

表1 埋入光纤T700/BA9916-II力学性能试验矩阵

试验项目	测试性能	铺层	试验标准	试验件尺寸 (mm × mm × mm)	埋入光纤数量 / 根					数量 / 件
					1	2	3	5	0	
0° 拉伸	强度 $X_t$ /MPa	[0°] 16	ASTMD 3039	250 × 24 × 2.4	6	6	6	6	6	30
	模量 $E_{1t}$ /GPa									
	泊松比 $\nu_{12}$									
90° 拉伸	强度 $Y_t$ /MPa	[90°] 16	ASTMD 3039	250 × 24 × 2.4	6	6	6	6	6	30
	模量 $E_{2t}$ /GPa									
	泊松比 $\nu_{12}$									
0° 压缩	强度 $X_c$ /MPa	[0°] 16	ASTM D 6641	140 × 24 × 2.4	6	6	6	6	6	30
	模量 $E_{1c}$ /GPa									
90° 压缩	强度 $Y_c$ /MPa	[90°] 16	ASTM D 6641	140 × 24 × 2.4	6	6	6	6	6	30
	模量 $E_{2c}$ /GPa									
纵横 剪切	强度 $S_{xy}$ /MPa	[± 45°] 4s	ASTM D 6641	250 × 24 × 2.4	6	6	6	6	6	30
	模量 $G_{xy}$ /GPa									

表2 试验件基本力学性能测试结果

基本性能		0 根光纤 测量值	1 根光纤 测量值	2 根光纤 测量值	3 根光纤 测量值	5 根光纤 测量值
0° 拉伸	$X_t$ /Mpa	2250	2234	2291	2241	2208
	$E_{1t}$ /GPa	120	121	121	120	120
	$\nu_{12}$	0.291	0.293	0.296	0.292	0.287
0° 压缩	$X_c$ /Mpa	1249	1186	1221	1254	1213
	$E_{1c}$ /GPa	110	110	109	110	109
90° 拉伸	$Y_t$ /Mpa	60.1	60.2	61.9	63.3	62.6
	$E_{2t}$ /GPa	8.22	8.34	8.32	8.46	8.61
90° 压缩	$Y_c$ /Mpa	212	218	223	225	224
	$E_{2c}$ /GPa	9.54	9.67	9.56	9.65	9.95
纵横 剪切	$S_{0.2}$ /Mpa	46.7	45.7	47.3	47.3	49.2
	$G_{12}$ /GPa	4.14	4.21	4.19	4.19	4.49

图 1~ 图 5 分别给出了 0° 拉伸和压缩、90° 拉伸和压缩、以及 45° 剪切强度力学性能的测试结果。图 6 给出了 0° 拉伸刚度力学性能的测试结果。由图 1~ 图 5 可以看出：光纤埋入对 0° 拉伸和压缩试验件强度基本没有影响。埋入 1 根 ~5 根光纤，与不埋入光纤比较，强度性能最大误差为 2.8%，测试结果有大有小，但是变化不大。

光纤埋入对 90° 拉伸和压缩试验件强度基本没有影响。埋入 1 根 ~5 根光纤，与不埋入光纤比较，强度性能最大误差为 5.0%。对于 90° 拉伸，光纤埋入根数能适当提高 90° 拉伸的强度性能。对于 90° 压缩性能，测试结果有大有小，但是变化不大，说明光纤埋入对 90° 压缩强度性能基本没有影响。

同样，光纤埋入对 45° 剪切试验件强度基本没有影响。埋入 1 根 ~5 根光纤，与不埋入光纤比较，强度性能最大误差为 3.2%，测试结果有大有小，但是变化不大，说明光纤埋入对 45° 剪切强度性能没有影响。

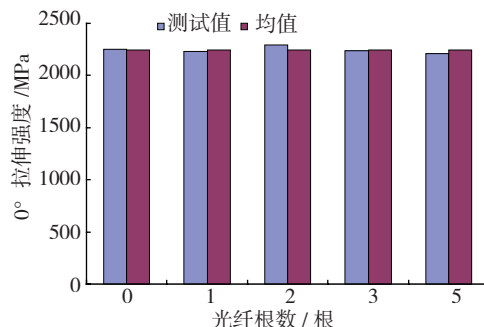


图1 光纤根数-0° 拉伸强度

Fig.1 Number of optical fibers to 0° tension strength

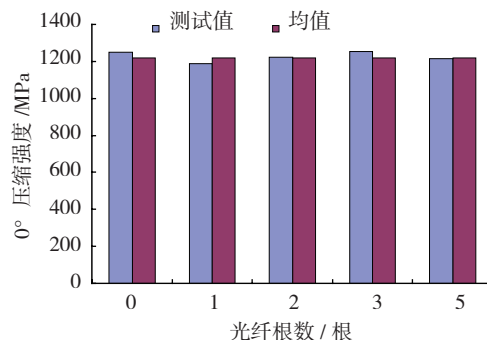


图2 光纤根数-0° 压缩强度

Fig.2 Number of optical fibers to 0° compress strength

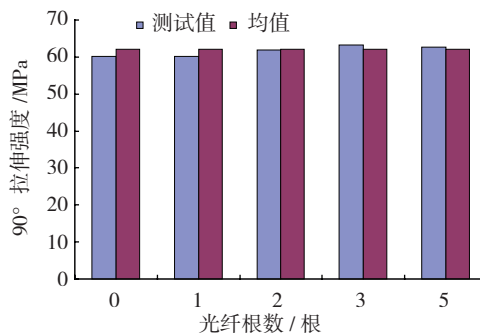


图3 光纤根数-90° 拉伸强度

Fig.3 Number of optical fibers to 90° tension strength

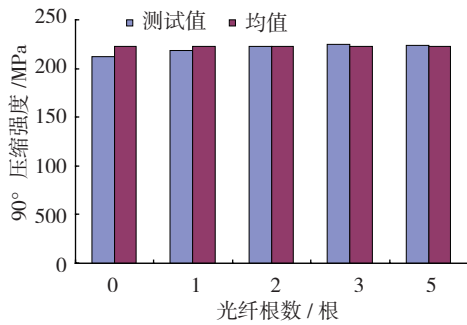


图4 光纤根数-90° 压缩强度

Fig.4 Number of optical fibers to 90° compress strength

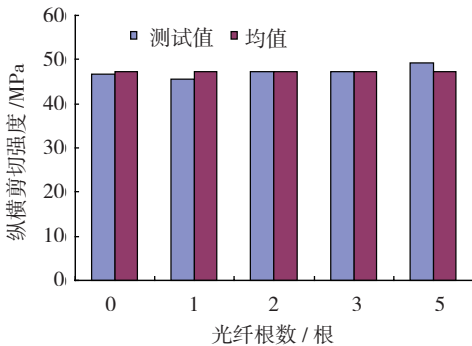


图5 光纤根数-±45° 剪切强度

Fig.5 Number of optical fibers to ±45° shear strength

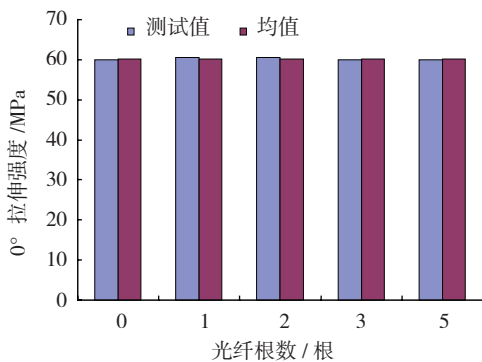


图6 光纤根数-0° 拉伸模量

Fig.6 Number of optical fibers to 0° tension modul

由图6可以看出,光纤铺设密度对0°拉伸模量的影响更小。由表2中其他的刚度数据进一步可以看出,光纤铺设密度对试验件其他刚度性能的影响与对强度的影响类似,均小于5.0%。

进一步的分析发现,由于光纤纤芯为玻璃纤维材料,其强度性能较碳纤维强度性相当,但刚度性能较低。且以5根光纤为例,光纤材料在试验件中所占纤维材料的体积百分比为 $9.7 \times 10^{-12}$ 。根据微观复合材料力学理论,埋入少量的光纤,难以对试验件的力学性能产生较大的影响。

#### 4 结束语

本文通过试验测试了埋入光纤对复合材料基本力学性能的影响作用。将光纤作为传感器使用,光纤的铺设间

隔密度大于4.8mm的条件下,试验和分析表明:

(1)埋入光纤对复合材料强度和刚度性能的影响较小,均小于5%。

(2)埋入光纤能少量增加复合材料90°方向的强度和刚度性能。

#### 参考文献

[1] 张光磊,杜彦良. 智能材料与结构系统. 北京:北京大学出版社,2010.  
 [2] Mearsures R M, Glossop N D W, Tennyson R C. Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials. SPIE,1988,986:120-129.  
 [3] 梁大开,陶宝祺. 光纤埋入碳纤维复合材料后光学性能变化的研究. 材料工程,1998,11:8-13.  
 [4] Yang S M, Chen C M. Application of single mode optical fiber sensors in structural vibration suppression. Intelligent Material Systems and Structure, 1996,7 (1):71-77.

(责编 小城)

(上接第76页)

良好。

(2)应用该软件对复合材料舱门制造成本进行评估后发现,单架次生产时,与金属材料舱门相比,复合材料舱门所涉及的复合材料加工工艺需花费较长的工时、较高的模具和设备耗费,以及较昂贵的材料价格,这使其单件制造成本明显增加。

(3)生产批量及工艺方法等因素对复合材料舱门制造成本有很大影响:增加生产批量的方式可以明显降低单件零部件的模具费用;采用共固化成形、共胶接等整体化成形工艺可明显降低装配成本。

#### 参考文献

[1] Niazi A, Dai J S, Balabani S, et al. Product cost estimation: Technique classification and methodology review. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(2):563-575.  
 [2] Watson R, Kwak Y H. Parametric estimating in the knowledge age: Capitalizing on technological advances // 13th international conference on management of technology, IAMOT, 2004: 1-11.  
 [3] Boren H E. A computer model for estimating development and procurement costs of aircraft. The Rand Corporation, 1976.  
 [4] PRICE Corp. PRICE H fundamentals course material. New Jersey: Price Systems L.L.C, 2004: 7-36.  
 [5] Gutowski T G, Houl T D, Dillon G, et al. Development of a theoretical cost model for advanced composite fabrication. Composites Manufacturing, 1994, 5(4): 231-239.  
 [6] Northrop Corporation. Advanced composite cost estimating manual. AFFDL-TR-76-87, 1976.  
 [7] Sascha M H. Cost modeling and design for manufacturing guidelines for advanced composite fabrication[D]. Cambridge: MIT, 2002.  
 [8] 叶强,陈普会,柴亚南. 复合材料结构制造成本估算模型及软件开发. 复合材料学报, 2008, 25(4):161-167.

(责编 良辰)