

用界面单元法分析复合材料界面力学性能*

叶碧泉¹ 羿旭明¹ 靳胜勇¹ 梁芝茹¹

(周焕文推荐, 1995年1月20日收到)

摘 要

本文利用界面单元的固有特性, 将其用来模拟复合材料中纤维与基体之间的界面特征, 计算了一个沿 x 轴方向纤维周期排列的单层板, 在横向载荷作用下的应力分布问题。给出了三相(纤维、基体和界面)特性各种配比时应力分布等高线图以及通过界面时径向应力 σ_r 的变化情况, 反映了界面特性对应力分布的影响。

关键词 复合材料力学 界面 界面元

一、引 言

纤维增强复合材料是一种新型结构材料, 具有比强度高、比刚度大以及性能可设计等一系列优点, 已在航空、航天、核工业和汽车工业等领域得到广泛的应用。同时, 由于纤维增强复合材料又是由基体、纤维和厚度仅为纳米级的界面复合而成, 因而它又是一种非均匀、各向异性的多相材料。于是, 关于它的力学性能及其破坏机理的研究就比单一的、均匀的和各向同性的结构材料复杂得多。特别是纤维和基体之间的界面相, 它既是纤维和基体连接的桥梁, 同时又是其它力学信息的传递者。界面的性质直接影响着复合材料的各项力学性能, 它与复合材料的强度、刚度、韧性有很密切的关系, 因此研究复合材料界面力学性能和破坏机理是当今材料科学、力学及应用数学的前沿课题。

纤维和基体材料两项界面之间的粘结特性对复合材料力学性能有着很大的影响, Adams^[1]和Zywicz^[2]对纤维和基体间完好粘结进行了讨论, 即认为力和位移是连续地通过不连续的两相材料界面, 从而忽略了界面层的影响。但是由于实际应用的需要或生产过程中纤维和基体之间的化学反应所致, 在纤维和基体之间界面层是客观存在的, 尽管第三相材料—界面层在几何尺寸上远比另外两相材料小得多, 但它的存在是确定无疑的了。因此简单的连续性假设而忽略界面层的影响显然是不适宜的。国内外有些学者, 在实验或计算模拟时, 考虑了界面层的存在, 探讨了它对复合材料宏观及微观力学性能的影响。特别是J.D. Achenbach^[3]用所谓弹簧模型探讨了层间相材料参数对应力分布的影响以及对整个复合材料应力—应变曲线的影响。但是, 他在实际计算模型中假定通过界面相时, 径向和横向力是连续的, 而假定位移是不连续的, 而且, 弹簧模型的弹性系数没有直接与第三相材料

* 国家自然科学基金资助项目

1 武汉大学数学系, 武汉 430072

的参数联系起来,因而,这实际上也是一个简化的力学模型。

既然实验和理论分析都证实纤维和基体间界面相的客观存在,但是在实际计算模拟时为什么又忽略它的存在呢?其主要原因是因为界面层的厚度太小,与其他两相材料的维度相比差得太远。用常规有限元法或边界元都很难对这几何维度上具有实变性的多相结构进行计算模拟。

界面元对多相材料结构在几何不连续的模拟上是一个强有力的工具。已有人将界面元用于模拟岩石和混凝土之间的中间介质层^[4],或用于岩石连接分析^[5]以及混凝土和钢筋之间的粘接问题分析^[6]。本文将利用界面元的固有特性,用其分析复合材料界面力学性能。

二、界面元的基本公式

为了真正反映界面力学特性对复合材料宏观及微观力学性能的影响,作有限元计算时,我们将纤维与基体之间用一个特殊的界面元联系起来,如图1所示。

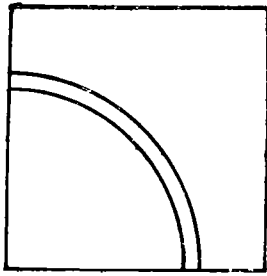


图 1

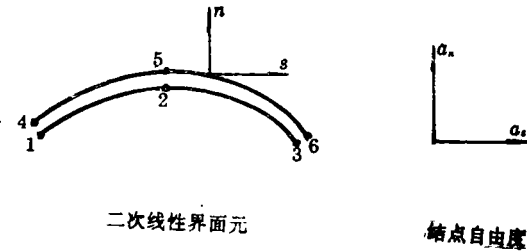


图 2

因为纤维的外径是一半径为 a 的圆弧,因此,联结它的界面元应取成二次线性界面元,如图2所示。这种界面元有6个结点,每个结点有两个自由度,因此单元结点位移向量 δ^e 为

$$\delta^e = (\delta_1^u, \delta_1^s, \dots, \delta_6^u, \delta_6^s)^T \quad (2.1)$$

这里 n 表示垂直于界面表面的方向, t 表示与界面相切的方向,连续位移场表示成

$$u = (u_n^t, u_s^t, u_n^b, u_s^b)^T \quad (2.2)$$

这里上标 u 和 l 分别表示界面的上、下两边。假定插值多项式 $n = (N_1, N_2, N_3)$, 则连接位移场和结点位移之间的关系可表示为:

$$u = H \delta^e \quad (2.3)$$

这里

$$H = \begin{pmatrix} n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

假定相对位移 $\Delta u = (\Delta u_n, \Delta u_s)^T$ 则

$$\Delta u = L u \quad (2.5)$$

这里

$$L = \begin{pmatrix} -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & +1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

于是
这里

$$\Delta u = LH\delta^e = B\delta^e \quad (2.7)$$

$$B = \begin{vmatrix} -n & n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n & n \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

若用矩阵 D 表示界面单元的本构特性, 即

$$D = \begin{vmatrix} d_n & 0 \\ 0 & d_t \end{vmatrix} \quad (2.9)$$

于是面积力 t 与相对位移 Δu 之间的关系成为^[7]

$$t = D\Delta u \quad (2.10)$$

其中: $t = (t_n, t_t)^T$ 在界面单元内, 内力所作的功

$$U = \frac{1}{2} \int_A \Delta u^T t dA \quad (2.11)$$

利用(2.7)和(2.10)式, 则

$$U = \frac{1}{2} (\delta^e)^T \int B^T D B dA \delta^e \quad (2.12)$$

作用于结点上的外力所作的功

$$W = -(\delta^e)^T f \quad (2.13)$$

这里 f 是外力向量, 利用最小势能原理可得到

$$[K]^e \delta^e = f \quad (2.14)$$

其中界面元刚度矩阵 $[K]^e$ 等于

$$[K]^e = \int_A B^T D B dA \quad (2.15)$$

将界面元的刚度矩阵与常规单元刚度矩阵一起就可组合成结构的总体刚度矩阵, 其后的计算就与常规有限元法相同。

三、计算模型

为了将界面元应用于复合材料结构的力学性能分析, 我们将计算一个沿 x 方向纤维周期排列的增强复合材料单层板, 在横向载荷作用下的应力分布问题。这一计算模型可简化成一平面应变问题。如图 3 所示。

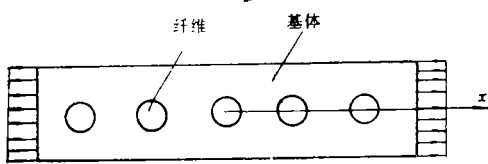


图 3

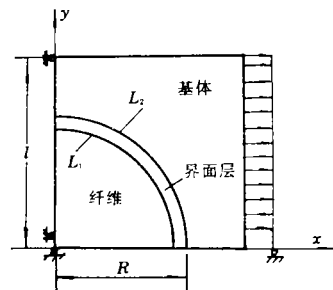


图 4

由于纤维排列的周期性, 以及结构在几何上和受力上的对称性, 最后的计算模型如图4所示。

坐标取向如图所示, 其位移边界条件是: x 轴上的点 y 方向上的位移 $u_y=0$, y 轴上的点 x 方向上的位移为 $u_x=0$, 即在 $x=0$ 或 $y=0$ 的边界上, 其法向位移为0, 并且在 $x=L$ 的边上作用一组外力, 使其沿 x 方向产生一已知的均匀位移场 $\Delta(u_x=c)$ 。

计算中设有一界面层位于纤维和基体之间如图4所示。图中弧线 L_1 和 L_2 所围成的区域为界面层。在作有限元分析时, 将纤维和基体都划分成8结点四边形等参单元, 而对界面层则采用6结点四边形单元, 并且位于 L_1 和 L_2 上的对应结点将采用相同的坐标。在自动划分单元过程中, 对出现的三角形单元, 将当作退化的四边形单元进行处理。

在计算模拟时, 我们讨论了两组几何尺寸不同的情况, 一组纤维体积含量为30%, 另一组纤维与基体的体积含量各为50%。在计算中, 我们认为整个结构处于线弹性、小变形状态, 即利用了线性有限元分析方法。在计算中所取三相材料的各种材料特性的配比情况列于表1, 其中, 假定纤维的模量 E_f 和Poisson比 ν_f , 以及基体的 ν_m 在计算中不变, 对每一给定的 E_m 取三组不同的 $D_n(D_i=D_n)$ 进行了计算。

表 1

ν_f	E_f	ν_m	E_m	$D_n(D_i)^*$		
0.25	70000	0.4	4500	100	10000	40000
			10000	同上		
			40000	同上		

*注: D_n 为劲度系数, 单位: N/cm^3

四、计算结果

图5、图6和图7是当 E_f , E_m 不变时, 反映界面材料性能的变化对应力分布的影响。当界面强度非常弱时, 应力很难通过界面传给纤维。从图5中的应力分布可见, 纤维几乎不承受力, 可以认为两相材料(纤维与基体)近乎脱开, 应力几乎全部由基体承担, 并且高应力区在图中左上角基体部分, 这与实际情况完全相符。

当 D_n 在数值上接近或超过基体弹性模量 E_m 时, 由图6和图7可见, 应力分布较为均匀, 且与各项材料的强弱相关。

图8与图7中所取三相材料的力学性能完全一样, 其主要不同之处在于纤维和基体的体积比不一样。图7中取纤维半径 $R=0.8$ (无量纲量), 而图8中则取纤维半径 $R=1.0$ 。显然, 体积比不一样, 应力分布也就有所变化。图9与图7中所取三相材料的力学性能完全一样, 纤维与基体比也是一样的。主要是想考查一下单元划分的粗细程度对计算精度的影响。图7将计算区域划分成20个单元(16个常规元加上4个界面元)。而图9则进行了单元加密, 将计算区域划分为64个单元(56个常规元和8个界面元)。比较两图的计算结果可见, 单元加密对提高计算精度是有一定影响的。

因为加力方向是沿 x 轴, 为了与理性分析相比较, 上面的图5~图9所给等应力线图, 都是对 σ_x 而言。为了考查通过界面相对应力的变化, 我们又对径向应力 σ_r 进行了计算、比较, 图10就是描绘 σ_r 沿靠近界面相两边的纤维和基体的值, 图中虚线代表基体中的应力, 实线代

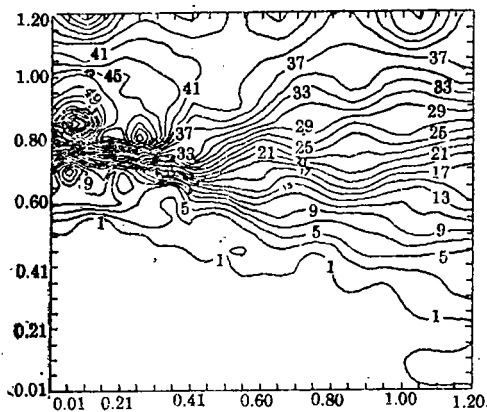


图5 等应力图 ($D_n=100, R=0.8$)

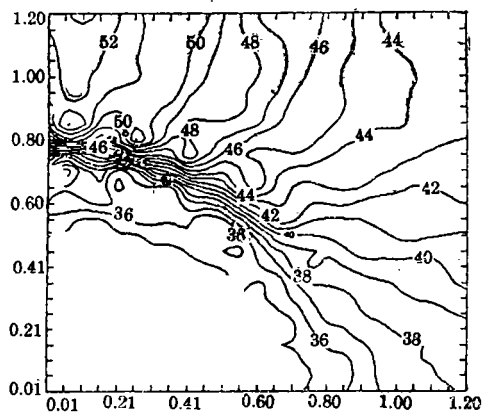


图6 等应力图 ($D_n=10000, R=0.8$)

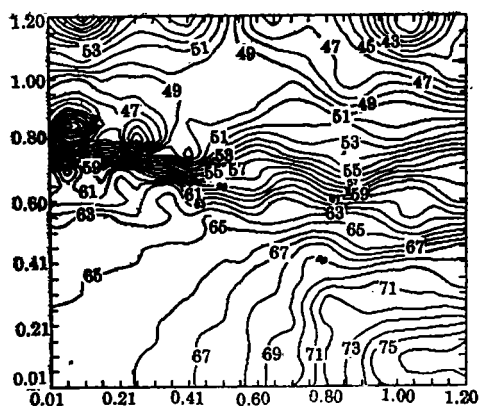


图7 等应力图 ($D_n=40000, R=0.8$)

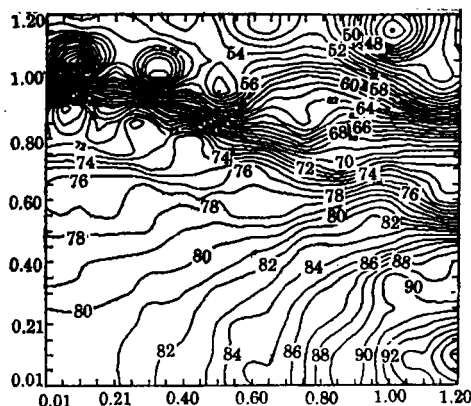


图8 等应力图 ($D_n=40000, R=1$)

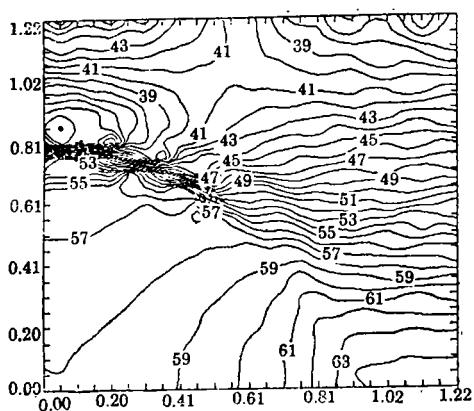


图9 等应力图 ($D_n=40000, R=0.8$)

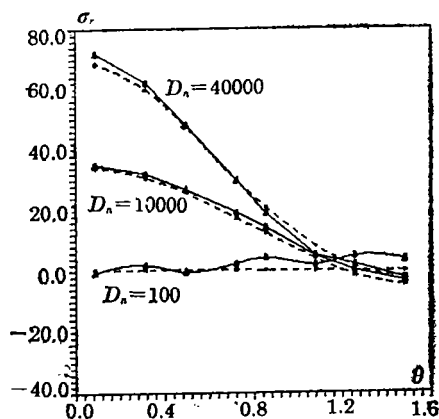


图 10

表纤维中的应力，绘出了 $D_n=100$ ， $D_n=10000$ 和 $D_n=40000$ 三种情况。当 $D_n=100$ 时，由于界面相很软，受力时纤维与基体几乎脱开，因而靠近界面的基体和纤维几乎成为自由面，这时两条曲线几乎与零应力线平行，即 σ_r 和 $\sigma_{r\theta}$ 几乎为零。

参 考 文 献

- [1] D.F. Adams, A micromechanics analysis of the influence of the interface on the performance of polymer-matrix composites, *J. Reinf. Plastics and Composites*, 6 (1987) ,66—87.
- [2] E. Zywickz, Local stresses and deformation due to fabrication and transverse loading in an ideal continuously reinforced Graphite/Aluminum metal matrix composite, *M. Sc. Thesis, Dept. of Mech. Eng. MIT.* (1986).
- [3] J. D. Achenbach and H. Zhu, Effect of interfacial zone on mechanical behavior and failure of fiber-reinforced composites, *J. Mech Phys. Solid*, 3(37) (1989), 381—393.
- [4] J.M. Hohberg and H. Backmann, A micro joint element for nonlinear arch dam analysis, *Numerical Methods in Geomechanics*, Ed. by G. Swoboda, Balkema Rotterdam (1989), 828—834.
- [5] A. Gens, I. Carol and E.F. Alonso, Elastic-plastic model for joints and interfaces, *Proc. 2nd Int. Conf. Computational Plasticity*, Ed. by D. J. Owen, E. Hinton and E. Onate, Vol.2, Pineridge Press, Swansea (1989), 1251—1264.
- [6] M. Keuser, G. Mehlhorn and V. Cornelius, Bond between prestressed steel and concrete, computer analysis using ADINA, *Comp. Struct*, 17 (1983), 669—676.
- [7] J.C.L. Schellekens and R. Deborst, On the numerical integration of interface elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 36 (1993), 43—66.

Analysis of Interphase Mechanical Behavior with Interface Element in the Composite Materials

Ye Biquan Yi Xuming Jing Shengyong Liang Ziruo

(Department of Mathematics, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China)

Abstract

In this paper, stress distribution is obtained by employing the interface element to simulate the interphase feature between fiber-matrix in single-ply laminar which consists of fiber arranged periodically in the x -axis direction and matrix, and which is subjected to far-field transverse load the contour of stress σ_{xx} and radial stress σ_r in the vicinity of interphase are plotted for three different interphase cases. It is made known that the effect of interphase properties on stress distribution is obvious.

Key words composite materials mechanics, interphase, interface element