

文章编号: 1000 8055(2008)10 1854-05

准静态加载下陶瓷基复合材料层合板 应力-应变曲线的模拟

许仁红, 宋迎东, 李龙彪, 孙志刚
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用细观力学方法来模拟纤维增强陶瓷基复合材料层合板在准静态加载下应力-应变行为. 采用层合板修正剪滞模型分析复合材料出现损伤时的细观应力场, 通过临界基体应变能准则、Nair 脱粘准则确定基体裂纹间隔和界面脱粘长度. 最后结合剪滞模型和损伤机制模拟陶瓷基复合材料层合板应力-应变曲线, 并与试验数据进行比较, 结果吻合较好.

关 键 词: 陶瓷基复合材料; 层合板; 剪滞理论; 本构模型

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Modeling behavior of cross-ply ceramic matrix composites under quasi-static loading

XU Ren hong, SONG Ying-dong, LI Long-biao, SUN Zhi-gang

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The stress-strain response of cross-ply fiber-reinforced ceramic composites laminates under quasi-static loading was discussed by using a micromechanical approach. The cross-ply modified shear lag model was used to analyze the micro stress field of the damage composites. The critical matrix strain energy criterion and the Nair de-bond criterion were used to determine the matrix crack spacing and interface de-bonded length. At last, the tensile stress-strain curves were modeled by combining laminated shear-lag theory and failure criterion. The results from the present analysis match well with experimental data.

Key words: ceramic matrix composites; cross-ply laminate; shear lag theory; constitutive laws

纤维增强陶瓷基复合材料由于具有高比模、耐高温和抗腐蚀等特点, 而且其强度, 特别是韧性均优于单相陶瓷. 这些特点使其成为许多结构件的可行材料, 而且在航空以及其它高温环境中具有广阔应用前景.

通过对陶瓷基复合材料层合板应力-应变行为的模拟可以深刻了解其变形和损伤机制, 可以

更好的了解其力学参数对材料性能的影响, 对陶瓷基复合材料的设计和应用有着重要的意义.

许多学者对陶瓷基复合材料层合板单向加载的失效过程进行了研究^[1-9]. Beyerle 和 Evans^[1]通过能量平衡方法对层合板 0° 层和 90° 层基体裂纹演化进行模拟, Karandikar 和 Chou^[2]通过对单层板弹性模量并结合混合率来模拟层合板弹性模

收稿日期: 2007-10-12; 修订日期: 2008-04-17

基金项目: 航空科学基金(05C52013); 973 项目资助博士点基金(20070287039).

作者简介: 许仁红(1984-), 男, 安徽宣城人, 硕士生, 主要研究方向为陶瓷基复合材料疲劳与寿命预测.

量. 上述理论模拟均与试验结果存在一定的差距. Pryce 和 Smith^[3] 则通过试验得到裂纹密度, 对层合板力学行为进行了模拟, 但是没有考虑裂纹演化. Daniel^[4] 等人通过最大应力准则来计算层合板 90° 层横向裂纹和 0° 层基体裂纹的形成和演化, 但是这种基于单值基体强度的最大应力准则预测的基体裂纹会迅速饱和, 也就是说基体裂纹的应力范围很窄. Weitsman 和 Zhu^[5] 基于经典断裂力学方法提出了一种能量平衡法, 结合剪滞模型来预测裂纹随应力的变化, 但是在他们的模型中, 应变能释放率的计算很复杂. Solti 等人^[6] 在能量平衡模型基础上, 提出了临界基体应变能准则, 假设基体应变能存在一个临界值, 当基体应变能超过临界值时, 额外的基体应变能将通过新裂纹产生、界面脱粘等形式耗散掉, 该模型考虑了界面脱粘对基体裂纹演化的影响, 很好的预测了基体裂纹间隔随应力演化.

目前主要存在两种方法来确定界面脱粘: 最大剪应力准则^[7] 和断裂力学方法^[8]. 最大剪应力准则认为当界面剪应力达到界面粘结强度时界面脱粘; 而断裂力学方法将界面脱粘作为一种裂纹扩展来研究, 认为当界面脱粘尖端的应变能释放率达到界面脱粘韧性时界面脱粘. 本文将采用基于断裂力学的 Nair 脱粘准则确定界面脱粘.

本文首先对复合材料出现损伤(横向裂纹、基体裂纹和界面脱粘) 时细观应力场进行分析, 然后分别介绍临界基体应变能准则、Nair 脱粘准则, 最后将失效准则与本构关系相结合模拟层合板陶瓷基复合材料应力-应变曲线.

1 层合板剪滞理论

1.1 基本假设

为了模拟层合板单轴加载下的响应, 使用一维单元体及一系列简化假设:

- 1) 假设纤维均匀分布在基体中;
- 2) 假设层合板是对称铺层形式;
- 3) 假设复合材料中的横向裂纹间隔和基体裂纹间隔等间距分布, 且贯穿每一层;
- 4) 只考虑加载方向的应力以及 0° 层和 90° 层层间剪应力和 0° 层组分之间的剪应力.

1.2 基本公式

层合板的特征单元体如图 1 所示. 将层合板分成三个部分: 90° 层, 0° 层纤维和 0° 层基体. 假设 0° 层基体裂纹不影响 90° 层的应力分布. 因此, 横

向裂纹可以影响层间的应力传递, 而基体裂纹只影响 0° 层组分之间的应力分布.

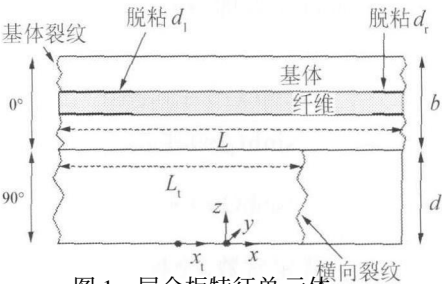


图 1 层合板特征单元体

Fig. 1 Representative volume element of cross ply laminates

0° 层和 90° 层的厚度分别为 2b 和 2d. 90° 层和 0° 层的平均裂纹间隔分别为 L₁ 和 L, 裂纹密度则为单位长度内的平均裂纹间隔(比如 1/L₁ 或 1/L). 通过混合法, 可得方程

$$\sigma = \frac{b}{b + d} \sigma_L(x) + \frac{d}{b + d} \sigma_T(x) \tag{1}$$

式中

$$\alpha_L(x) = v_f \sigma_f + v_m \alpha_m \tag{2}$$

其中 σ 是层合板轴向应力; $\alpha_L(x)$ 是纵向层(0° 层) 的轴向应力; $\sigma_T(x)$ 是横向层(90° 层) 的轴向应力, $\alpha(x)$ 和 $\alpha_m(x)$ 则是 0° 层的组分应力, v_f 和 v_m 分别为纤维和基体的体积百分比.

在加载过程中, 当 90° 层形成裂纹(横向裂纹), 层间载荷重新分布主要是依靠 90° 层和 0° 层之间的层间剪应力 $\tau(x)$

$$\tau(x) = b \frac{d\alpha_L(x)}{dx} = - d \frac{d\sigma_T(x)}{dx} \tag{3}$$

根据 Kuo 和 Chou^[9] 的复合材料单层板分析, 剪应力表达式如下:

$$\begin{cases} \tau(x, z) = \left\{ \frac{(b + d)^2}{z + b} - \left[z + \frac{(b + d)^2}{b} \right] \right\} \\ \left\{ b - \frac{(b + d)^2}{b} \right\}^{-1} \tau(x) & \text{当 } z \in \bar{z}_{90} \\ \tau(x, z) = \frac{b + d - z}{b} \tau(x) & \text{当 } z \in \bar{z}_0 \end{cases} \tag{4}$$

运用传统的剪滞理论和方程(1) ~ (4), 可得 90° 层和 0° 层应力分布微分方程

$$\frac{d^2 \sigma_T(x)}{dx^2} = \lambda^2 [\sigma_T(x) - \sigma_f^0] \tag{5}$$

$$\frac{d^2 \alpha(x)}{dx^2} - \beta^2 \alpha(x) =$$

$$- \beta^2 \left[\alpha^0 - \frac{E_f}{E_1} \cdot \frac{d}{b} (\sigma_T(x) - \sigma_f^0) \right] \tag{6}$$

其中 σ_f^0 和 σ_f^0 是在层合板未损伤的情况下的轴向应力, 通过混合法得到. E_f 为纤维弹性模量, E_1

为 0° 层弹性模量. 常数 λ 和 β 是剪滞常数^[7]. 在考虑了裂纹附近应力重新分布的情况下, 90° 层轴向应力和 0° 层轴向应力即方程(5)和(6)的解表达如下:

$$\sigma_T(x) = c_1 \sinh(\lambda x) + c_2 \cosh(\lambda x) + \sigma_T^0 \quad (7)$$
$$\sigma_T(x) = c_3 \sinh(\beta x) + c_4 \cosh(\beta x) + \frac{E_f}{E_1} \cdot \frac{d}{b} \frac{\beta^2}{\lambda^2 - \beta^2} \{ c_1 \sinh(\lambda x) + c_2 \cosh(\lambda x) \} + d^0 \quad (8)$$

其中 $c_1 \sim c_4$ 为待定常数. 坐标 x_i 为横向裂纹的局部坐标, 如图 1 所示.

0° 层基体轴向应力如下表示:

$$\sigma_m(x) = \frac{1}{v_m} \left\{ \frac{b+d}{b} \sigma - \frac{d}{b} \sigma_T(x_i|x) \right\} - \frac{v_f}{v_m} \sigma_T(x) \quad (9)$$

其中 $\sigma_T(x_i|x)$ 是 $\sigma_T(x_i)$ 在 $x_i = x$ 处的值. 方程(7)和(8)中的常数 $c_1 \sim c_4$ 通过边界条件解出. 边界条件主要是根据复合材料的损伤状态得到, 主要分为以下两种情况: 出现横向裂纹后和出现基体裂纹后的应力分布, 如图 2 和图 3 所示.

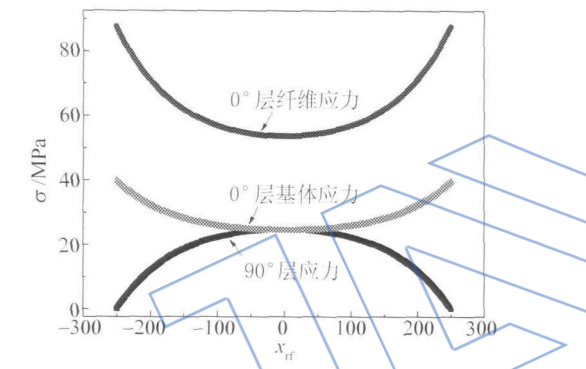


图 2 出现横向裂纹后层合板应力分布
Fig. 2 Micro-stresses for cross-ply after transverse crack

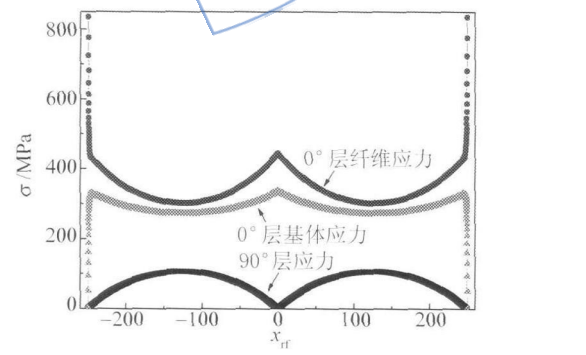


图 3 出现基体裂纹后层合板应力分布
Fig. 3 Micro-stresses for cross-ply after matrix crack

2 陶瓷基复合材料的损伤机制

2.1 横向裂纹和基体裂纹

本文采用 Solti 等人^[6]提出的临界基体应变能(CMSE)方法来预测基体裂纹随应力的变化,

该理论认为当基体应变能达到一定临界值时, 基体失效, 出现裂纹, 随着应力增加, 基体应变能不再发生变化, 但是裂纹密度发生变化. 图 4 为 CMSE 描述的裂纹随应力增加演化过程:

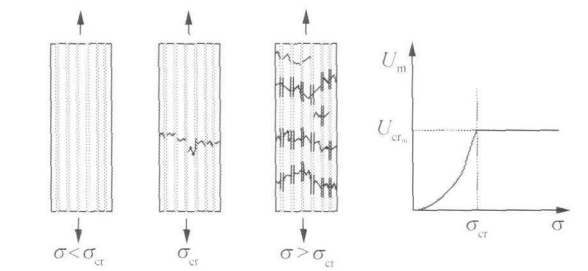


图 4 CMSE 标准描述的裂纹随应力增加演化过程
Fig. 4 Critical matrix strain energy criterion

层合板的横向裂纹和基体裂纹平均裂纹间隔通过临界基体应变能准则估算

$$U_{m_o} + U_m(L) = U_{cr_m} \quad (10)$$
$$U_{T_o} + U_T(L) = U_{cr_T} \quad (11)$$

通过 CMSE 准则可得横向裂纹密度以及基体裂纹密度随应变的变化, 如图 5 和图 6 所示.

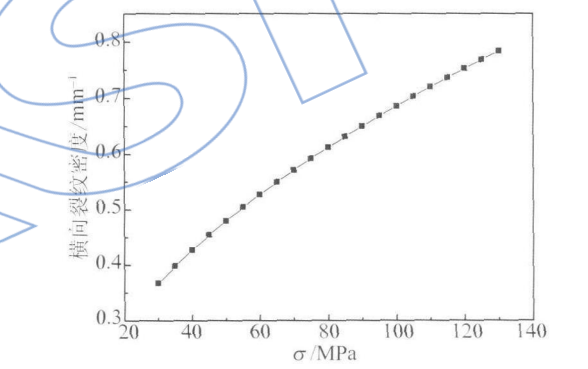


图 5 横向裂纹密度随应力变化
Fig. 5 Applied stress versus transverse crack density for cross-ply laminates

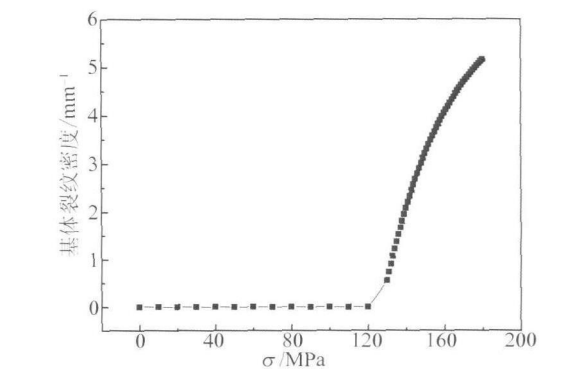


图 6 基体裂纹密度随应力变化
Fig. 6 Applied stress versus matrix crack density for cross-ply laminates

2.2 界面脱粘

当基体裂纹扩展到纤维/基体界面时, 将沿界面发生偏转, 界面发生脱粘. 本文采用 Nair 脱粘准则^[8]确定脱粘长度.

Nair 脱粘准则通过在界面脱粘过程中的能量交换来确定脱粘长度

$$dU_d + dU_s + dU_f - dU_T = 0 \tag{12}$$

其中 dU_d 是纤维/基体界面在脱粘过程中吸收的能量; dU_s 是单元体增加的应变能; dU_f 是界面摩擦能; dU_T 是纤维拉伸力 T 所做的功.

根据现在分析的损伤形式, 如图 1 所示, 单元体两边的脱粘长度不相等, 即 $x < 0$ 的脱粘长度不等于 $x > 0$ 的脱粘长度. 为了区分两边的脱粘长度, 分别用 d_l ($x < 0$) 和 d_r ($x > 0$) 表示. 根据 Nair 脱粘准则和损伤结构, 可以求出裂纹两端的脱粘长度.

脱粘区界面剪应力假设为常数. 通过 Nair 脱粘准则可得脱粘长度随应力的变化, 如图 7 所示.

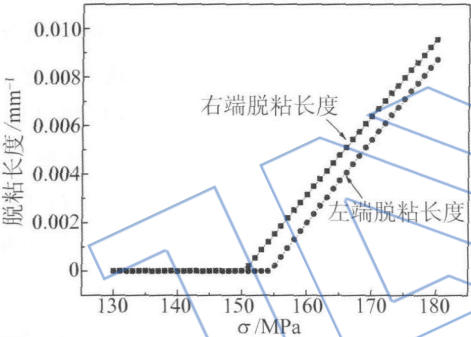


图 7 脱粘长度随应力变化

Fig. 7 Applied stress versus de bond length for cross ply laminates

3 应力-应变曲线模拟与实验验证

通过层合板剪滞模型和损伤机制, 可对层合板应力-应变曲线进行模拟. 由剪滞理论得到层合板应力分布. 由下式可得层合板的应变

$$\epsilon_c = \frac{1}{E_f L} \int_L \sigma_f(x) dx + (\alpha_f - \alpha_c) \Delta T \tag{13}$$

根据损伤机制可以求得横向裂纹 L_f , 基体裂纹 L 和脱粘长度 d_l, d_r . 结合剪滞理论和损伤机制即可以对层合板应力-应变关系进行模拟, 并与实验数据^[10]进行对比, 如图 8 所示. 层合板材料常数如下:

$$\begin{aligned} E_f &= 210 \text{ GPa}, E_m = 95.5 \text{ GPa}, V_f = 0.38, \\ r_f &= 7.5 \mu\text{m}, \alpha_f = 3.1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \alpha_m = 4.5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \\ \tau_i &= 20 \text{ MPa}, \Delta T = -1000 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

从图 8 中可以看出, 理论计算与试验结果吻合较好.

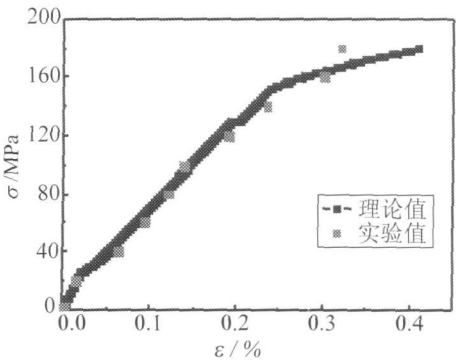


图 8 层合板应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain prediction of cross ply laminates

4 结 论

提出了陶瓷基复合材料层合板拉伸力学行为的模拟方法. 即通过临界基体应变能模拟横向裂纹和基体裂纹演化以及 Nair 脱粘准则模拟界面脱粘, 然后将修正层合板剪滞理论和损伤机制进行结合来模拟陶瓷基复合材料层合板的单向加载力学行为.

采用本文提出的方法模拟了陶瓷基复合材料层合板的单向拉伸应力-应变曲线, 并与试验数据吻合的较好, 验证了所提出方法的有效性.

参考文献

[1] Beyerle D S, Spearing S M, Evans A G. Damage mechanisms and the mechanical properties of a laminated 0/90 ceramic matrix composite [J]. J. Amer. Cer. Soc., 1992, 75(12): 2719-2725.

[2] Karandikar P, Chou T W. Characterization and modeling of micro cracking and elastic moduli changes in nicalon/CAS composites [J]. Composites Science and Technology, 1993, 46: 1-11.

[3] Pryce A W, Smith P A. Behavior of unidirectional and cross ply ceramic matrix composites under quasi static tensile loading [J]. J. Mater. Sci., 1992, 27: 2695-2704.

[4] Daniel I M, Anastassopoulos G. Failure mechanisms and damage evolution in crossply ceramic matrix composite [J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, 32(3/4): 341-355.

[5] Weitsman Y, Zhu H. Multi fracture of ceramic composites [J]. J. Mech. Phys. Solids, 1993, 41(2): 351-388.

[6] Solti J P, Mall S, Robertson D D. Modeling behavior of cross ply ceramic matrix composites under quasi static loading [J]. Applied Composite Materials, 1995, 2: 265-292.

[7] Lawrence P. Some theoretical considerations of fiber pull

- out from an elastic matrix [J]. J Mater Sci, 1972, 7(1): 1-6.
- [8] Shanti V. Nair crack wake debonding and toughness in fiber or whisker reinforced brittle matrix composites [J]. J Am Ceram. Soc., 1990, 73(10): 2839-2847.
- [9] Kuo W S. Damage of multi directionally reinforced ceramic matrix composites [D]. Newark USA: Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, 1992.
- [10] James P S. Modeling of progressive damage in fiber reinforced ceramic matrix composites [D]. Ohio USA: Air Force Institute of Technology, 1996.

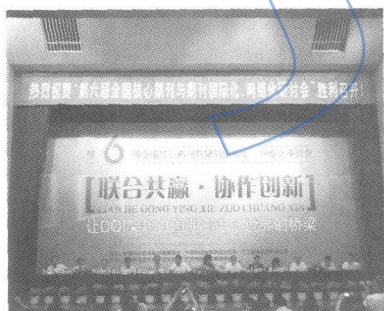
第六届全国核心期刊与期刊国际化、网络化研讨会 联合共赢、协作创新——让 DOI 架起中国期刊走向世界的桥梁

2008年9月6日,由中国科学技术期刊编辑学会、中国科学技术信息研究所和万方数据股份有限公司联合主办,广西科技情报研究所、广西科技期刊编辑学会承办的"第六届全国核心期刊与期刊国际化、网络化研讨会"在广西南宁召开。会议由万方数据公司顾问宋培元主持。

参会的领导有:中宣部出版局副局长刘建生,科技部条财司吴波尔巡视员,省科技厅纪检组组长奉明芳,省新闻出版署报刊处处长汤晓荣,科技期刊编辑学会秘书长姚希彤,中国科学技术信息研究所副所长赵志耘,万方数据股份有限公司副总裁乔晓东,市场总监张秀梅,WK 期刊出版集团 LWW 副总裁 Kevin Fitzpatrick 等来自国内多家学术团体的领导和专家,以及全国数百家期刊的 500 多名专家、学者及部分国际期刊出版商代表参加会议。

研讨会的主题为"联合共赢,协作创新——让 DOI(数字对象唯一标识符)架起中国期刊走向世界的桥梁"。会上,代表们就期刊出版业发展的现状、国际期刊出版未来发展的机遇和方向、中国期刊业的整合共赢等问题进行了广泛交流;并就期刊评价的精品战略问题,DOI 对于国内科技信息资源特别是科技期刊发展的重要价值与期刊发展相关的具体问题进行了深入探讨。此外,会议代表还就开放存取和科技期刊发展网络化、国际化、期刊网络品牌的开发与保护等主题进行了发言,并展开了热烈的讨论。

随着中国科技论文数量快速增长,期刊国际化、网络化越来越受到重视,《航空动力学报》也一直注重期刊国际化、网络化的发展进程,从 2007 年 8 月 1 日起就正式采用了网上采编系统,实行了网络投稿、审稿,实现了编辑部的网上办公。此次会议上我们和很多家期刊进行了交流,取长补短,今后将继续关注国际化的发展趋势,办出国际品牌期刊。



大会会场



中宣部出版局副局长刘建生



中国科学技术信息研究所副所长赵志耘



科技期刊编辑学会秘书长姚希彤



万方数据股份有限公司副总裁乔晓东



WK 期刊出版集团副总裁 Kevin Fitzpatrick