

文章编号: 1000-8055(2009)09-2019-07

弱界面黏结通用单胞模型数值分析

高希光, 孙志刚, 廉英奇, 宋迎东, 朱如鹏
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为考查通用单胞模型和弱界面分离模型模拟复合材料界面脱黏的有效性, 考虑了柔性界面, 常响应界面和渐进适应界面三种不同的界面分离模型, 并分析了界面对材料性能的影响. 计算结果表明, 将界面分离模型集成到通用单胞模型中, 增强了通用单胞模型的适用范围和对复合材料力学响应特性的模拟分析能力.

关 键 词: 复合材料; 界面脱黏; 弱界面黏结; 通用单胞模型; 数值模拟

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Numerical study of generalized method of cell with weak interfacial bonding

GAO Xi-guang, SUN Zhi-gang, LIAN Ying-qi,
SONG Ying-dong, ZHU Ru-peng

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016; China)

Abstract: In order to validate the ability of the generalized method of cell (GMC) with weak interface in modeling the interface debonding within continuum fiber reinforced composite, three kinds of weak interface were considered in this paper to study the effect of the interface on global mechanics behavior of composite. The numerical results indicate that the method developed in this paper expands the GMC in analysis of composites with complicated behavior.

Key words: composite; interface debonding; weak interface bonding; generalized method of cell; numerical analysis

复合材料的性能和损伤破坏规律取决于其组分材料性质,同时也取决于其细观结构特征,这些特征包括增强相(如纤维)的体积分数、形状、分布规律以及界面相的性质等.界面在复合材料中起着传递基体和纤维载荷的作用,对材料的性能影响较大^[1].由 Aboudi^[2]提出的通用单胞模型(GMC)是一种基于代表性体积元(RVE)的宏细观统一本构模型.该模型通过平均意义上的子胞边界位移连续条件和力平衡条件以及满足子胞内

积分形式的平衡方程建立材料细观结构、组分材料常数与宏观材料常数的关系.不仅能模拟复杂的细观结构,而且具有较高的计算效率,被美国 NASA 广泛应用于各种复合材料的宏细观应力分析^[3-4].本文应用考虑界面分离的 GMC 模型,研究了柔性界面分离、常响应界面分离和渐进适应界面分离^[5]对复合材料性能的影响.通过数值算例验证了通用单胞模型和弱界面分离模型模拟复合材料界面脱黏的有效性.

收稿日期: 2008-08-23; **修订日期:** 2009-04-25

基金项目: 博士点基金(20070287039); 973 项目

作者简介: 高希光(1981-),男,福建沙县人,博士后,研究方向为航空发动机结构、强度与振动.

1 弱界面分离模型

采用黏滞域^[6]模型来模拟界面特性.假设界面是一个厚度为零的区域,在界面两边,材料的力学性能发生突变.这导致位移场在界面处发生突变,即

$$[u_i^m]^I = [u_i^f]^I + u_i^I, \quad (i = n, \tau, b) \quad (1)$$

其中 n , τ 和 b 分别表示界面的法向、以及两个切向(如图1所示). $[u_i^m]^I$ 和 $[u_i^f]^I$ 分别表示基体和纤维在界面处的位移, u_i^I 表示界面位移, 上标 I 表示界面. 假设界面两边的应力仍然保持连续, 即

$$[\sigma^m]^I = [\sigma^f]^I = \sigma^I, \quad (i = n, \tau, b) \quad (2)$$

其中 $[\sigma^m]^I$ 和 $[\sigma^f]^I$ 分别表示基体和纤维在界面处的应力, σ^I 表示界面应力. 那么界面位移可以表示成界面应力的函数

$$u_i^I = R_i \cdot \sigma^I \quad (3)$$

等式(3)称为界面分离函数, 其中 R_i 表示分离系数, 与界面应力有关. 采用不同的分离系数 R_i 可以建立不同的界面模型.

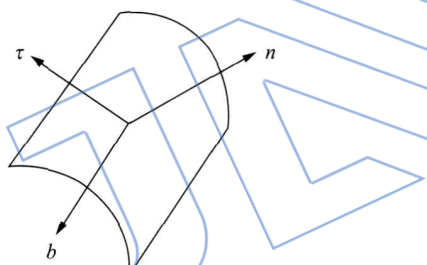


图1 复合材料的界面坐标系

Fig. 1 Local coordinates of interface

1.1 柔性界面分离模型

将式(3)中的界面分离系数 R_i 取常数, 即界面位移和界面应力之间存在着线性关系

$$u_n^I = R_n \cdot \sigma_n^I, \quad u_\tau^I = R_\tau \cdot \sigma_\tau^I \quad (4)$$

这样的界面模型始终是柔性的, 称为柔性界面分离模型 (flexible interface, FI). 当选择界面分离系数 $R_i \rightarrow 0$ 时表示界面是理想黏结的, 不存在界面分离, 当 $R_i \rightarrow \infty$ 时表示界面完全脱黏失效.

1.2 常响应界面分离模型

从柔性界面模型的定义可以看出这个界面分离模型有着明显的缺点, 首先其界面黏结强度不足, 即从一开始就发生了分离. 再者, 其界面分离系数保持不变, 不能改变界面分离变形的程度.

实际的复合材料界面上由于残余压应力和化学、物理结合作用的存在, 界面必须克服这些应力才能发生分离, 为了使柔性界面模型具有更准确的模拟能力, 对其进行改进, 引入界面黏结强度的概念, 界面分离函数表达如下:

$$du_i^I = 0, \quad (\sigma^I < \sigma_{\text{DB}})$$

$$du_i^I = R_i \cdot d\sigma^I, \quad (\sigma^I \geq \sigma_{\text{DB}}) \quad (5)$$

其中 σ_{DB} 表示界面黏结强度, 界面在应力低于 σ_{DB} 时界面黏结完好, 在大于 σ_{DB} 时就发生脱黏. 这样的模型被称为常响应界面 (constant compliant interface, CCI) 模型. 和 FI 模型一样, 大的分离系数 R_i 可以模拟界面完全分离的情况.

1.3 渐进适应界面分离模型

常响应界面模型也有局限性, 一旦界面发生分离, 界面分离程度将不会增加 (界面分离系数 R_i 保持为常数). 因此需要采用一种新的界面分离模型, 在这个模型中允许界面分离系数随界面应力、位移状态的变化而变化, 因此被称之为渐进适应界面 (evolving compliant interface, ECI) 模型, 界面应力和界面位移之间的分离函数描述如下:

$$\sigma^I = \sigma_{i, \text{max}} \left(\frac{u_i^I}{\rho} \right) \exp \left(1 - \frac{u_i^I}{\rho} \right), \quad (i = n, \tau, b) \quad (6)$$

其中 $\sigma_{i, \text{max}}$ 表示界面所能承受的最大应力, ρ 表示界面特征长度.

2 界面对材料性能的影响

2.1 柔性界面对材料性能的影响

采用 1.1 中的柔性界面分析模型, 分离函数为式(4). 界面方程是线性的, 因此在材料弹性范围内不会产生非线性的响应. 下面分析不同的界面分离系数对复合材料宏观等效模量的影响. 为了便于分析, 假设分离系数与纤维弹性模型之间存在如下关系式:

$$R_n = \left(\frac{1}{aE_f} \right), \quad R_\tau = \left(\frac{1}{aG_f} \right) \quad (7)$$

E_f 为纤维的拉伸弹性模量, G_f 为纤维的剪切弹性模量.

这里考虑材料处于弹性阶段的情况, 材料常数: $E_f = 380 \text{ GPa}$, $\mu = 0.15$, $E_m = 70 \text{ GPa}$, $\mu_m = 0.31$. 计算采用 14×14 个子胞的通用单胞模型, 如图2. 结果见图3和图4.

从计算结果中可以得到当界面黏结从强到弱

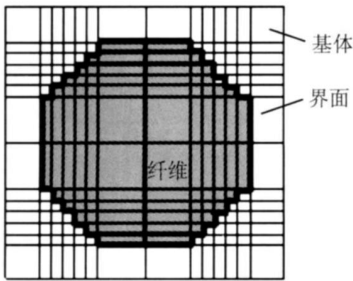


图 2 14×14 子胞代表性体元

Fig. 2 Representative volume element (RVE) with 14×14 subcells

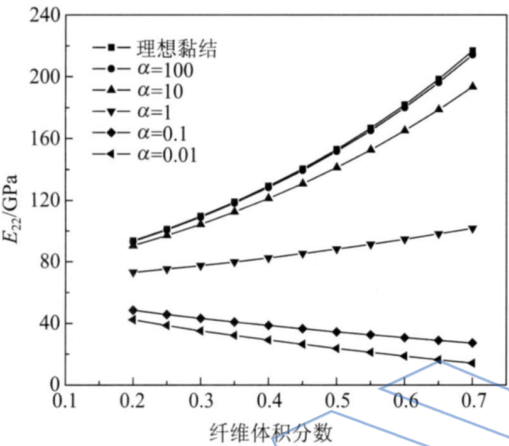


图 3 纤维体积分数对横向拉伸模量的影响

Fig. 3 Effect of the volume fraction of fiber on the transverse Yang's moduli

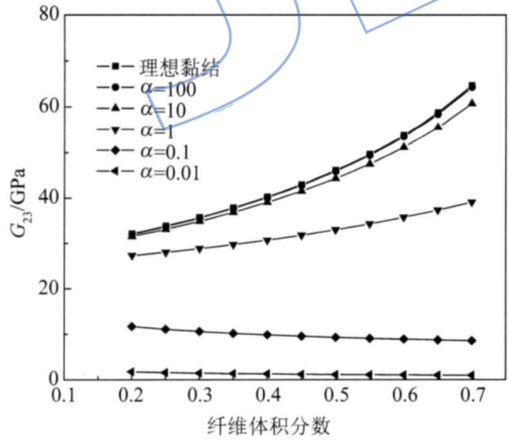


图 4 纤维体积分数对横向剪切模量的影响

Fig. 4 Effect of the volume fraction of fiber on the shear moduli

(α 从大到小)变化时宏观弹性模量变小.说明弱界面的存在使得宏观刚度下降,复合材料的性能被弱化了.当界面黏结较强时($\alpha=100,10,1$)宏观弹性模量随纤维体积分数的增加而增加,而当界面黏结较弱时($\alpha=0.1,0.01$),弹性模量随纤维体

积分数的增加反而下降.这是因为当纤维体积分数增加时弱界面黏结的区域增加了,弱界面的影响超过了纤维体积分数增加的影响.当界面黏结很弱时,宏观横向剪切模量下降很快,复合材料承受横向剪切的能力变得非常弱.

2. 2 常响应界面对材料性能的影响

采用 1. 2 节中的界面分离模型,界面分离函数如式(5)所示.由于常响应界面模型是非线性的,所以对这里计算了不同的界面强度和界面分离系数对复合材料宏观响应的影响.仍然使用参数 α 以及式(7)的关系.材料常数与 2. 1 节相同,纤维体积分数 $V_f = 50\%$. 横向拉伸的结果见图 5 和图 6,横向剪切结果如图 7 和图 8.

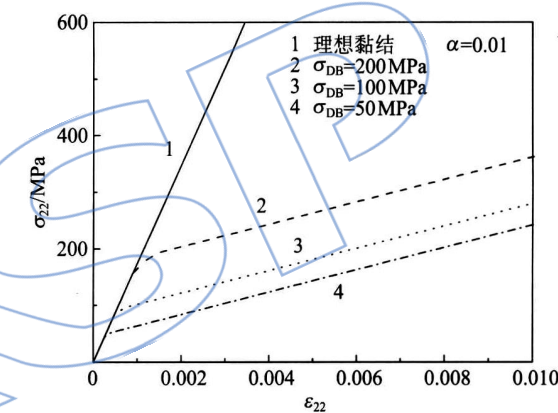


图 5 界面黏结强度对横向拉伸的影响

Fig. 5 Effect of the volume fraction of fiber on the responds upon transverse loading

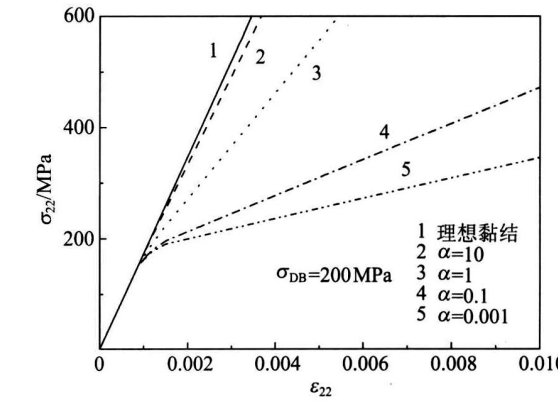


图 6 界面分离系数对横向拉伸的影响

Fig. 6 Effect of the debonding coefficient on the responds upon transverse loading

在常响应界面模型情况下,复合材料宏观横向拉伸响应有一个明显的转折点,对应于界面分离开始发生.在界面发生分离以后宏观的应力应变增量之间仍然为线性关系.这是因为此模型中界

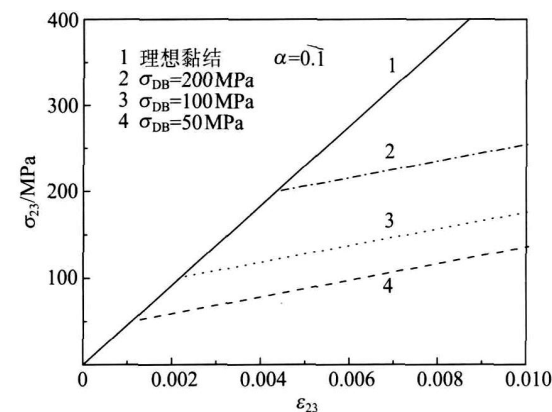


图 7 界面黏结强度对横向剪切的影响
Fig. 7 Effect of the bonding strength on the responds upon transverse shear

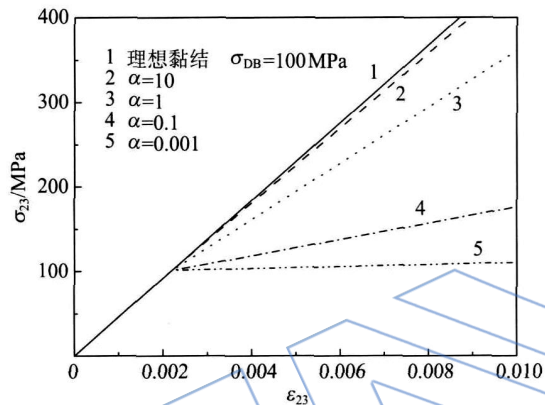


图 8 界面分离系数对横向剪切的影响
Fig. 8 Effect of the debonding coefficients on the responds upon transverse shear

面分离发生后,分离系数不变,即分离程度不增加。界面黏结强度对复合材料横向拉伸的影响见图 5,很明显应力-应变响应曲线的转折点取决于界面黏结强度,黏结强度越高越需要更高的外部载荷才能使界面发生分离。图 6 表示界面分离系数对横向拉伸的影响,分离系数决定了界面分离发生以后响应曲线的斜率, α 越大则斜率越大, α 越小则斜率越小。界面黏结强度和界面分离系数对复合材料横向剪切的影响与横向拉伸时相似,见图 7 和图 8。

2.3 渐进适应界面对材料性能的影响

1) 渐进适应界面分离模型特性

渐进适应界面模型 (ECI) 的界面演化方程如式 (6) 所示。与前两个模型不同,渐进适应界面分离模型的特点是允许界面应力卸载,也就是说,界面应力先上升后下降,而外部载荷和界面位移则继续增加。模型不包含限定的界面黏结强度。

图 9 是渐进适应界面模型集成到通用单胞法

得到的典型横向拉伸的响应曲线,可以看出其明显的呈现三个演化阶段:①随着应力增加界面开始分离,宏观刚度下降;②界面应力达到最大值并发生卸载,导致宏观响应也出现了应力峰值并随之开始卸载。③界面完全脱黏失效,相当于纤维失效,复合材料完全由基体来承担外加载荷,其响应和纯基体材料的拉伸曲线接近。

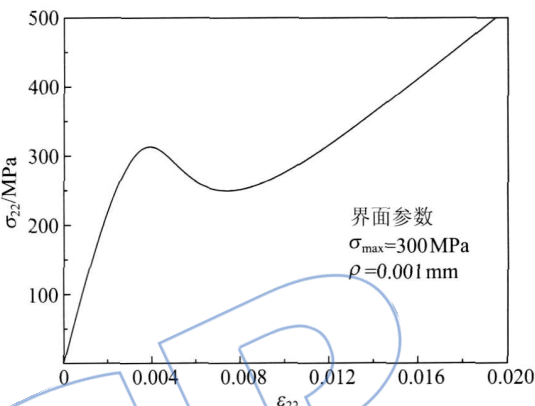


图 9 渐进适应界面时横向拉伸曲线
Fig. 9 Stress/ strain curve of composites with ECI

图 10 和图 11 表示纤维子胞和基体子胞的应力应变响应曲线。很明显纤维子胞应力在达到界面所能承受的最大应力以后,开始发生快速卸载直至界面完全失效,此时纤维子胞承受的应力几乎为零,纤维已经起不到有效的增强作用。基体子胞的应力是一直增加的,在界面失效后基体子胞承担了几乎所有的外部载荷。

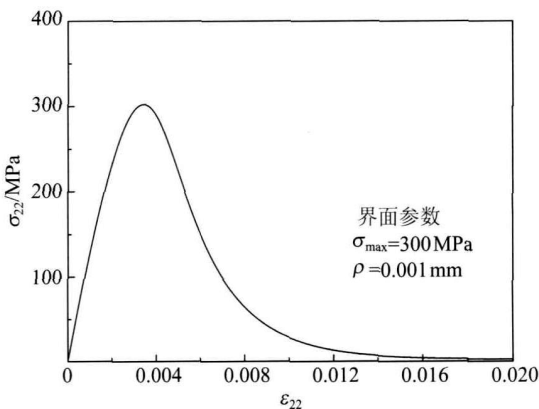


图 10 纤维子胞的应力应变曲线
Fig. 10 Stress/ strain curve of subcells at fiber

典型的横向剪切响应如图 12 所示。可以看出复合材料在受到横向剪切作用时,应力首先随着应变的增大而增大,并且达到一个最大值,然后开始卸载直至于零。与横向拉伸响应不同,横向剪切

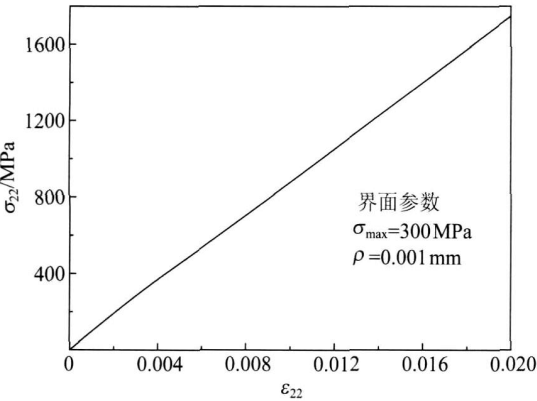


图 11 基体子胞的应力应变曲线

Fig. 11 Stress/ strain curve of subcells at fiber

时,界面失效后复合材料承受外部载荷的能力也消失了.这是由于通用单胞法本身在计算横向剪切应力时采用了各个子胞横向剪切应力相等的假设条件,而且子胞的横向剪切应力就等于复合材料宏观横向剪切应力.所以一旦界面失去了传递载荷的能力,就导致所有子胞以及整个复合材料失去了承受载荷的能力.因此对于横向剪切而言,界面的性能几乎完全决定了复合材料的性能和响应.子胞的应力变化表示在图 13 中.

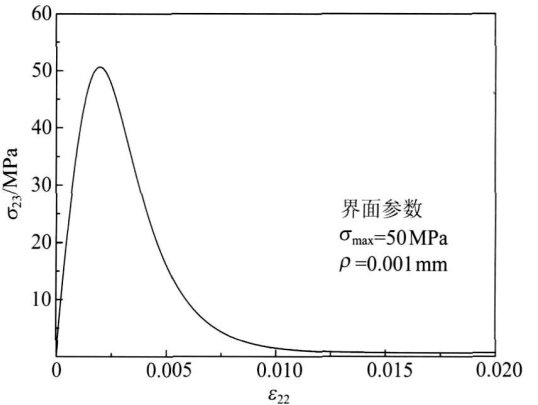


图 13 横向剪切时子胞应力变化

Fig. 13 Stress curve of subcell at transverse shear

表 1 B-P 模型参数
Table 1 Parameters of B-P model

参数	值
m_1	0.025
m_2	2.2
Z_0	1130
Z_1	1620
Z_3	330
D_0	10000
n	4
A_1	0.0002
r_1	1.2

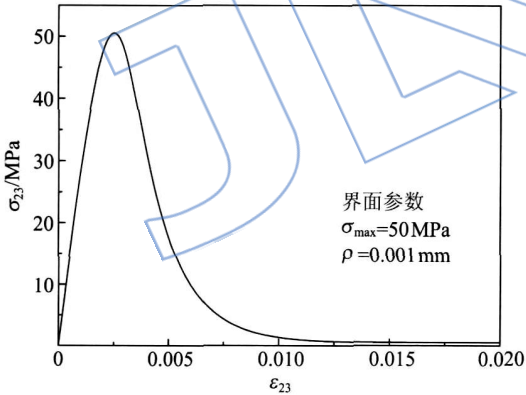


图 12 弱界面连接复合材料横向剪切响应

Fig. 12 Stress/ strain curve of composites with weak interface at transverse loading

2) 基体 B-P (Bodner-Partom) 本构关系时复合材料性能

基体塑性是复合材料计算分析中不可避免的问题,基体材料发生塑性应变对整个复合材料的性能都有很大的影响.这里采用 B-P 本构方程^[7]结合通用单胞方法分析弱界面黏结的复合材料的弹塑性行为.本文计算中基体材料 B-P 本构关系的参数见表 1.不同的界面参数条件下复合材料的横向拉伸响应曲线如图 14 和图 15 所示.

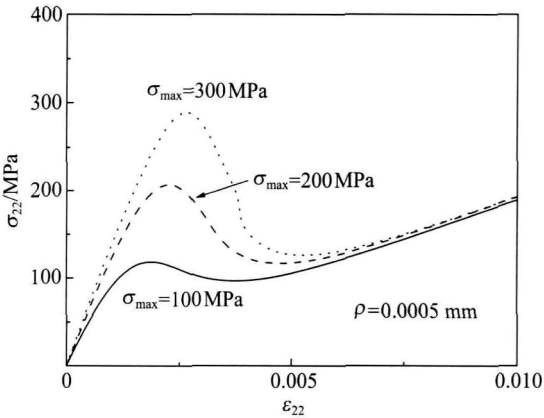


图 14 界面最大应力对复合材料横向拉伸的影响

Fig. 14 Effect of $\sigma_{\max}$ on $\sigma_{22}/\epsilon_{22}$ curve at transverse loading

可以看出算例所用的 B-P 本构模型参数在计算中复合材料横向拉伸时的塑性应变很小的,几乎可以忽略,这使得复合材料的拉伸响应基本上由弱界面的脱黏分离控制.复合材料横向拉伸响应曲线仍然明显的分为三个阶段,开始界面黏结良好,应力随应变的增加而增加,但是宏观刚度

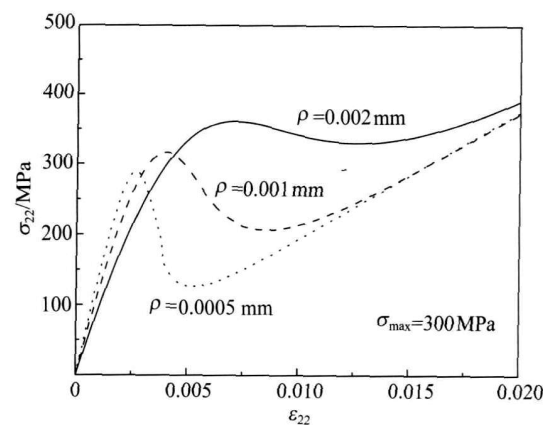


图 15 界面特征长度对复合材料横向拉伸的影响
Fig. 15 Effect of ρ on $\sigma_{22}/\varepsilon_{22}$ curve at transverse loading

是下降的。接着界面局部应力达到界面的最大应力后界面发生脱黏,局部应力卸载,宏观应力也卸载,但是宏观应变持续增加。最后界面完全脱黏,不能有效的传递应力,纤维增强作用失效,由基体承担外部载荷。

图 14 表示界面最大应力对复合材料横向拉伸的影响,界面最大应力主要决定宏观响应的最大应力和整体的应力水平,界面最大应力越大,宏观应力卸载时的应力值就越高,宏观响应的应力水平也越高。图 15 表示界面特征长度对复合材料的影响,界面特征长度主要影响应力卸载发生时间以及卸载的斜率,特征长度越小界面脱黏就发生越早,应力的卸载就越快,第二段响应的应力水平就越低。

界面参数对复合材料横向剪切的影响如图 16 和 17 所示。界面最大应力和界面特征长度的影响与横向拉伸时相似。由于各个子胞的横向剪切应力是相同的,所以界面特性基本上完全决定了复合材料的横向剪切响应。

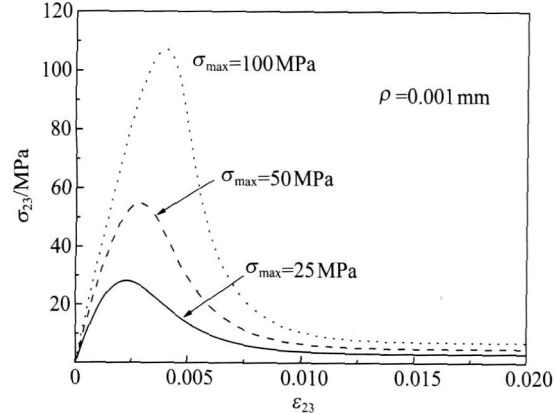


图 16 界面最大应力对横向剪切的影响
Fig. 16 Effect of $\sigma_{\max}$ on $\sigma_{23}/\varepsilon_{23}$ curve at transverse loading

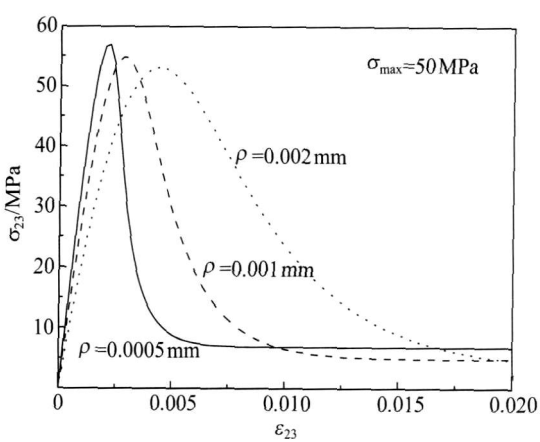


图 17 界面特征长度对横向剪切的影响
Fig. 17 Effect of latent length of interface on $\sigma_{23}/\varepsilon_{23}$ curve at transverse shear

渐进适用界面模型和 B-P 本构模型的同时使用会引起通用单胞方法计算时强烈的非线性,有时会引起收敛困难。计算方法的收敛性对界面参数和 B-P 本构模型参数很敏感,仅仅依靠减小计算步长的方法往往不能改善其收敛性。在算例分析中,如果界面特征长度的取值过小或者界面最大应力的取值过大都会导致计算不稳定和收敛困难的情形,在子胞数目较少时这种情况更加突出。这可能是由于界面应力卸载时子胞上应力重新分配,应力变化剧烈而导致的。

3 结 论

本文以改进算法的通用单胞法为基础,集成了弱界面分离模型,并对弱界面黏结的复合材料宏观性能进行了计算分析。采用了不同的界面分离模型计算分析了复合材料的性能行为。结论如下:

- 1) 采用柔性界面模型,结果表明弱界面黏结的复合材料刚度和弹性模量降低,界面黏结越弱模量越低。
- 2) 采用常响应界面模型,界面黏结强度越高,界面越难分离,复合材料能够承受更高的应力。界面分离系数越大,复合材料界面分离后的模量越高。
- 3) 采用渐进适应界面模型,复合材料宏观响应会发生应力卸载,界面最大应力越高则复合材料宏观响应的应力水平就越高。界面特征长度越大,宏观响应的应力越高,卸载时的速度越慢。

本文的计算结果表明,将界面分离模型集成到通用单胞模型中,大大的增强了通用单胞方法的适用范围和对复合材料复杂响应特性的模拟分

析能力.

参考文献:

- [1] Cao H C, Evans A G. An experimental study of the fracture resistance of bi-material interfaces[J]. Mechanics of Materials, 1989, 7(4): 295-304.
- [2] Paley M, Aboudi J. Micromechanical analysis of composites by the generalized method of cells [J]. Mechanics of Materials, 1992, 14(2): 127-139.
- [3] Bednarczyk B A, Arnold S M, Lerch B A, et al. Fully coupled micro/ macro deformation damage and failure prediction for SiC/ Ti-15-3 laminates [R]. NASA, TM-2001-211343, 2001.
- [4] Bednarczyk Brett A. A fully coupled micro/ macro theory for thermo-electro-magneto- elasto-plastic composite laminates [R]. NASA, CR-2002-211468, 2002.
- [5] 孙志刚,宋迎东,廉英琦,弱界面黏结对复合材料有效性能的影响[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 915-919.
SUN Zhigang, SONG Yingdong, LIAN Yingqi. Composite mechanical behavior with weak interfacial Bonding[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 915-919. (in Chinese)
- [6] Hashin Z, Rosen B W. The elastic moduli of fiber reinforced materials[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1964, 31(2): 223-232.
- [7] 宋迎东,高德平. 采用 Bodner-Partom 本构模型的黏塑性有限元应力分析方法研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(10): 1208-1211.
SONG Yingdong, GAO Deping. Visco-plastic finite element method for stress analysis with Bodner-Partom constitutive equations [J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(10): 1208-1211. (in Chinese)