

文章编号: 1000-8055(2005) 06-0915-05

弱界面粘结对复合材料有效性能的影响

孙志刚, 宋迎东, 廉英琦
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 采用非线性弹簧元模拟界面, 用细观力学有限元法计算分析了不同界面特性下弱界面粘结的纤维增强金属基复合材料的宏细观性能。并考虑了 3 种不同的界面模型。结果表明弱界面粘结的存在使复合材料宏观性能下降。在常响应界面情况下, 复合材料横向拉伸应力-应变曲线存在明显的转折点, 对应于界面分离的起始点, 转折点的位置取决于界面粘结强度。当存在渐进适应界面时, 复合材料横向拉伸应力-应变曲线存在 3 个阶段。

关键词: 航空、航天推进系统; 复合材料; 弱界面粘结; 非线性弹簧元

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Composite Mechanical Behavior with Weak Interfacial Bonding

SUN Zhi-gang, SONG Ying-dong, LIAN Ying-qi

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The micromechanical finite element method and the nonlinear spring element for the interface were employed to predict the effective behavior of MMCs. The results indicate that weak interfacial bonding reduces the macro mechanical properties of MMCs. A weak interfacial bonding reduces the elastic modulus of MMCs. The Constant Compliant Interface (CCI) model included a finite interfacial strength for the interface. The stress-strain curve under transverse loading of MMCs has a corner point, associated with the initiation of interfacial de-bonding, which is determined by the interfacial bonding strength. The Evolving Complaint Interface (ECI) model allows unloading of interfacial stresses. The transverse loading stress-strain curve exists three-stage deformation process.

Key words: aerospace propulsion system; Metal Matrix Composites(MMCs); weak interface; nonlinear spring element

金属基复合材料具有较高的比强度、比刚度以及良好的抗蠕变、耐高温等性能, 因此在航空航

天领域具有十分广阔的应用前景。复合材料做为一种多相结构材料, 其力学性能和失效机理都与

收稿日期: 2004- 11- 15; 修订日期: 2005- 07- 26

基金项目: 航空科学基金资助(01C52017)

作者简介: 孙志刚(1976-), 男, 辽宁绥中人, 南京航空航天大学能源与动力学院讲师, 主要从事航空发动机结构、强度与振动研究。

组分相的性能、增强相的形状、分布以及增强相和基体相之间的界面特性等微观特征密切相关,大量的国内外学者已经对界面问题做了较多的研究^[1~7]。然而,由于界面的微观结构非常复杂,目前,还未做到清楚的认识。在以前的研究中都有如下的假设^[3~5]:纤维增强金属基复合材料的界面或为一反应层,或为一过渡层,因此将界面看成是一层极薄的、具有与纤维和基体不同的力学性能的界面层,然而这样的假设很难测量出界面的特征常数。描述界面还有其它的一些模型^[6],但都有一定的缺点。因此本文采用了非线性弹簧元来模拟复合材料的界面连接。

1 模拟界面的非线性弹簧元

弹簧元是一个两节点的非线性单元,由 2 个节点 I, J 构成,每个节点的自由度数目的方向可以定义,每个节点最多可以有 3 个自由度(3 个轴向自由度或 3 个旋转自由度),载荷的方向为连线方向。单元允许两个节点重合,此时节点只能有一个方向的自由度,并且 2 个节点的自由度方向必须一致,并由此决定载荷的方向。单元节点相对位移 D 与节点力 F (2 个节点相同)之间的关系曲线由一系列自定义的点 (D, F) 构成,可以是非线性的,称为单元的实常数,单元的构成及实常数的定义见图 1。使用该单元计算时需要采用非线性求解。

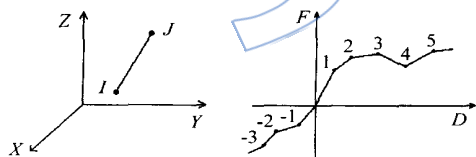


图 1 弹簧元构成与位移-力曲线

Fig. 1 Spring element and displacement-force curve

2 弱界面分离模型

采用粘结带模型来表征界面特性,首先认为界面层的厚度非常小,可以忽略不计,在界面处基体和纤维之间在各个方向的应力分量是连续的而位移分量是不连续的,即在界面上:

$$\left. \begin{aligned} [\sigma_i^m]' &= [\sigma_i^f]' = \sigma_i' \\ (i &= n, \tau, b) \\ [u_i^m]' &= [u_i^f]' + u_i^i \\ (i &= n, \tau, b) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里 $[\sigma_i^m]'$ 和 $[\sigma_i^f]'$ 分别表示基体和纤维在界面处的应力, σ_i' 表示界面应力。 $[u_i^m]'$ 和 $[u_i^f]'$ 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。界面位移可以表示成界面应力的函数:

$$u_i^i = R_i \cdot \sigma_i' \quad (2)$$

这个公式称为界面分离函数,其中 R_i 表示分离系数,与界面应力有关。将式(2)中的分离系数 R_i 定义为不同的系数可以得到不同的界面模型。

2.1 柔性界面分离模型

将公式(2)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。

$$u_n^i = R_n \cdot \sigma_n' \quad u_\tau^i = R_\tau \cdot \sigma_\tau' \quad (3)$$

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 $R_i \rightarrow 0$ 时表示界面是理想粘结的,不存在界面分离,当 $R_i \rightarrow \infty$ 时表示界面完全脱粘失效。采用与上述相似的定义,在采用弹簧元进行模拟时,定义的弹簧单元位移与节点力之间的关系:

$$D_n = R_n^s \cdot F_n \quad D_\tau = R_\tau^s \cdot F_\tau \quad (4)$$

其中: R_i^s 称为弹簧柔度,表示弹簧连接的强弱。

为了在计算便于分析,这里引入一个常参数 α 令:

$$R_n^s = \left[\frac{1}{\alpha E_f} \right] \quad R_\tau^s = \left[\frac{1}{\alpha G_f} \right] \quad (5)$$

式中: E_f 为纤维的拉伸弹性模量, G_f 为纤维的剪切弹性模量。

2.2 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,首先其界面粘结强度不足,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,引入界面粘结强度的概念,界面分离函数表达如下:

$$\left. \begin{aligned} du_i^i &= 0 & (\sigma_i' < \sigma_{DB}) \\ du_i^i &= R_i \cdot d\sigma_i' & (\sigma_i' \geq \sigma_{DB}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中: σ_{DB} 表示界面粘结强度,界面在应力低于 σ_{DB} 时界面粘结完好,在大于 σ_{DB} 时就发生脱粘。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。

在有限元计算中将弹簧元的特性曲线定义为下面的形式。

$$\left. \begin{aligned} D_i &= 0 & F_i &\leq F_{i,DB} \\ D_i &= R_i^S \cdot F_i & F_i &> F_{i,DB} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$(i = n, \tau, b)$

其中: $F_{i,DB}$ 为弹簧元的连接强度, R_i^S 称之为弹簧元的分离系数。

用这样的弹簧元来模拟复合材料弱界面粘结特性, 可以分析不同的弹簧参数对复合材料宏观等效模量的影响。为了便于分析, 同样引入一个常参数, 令:

$$R_n^S = \left[\frac{1}{\alpha E_f} \right] \quad R_\tau^S = \left[\frac{1}{\alpha G_f} \right]$$

式中: E_f 为纤维的拉伸弹性模量, G_f 为纤维的剪切弹性模量。

2.3 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:

$$\sigma_i^I = \sigma_{i,max} \frac{u_i^I}{\rho} \exp \left(1 - \frac{u_i^I}{\rho} \right)$$

$(i = n, \tau, b)$

(8)

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

在有限元分析中把弹簧单元节点力和位移之间的关系定义为如下形式:

$$F_i = F_{i,max} \frac{D_i}{\rho} \exp \left(1 - \frac{D_i}{\rho} \right)$$

$(i = n, \tau, b)$

(9)

这里: $F_{i,max}$ 代表界面弹簧的最大承载, ρ 代表弹簧分离特征长度。

3 算例分析

分析连续纤维增强复合材料 SiC/ Ti, 纤维材料参数为: $E_f = 380 \text{ GPa}$, $\mu_f = 0.15$, 基体材料参数 $E_m = 70 \text{ GPa}$, $\mu_m = 0.31$, 纤维含量 $V_f = 50\%$, 基体为弹性。利用节点重合的弹簧元模拟界面。界面是没有厚度的, 纤维和基体在界面上有一组节点相互重合。将重合节点分别用法向和切向两个

方向的单向弹簧单元连接起来表示界面粘结, 自定义弹簧单元的实常数表示界面的粘结性质, 如图 2 中实点所示。

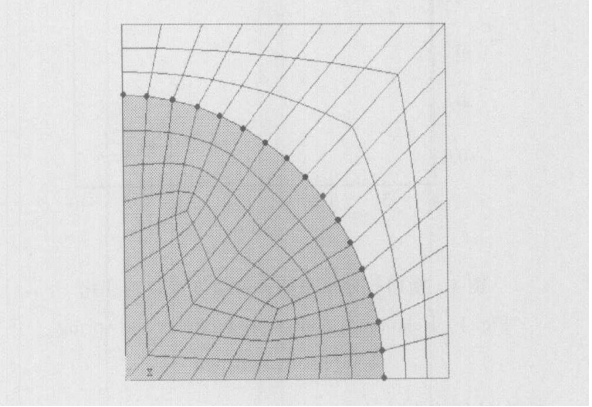


图 2 复合材料代表性体元的有限元模型
Fig. 2 Finite element model of REV

3.1 柔性界面分离模型计算结果

计算了在不同弹簧柔度条件下横向拉伸模量的变化。计算的结果如图 3。从计算结果可以很明显的看到, α 比较大时界面粘结可以认为是完好的, α 比较小的时候宏观横向弹性模量随着 α 的减小迅速下降, α 很小的时候宏观模量接近基体的模量, 说明界面粘结已经完全失效, 不能有效传递载荷, 纤维在复合材料中的增强作用失效, 仅由基体承担外部载荷作用。

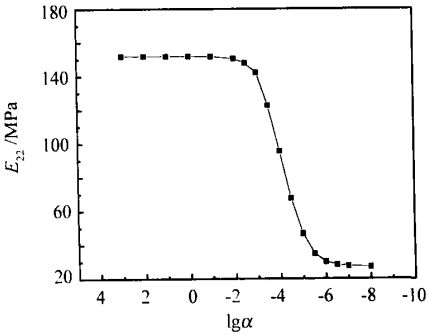


图 3 泊松比随弹簧柔度系数的变化
Fig. 3 Relation of poisson ratio and spring compliant coefficient

图 4 表示界面分离系数对复合材料泊松比的影响, 可以看到, 随着 α 减小, 界面分离系数变大, 界面粘结变弱, 泊松比变小甚至于变为负值。这是因为界面粘结很弱的时候, 界面的分离程度很大, 代表体元在与载荷垂直的方向上反而“膨胀”了。

3.2 常响应界面分离模型计算结果

对复合材料计算了弹簧连接强度与弹簧分离

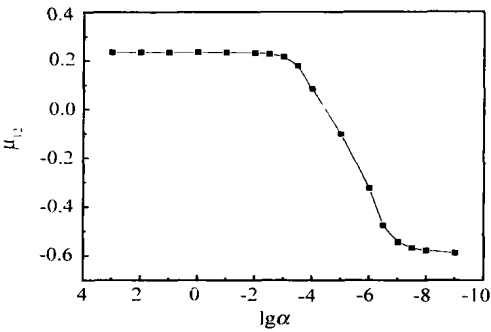


图 4 横向拉伸模量随弹簧柔度系数的变化
Fig. 4 Relation of transverse modulus and spring compliant coefficient

系数对复合材料横向拉伸响应与横向剪切响应的影响,见图 5、图 6。采用常响应界面模型时,复合材料应力-应变曲线存在一个明显的转折点,对应于界面分离的起始点。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

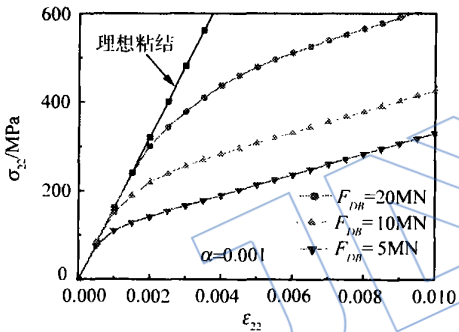


图 5 不同弹簧分离系数下的横向拉伸曲线
Fig. 5 Transverse tensile behavior of different spring separate coefficient

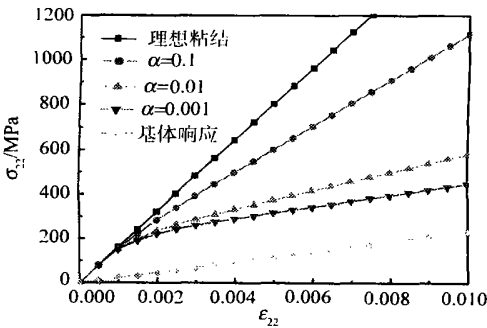


图 6 不同弹簧连接强度下的横向拉伸曲线
Fig. 6 Transverse tensile behavior of different spring strength

为此模型中界面分离发生后,分离系数不变,即分离程度不增加。从图中可以看出:连接强度主要影

响界面分离发生时的应力水平,强度越大则分离时的应力越高;分离系数主要影响分离以后的响应曲线的斜率,分离系数越大则斜率越大。

3.3 渐进适应分离模型

采用该模型计算得到的结果见图 7、图 8。与前面采用界面分离模型不同,由于渐进适应界面分离模型允许界面上的应力载荷卸载,因而宏观响应曲线明显的分为 3 个阶段。首先随着应力的增加,界面粘结质量下降,宏观刚度下降;第二阶段当界面上的应力达到了界面最大应力,界面发生分离,随后应力卸载;第三阶段界面分离加剧直至最后完全脱粘失效,传载能力消失,外部载荷由基体承担响应曲线与纯基体相当。

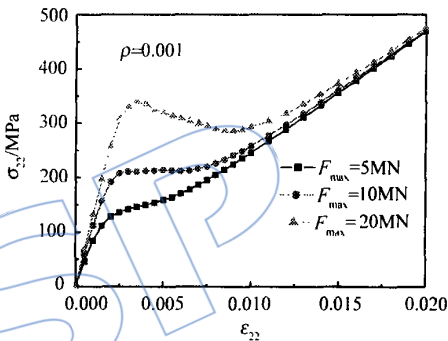


图 7 界面弹簧特征长度对横向拉伸的影响
Fig. 7 Transverse tensile behavior of different spring diagnostic length

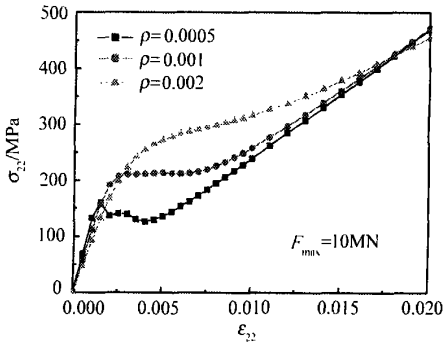


图 8 界面强度对复合材料横向拉伸的影响
Fig. 8 Transverse tensile behavior of different interfacial strength

从图中可以看出:弹簧最大承载主要影响宏观响应曲线峰值的大小,也就决定了响应的整体应力水平的高低,因为最大承载值越大就意味着需要更高的外部载荷和局部应力才能引起界面分离的发生。弹簧特征长度主要影响宏观响应曲线峰值的位置和宏观应力卸载的速度。特征长度的

值越大则峰值越晚出现, 应力卸载就越慢。在计算中发现过小的特征长度会引起有限元计算时收敛困难。

4 结 论

对于弱界面粘结复合材料采用了用界面应力和界面位移描述的界面分离模型。用非线性弹簧元模拟界面特性, 对弱界面粘结复合材料性能进行了分析。分别采用了柔性界面模型、常响应界面模型和渐进适应界面模型分析复合材料宏观性能。结果表明当界面粘结从强到弱变化时, 复合材料横向弹性模量不断变小。在常响应界面情况下, 复合材料横向拉伸应力- 应变曲线存在明显的转折点, 对应于界面分离起始点, 转折点位置取决于界面粘结强度。当存在渐进适应界面时, 复合材料横向拉伸应力- 应变曲线存在 3 个阶段。

参考文献:

[1] 黄玉东, 孔宪仁, 张志谦, 等. 界面层对纤维与基体间载荷传递能力的影响[J]. 复合材料学报, 1996, 13(3): 21~25.
Huang Yu-dong, Kong Xian-ren, Zhang Zhi-qian, et al. Effect of Interlayer on the Load Carrying Capabilities Between Fiber and Matrix[J]. *ACTA Materiae Compositae Sinica*, 1996, 13(3): 21~25.

[2] Mital S K. Interfacial Micro-Fracture in High Temperature

Metal Matrix Composites[J]. *J. Comp Mater*, 1993, 27(17): 1678~1694.

[3] 康国政, 高庆, 刘世楷, 等. 界面对短纤维增强金属基复合材料力学行为的影响[J]. 复合材料学报, 1999, 16(1): 35~40.
Kang Guo-zhen, Gao Qing, Liu Shi-kai, et al. Interfacial Effects on Mechanical Behavior of Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites[J]. *ACTA Materiae Compositae Sinica*, 1999, 16(1): 35~40.

[4] 高庆, 康国政, 杨川, 等. 高温下短纤维增强金属基复合材料界面的微观结构和热残余应力状态分析[J]. 复合材料学报, 2002, 19(4): 46~50.
Gao Qing, Kang Guo-zhen, Yang Chuan, et al. Study on Microstructure Characteristics and Thermal Residual Stress States of Interface on Short Fiber Reinforced Composites at Elevated Temperature[J]. *ACTA Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(4): 46~50.

[5] Kang G Z, Gao Q, Liu S K. Effect of Interfaces on Stress Transfer in Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites[J]. *J. Southwest Jiaotong Univ*, 1998, 6(1): 47~49.

[6] 廉英琦. 弱界面粘结的纤维增强金属基复合材料细观力学分析[D]. 江苏 南京: 南京航空大学, 2004.

[7] 孙志刚, 宋迎东, 高德平. 考虑界面时细观几何结构对复合材料力学性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(4): 488~494.
Sun Zhi-gang, Song Ying-dong, Gao De-ping. Influence of Micro-Structural Geometry and Interface on Composite's Mechanical Behavior[J]. *Journal of materials science& engineering*, 2004, 22(4), 488~494.