第10卷第1期　　复合材料学报　　Vol.10 No.1
1993年　3月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　March 1993

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

陈陆平　潘敬哲　钱令希

(大连理工大学工程力学研究所，116023)

摘　要　本文利用参数拟二次规划法和非连续线弹性本构模型，构造了复合材料纤维/基体界面失效问题的细观力学模型并进行了有限元计算分析，得到了与实验相吻合的结果。

关键词　参数拟二次规划法，非连续线弹性本构模型，纤维/基体界面失效，复合材料

1　引　　言

在复合材料学中，纤维/基体界面问题是最活跃的研究领域之一。它主要包括三个方面：第一是研究界面的化学和物理的结构；第二是研究界面的形状对复合材料整体性能的影响；第三是有关基础理论的研究。界面研究的根本目的在于对各种不同的复合材料体系，寻求有效的纤维表面处理工艺与纤维基体的复合工艺，以获得最佳的宏观物理力学性能，同时排除不相容的复合材料体系。因此，界面问题是物理、化学、力学与材料科学的交叉问题。

从细观角度来看，复合材料作为一个微结构，其力学性能依赖于各组分材料的性能，因此复合材料的整体性能是可以设计的[1,2]，这一点对弹性性能来说可以做到，但是对于诸如强度，韧性等与破坏过程有关的整体性能基本上还处于经验设计的阶段[2]。

研究复合材料的破坏模式与复合材料的材料设计是两个彼此独立，也彼此相关的课题。要想得到具有某些优良性能的复合材料，就要能对如何选择界面的强与弱；基体的韧性与刚性；纤维的高强度与高模量等做出正确的判断。这样我们首先要知道复合材料的破坏模式，即对裂纹如何从基体、纤维、层面、层间扩展。并导致复合材料的最后失效的过程有一个较为透彻的了解[2,3]。从力学角度来看，界面的失效是一个裂纹在多相介质中的扩展问题，断裂力学对界面失效过程的数值模拟存在着相当的困难。本文根据非连续线弹性问题的参变量变分原理及其参变量有限元方法[4]，对纤维/基体的界面失效过程建立了非连续线弹性模型，进行了有限元数值模拟，数值结果与扫描电镜观察到的实验现象吻合得很好。

复合材料的破坏模式受界面粘接程度的影响很大。界面材料的力学性能有传递和阻断双

本文1991年6月收到，国家自然科学基金重大项目资助

重效应。纤维和基体间需要良好的粘结，以保证能将应力传递给纤维（传递效应）；但是断裂纤维邻近的界面脱粘将缓和未断纤维的应力集中，阻止主裂纹的继续扩展（阻断效应）并吸收能量。这样就提出了一个界面最佳粘合问题[2,5]，把这个问题当作优化问题来处理，则设计变量可选用表征界面强弱的物理量：界面的剪切强度和界面的抗剪韧性，文[2]给出了二者的实验测定方法。目标函数通常选用受界面性能影响较大的复合材料性能，例如无切口纵向拉伸强度和切口拉伸强度。文[6]中用实验测定了多种基体和纤维在不同组合下，二种界面粘接方式对它们拉伸强度的影响，并利用有限元法对实验进行了数值模拟。文[7-9]也分别研究了界面在复合材料破坏过程中的作用，本文注意到文[10]对具有强弱两种不同界面强度的高模量碳纤维增强环氧基复合材料进行了对比研究，实验结果表明：具有较弱界面强度的复合材料具有较高的拉伸强度，并用有限元法分析了这一结果，但没有说明破坏过程。本文用非连续线弹性模型对上述实验现象进行数值模拟。

2 计算模型的构造

文[10]中做计算分析时，沿轴向取复合材料截面，让其中纤维单元的强度遵从 weibull 分布，改变界面强度作平面问题的有限元计算，从整体上说明了断口受界面强度影响的情况。本文为进一步说明界面失效过程，采用上文中的实验数据建立新的计算模型。对复合材料各组成部分分别做如下处理。

复合材料基体和纤维之间的界面相对整体来说尺寸很小，但它的剪切刚度和强度可以测定[2]。因此，本文采用联结单元模拟界面[4]（如图2.1示），并且，界面破坏当作脆性断裂来处理[7]，所以联结单元符合非连续线弹性本构模型，其失效准则及刚度降级准则为：

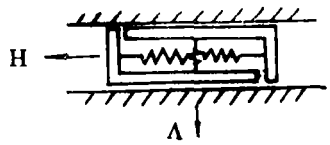

图2.1 联结单元模拟界面

$$若\varepsilon_H > X_{HT} \qquad 则K_H = 0$$

$$若\varepsilon_v > X_{vT} \qquad 则K_v = 0$$

ε_v和ε_H分别为纤维与基体之间的相对法向应变和切向应变；X_{vT}和X_{HT}分别是法向应变和切向应变的临界值，可按文[2]实验测定取值；K_v和K_H分别是法向和切向刚度。

对于基体和纤维，根据实验结果，也可分别看作是各向同性非连续线弹性体，相应的失效准则和刚度降级准则可叙述如下[4]：

在总体坐标下，设单元的弹性矩阵为：

$$[D] = \frac{1}{1-\nu^2}\begin{bmatrix} E & \nu E & 0 \\ \nu E & E & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}$$

矩阵中E、ν、G为弹性常数，采用最大主应变失效判据：在主应变方向上，当某一主应变超过临界X_t时，材料在该方向发生失效，弹性矩阵变为：

$$[D_1] = \frac{1}{1-\nu^2}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

当另一个方向的主应变也超过临界值X_t时，该单元完全失效，弹性矩阵变为零，弹性阵中E、ν、X_t，随基体和纤维的选取而变化。

Rosen在提出的累积弱化模型中假定[1]：纤维中的缺陷是随机分布的，随着载荷的增加纤维在最薄弱点破坏，如图2.2所示。继续加载时，若界面很强，在基体很脆情况下，则裂缝会使基体开裂引起邻近纤维断裂导致整体破坏，此时断口整齐。本文猜测若界面较弱，纤维断裂后，断续加载，则界面会开裂，导致最后的断面可以看到有纤维拔出现象；同样，裂缝在脆性基体中首先出现并扩展也会导致这种结果。因此为了更清晰描述界面失效情况，并能简化计算为平面问题，取出图2.2中虚框部分，按图2.3划分，节点6到节点114的直线为界面，6、7和114、115等重节点号表示联结单元的存在，并对边界节点作如下处理：

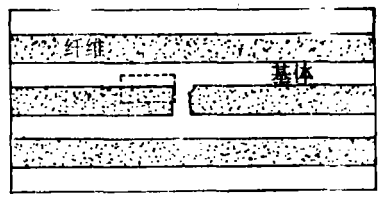

图2.2 纤维破坏示意图

1. 节点1—3，y轴方向位移限定为零；7—9节点的y向放松位移，模拟初始裂缝存在。
2. 节点109—117，y轴方向指定位移，并成比例增加，模拟复合材料的轴向拉伸。

本文中纤维体积含量取为50%，联结单元的弹性模量取为：K_H＝3500MPa、K_V=3500MPa，界面强度等其它参数采用文[2]中的实验结果，见表2.1、表2.2（其中：HM—L表示弱界面，HM—H表示强界面）。

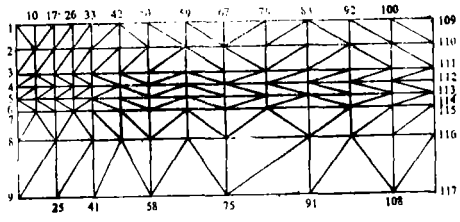

图2.3 图2.2中虚框部分的界面失效情况

表2.1

	Fiber	Matrix
Tensile Modulus	400GPa	3.5GPa
Tensile Strength	3.5GPa	0.12GPa

表2.2

	Interfacial Stren
HM—L	50MPa
HM—H	100MPa

3 计算分析结果及其与实验结果的比较

从已有的实验结果中可以归纳出这样结论：对基体剪切强度较高的复合材料，界面粘结强度太高反而会使复合材料拉伸强度降低。当界面强度较高时，复合材料断口较整齐，当界面强度较低时，断口较粗糙，有纤维拔出。

用上节建立的模型进行计算表明：无论裂缝从基体还是纤维中开始扩展，其中，弱界面材料总是发生界面开裂，而强界面不发生开裂，并且弱界面复合材料有较高的拉伸强度。如图3.1—3.4所示，计算结果描述的界面破坏情形与实验结果是相吻合的，验证了上一节的推测。

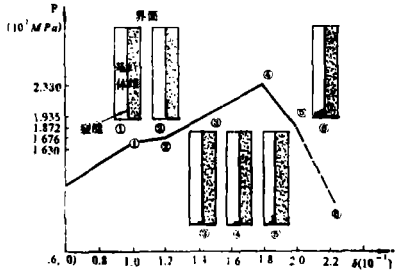

图 3.1

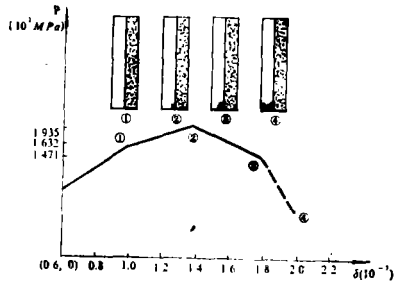

图 3.2

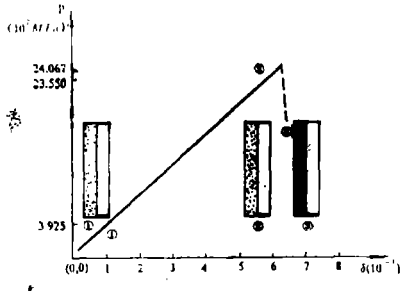

图 3.3

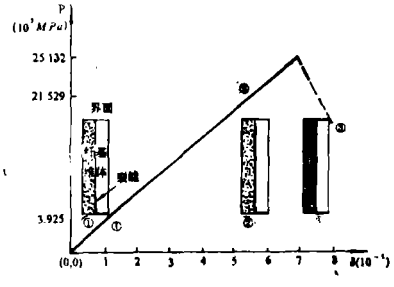

图 3.4

4 结 论

参数变分原理在解决力学非线性问题中具有广泛的应用，相应的参数拟二次规划法在计算分析非连续线弹性问题中也具有很高的效率[12]。本文利用非连续线弹性本构关系模型，构造了一个简单的复合材料细观力学模型，并利用参数拟二次规划有限元法，计算分析了复合材料的纤维基体界面失效问题。计算结果与实验结果完全符合，说明了所构造的非连续线弹性体本构模型对模拟界面失效问题的有效性以及所构造的复合材料细观力学模型的合理性，为用数值法分析复合材料界面的最优设计问题提供了简便实用的方法。但实际上界面失效问题是一个很复杂的问题，它与众多的材料参数有关，因此要深入地研究，必须考虑这些因素的影响，本文为这方面的工作做了初步成功的探索。

参 考 文 献

1 Tsai S W. Composite Design. 1986

2 Jacques D, FvreJ P. Determination of the Interfacial Shear Strength by Fibre Fragmentation on Resin Systems with a Small Rupture Strain. In: Proceedings of ICCM-6(1987): 5.471-5.480

3 Harescengh. R I Composites-the Way Ahead. In: Proceedings of ICCM-6, 1987: 514

4 潘敬哲，陈陆平，钱令希．复合材料失效过程分析中的参数拟二次规划法．计算结构力学及其应用．1991，4：374-382

5 Hatsuo Ishida. Composite Interfaces. North-Holland. 1986
6 Donald, F Adams. Micromechanical Predictions/ Experimental Correlations of the Influence of the Interface or the Mechanics and Physical properties of a Unidirectional Composite. In: Proceedings of ICCM -7 1989, 2: 351-363
7 Piggott M R , Dai S R.Brittle Failure at the Fibre-Matrix Interface. Composite Interface.1988, 481-489
8 Ikuta N, etal. Interface Effect of Fracture Process by Tensile Stress in Glass Fiber-Epoxy Composite. Composite Interface.1988, 611-619
9 Tong Y, Vasiuk I. The Effect of Interface on the Mechanical Properties of Composites. Composite Interfaces. 1988, 757-764
10 Isao Kimpara. Tensile Failure Mechanism of Unidirection Pitch-Based CFRP with Different Interfacial Strength. In: Proceedings of ICCM -7, 1989, 2: 73-78
11 D.赫尔. 复合材料导论. 中国建筑工业出版社
12 潘敬哲，陈陆平，钱令希. 纤维增强复合材料层压板的失效过程分析.应用力学学报.1989, 6(3): 1-10

THE QUASI PARAMETRIC FINITE ELEMENT NUMERICAL SIMULATION OF FAILURE PROCESS AT FIBRE-MATRIX INTERFACE OF COMPOSITE

Chen Luping　Pan Jingzhe　Qian Lingxi

(Research Institute of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology,116023)

Abstract Based on the quasi-parametric quadratic programming method and discontinuous linear elastic constitutive law model, this paper constitutes the micro-mechanics model of failure process at the fiber-matrix interface and does numerical analysis by finite element. The calculated results show an agreement with that of experiment.

Key words quasi-parametric quadratic programming method, discontinous linear elastic consitutive law model, failure at the fiber-matrix interface, composite