

针刺 C/C 复合材料剪切性能

孙 岩 刘勇琼 廖英强

(西安航天复合材料研究所,西安 710025)

文 摘 利用 V 形开口梁(Iosipescu)实验对一种新型针刺准三维 C/C 复合材料面内剪切性能及层间剪切性能进行了测试分析;获得了离散性较小的剪切强度与剪切模量值,以及有效地破坏模式;同时用有限元方法分析了层间剪切试样中的应力分布状态。结果表明,试样缺口根部处应力集中引起试样过早破坏,人为引入缺陷后,可以得到较均匀的剪应力场。

关键词 针刺 C/C 复合材料,V 形开口梁剪切实验,面内剪切,层间剪切

Shear properties of needled felt carbon/carbon composites

Sun Yan LiuYongqiong Liao Yingqiang

(Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

Abstract A new designed quasi-3D needled felt C/C composites have been tested to measure both in-plane shear and interlaminar shear properties by the Iosipescu shear method. The results of both stresses and moduli have shown small scatter, and invalid failure modes were obtained. The interlaminar shear V-notch specimen was analyzed using the finite element method to find out how the stress and strain fields distribute in the test section. The study shows that, the stress concentrations near the notch roots have caused premature failures of the sample. When two cracks were introduced, a homogeneous shear stress state was achieved.

Key words Needled felt C/C composites, Iosipescu v-notch shear test, In-plane shear, Interlaminar shear

0 引言

C/C 复合材料具有高比强度、高比模量、高热导率、低线膨胀系数以及高温力学性能稳定等一系列特点,已广泛用于航空、航天等领域,如 C/C 刹车盘, C/C 喉衬, C/C 扩张段等产品与传统材料制品相比具有明显优势^[1-3]。

本文研究的为一种新型针刺准三维 C/C 复合材料。将无纬碳布和碳纤维网胎交替叠层,采用接力式针刺方法将碳纤维网胎的纤维通过倒钩针的钩爪引入布面的垂直方向,形成准三维结构的碳纤维预制体。由于对每一碳布/网胎都进行针刺,预制体厚度方向的每一部分具有同等数量的贯穿纤维,均匀性好。采用 CVI 工艺对针刺碳纤维预制体进行致密,经多次循环致密可获得高密度热解碳基体,最后制得的 C/C 复合材料各个方向都具有良好的力学性能,包括较高的层间剪切强度^[4-8]。

剪切性能是对复合材料结构设计与分析是很重

要的参数,目前对针刺 C/C 复合材料剪切性能的研究主要以剪切强度研究为主^[9]。为同时获得针刺 C/C 复合材料的剪切强度和剪切模量,本文主要采用 Iosipescu V 形开口梁剪切实验对材料的面内与层间剪切性能进行测试。并验证 Iosipescu 剪切实验测量针刺 C/C 复合材料剪切性能的可行性。

1 实验

1.1 材料与试样制备

本研究的 C/C 复合材料为等温 CVI 致密针刺碳纤维预制体所得。针刺预制体结构为无纬碳布与碳纤维网胎交替叠层,无纬碳布铺层角度为 0°与 90°交替。采用接力式针刺方法,均匀地引入垂直纤维,形成准三维结构预制体,所使用的碳纤维为东丽公司的 T700。将针刺预制体进行 1 600℃ 的高温热处理后沉积热解碳。以丙烯为碳源气体,采用均热法 CVI 致密工艺致密,经多次致密后,将获得的 C/C 复合材料进行 1 800℃ 热处理以消除部分内应力。最终制得的

收稿日期:2011-09-19

国防基础科研项目(C0320110006)

作者简介:孙岩,1985 年出生,硕士研究生,主要从事 C/C 复合材料力学性能的研究。E-mail:sunyan0109@163.com

C/C 复合材料密度约 1.65 g/cm^3 。

根据 ASTM D5379^[10] 标准制得试样, 试样尺寸与方向如图 1 所示。

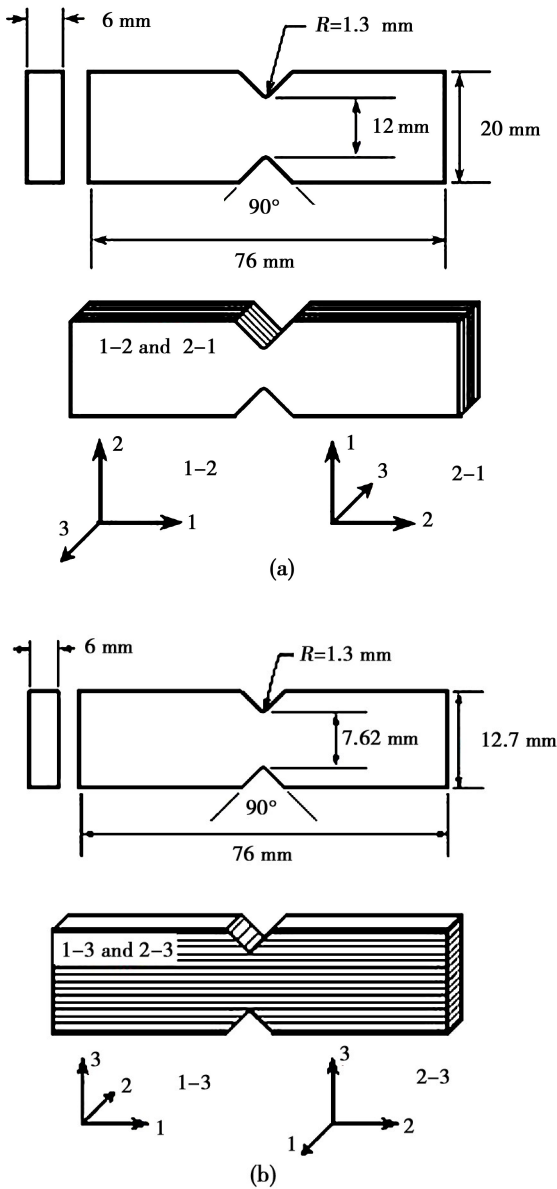


图 1 试样尺寸与方向

Fig. 1 Size and direction of the Iosipescu specimens

在制作层间剪切试样时, 由于所制作材料垂直无纬布方向尺寸不足标准中规定的 20 mm , 参考相关文献制得高为 12.7 mm 试样^[11-13]。为使试样具有相同数量的 0° 层与 90° 层(无纬碳布与碳纤维网胎层共约 1 mm), 试样厚度定为 6 mm 。试样具有 90° 双边缺口, 深度为 20% 试样高度, 缺口根部具有半径 1.3 mm 的倒角。加工试样尽量保证试样的表面层为完整的结构层, 并保证表面光滑。材料方向 1 定义为平面内无纬布 0° 层铺层方向, 方向 2 为平面内无纬布 90° 层铺层方向, 方向 3 定义为垂直于平面方向。制得 1-2 与 1-3 剪切平面试样分别作为面内剪切试样与层间剪切试样。同时制得 2-1 方向与 2-3 方向剪

切试样, 来验证剪切性能同 1-2 方向和 1-3 方向相同。

准确测量试样缺口间距离, 并将缺口间区域进行打磨, 粘贴 $\pm 45^\circ$ 方向应变片, 如图 2 所示。测试中试样发生扭曲会影响测量结果, 采用双面粘贴应变片取应变平均值进行计算可以减少误差^[11]。

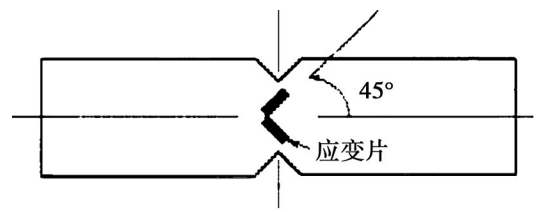


图 2 应变片的粘贴

Fig. 2 Position of strain sensor

1.2 测试方法与步骤

选用 Iosipescu 剪切测试方法主要有两个原因。首先, Iosipescu 剪切实验可以测量材料各个方向的剪切性能, 即同一种方法既可以测得面内剪切性能又可以测得层间剪切性能。其次, Iosipescu 剪切实验既可以得到材料剪切强度, 同时又可以获得剪切模量。这是一些其他剪切实验办不到的, 如短壁梁剪切实验无法获得剪切模量^[11-12]。

Iosipescu 剪切实验夹具如图 3 所示。此夹具目的在于在两个 V 型缺口中间获得纯剪应力状态, 通过施加两个相反的力偶使力矩在试样中间截面处相互抵消, 试样中间截面只有剪应力作用。实验在万能试验机 Instron-1195 上进行, 横梁移动速率为 0.5 mm/min , 记录应变和载荷。

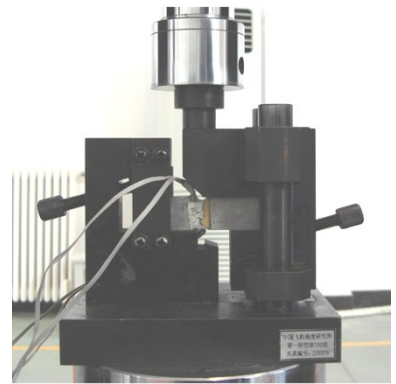


图 3 V 型缺口梁试样夹具

Fig. 3 V-Notched beam test fixture schematic

试样缺口间区域的平均剪切应力为 τ , 由试验机施加的力 p 和缺口间试样截面积确定,

$$\tau = p/wt \quad (1)$$

式中, w 为缺口间距离, t 为试样厚度, 当 p 达到最大时, 获得剪切强度 τ_{\max} 。

剪切应变 γ , 为试样缺口间所粘贴应变片应变值计算所得, 计算如下

$$\gamma = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}| \quad (2)$$

式中, ε_{+45} 为单侧 +45° 方向应变片的值, ε_{-45} 为同侧 -45° 方向应变值。当用来计算模量时所使用的剪切应变 γ , 为试样前后两面计算所得剪切应变的平均值。

剪切模量为应力/应变曲线直线段的斜率, 当应变取值在 0.05% ~ 0.5% 时, 来计算模量 G ,

$$G = \tau / \gamma \quad (3)$$

评估试样的扭曲程度,

$$\text{扭曲度} = |(G_a - G_b) / (G_a + G_b)| \times 100\% \quad (4)$$

式中, G_a 、 G_b , 为试样前后表面所测得的剪切模量。

2 结果与讨论

实验结果如表 1 所示, 表中分别列出了面内剪切与层间剪切试样的剪切强度和剪切模量的均值与方差, 同时计算出试样的平均扭曲度。试样加工不平或在夹具中放置不平直, 都可能导致试样扭曲, 从而影响剪切强度测试结果。Morton 等人^[11]认为, 减小或消除试样的扭曲可以显著提高试样的剪切强度。本文中的试样平均扭曲度不大, 获得较满意的实验结果。由于面内具有大量连续长直纤维而层间为针刺过程引入的不连续纤维且含量相对较低, 因此面内剪切强度明显高于层间剪切强度, 同样面内具有较高的剪切模量。

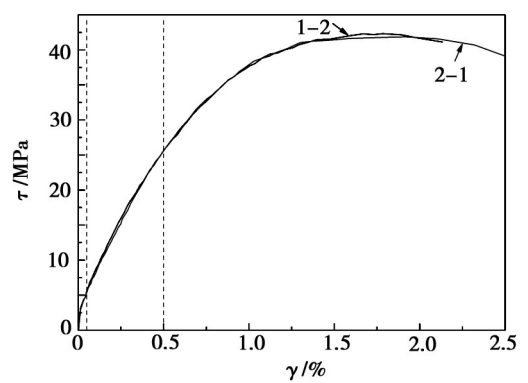
表 1 试样不同面内的平均剪切强度, 模量与扭曲度

Tab.1 Average shear strength, shear moduli and specimen twisting for diferent shear planes

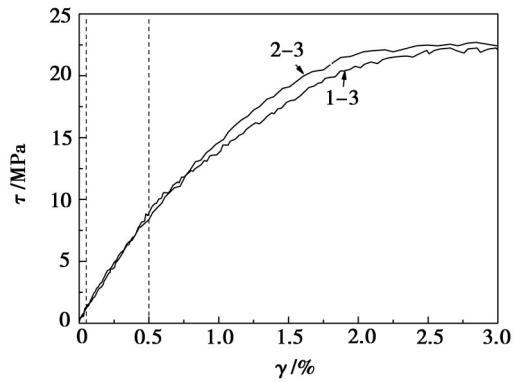
剪切位置	剪切面	剪切强度/MPa	剪切模量/GPa	扭曲度/%
面内	1-2	39.9±3.4	4.60±0.46	4.78
	2-1	43.7±4.1	5.02±0.45	9.66
层间	1-3	19.4±2.6	1.72±0.07	8.61
	2-3	20.4±4.9	1.60±0.21	8.51

实验测得的针刺 C/C 复合材料的剪切应力/应变曲线如图 4 所示, 曲线的主要特征表现为非线性, 随着应变的增加曲线斜率逐渐变缓, 说明材料刚度在缓慢降低。图中标记出了剪切模量计算区域, 应变取值范围为 0.05% ~ 0.5%, 取曲线开始的直线段。对于面内剪切试验曲线可以看到明显的下降趋势, 而对于层间剪切的应力/应变曲线没有明显的下降趋势, 但在实验中试样已经破坏, 所以可以将曲线中的平稳段认为最大剪切强度。

两种剪切试样的破坏形貌如图 5 所示, 无论是面内剪切还是层间剪切都获得了 Iosipescu 剪切实验的有效破坏模式。对于面内剪切, 破坏主要发生在连接两缺口的试样中线区域, 可以观察到纤维与基体的剪断。对于层间剪切实验, 观察到大量试样的破坏首先会在缺口根部出现纵向裂纹, 但裂纹扩展较短距离后停止扩展, 然后会在缺口间区域发现有大量裂纹产生, 随着继续加载, 纤维转向, 裂纹扩展。



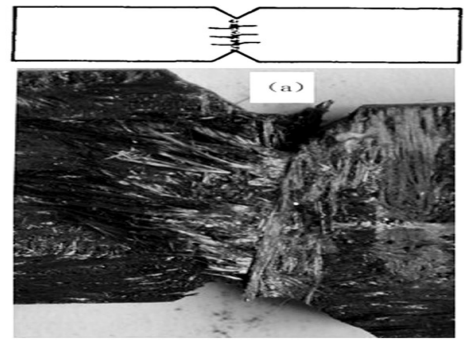
(a) 面内剪切



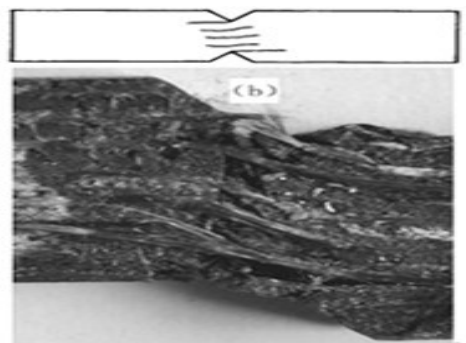
(b) 层间剪切

图 4 剪切应力—应变曲线

Fig. 4 Typical shear stress-strain plots (dashed lines bound the strain range used in the calculation of shear modulus) (虚线限定了计算剪切模量的应变范围)



(a) 面内剪切



(b) 层间剪切

图 5 试样破坏模式

Fig. 5 Failure modes observed during testing

3 有限元模拟

当做层间剪切实验时, 材料正交各向异性明显且材料破坏复杂, 为了准确了解试样中应力应变分布对

结果的影响,建立了有限元模型进行分析。利用商用有限元软件 Abaqus 6.9 进行模拟计算。为提高计算效率建立 2 维模型(厚度设为 1 mm)。同时建立加载块的模型模拟试样与加载块间的滑动,定义面接触,摩擦因数取值为 0.3。G. Odegard 等人^[14-15],分析了摩擦系数对单向 Iosipescu 剪切试样数值模拟结果的影响,认为摩擦因数在 0.1 ~ 0.5 之间时应力场差别可以忽略。设加载块厚度为 5 mm,长度为 25 和 34 mm 两种。选择标准静态分析,勾选材料几何非线性。尽管复合材料剪切具有明显的非线性,本文模拟只考虑给出试样的应力应变场分布情况,没有进行材料非线性处理。试样左侧夹持,右半部分加载块有一个向下的位移,大小为 1 mm。定义材料方向,试件纵向(x 方向)为材料 1 方向,横向(y 方向)为材料 3 方向。有限元分析中的网格划分以及边界条件见图 6。

表 2 有限元分析中的材料性能
Tab. 2 Material properties used in the finite element computation

材料	杨氏模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比
针刺 C/C 复合材料	$E_{xx} = 30; E_{yy} = 10$	$G_{xy} = 1.7$	$\nu_{xy} = 0.2$
金属加载块	$E = 230$	$G = 88$	$\nu = 0.3$

图 7 显示了试样中段各个方向应力分布云图。可以看到缺口根部圆弧段与直线段交叉区域存在应力集中,具有很高的张应力与剪应力,这可以对应于试样中观察到的缺口处先出现裂纹。由于纵向有连续纤维的存在,具有较高的强度,所以主要不是由纵向张应力 σ_x 引起的材料过早破坏。最有可能是由于缺口根部的横向应力 σ_y 和剪应力 τ_{xy} 共同作用导致层间较弱区域出现裂纹。比较缺口处 σ_y 与 τ_{xy} , σ_y 具有较高值且表现为张应力,更容易导致张开型裂纹发生。试样上下缺口根部出现裂纹时,不是纯剪应力引起的,而且横向张应力作用很大,所以不能以缺口出现裂纹时应力值作为材料的剪切强度。

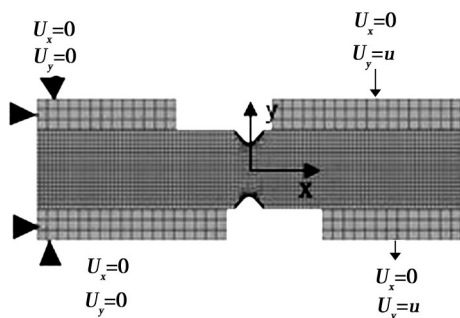


图 6 有限元网格与试样边界条件

Fig. 6 Finite element mesh and boundary conditions of the Iosipescu specimens

为了评估当缺口处出现裂纹后应变片区域的应力状态,重新建立一个有限元模型。在上下缺口处各

引入一个裂纹,根据实验观察裂纹长度约为 9 mm。本文中引入裂纹只是在计算前的几何形状上人为引入缺陷且不改变计算方法。计算后的模型以及剪应力状态如图 8 所示。

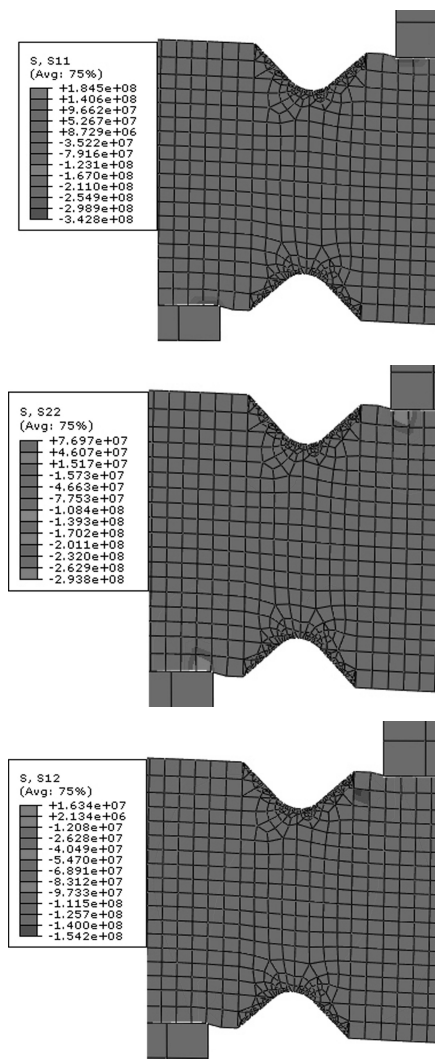


图 7 缺口处的应力状态分布

Fig. 7 Contours of stress distributions around the notch (S11 为 σ_x ; S22 为 σ_y ; S12 为 τ_{xy})

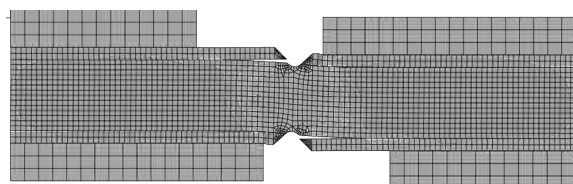
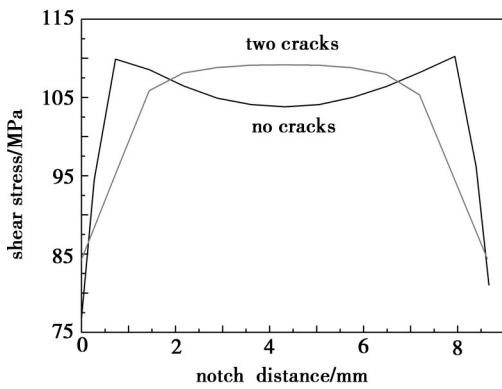
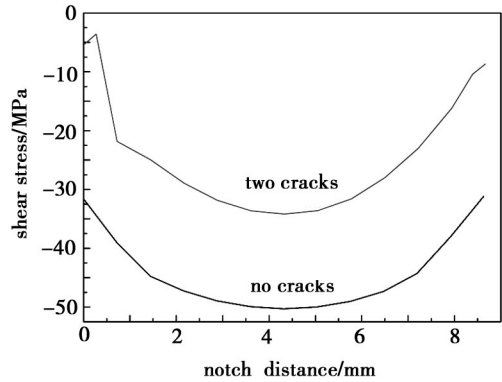


图 8 带有裂纹的有限元模型变形图
 Fig. 8 Deformed Iosipescu specimen after the appearance of cracks

缺口中间截面的应力分布曲线如图 9 所示,当试样在缺口处引入裂纹缺陷时,会得到一个相对均匀的剪应力区域,但对剪应力的大小影响较小。同时横向压应力 σ_{22} 会增大,试样中间区域应力状态变得均匀但仍不是纯剪状态。



(a) 剪应力分布



(b) 压应力分布

图9 试样中间截面应力分布

Fig.9 Stresses along the notch line

由于应变片区域的应力应变不均匀,有人提出在计算剪切模量时,对获得的剪切模量乘以一修正系数来校正实验结果^[16]。如用下式计算剪切模量 G ,

$$G = C \cdot \bar{G} \quad (5)$$

$$C = \tau^0 / \bar{\tau}, \tau^0 = \frac{1}{A_0} \int \tau dA \quad (6)$$

式中, G 为修正后的模量, \bar{G} 为测得的平均模量, C 为修正系数, A_0 为应变片区域面积, τ^0 为应变片区域的平均应力, $\bar{\tau}$ 为截面处的全局平均应力。当材料不均匀,如纵向弹性模量(试样长度方向)高于横向弹性模量时, C 小于1。

尽管文中有限元计算模型很简单,但可以大概给出试样的应力状态以及试样破坏的可能因素。对于正交各向异性明显的试样,可以使用修正系数来获得较为精确的剪切模量值。缺口根部出现裂纹后试样的剪切应力变得相对均匀,可认为是一种获得均匀剪应力状态的方法。Fabrice Pierron 等人^[17],认为由于压应力的存在,会使剪切强度的结果偏高,建议用破坏准则来修正可以得到较满意的结果。

4 结论

用 Iosipescu 剪切实验方法,测试针刺 C/C 复合材料面内剪切与层间剪切性能。获得离散性都较小的剪切强度与模量及典型非线性剪切应力/应变曲线,破坏模式都是 Iosipescu 剪切实验的有效破坏模式。

对层间剪切试样进行了有限元分析,发现缺口根部具有应力集中,较高的横向张应力导致产生裂纹。由于试样的材料各向异性,剪应力在缺口中间区域的分布是非均匀的。建立具有裂纹的有限元模型,缺口中间区域具有较均匀的剪应力分布,但由于横向压应力的存在,试样仍不是纯剪状态。

参考文献

- [1] Savage G. Carbon-carbon composites [M]. London: Chapman & Hall, 1993; 12
- [2] Buckley J D, Edie D D. Carbon-carbon materials and composites [M]. Park Ridge: Noyes Publications, 1993; 12
- [3] Peter Morgan. Carbon fibers and their composites [M]. Taylor & Francis Group, 2005; 951-1032
- [4] 杨爱玉,王者辉. NOVOLTEx 碳/碳复合材料——固体火箭发动机喷管材料的最佳选择 [J]. 宇航材料工艺, 1996 (6): 49-55
- [5] 刘建军,李铁虎,郝志彪,等. 针刺碳布/网胎复合织物的组分形态及性能研究 [J]. 固体火箭技术, 2005, 28 (4): 299-303
- [6] Michel Berdoyes. SRM nozzle design breakthroughs with advanced composite materials [C] // AIAA, 1993, 93-2009
- [7] Boury D, Filipuzzi L. Sepcarb materials for solid rocket booster nozzle components [C] // AIAA, 2001, 01-3848
- [8] Alain Lacombe, Marc Lacoste, Thierry Pichon. 3D Novoltex[®] and Naxeco[®] Carbon-carbon Nozzle Extensions; matured, industrial and available technologies to reduce programmatic and technical risks and to increase performance of launcher upper stage engines [C] // AIAA, 2008, 2008-5236
- [9] 熊翔,黄伯云,肖鹏. 准三维 C/C 复合材料的层间剪切性能及其断裂机理 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14 (11): 1799-1803
- [10] Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method [P]. ASTM Designation: D 5379/D 5379M, United States: ASTM, 1998
- [11] Morton J, Ho H, Tsai MY, Farley GL. An evaluation of the Iosipescu specimen for composite materials shear property measurement [J]. Compos. Mater., 1992, 26 (5): 708-50
- [12] Zhou G, Green E R, Morrison C. In-plane and interlaminar shear properties of carbon/epoxy laminates [J]. Composites Science and Technology, 1995, 55 (2): 187-193
- [13] Walrath D E, Adams D F. Analysis of the stress state in an Iosipescu shear test specimen [R]. NASA-C-168, 1983
- [14] Odegard G, Kumosa M. Elasto-plastic analysis of the Iosipescu shear test [J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33 (21): 1981-2001
- [15] Odegard G, Searles K, Kumosa M. A critical examination of the Iosipescu shear test as applied to 0 unidirectional composite materials [J]. Mechanics of Composite Materials and Structures, 1999, 6 (3): 229-56
- [16] Chianga MY M, Jianmei He. An analytical assessment of using the Iosipescu shear test for hybrid composites [J]. Composites, 2002, 33 (Part B): 461-470
- [17] Fabrice Pierron, Alain Vautrin. Measurement of the In-plane sheare strengths of unidirectional composites with the Iosipescu test [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57: 1653-1660