

一种测试 C/C 扩张段层间剪切强度的改进三点短梁剪切法

赵 昆¹ 余秀华¹ 侯 晓² 生志斐¹ 李 耿¹

(1 西安航天动力技术研究所,西安 710025)

(2 航天动力技术研究院,西安 710025)

文 摘 分别采用传统三点短梁剪切法和改进三点短梁剪切法对扩张段所采用的针刺 C/C 复合材料进行了层间剪切强度测试试验。结果显示,改进的三点短梁剪切法很好地解决了传统三点短梁剪切法的应力集中现象,试件更容易发生层间剪切破坏;改进的三点短梁剪切法的测试结果一般要大于传统三点短梁剪切法的,更接近材料实际水平。对改进的短梁剪切法试验破坏试样进行电镜扫描分析,指出了发生破坏的薄弱点,提出了要提高材料的层间剪切性能可合理优化网胎层厚度的改进建议。

关键词 C/C 扩张段,针刺 C/C 复合材料,改进的三点短梁剪切法,层间剪切强度,层间剪切破坏

A Modified Three-Point Short Beam Shear Test for Measurement of Interlaminar Shear Strength of C/C Composites Nozzle Extension

Zhao Kun Yu Xiuhua¹ Hou Xiao² Sheng Zhifei¹ Li Geng¹

(1 Xi'an Institute of Aerospace Solid Propulsion technology, Xi'an 710025)

(2 Academy of Aerospace Solid Propulsion technology, Xi'an 710025)

Key words In this paper, the traditional three-point short beam shear test and a modified three-point short beam shear test were used for measurement of interlaminar shear strength of needling C/C composites nozzle extension. The test results showed, the modified method well reduced the stress concentration phenomenon that the traditional method caused, and specimems occurred interlaminar shear failure more easily. Moreover, the test values of the modified method were higher than the traditional method, and more approach to the fact. Lastly, the weakness position of failure test specimems of the modified three-point short beam shear test was found by scanning electron microscopy, and made a suggestion on material preparation process.

Key words C/C nozzle extension, Needling C/C composites, Modified three-point short beam shear test, Interlaminar shear strength, Interlaminar shear failure

0 引言

C/C 复合材料具有抗烧蚀、力学性能优异、密度低等显著优点,在固体火箭发动机喉衬、收敛段、扩张段和延伸锥得到了广泛的应用。国外在 20 世纪 70 年代就开始研究 C/C 扩张段(图 1),并于 80 年代在宇航及武器发动机上获得应用。例如的 Mx 导弹发动机^[1]、侏儒导弹第三级发动机,法国的 Boeing Delta

III 发射器的顶级发动机 RL10 B-2^[2]、Ariane5 的助推发动机^[3]都应用了 C/C 扩张段技术。C/C 扩张段早期都采用 2D 铺层,但由于 2D 材料层间抗剪性能差,易分层,迫使人们寻求新的成型工艺。法国 SEP 公司在 80 年代研发成功了厚度方向有碳纤维增强的 Novoltex^[4-6] C/C 扩张段和延伸锥。在其预制体中,织物层与层之间采用由带钩的针将碳纤维带入厚度

收稿日期:2013-03-18

作者简介:赵昆,1986 年出生,硕士研究生,主要从事固体火箭发动机设计及复合材料性能测试的研究工作。E-mail:447302242@qq.com

方向。采用这种工艺的 C/C 复合材料的剪切强度比普通 2D C/C 材料大约要高 2~3 倍。



图 1 C/C 扩张段

Fig. 1 C/C composites nozzle extension

由于 C/C 复合材料内部结构的特点,其材料性能反映出各向异性,尤其是垂直方向与水平方向差异性较大。其中层间剪切强度相对薄弱,是 C/C 扩张段关键性能指标之一,层间剪切强度低易导致 C/C 扩张段分层破坏。目前工程上常采用的测试 C/C 材料的层间剪切强度的方法为三点短梁剪切法^[7-8]。事实证明这种方法由于压头附近易产生应力集中而导致其测试值并不能反映真实的 C/C 材料层间剪切性能。本文针对传统三点短梁剪切法的应力集中问题,提出了一种改进的三点短梁剪切法。

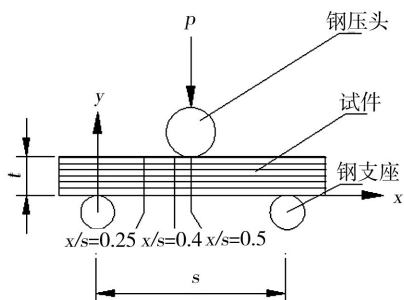
1 改进方案

工程上最常用的测试材料层间剪切强度的方法是三点短梁剪切法[见图 2(a)]。层间剪切强度公式如下:

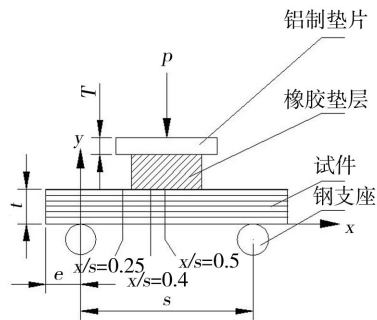
$$\tau_{\max} = \frac{3p}{4wt} \quad (1)$$

式中, p 为试样破坏时的最大载荷, w 为试样截面的宽度, t 为试样截面的厚度。

本文提出的改进三点短梁剪切法如图 2(b) 所示。



(a) 传统法



(b) 改进法

图 2 传统及改进的三点短梁剪切法试验方案示意图

Fig. 2 Traditional and modified three-point short beam shear test plan general view

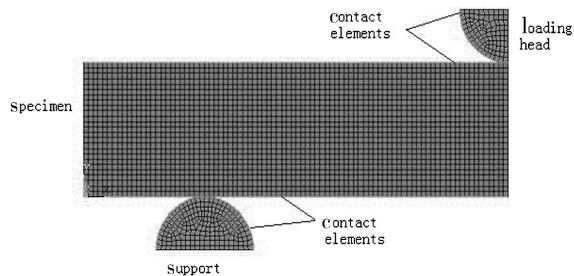
图中 x/s 为以左支点为原点的 x 轴坐标值比短梁两支点间的跨度值(s),用于表示短梁上不同截面的位置。

改进方法压头不直接跟试件接触,而采用橡胶垫和铝制垫片作为过渡层,把直接作用于材料的载荷变为通过铝制垫片和橡胶垫传递到试件的间接载荷。

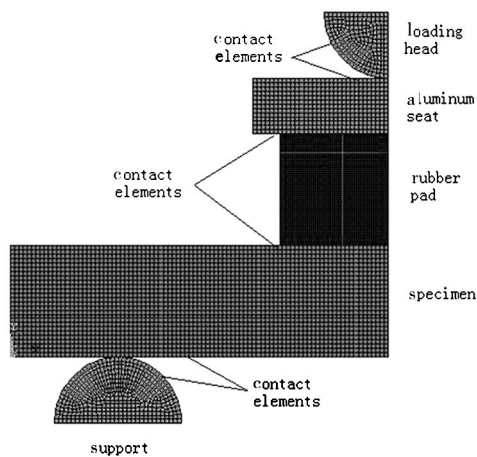
2 数值模拟

2.1 计算模型

两种方法的平面有限元模型见图 3。



(a) 传统法



(b) 改进法

图 3 传统及改进的三点短梁剪切法有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the traditional and modified three-point short beam shear test

由于对称性,模型只建立了一半,压头和支座被处理成圆柱,各接触面均采用面-面接触单元。支座下表面进行各方向零位移约束,压头上表面施加垂直方向载荷。除了 C/C 试样材料模型按各向异性计算,其他部件材料均按各向同性。

2.2 计算结果分析

施加 400 N 载荷下两种方法的试样内剪切应力和弯曲应力的计算云图见图 4 和图 5。

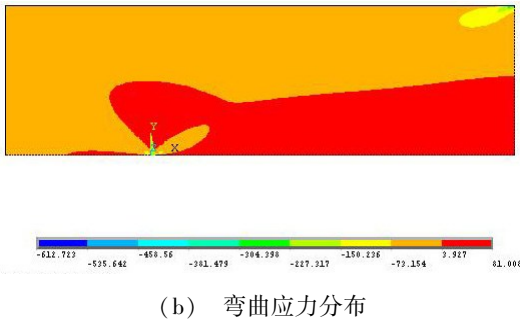
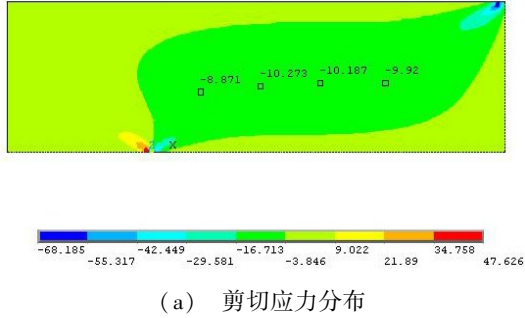


图 4 传统三点短梁剪切法计算云图

Fig. 4 Traditional three-point short beam shear test stress profile

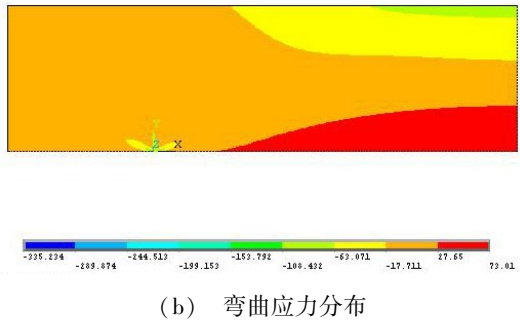
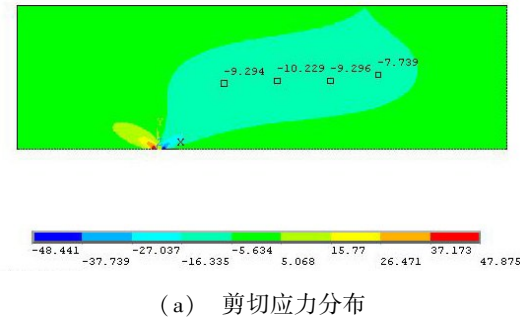


图 5 改进三点短梁剪切法计算云图

Fig. 5 Modified three-point short beam shear test stress profile
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 5 期

由图 4、图 5 可知,传统的三点短梁剪切法在压头附近层间剪切应力和压应力有严重的集中现象,而改进的方法在不引进其他的约束的条件下很好地改善了压头附近的压应力和剪切应力集中现象。

图 6 为两种方法不同截面的层间剪切应力分布。可以看出在 $x/s=0.25$, $x/s=0.4$ 截面上层间剪切应力沿厚度分布呈抛物线。而在 $x/s=0.5$ 截面上,传统法由于应力集中,层间剪切应力也在压头附近变得很大,而改进法层间剪切应力在压头值接近零。

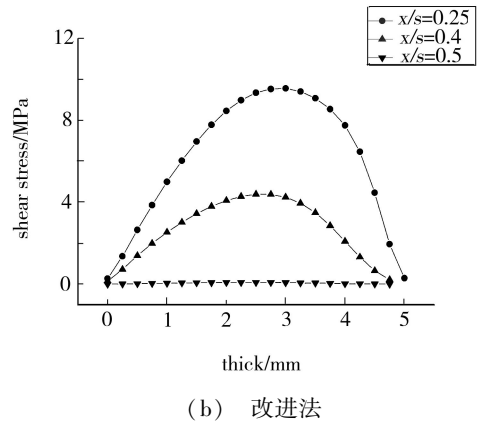
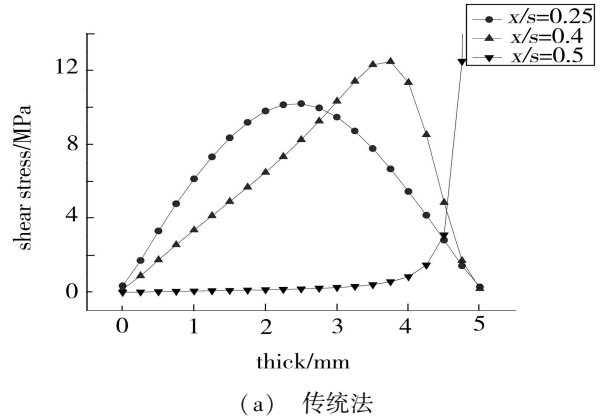


图 6 传统及改进短梁剪切法不同截面上的层间剪切应力分布

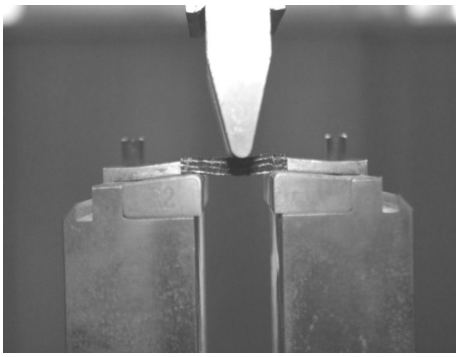
Fig. 6 Interlaminar shear stress distribution in the traditional and modified short beam shear specimen

综上所述,数值模拟结果表明改进的三点短梁剪切法改善了传统方法的应力集中现象,试件更容易发生层间剪切破坏而非应力集中破坏。

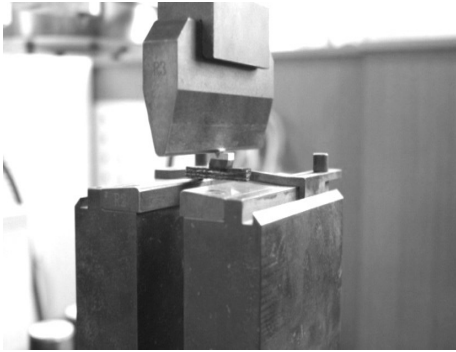
3 试验

3.1 测试方案

为了与传统的三点短梁剪切法进行对比,本文同时进行了传统法和改进法试验,其工装如图 7 所示。支座和压头半径均定为 2 mm,跨厚比为 5,外悬长定为 5 mm,试验机加载速率为 2 mm/min。



(a) 传统法



(b) 改进法

图7 传统法及改进法三点短梁剪切法工装图

Fig. 7 Traditional and modified three-point short beam shear test clamp

3.2 试样材料

试样的材质为一种新型针刺准三维 C/C 复合材料。增强体为针刺碳纤维预制体,无纬布和碳纤维网

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,形成准三维结构的预制体。随后采用等温 CVI 致密,经多次循环致密使其密度达到 1.5 g/cm^3 以上。

3.3 试样制备

为了让厚度方向至少包含三层碳布层,并结合针刺 C/C 复合材料的特点,本文将试件尺寸定为 $35 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (图 8)。为了能较真实的反映实际情况,试件在 C/C 扩张段本体上分别进行环向和轴向取样。

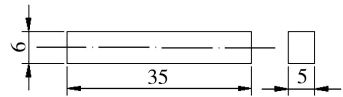


图8 试样尺寸示意图

Fig. 8 Sample size

3.4 试验设备

试验机采用 CMT5105 型微机控制电子万能试验机,电子显微镜采用日本电子公司的 JSM-6460LV 型扫描电子显微镜。

4 结果与讨论

4.1 传统三点短梁剪切法试验结果与分析

对试验后的试件进行电镜扫描发现,试件容易在长度中部的压头接触附近出现裂纹,其典型的电镜扫描图如图 9 所示。由于 C/C 材料抗压性能较差,实际中这种破坏主要由压应力集中引起的。

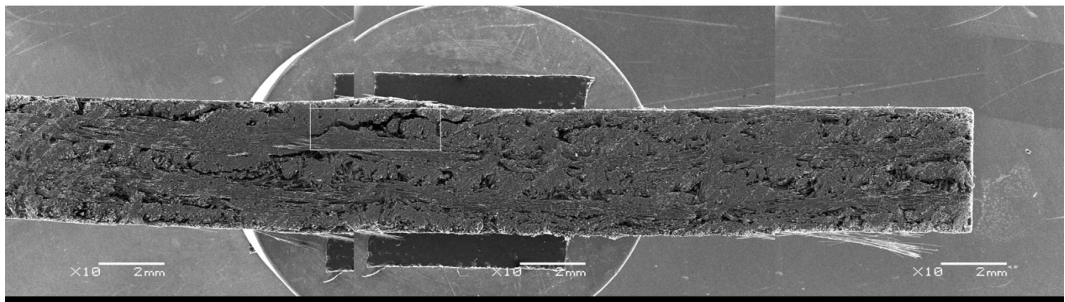


图9 传统三点短梁剪切法试件典型裂纹图

Fig. 9 Traditional three-point short beam shear test typical failure mode

4.2 改进三点短梁剪切法试验结果与分析

传统及改进三点短梁剪切法的试验结果见表 1。对比传统法与改进法的测试结果发现,改进的短梁剪切法测试结果一般大于传统法的。这说明传统短梁剪切法由于压头附近的集中应力导致试样提前发生破坏,从而测试结果偏小。

通过对试验后试样进行电镜扫描发现,试样的层

间剪切破坏主要有两类:第一类为裂纹发生在试件长度 $1/3$ 附近,试件一端有裂纹(图 10);第二类为裂纹分别发生在试件长度 $1/3$ 或 $2/3$ 附近试件两端均有裂纹(图 11)。数值模拟显示试件长度 $1/3$ 和 $2/3$ 处附近剪切应力较大,这说明两类破坏形式均与数值模拟吻合。

表 1 传统及改进的三点短梁剪切法的测试结果
 Tab.1 Traditional and modified three-point short beam shear test results

方法	取样形式	试样编号	最大载荷/N	剪切强度/MPa	平均值/MPa	方差	离散系数/%
传统法	环向 35 mm×6 mm×5 mm	1	408	10.2	11.5	1.086	9.40
		2	466.7	11.7			
		3	511.8	12.8			
		4	489.1	12.2			
		5	425.6	10.6			
	轴向 35 mm×6 mm×5 mm	1	400	10	9.9	0.587	6
		2	370.2	9.3			
		3	381.4	9.5			
		4	433	10.8			
		5	388.2	9.7			
改进法	环向 35 mm×6 mm×5 mm	1	673	17.6	17.4	1.6	9.40
		2	579	15.1			
		3	747	19.5			
		4	705	18.1			
		5	627	16.7			
	轴向 35 mm×6 mm×5 mm	1	662.5	16.7	16	1.06	6.62
		2	582	14.7			
		3	610.6	15.2			
		4	641.3	16.1			
		5	699	17.3			

通过对试样破坏模式的总结,还发现轴向取样试样更容易发生第一类层间剪切破坏,环向取样试样更容易发生第二类层间剪切破坏。

由图 12 可知,裂纹一般发生在碳布与网胎的界面处或界面附近的网胎层。这说明碳布与网胎的界面以及网胎是整个材料的薄弱部分。故合理优化网胎层厚度,可减小层间剪切破坏在网胎层发生。

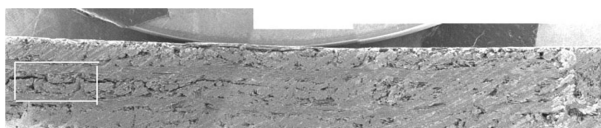


图 10 轴向取样试件裂纹图

Fig. 10 Axial sampling sample typical failure mode

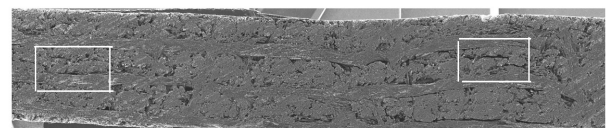


图 11 环向取样试件裂纹图

Fig. 11 Axial sampling sample typical failure mode

参考文献

[1] 苏红, 张小虎, 郑金煌, 等. SRM 用大型整体针刺准三向 C/C 扩张段制造技术研究[C]//第六届全国新型炭材料学术研讨会, 太原, 2003: 295-300

[2] Ellis R A, Lee J C, Payne F M, et al. Development of a carbon-carbon translating nozzle extension for the RL10B-2 liquid rocket engine [C]//Société Européenne de Propulsion, St. Médard en Jalles, 1997, France; AIAA, 1997: 2672

[3] Le M O. Ariane 5 solid rocket motor nozzle design [C]//26th Joint Propulsion Conference, Orlando, FL, America, 1990: 2083

[4] Broquere B H. Carbon/carbon nozzle exit cones: SEP's experience and new developments [C]//Société Européenne de Propulsion, St. Médard en Jalles, 1997, America; AIAA, 1997: 2674

[5] 邱惠中, 吴志红. 国外航天材料的新进展[J]. 宇航材料工艺, 1997(4): 5

[6] Alain Lacombe, Thierry Pichon, Marc lacoste. 3D carbon-carbon composites are revolutionizing upper stage liquid rocket engine performance by allowing introduction of large nozzle extension [C].//119-SDM-75 High Temperature Materials session, 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Spring, CA, 2009, America; AIAA, 2009: 2678

[7] Russell A E. Testing of Novolox 3-D carbon-carbon integral throat and exit cones [C]//24th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Joint Propulsion Conference, Boston, 1988, America; AIAA, 1988: 3361

[8] Ming Xie, Donald F A. Study of three-and four-point shear testing of unidirectional composite materials [J]. Composites, 1995, 26(9): 653

(编辑 任涛)

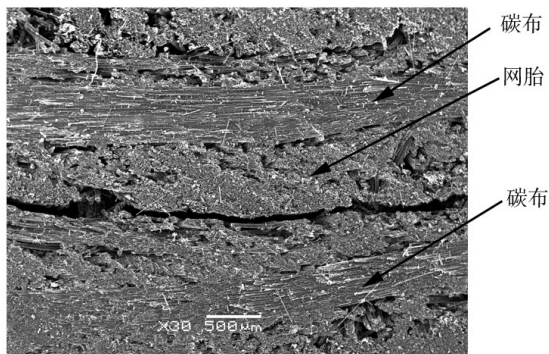
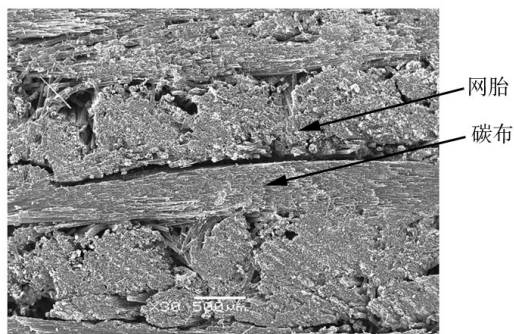


图 12 两种试件裂纹电镜扫描图 30×

Fig. 12 Two sample failure crack

5 结论

(1) 传统的三点短梁剪切法压头附近容易出现应力集中破坏;改进的三点短梁剪切法很好地解决了传统三点短梁剪切法的应力集中现象,试件更容易发生层间剪切破坏。

(2) 改进三点短梁剪切法的测试结果一般要大于传统三点短梁剪切法的。改进短梁剪切法测试结果更接近材料的真实水平。

(3) 电镜扫描结果显示,层间破坏裂纹一般发生在碳布与网胎的界面或界面附近的网胎层,因此要提高材料的层间剪切性能可合理优化网胎层厚度。