复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第26卷 第5期 10月 2009年
Vol. 26 No. 5 October 2009

文章编号：1000-3851(2009)05-0132-05

陶瓷基复合材料界面结合强度影响断裂过程的有限元研究

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 空天材料与服役教育部重点实验室，北京 100191；
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 100073）

摘 要： 提出了纤维增强复合材料断裂有限元模型，该模型既用弹簧单元考虑了基体与纤维之间的分离，又用接触单元考虑了基体与纤维之间的摩擦，较真实地模拟了纤维增强复合材料的断裂过程。通过有限元计算，预测了基体与纤维之间的界面结合强度对整个复合材料断裂模式的影响。还对强弱两种不同基体弹性模量的材料进行进一步的探讨。对比其他文献，本文中预测结果与真实情况较为吻合。结果表明，对于纤维增强复合材料，不论是强基体还是弱基体，适中的界面结合强度有助于提高其韧性及整体抗拉强度。

关键词： 复合材料；界面结合强度；断裂模式；有限元法

中图分类号： TB332；TB330.1 **文献标志码：** A

Finite element research on the effect of interfacial bond strength on fracturing process of ceramic matrix composites

LI Xudong[1], ZHANG Yue*[1], ZHANG Fanwei[1], ZHANG Dahai[2], LI Zhongping[2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials, Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100073, China)

Abstract: The finite element method was employed to simulate the crack growth behavior of ceramics matrix composites. The model used the combined elements for simulating the separation between matrix and fiber and the contact elements for simulating the friction between matrix and fiber, considering interfacial bond strength on the basis of the fracture model of fiber reinforced composites. It predicted that the interfacial bond strength between matrix and fiber affects the fracturing process through FEM calculation and studied the impacts on the composites with different elastic moduli of matrix for further discussion. Compared with other results, this result showed that the moderate interfacial bond strength was suitable for the composites, whether its elastic modulus of matrix was "strong" or "weak", to improve the toughness and tensile strength.

Keywords: composites; interfacial bond strength; fracture scheme; finite element method

陶瓷材料本身是一种脆性材料，但经纤维增强后其韧性和强度都有提高，纤维/基体的界面对纤维增强陶瓷复合材料的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成为研究的重点，大部分工作是在细观力学有限元的基础上展开的。近年来，Walter[1]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。Hashin[2]采用广义自洽模型，把界面定义为应力与不连续位移存在线性关系的无厚度界面。Jones和Whither[3]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[4]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

收稿日期： 2008-09-23；**收修改稿日期：** 2009-02-17
通讯作者： 张 跃，教授，主要从事陶瓷材料和计算材料学研究 E-mail：zhangy@buaa.edu.cn

位移成线性关系。Needleman[5]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。Lissenden和 Herakovich[6]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。Nimmer[7]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。

国内学者对于界面损伤、失效的细观力学数值模拟展开了一些有益的研究工作，陈浩然[8]等采用广义自洽有限元法把界面层作为有厚度的第三相，讨论了损伤界面对于复合材料宏观性能的影响，还给出了损伤界面的局部应力场。陈陆平[9]等提出采用有限元法中的非连续线弹性联结单元来模拟界面的损伤破坏过程。叶碧泉[10]等人通过在基体与纤维之间引入一个各向同性的无厚度界面元，分析了界面特性对应力-应变分布的影响，解决了界面单元划分的厚度问题。周储伟[11]等人基于内聚力模型推导了一种无厚度的界面层单元。卓家寿[12]提出的界面元方法，可以很方便地描述多相结构材料之间的界面不连续情况，也被用来进行复合材料的界面数值分析。刘春俊等[13]采用二维粘结带轴对称模型对陶瓷基复合材料的拔出过程进行模拟和分析。

本文作者在有限元模型中采用非线性弹簧单元的位移-力曲线模拟基体与纤维间的分离，同时考虑纤维拔出过程中与基体的摩擦，进而模拟有界面存在的陶瓷基复合材料的断裂过程，探讨界面结合强度的影响。

1 建立界面模型

陶瓷基复合材料具有与树脂基复合材料截然不同的断裂特性。树脂基复合材料的基体模量远小于增强纤维，受力时基体的应变大于纤维，牢固的界面结合可以充分发挥高强度纤维的承载作用，从而产生显著的增强增韧效果；而陶瓷基复合材料的增强纤维的模量和基体相当，有时甚至低于基体，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。

纤维编织结构对复合材料的断裂模式本身没有质的影响，因此，本文中忽略编织结构的影响，重点研究界面的结合强弱对复合材料的断裂模式的影响。

表 1 石英纤维和 SiO_2 基体的弹性性能

Table 1 Elastic property of quartz fiber and SiO_2 matrix

Materials	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Tension intensity/MPa
Quartz fiber	78	0.15	1000
SiO_2 matrix	10～50	0.16	300

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(如图 1 所示)。详见文献[14]。纤维和基体均被认为是线弹性材料，其性能参数如表 1 所示。有限元网格示意图如图 1 所示。

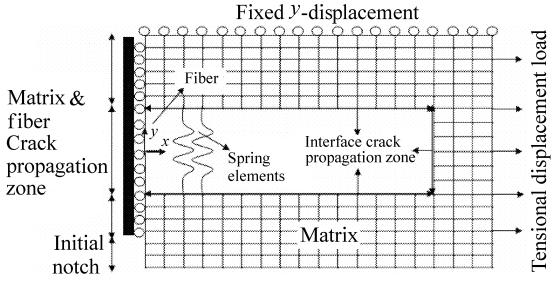

图 1 复合材料断裂模型的有限元网格

Fig. 1 FEM mesh of the fracturing model for composites

裂纹扩展的判据主要有 2 种：强度判据和应变能释放率判据。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

$$\sigma_{r4}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}\leqslant[\sigma]$$

式中：σ_1、σ_2、σ_3 分别为第 1、第 2、第 3 主应力；$[\sigma]$为材料的本征强度。其中 σ_{r4} 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，比较裂纹处的 von Mises应力与材料本征强度，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，所采用的二维平面应力模型，相当于三维的薄板模型，与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 2 个部分连接起来，起到基体间

的应力传递作用。

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，判断前端是否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。

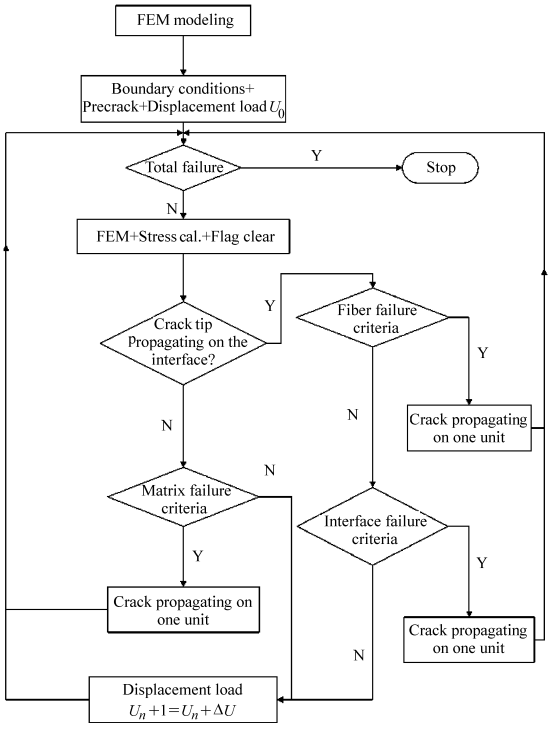

图 2　复合材料断裂过程的 ANSYS 计算流程图

Fig. 2　Flow diagram of ANSYS simulation for fracture of composites

3　计算结果与分析

这里所指的“强弱”是基体弹性模量相对于纤维的高弹性模量来说。如果基体的弹性模量与纤维的弹性模量相比接近，稍低则称之为强基体；若基体的弹性模量远低于纤维的弹性模量，则称之为弱基体。

图 3 是弱基体下不同界面结合强度的应力-应变曲线，曲线 A、B、C 分别是界面结合强度由弱到强的典型试样。由图 3 可以看出，曲线 A 和 C 基本表现为脆性断裂，只是断裂强度不一样，而曲线 B 表现为韧性断裂。这是由于曲线 A 的界面的结合强度低，界面太弱，纤维未能承载作用，且基体的模量较低，所以材料呈现较低的表观模量，而且在很小的应力下材料就开始失效；曲线 C 的界面结合很强，基体的应力较好地传递到纤维上，材料表观模量显著提高。另一方面，由于界面结合强度过大，裂纹在界面区产生的应力不能使纤维脱粘，裂纹在纤维处产生应力集中，导致纤维断裂，材料呈脆性断裂；曲线 B 界面强度适中，基体的应力能较好地传递到纤维上，材料的应力-应变特性与曲线 C 一致。曲线 B 与 C 不同的是当应力达到某一值时，界面区应力没有导致纤维断裂之前超过了界面的结合强度，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释放了应变能，发挥了纤维的增韧补强作用，应力-应变曲线呈现显著的非脆性断裂特征。结果表明，纤维/基体界面结合强度对纤维增强陶瓷基复合材料的力学特性及其断裂模式和过程具有重要的作用。界面结合强度提高能够提高复合材料的弹性模量和断裂强度，而适中的界面结合强度有助于提高材料的断裂韧性。

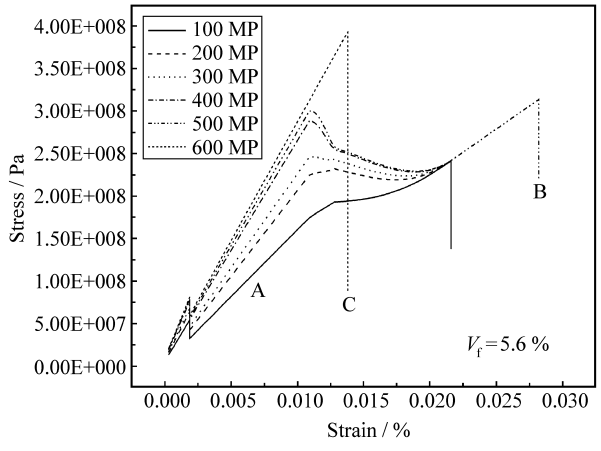

图 3　SiO_2 基复合材料弱基体下不同界面结合强度的应力-应变曲线

Fig. 3　Stress－strain curves of different interfacial bond strengths of weak matrix of SiO_2 matrix composites

图 4 是高弹性模量的强基体复合材料的界面结合强度对应力-应变曲线影响的计算结果。与图 3 相同，曲线 A、B、C 分别是界面结合强度由弱到强的典型试样。与弱基体弹性模量的情况相似，界面结合强度较小时(曲线 A)，试样表观弹性模量较小，虽然应力-应变曲线斜率有一个较小的变化，但基本上呈脆性断裂；界面结合强度很强时(曲线 C)，试样表观模量大，断裂呈完全脆性；只有适中

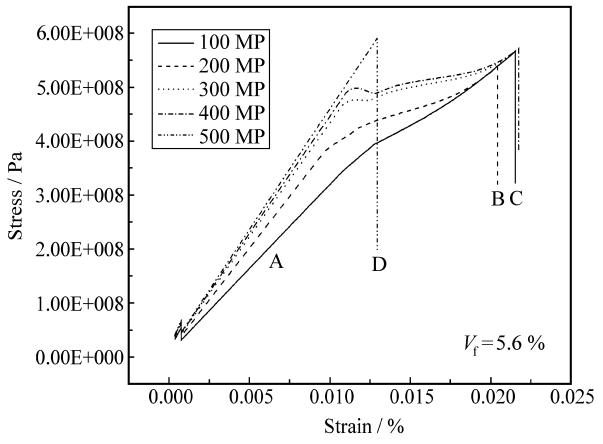

图 4 SiO_2基复合材料强基体下不同界面结合强度的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress - strain curves of different interfacial bond strengths of strong matrix of SiO_2 matrix composites

的界面结合强度(曲线 B)才表现出比较好的韧性。另一方面，对于高基体模量试样，即基体和纤维的模量相差不大时，界面结合强度对试样的断裂强度影响不大，只影响其断裂模式和韧性。这是由于当基体和纤维的模量相差不大时，受载试样的应变分布变化不大，基体与纤维间的应力传递作用不明显所致。

通过应力-应变曲线积分计算了试样的断裂应变能，2 种基体模量体系的断裂应变能与界面结合强度的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可以清楚地看到，随着材料的界面结合强度的增大，断裂应变能大体上都是先增大后减小，界面强度存在最优值，这与上述应力-应变曲线的讨论相一致。随着界面结合强度的增大、试样表观模量和应力-应变的非线性的提高，断裂应变能提高。界面结合强度进一步提高，试样成为脆性断裂，断裂应变能下降。比较 2 条不同界面结合强度试样的曲线可知，对于基体模量小的试样来说，随着界面结合强度的提高，应力传递作用显著，试样断裂强度提高显著，因此断裂应变能增加显著。而基体弹性模量大的试样，界面结合强度较低时，断裂应变能增大的效应不显著。但是，高基体模量试样的脆性断裂转变对界面结合强度更敏感，断裂应变能下降得更剧烈，开始转变的界面结合强度更低。

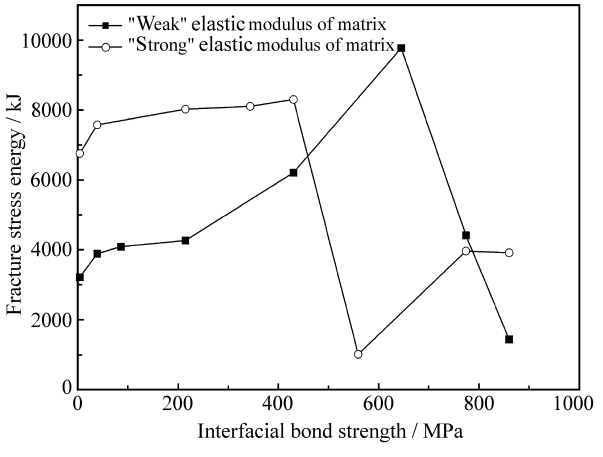

图 5 SiO_2基复合材料断裂应变能-界面强度曲线

Fig. 5 Relationship of SiO_2 matrix composites between interfacial bond strength and fracture energy

4 结 论

采用有限元分析方法，通过建立弹簧及界面接触单元界面模型，能够很好地探讨复合材料力学特性和断裂过程。通过对不同基体模量试样的计算，研究了界面结合强度对复合材料力学性能的影响。结果表明：

(1) 对于陶瓷基纤维增强复合材料，无论是强基体还是弱基体，界面结合强度都是一个极为重要的因素。界面结合强度的提高有助于应力传递提高复合材料断裂强度，适中的界面结合强度的复合材料呈现显著的非脆性断裂特性，具有较高的断裂应变能。但界面结合强度过高时，复合材料成为脆性断裂，纤维的增韧效果下降。

(2) 基体模量不同，复合材料的界面结合强度效应的程度不同。

参考文献：

[1] Walter M E, Ravichandran G, Ortiz M. Computational modeling of damage evolution in unidirectional fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Comput Mech, 1997, 20(1/2): 192-198.

[2] Hashin Z, Rosen B W. The elastic moduli of fiber reinforced materials [J]. ASME J App Mech, 1964, 31(1): 223-232.

[3] Jones J P, Whither J S. Waves at flexibly bonded interface [J]. J App Mech, 1967, 34(4): 905-909.

[4] Achenbach J D, Zhu H. Effect of interfacial zone on mechanical behavior and failure of fiber-reinforced composites [J]. J Mech Phys Solids, 1989, 37(3): 381-393.

[5] Needleman A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding [J]. J Appl Mech, 1987, 54(3): 525-531.

[6] Lissenden C J, Herakovich C T. Numerical modelling of damage development and viscoplasticity in metal matrix composites [J]. Comp Meth Appl Mech Eng, 1995, 126(3/4): 289-303.

[7] 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]. J Comp Tech Res, 1991, 13(1): 3-13.

[8] 陈浩然，苏晓风，郑长泉. 考虑损伤界面的多相复合材料总体平均力学性能的预测 [J]. 计算力学学报，1995，12(1)：39-46.
Chen Haoran, Su Xiaofeng, Zheng Changquan. The prediction of overall average mechanical properties for multi - phase composites with imperfect interphase [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1995, 12(1): 39-46.

[9] 陈陆平，潘敬哲，钱令希. 复合材料纤维/基体界面失效问题的参变量有限元数值模拟 [J]. 复合材料学报，1993，10(1)：71-75.
Chen Luping, Pan Jingzhe, Qian Lingxi. The quasi parametric finite element numerical simulation of failure process at fiber/matrix interface of composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1993, 10(1): 71-75.

[10] 叶碧泉，翼旭明. 用界面单元法分析复合材料界面力学性能 [J]. 应用数学和力学，1996，17(4)：343-348.
Ye Biquan, Yi Xuming. Analysis of interphase mechanical behavior with interface element in the composite materials [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1996, 17(4): 343-348.

[11] 周储伟，杨　卫，方岱宁. 内聚力界面单元与复合材料的界面损伤分析 [J]. 力学学报，1999，31(3)：117-122.
Zhou Chuwei, Yang Wei, Fang Daining. Cohesive interface element and interfacial damage analysis of composites [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1999, 31(3): 117-122.

[12] 卓家寿，章　青. 不连续介质力学问题的界面元法 [M]. 北京：科学出版社，2000：260-261.

[13] 刘春俊，张　跃，张大海，李仲平. 陶瓷基复合材料纤维拔出的有限元研究 [J]. 稀有金属材料与工程，2007，36(S1)：766-769.
Liu Chunjun, Zhang Yue, Zhang Dahai, Li Zhongping. Finite element simulation of fiber pullout in fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(S1): 766-769.

[14] 李旭东，张　跃，张凡伟，张大海，李仲平. 复合材料界面对其断裂过程的有限元研究 [J]. 宇航材料工艺，2008，28(3)：22-25.
Li Xudong, Zhang Yue, Zhang Fanwei, Zhang Dahai, Li Zhongping. Finite element research on interface of composites during fracturing [J]. Aerospace Materials & Technology, 2008, 28(3): 22-25.