

文章编号: 1000-324X(2007)01-0113-06

三维机织陶瓷基复合材料的面内剪切性能及损伤研究

常岩军, 矫桂琼, 王 波, 管国阳, 卢智先
(西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘要: 采用 IOSIPESCU 纯剪切试件, 考虑纤维的编织结构和失效机理, 研究了三维机织碳 / 碳化硅 (C/SiC) 复合材料在面内剪切载荷作用下的力学性能和损伤过程. 材料具有明显的非线性应力 - 应变行为和残余变形等特性. 材料主要的损伤机制为基体微裂纹开裂, 界面脱粘和纤维断裂, 其中界面裂纹是材料应力 - 应变等力学行为的主要影响因素. 基于连续介质损伤力学分析方法, 提出了简单的损伤演化模型并对损伤演化过程进行了描述.

关键词: 陶瓷基复合材料; 三维机织; 损伤演化模型; 临界应变

中图分类号: TQ 174 **文献标识码:** A

Mechanical Properties and Damage Process of a Three-dimensional Woven Ceramic Composite under In-plane Shear Loading

CHANG Yan-Jun, JIAO Gui-Qiong, WANG Bo, GUAN Guo-Yang, LU Zhi-Xian

(School of Mechanics and Civil Construction, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The mechanical behavior and damage process of a three-dimensional woven carbon/silicon carbide (C/SiC) composite under in-plane shear loading were investigated with IOSIPESCU specimens in relation with the failure mechanisms and the fiber architecture. The C/SiC composite exhibited several interesting features including an essentially non-linear stress-strain behavior and permanent deformations. The results show that the major damage mechanisms are matrix microcracks cracking, interface debonding and fiber breaking. The delamination cracks affect mainly the stress-strain behavior and the mechanical properties. A damage model is proposed based upon continuum damage mechanics to describe the damage evolution.

Key words ceramic composites; 3D woven; damage model; critical strain

1 引言

碳纤维增韧碳化硅基 (C/SiC) 复合材料具有高比强、高比模、耐高温、抗烧蚀、抗氧化和低密度等特点, 在高推重比航空发动机, 火箭发动机等领域具有广阔的应用前景, 被认为是继碳 - 碳复合材料 (C/C) 之后发展的又一新型战略性材料^[1]. 与二维编织 C/SiC 复合材料相比, 三维机织 C/SiC 复合材料在编织结构上没有了层的概念, 增强了厚度方向的性能, 显著提高了材料抵抗分层的能力.

作为一种新型各向异性材料, 剪切性能是其重要的特性. 尤其是在连接件等具有复杂应力状态的主承力结构件上应用时, 研究材料的剪切性能显得十分必要. 国内外对编织复合材料的剪切性能的

研究主要集中在树脂基复合材料^[2~5], 潘文革等^[6]利用声发射特征参数的综合分析法, 揭示了三维编织 C/SiC 复合材料单向拉伸时损伤演化过程和规律, 并利用声发射相对能量, 定义了材料临界损伤强度. 对于编织陶瓷基复合材料剪切性能的研究较少^[7], 贺鹏飞等^[8]从细观角度对复合材料内部损伤发展进行了理论分析, 讨论了层合板在面内剪切外载作用下的内部损伤发展. Xia^[9]等利用有限元分析了陶瓷基复合材料纤维 / 基体界面的滑移行为, 计算了界面滑移的应力场, 对拉伸失效行为进行了分析. Siron 和 Lamon^[10,11]研究了拉剪作用下材料中的微裂纹对力学行为的影响, 认为分层裂纹是材料非线性力学行为的主要影响因素, 并基于连续介质力学方法建立了材料的损伤演化模型.

收稿日期: 2006-01-11, 收到修改稿日期: 2006-05-18

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (90405015); 高等学校博士基金 (2030699040)

作者简介: 常岩军 (1979-), 男, 博士研究生. E-mail: yanjun_chang@126.com

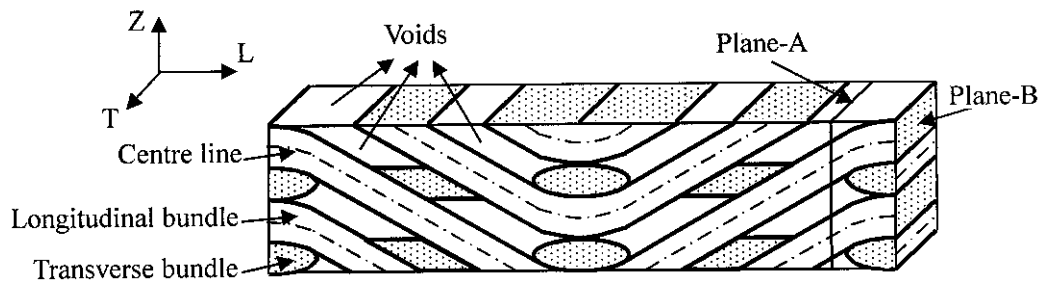


图 1 倾斜内锁型三维机织 C/SiC 复合材料的体积代表单元

Fig. 1 Volume representative unit cell for a 3D angle-interlock woven C/SiC composite

本文采用 IOSIPESCU 剪切试件对材料的面内剪切性能进行了试验研究和损伤分析,探讨了两种面内剪切损伤过程和破坏机理,并初步建立了材料的剪切损伤模型,表征了材料的剪切应力应变曲线,为进一步建立复杂应力状态下的各向异性损伤理论打下了基础。

2 剪切试验

采用三维机织的方法,制备纤维预制体.所用纤维为日本 Toray 公司生产的 T-300 6K 的碳纤维.采用化学气相渗透 (CVI) 工艺进行复合材料的制备,材料中纤维的体积分数约为 40%,空洞体积分数约为 30%.根据材料编织结构在经向和纬向的不同,把复合材料分别沿经向和纬向切割,得到 LT 面和 TL 面 IOSIPESCU 纯剪切试件各五件,在每种试验件中任取两件进行加卸载试验.图 1 为材料的体积代表单元,体积代表单元包括经向上的一个周期,纬向上的半个周期,利用材料纬向的反对称性可以得到材料全周期内的体积单元. TL 面剪切的第一个字母 T 表示剪切面垂直于 T 向,即 LZ 面;第二个字母 L 表示加载方向为 L 向,如图 1 所示.同理 LT 面剪切表示剪切面垂直于 L 向,即 ZT 面,加载方向为 T 向.

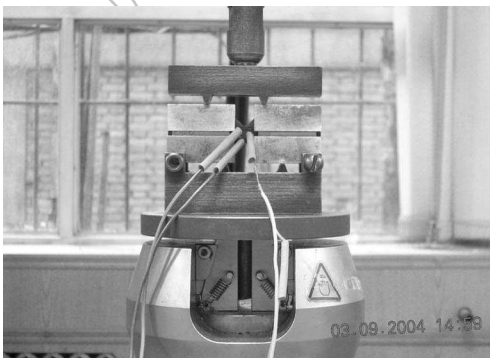


图 2 反对称四点弯曲纯剪切试验装置

Fig. 2 Anti-symmetrical four-point flexural shear apparatus

通过在试件缺口处粘贴应变片测量缺口处

的剪切应变.试验采用反对称四点弯曲纯剪切试验装置,如图 2 所示.试验在 INSTRON-8871 液压伺服试验机上完成,载荷控制加载,加载速度为 0.02kN/s,卸载速度为 0.05kN/s.为了研究随着应力的变化材料的损伤过程,分别对 LT 面和 TL 面试件进行加卸载试验,每增加约 8MPa 进行一次卸载,并重新加载,利用 DH-3817 动静态应变测试系统采集应变和载荷,并根据剪切夹具和施加载荷计算出材料缺口处的应力,得到材料 LT 面和 TL 面的剪切加卸载应力应变曲线,得到材料 LT 面和 TL 面的剪切应力应变曲线.

3 结果和讨论

3.1 剪切应力应变曲线

图 3、4 分别给出了材料 LT 面和 TL 面剪切试件的典型剪切应力-应变曲线.从图中可以看出,

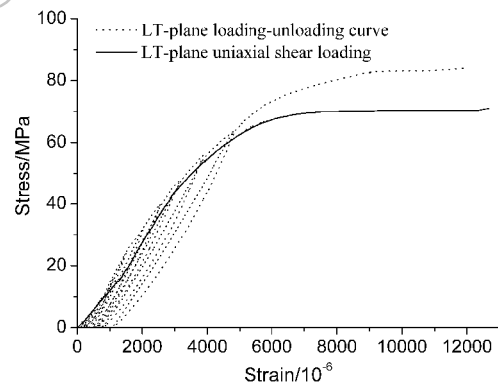


图 3 LT 面剪切应力应变关系

Fig. 3 Shear stress-strain curve of LT-plane

材料的剪切加卸载包络线和单向剪切应力应变曲线都具有明显的非线性行为.材料的卸载曲线略向下凸,而加载曲线基本为直线,在接近卸载点应力时才出现非线性偏转. LT 面剪切强度平均值为 72MPa,断裂应变为 1.25%加卸载剪切强度平均值为 85MPa,断裂应变约为 1.2%, LT 面剪切试件在加卸载后强度提高了近 20%. TL 面剪切强度平均值为 82MPa,断裂应变为 1.4%,加卸载剪切强度平

均值为 86MPa, 断裂应变约为 1.2%, TL 面剪切试验件在加卸载后强度没有明显变化. LT 面剪切应力应变曲线在应变约 >0.35% 时出现显著的非线性; LT 面剪切应力应变曲线约在应变 >0.5% 时出现显著的非线性. 图 3 中标出了 LT 面最后一次加卸载的弹性应变和非弹性应变以及加卸载路径, TL 面剪切试验过程及弹性应变和非弹性应变定义方法相同. 试验分析发现, 三维机织陶瓷基复合材料 LT 面和 TL 面剪切的应力应变曲线随着应力接近破坏应力基本为水平直线.

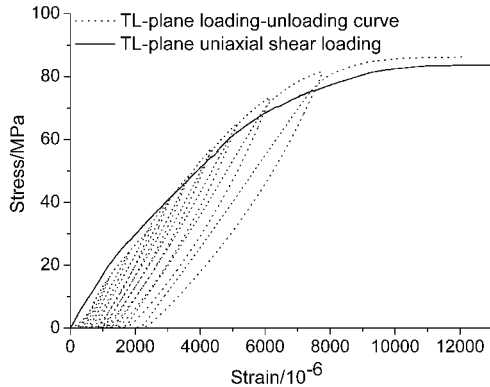


图 4 TL 面剪切应力应变关系
Fig. 4 Shear stress-strain curve of TL-plane

3.2 损伤和破坏机制

在 LT 面剪切试件的缺口剪切带上, 由于编织结构的影响, 各个截面的抗剪切能力并不相同. 与只包含经向纤维束的截面相比, 同时包含经向和纬向纤维束的截面具有更强的抗剪切能力. 因此根据最弱连接理论, LT 面剪切试件的断口应该在抗剪切能力最弱的截面, 即只含有经向纤维束的截面. 试件断口处主要为经向纤维束, 只有少量纬向纤维束, 在只包含经向纤维束的横截面材料形成了比较粗糙的断口, 如图 5, 而在断口附近的纬向纤维束位置形成齐断口, 如图 5(a), 因此 LT 面剪切主要由经向纤维束控制. 损伤机制为首先是基体中的微裂纹扩展, 随后裂纹在纤维 / 基体界面处发生偏转, 产生界面裂纹, 界面裂纹进一步扩展, 连接, 材料失去承载能力发生破坏.

TL 面剪切试件的横截面在两束经向纤维束连接的部位剪切性能较差, 这是因为在材料的编织结构中, 相邻的两束纤维束只是周期性的在几个离散的区域连接, 相接的面积与材料整个横截面面积相比非常小, 抗剪切能力也最弱. TL 面剪切的断口形貌如图 6, 断裂发生在相邻经向纤维束之间, 试件断口为两个台阶状断面, 台阶高度为

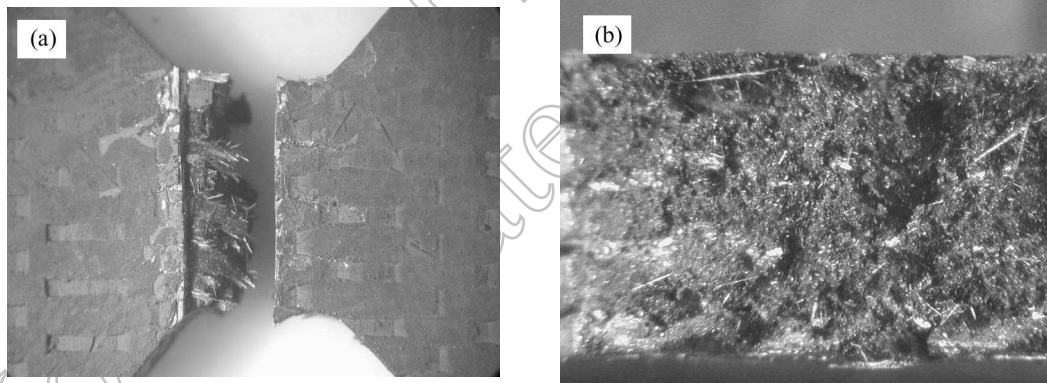


图 5 LT 面剪切断面显微照片
Fig. 5 Microstructure of LT-plane shear at cross-section
(a) Location of fracture; (b) For fracture surface

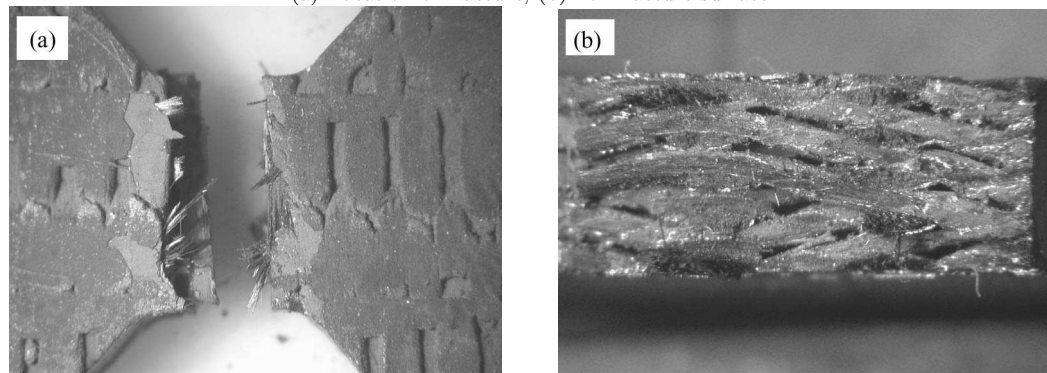


图 6 TL 面剪切断面显微照片
Fig. 6 Microstructure of TL-plane shear at cross-section
(a) Location of fracture; (b) For fracture surface

一束经向纤维束的宽度, 断口处经向纤维较为完整, 纬向纤维束大部分被整齐剪断, 有一小部分纬向纤维束为扫帚形. 断口分析表明, TL 面剪切试件首先在相邻的经向纤维束表面基体与纤维束之间产生界面裂纹, 裂纹进一步扩展, 经向纤维束失去承载能力, 接着载荷全部由体积分数较少的纬向纤维束来承担, 最后纬向纤维束被剪断, 试件发生破坏.

3.3 材料损伤演化模型

在面内剪切加卸载试验中, 卸载时由于受到界面摩擦和脱粘基体块的阻塞显示出明显的非线性, 计算出的卸载模量不够准确. 而重新加载基本为直线, 计算的加载模量较为准确, 采用直线拟合基本能够反应试验重新加载的整个真实过程. 因此, 本文以材料剪切加卸载试验中的重新加载模量 E_{rel} 的变化定义损伤 D , 表示为:

$$D = 1 - \frac{E_{rel}}{E_0} \quad (1)$$

式中 E_0 是材料初始线弹性阶段的弹性模量. 假设剪切应变由弹性应变和非弹性应变两部分组成, 则有:

$$\gamma_e = \gamma - \gamma_{ine} \quad (2)$$

式中 γ_e 为弹性应变, γ_{ine} 为非弹性应变. 于是材料损伤剪切应力应变关系为:

$$\tau = E_0(1 - D)\gamma - E_0(1 - D)\gamma_{ine} \quad (3)$$

在下面的分析中, 采用应变作为变量分析材料的剪切损伤过程以及应力应变关系.

3.3.1 LT面剪切损伤模型

假设 LT 面剪切试验中, 材料重新加载模量 E_{rel} 与应变之间满足玻尔兹曼 (Boltzmann) 方程, 则可以用以下函数来表示:

$$E_{rel} = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{\gamma - \gamma_1}{d}}} \quad (4)$$

式中 A_1, A_2, γ_1 和 d 为材料常数.

根据试验结果可以看出在载荷很低时, 重新加载模量基本不变, 因此可以假设,

$$E_0 = A_1 \quad (5)$$

γ_1 的几何意义为玻尔兹曼函数幅值的平均值对应的自变量值. γ_1 的物理意义为材料的损伤演化速度在应变为 γ_1 处为极大值, 当应变大于 γ_1 时, 材料劣化速度减缓.

以剪切应变为自变量的加载模量的曲率为:

$$k_{E_{rel}} = \frac{|E_{rel}''|}{[1 + (E_{rel}')^2]^{3/2}} \quad (6)$$

令 $k_{E_{rel}} = 0$, 则可求出材料的两个特征应变值 γ_{c1}, γ_{c2} . γ_{c1}, γ_{c2} 分别位于 γ_1 的两侧, 且满足以下关

系:

$$\frac{\gamma_{c1} + \gamma_{c2}}{2} = \gamma_1 \quad (7)$$

当 $0 \leq \gamma \leq \gamma_1$ 时, $E_{rel}'' \leq 0$, 则有

$$3E_{rel}'E_{rel}''^2 - (1 + E_{rel}'^2)E_{rel}''' = 0 \quad (8)$$

可求出

$$\begin{aligned} \gamma_{c1} &= \gamma_{c1}(A_1, A_2, d, \gamma_1) = 2097.1053 \times 10^{-6} \\ &\approx 2097 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (9)$$

再由特征应变关系式 (7) 可得 $\gamma > \gamma_1$ 时的临界应变值:

$$\gamma_{c2} = 3568.5 \times 10^{-6} \approx 0.36\% \quad (10)$$

γ_{c1} 和 γ_{c2} 的几何意义为玻尔兹曼函数曲率的两个极值点对应的自变量值. γ_1 的物理意义为材料的损伤演化速度在应变为 γ_{c1} 和 γ_{c2} 处发生较大变化.

假设在第二临界应变值 γ_{c2} 的前后, 非弹性剪切应变具有不同的损伤演化形式, 可以用以下曲线方程来拟合, 分别表示为:

$$\begin{aligned} \gamma_{ine} &= A + B_1\gamma + B_2\gamma^2 & (0 \leq \gamma \leq \gamma_{c2}) \\ \gamma_{ine} &= A_3e^{A_4\frac{\gamma - \gamma_{c2}}{\gamma_{c2}}} & (\gamma > \gamma_{c2}) \end{aligned} \quad (11)$$

由边界条件

$$\gamma_{ine}|_{\gamma=\gamma_{c2}} = \gamma_{ine}|_{\gamma=\gamma_{c2}}, \quad \frac{r\gamma_{ine}}{d\gamma}|_{\gamma=\gamma_{c2}} = \frac{d\gamma_{ine}}{d\gamma}|_{\gamma=\gamma_{c2}} \quad (12)$$

可得:

$$\begin{aligned} A_3 &= A + B_1\gamma_{c2} + B_2\gamma_{c2}^2, \quad A_4 = \\ &= \frac{B_1\gamma_{c2} + 2B_2\gamma_{c2}^2}{A + B_1\gamma_{c2} + B_2\gamma_{c2}^2} \end{aligned} \quad (13)$$

把式 (4), (5) 代入式 (1) 可得, 材料 LT 面剪切的损伤演化方程为:

$$D = 1 - \frac{A_2}{E_0} - \frac{1 - A_2/E_0}{1 + e^{\frac{\gamma - \gamma_1}{d}}} \quad (14)$$

把式 (5), (11) 和 (14) 代入式 (3), 则材料 LT 面剪切的应力 - 应变关系可以表示为:

$$\begin{aligned} \tau &= \left(A_2 + \frac{E_0 - A_2}{1 + e^{\frac{\gamma - \gamma_1}{d}}} \right) (\gamma - A - B_1\gamma - B_2\gamma^2) \\ & \quad (0 \leq \gamma \leq \gamma_{c2}) \\ \tau &= \left(A_2 + \frac{E_0 - A_2}{1 + e^{\frac{\gamma - \gamma_1}{d}}} \right) \left(\gamma - A_3e^{A_4\frac{\gamma - \gamma_{c2}}{\gamma_{c2}}} \right) \\ & \quad (\gamma > \gamma_{c2}) \end{aligned} \quad (15)$$

由实验数据的平均值得到: $A_1 = E_0 = 22.38039$, $A_2 = 17.71602$, $\gamma_1 = 2832.789 \times 10^{-6}$, $d = 558.629$, $A = -13.7747 \times 10^{-6}$, $B_1 = 0.12318$, $B_2 = 21.0545 \times 10^{-6}$, $A_3 + A + B_1\gamma_{c2} + B_2\gamma_{c2}^2$, $A_4 = \frac{B_1\gamma_{c2} + 2B_2\gamma_{c2}^2}{A + B_1\gamma_{c2} + B_2\gamma_{c2}^2}$.

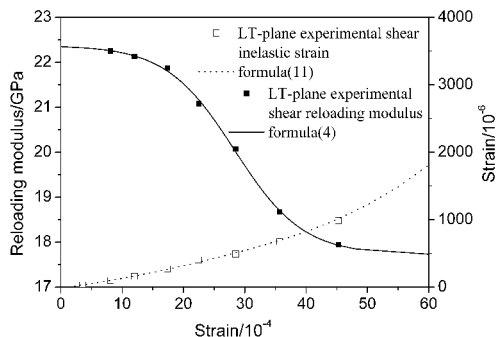


图 7 LT 面剪切重新加载模量和非弹性应变与应变的变化关系

Fig. 7 Relation between reloading modulus, inelastic strain and strain in LT-plane

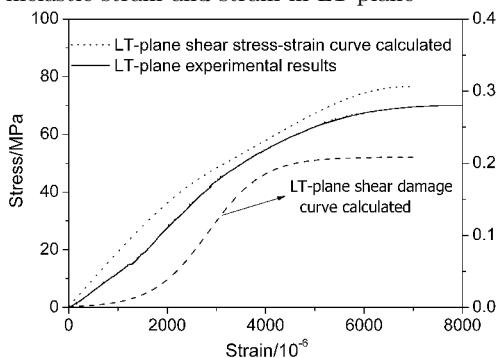


图 8 LT 面剪切损伤和应力与应变的变化关系

Fig. 8 Relation between damage, stress and strain of LT-plane shear

LT 面剪切加载模量和非弹性应变随应变的变化曲线如图 7 所示. LT 面剪切试件在加载初始阶段 ($\gamma < \gamma_{c1}$) 重新加载弹性模量没有明显的下降, 随着载荷的增大重新加载弹性模量急剧减小, 当材料剪切应变超过第二临界 γ_{c2} 应变时, 材料的重新加载弹性模量几乎不再变化. 当剪切应变小于第二临界应变时, 非弹性应变呈二次增长; 剪切应变大于第二临界应变时, 非弹性应变增长明显加快.

图 8 给出了材料 LT 面剪切的损伤演化曲线和应力应变曲线. 从图中可以看出, 材料 LT 面剪切在加载初始段损伤增长由慢变快, 临近破坏时, 材料的损伤不再增加, 损伤值约为 0.21. 由损伤模型计算出的应力应变曲线与材料试验结果比较, 破坏强度略高于试验强度值, 与强度对应的破坏应变预测值约为 7000×10^{-6} , 曲线趋势与试验结果比较吻合.

3.3.2 TL 面剪切损伤模型

与 LT 面剪切试验的损伤机制不同, TL 面剪切试验主要损伤过程为经向纤维束表面基体的界面脱粘, 因此它们的损伤演化方程也会具有不同的形式. 通过分析发现 TL 面剪切试验的重新加载模量, 非弹性应变与应力之间的函数关系, 损伤演

化方程, 以及材料 TL 面剪切的应力应变关系.

假设 TL 面剪切试验中, 材料重新加载模量 E_{rel} 随应变的变化按三次关系演化, 则可以表示为以下形式:

$$E_{rel} = A_0 + A_1\gamma + A_2\gamma^2 + A_3\gamma^3 \quad (16)$$

式中 A_0, A_1, A_2 和 A_3 为材料常数.

当式 (16) 中 $\gamma = 0$ 时, 有 $E_{rel} = A_0$. 这时材料没有变形, 因此可以假设材料的初始弹性模量 E_0 满足

$$E_0 = A_0 \quad (17)$$

假设 TL 面剪切试验与 LT 面剪切试验的非弹性应变随应变的变化关系相同, 则 TL 面剪切试验非弹性应变随总应变的演化形式为:

$$\gamma_{ine} = B_0 + B_1\gamma + B_2\gamma^2 \quad (18)$$

对式 (16) 求二阶导数, 并令

$$E''_{rel} = 0 \quad (19)$$

可得:

$$\gamma_1 = \frac{A_2}{A_3} \quad (20)$$

γ_1 的数学意义为三次函数的拐点对应的自变量值. γ_1 的物理意义为材料的损伤演化速度在应变为 γ_1 处出现转变, 由损伤演化速度由慢开始变快.

把式 (16), (17) 代入式 (1) 可得, 材料 TL 面剪切的损伤演化方程为:

$$D = -\frac{1}{E_0}(A_1\gamma + A_2\gamma^2 + A_3\gamma) \quad (21)$$

把式 (17), (18) 和 (21) 代入式 (4), 则材料 TL 面剪切的应力 - 应变关系可以表示为:

$$\tau = (A_0 + A_1\gamma + A_2\gamma^2 + A_3\gamma)(\gamma - B_0 - B_1\gamma - B_2\gamma^2) \quad (22)$$

由实验数据的平均值得到:

$$A_0 = E_0 = 23.62798, A_1 = -2980 \times 10^{-6}, A_2 = 0.548635 \times 10^{-6}, A_3 = -4.21746 \times 10^{-11}, B_0 = 9.84511 \times 10^{-6}, B_1 = 0.1701, B_2 = 11.3531 \times 10^{-6}.$$

因此可得到临界应变 $\gamma_1 = -\frac{A_2}{A_3} = 4636.21864 \times 10^{-6} \approx 0.46\%$

TL 面剪切试验的加载模量和非弹性应变随应变的变化曲线如图 9 所示. 图中的空心方框和实心方框分别为非弹性应变和加载模量的实验值, 点线和实线分别为试验结果的拟合曲线. 可以看出, 随着剪切应变的增加, 剪切的重新加载模量变化速度先减小后增大. 在材料临近破坏时, 模量约下降 40%, 非弹性应变约为 0.2%. 非弹性应变与剪切总应变之间为二次函数关系.

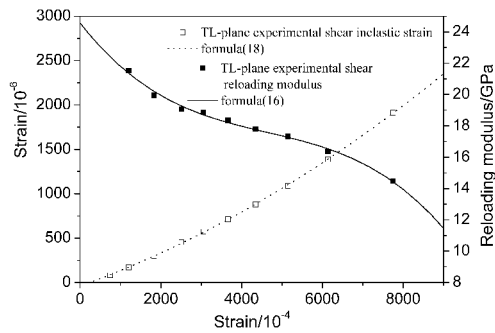


图9 TL面剪切重新加载模量和非弹性应变与应变的变化关系

Fig. 9 Relation between reloading modulus, inelastic strain and strain in TL-plane

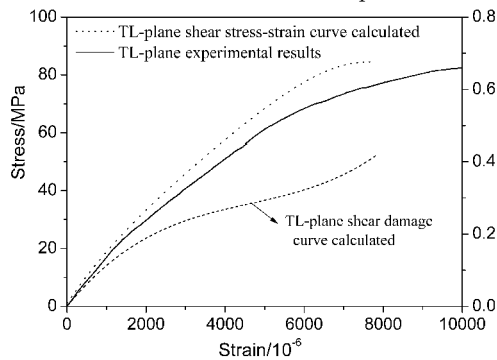


图10 TL面剪切损伤和应力与应变的变化关系

Fig. 10 Relation between damage, stress and strain of TL-plane shear

图10给出了材料TL面剪切的损伤演化曲线和应力应变曲线。可以看出随着应变的增长，TL面剪切的损伤非线性增长。在加载初始阶段，材料就开始产生损伤并迅速累积。随着应变的增加损伤增长速度先变缓后加快，在应变增加到0.75%时，损伤值达到0.4，材料发生破坏。本文预测的TL面剪切应力应变曲线与试验结果变化趋势相同，刚度和强度略大于试验结果，这与材料试验结果的分散性有关。

4 结论

通过对三维机织陶瓷基复合材料LT面和TL面面内剪切的试验分析，表明LT面剪切试验中纤维

束主要承受法向为纤维束方向的面内剪切，对应的主要损伤机制为基体裂纹开裂、界面脱粘和经向纤维断裂；TL面剪切试验中纤维束主要承受与纤维束方向平行的面内剪切，对应的主要损伤机制为界面脱粘、界面裂纹扩展、基体开裂，最后纬向纤维束断裂；

采用应变作为变量表征和分析了材料的面内剪切损伤过程，分别建立了材料LT面和TL面剪切的损伤模型，给出了材料的损伤演化方程和应力应变关系。通过分析发现，由于LT面和TL面剪切的主要损伤机制不同，它们的损伤演化方程也具有不同的形式，材料破坏时的损伤值也不同，分别为0.21和0.4。材料存在一个应变临界值，当剪切应变大于应变临界值时，材料损伤增长速度明显加快。LT面面内剪切应变临界值为0.36%，对应的应力为试验件剪切强度的60%~80%；TL面剪切临界应变值为0.46%，对应的应力为试验件剪切强度的65%~75%。由于纤维增强陶瓷基复合材料在剪切载荷作用下没有明显的屈服极限，因此基于本文的损伤模型预测出的临界应变值对材料的结构设计和工程应用具有重要指导意义。

参考文献

- [1] Zhang Litong, Cheng Laifei, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2003, **1**: 24-32.
- [2] Ganesh V K, Naik N K. *Composite Structures*, 1995, **30**: 179-192.
- [3] Nguyen M, Herszberg I, Paton R. *Compos Structures*, 1999, **47**: 767-779.
- [4] Khashaba U A. *Composite Structures*, 2004, **65**: 167-177.
- [5] Sun Huiyu, Pan Ning. *Composite Structures*, 2005, **67**: 317-322.
- [6] Pan Wenge, Jiao Guiqiong, et al. *Journal of Inorganic Materials*, 2004, **19**(4): 871-875.
- [7] Guan Guoyang, Jiao Guiqiong, et al. *Mechanical Science and Technology*, 2005, **5**: 515-517.
- [8] He Pengfei, Wu Renjie, et al. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1994, **3**: 17-22.
- [9] Xia Z, Curtin W A. *Acta mater.*, 2000, **48**: 4879-4892.
- [10] Siron O, Pailhes J, Lamon J. *Composites Science and Technology*, 1999, **59**: 1-12.
- [11] Siron O, Lamom J. *Acta mater.*, 1998, **18**: 6631-6643.