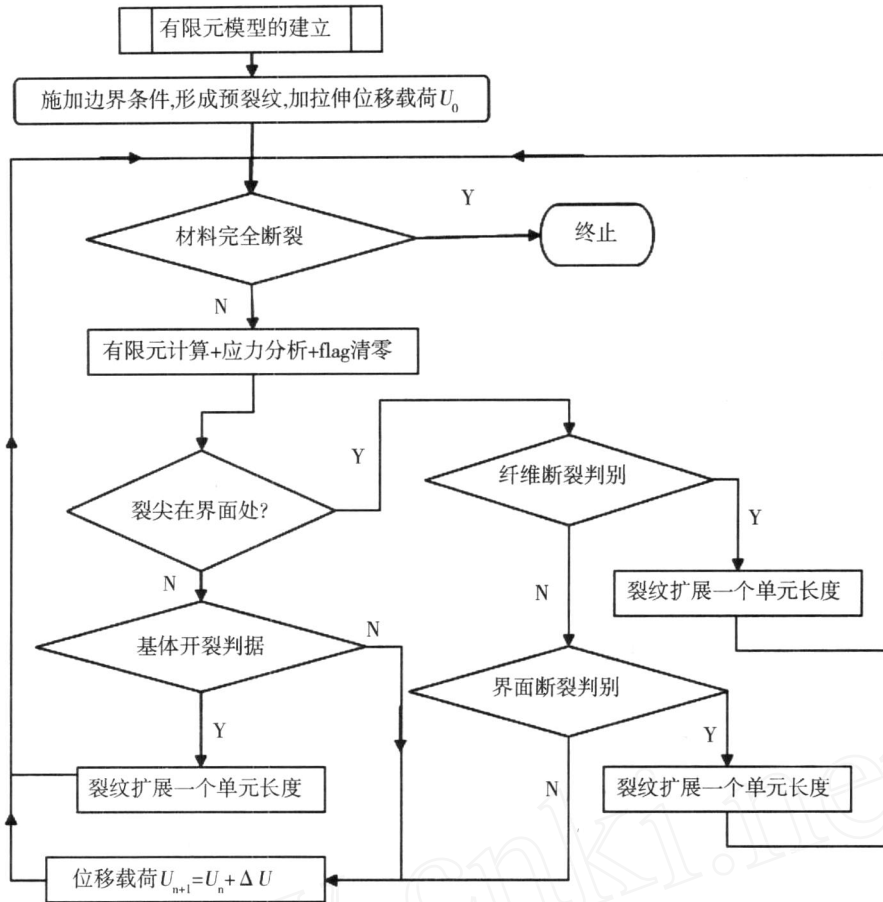


图 2 ANSYS计算流程图

Fig 2 Flow diagram of ANSYS simulation

3 计算结果与分析

通过有限元分析软件 ANSYS,可以得到不同基体弹性模量的应力—应变曲线(图 3)。

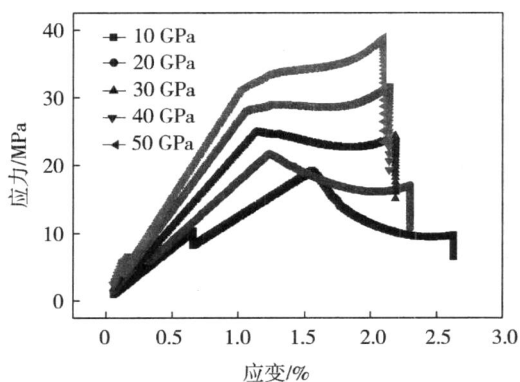


图 3 不同基体弹性模量下应力—应变曲线

Fig 3 Stress-strain curves of different Young's modulus of matrix

裂纹扩展过程中,由于界面脱粘减小了纤维处的应力集中,同时裂纹的偏转和纤维的拔出减小了裂纹的扩展阻力,发挥了纤维的增韧补强作用。当基体弹性模量不断增大时,复合材料失效时的最大应变不断减小,而最大应力增大。由此可以做出初步的预测,

当基体弹性模量在符合实际工艺条件的基础上,应尽可能大,就可以有效地提高复合材料的整体韧性。

为更好的理解界面结合强度对材料韧性的影响,从能量的角度来看,对于上述的计算结果,载荷—位移曲线所围成的面积是载荷对所做的功,也就相当于体元模型在外载荷作用下,从裂纹的产生到裂纹的扩展一直到材料的失效过程中吸收的能量,即断裂应变能。将不同基体弹性模量下的模型的断裂应变能作图(图 4),可以很明显的看出:随着不同基体弹性模量增大,断裂应变能不断增大。

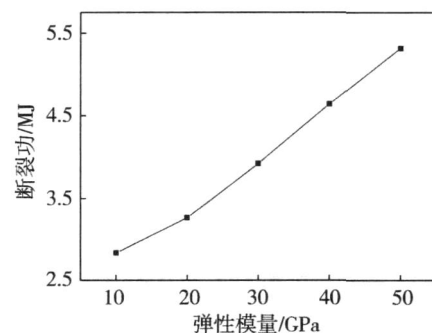


图 4 基体弹性模量—断裂应变能曲线

Fig 4 Relationship between Young's modulus of matrix and fracture energy

4 结论

对陶瓷基复合材料脆性断裂过程进行了有限元研究,探讨了界面因素对复合材料增韧、力学性能的影响,分析结果表明:在界面结合强度适中的情况下,较大的基体弹性模量,会产生较大的断裂应变能,有利于改善材料的韧性。

参考文献

- 1 Bao G A micromechanical model for damage in metal matrix composites *Damage Mechanics and Localization*, 1992; AMD - V01142/MD - V0134: 1 ~ 12
- 2 Walter M E, Ravichandran G, Ortiz M. Computational modeling of damage evolution in unidirectional fiber reinforced ceramic matrix composites *Comput Mech*, 1997; 20: 192 ~ 198
- 3 Hashin Z, Rosen B W. The elastic moduli of fiber reinforced materials *ASME J App. Mech*, 1964; 31: 223 ~ 232
- 4 Jones J P, Whither J S Waves at flexibly bonded interface *J App. Mech*, 1967; 34: 905 ~ 909

- 5 Achenbach J D, Zhu H. Effect of interfacial zone on mechanical behavior and failure of fiber-reinforced composites *J. Mech Phys Solids*, 1989; 37(3): 381 ~ 93
- 6 Needleman A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding *J Appl Mech*, 1987; 54: 525 ~ 531
- 7 Lissenden C J, Herakovich C T Numerical modelling of damage development and viscoplasticity in metal matrix composites *Comp. Meth Appl Mech Eng*, 1995; 126: 289 ~ 303
- 8 Ferrante J, Smith J R, Rose J H. Universal binding energy relations in metallic adhesion *Microscopic Aspects of Adhesion and Lubrication*, Elsevier, Amsterdam, 1982: 19 ~ 30
- 9 Nimmer R P, Bankert R J, Russel E S et al Micromechanical modeling of fiber/matrix interface effects in transversely loaded SiC/Ti - 6 - 4 metal matrix composites *J Comp. Tech Res*, 1991; 13: 3 ~ 13

(编辑 李洪泉)

(上接第 17 页)

达到监控器件制造工艺,指导、监测器件设计的目的,是今后的研究方向。

参考文献

- 1 Mcconnel A, Uma S, Goodson K Thermal conductivity of doped polysilicon layers *Journal of Micro Systems*, 2001; 10(3)
- 2 Boudenne A, Ibois L, Gehin E et al A simultaneous characterization of thermal conductivity and diffusivity of polymer materials by a periodic method *J. Phys D: Appl Phys*, 2004; 37: 132 ~ 139
- 3 宋青林等. 薄膜热导率测试结构的研究. *仪器仪表学报*, 2004; 25(4): 228 ~ 229
- 4 张建刚,陈绍凤等. 微尺度薄膜热导率测试技术. *物理学进展*, 2002; 22(3): 283 ~ 295
- 5 张立伟等. 一种用于测量 SiO_2 薄膜热导率的测试方法. *测控技术*, 2001; 20(8): 25 ~ 27
- 6 Dachen C, Goodson K, Babin S et al Thermal conductivity measurements of thin-film resist *J. Vac. Sci Technol B*, 2001;

19(6): 2 874 ~ 2 877

- 7 顾敏沁,晋宏师等. 用扫描热显微镜测量微小区域热导性质的探讨. *工程热物理学报*, 2000; 21(4): 456 ~ 460
- 8 崔景彪,方容川. 热厚衬底上薄膜材料热导率测量. *科学通报*, 1996; 41(3): 280 ~ 282
- 9 缪正宇,张青川等. 双材料微梁阵列室温物体红外成像. *物理学报*, 2006; 55(7): 3 208 ~ 3 214
- 10 Zawilski B, Littleton R, Tritt T. Description of the parallel thermal conductance technique for the measurement of the thermal conductivity of small diameter samples *Rev. Sci Instruments*, 2001; 72(3): 1 770 ~ 1 774
- 11 Zawilski B, Littleton R, Tritt T. Investigation of the thermal conductivity of the mixed pentatellurides $Hf_{1-x}Zr_xTe_5$. *Applied Physics letters*, 2000; 77(15): 2 319 ~ 2 321

(编辑 吴坚)