复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第22卷 第6期 12月 2005年
Vol. 22 No. 6 December 2005

文章编号：1000-3851（2005）06-0144-06

三维六向编织复合材料力学性能的实验研究

徐 焜[1]，许希武*[1]，汪 海[2]
（1. 南京航空航天大学 结构强度研究所，南京 210016；2. 沈阳飞机设计研究所，沈阳 110035）

摘 要： 通过拉伸(含开孔拉伸)、压缩(含开孔压缩)、面内剪切及冲击后压缩实验，获得了三维六向编织复合材料的主要力学性能参数。基于宏观实验，探讨了材料在拉伸、压缩及剪切载荷作用下的破坏模式和失效机理，分析了开孔类型(机械孔、编织孔)对材料拉、压性能的影响并研究了冲击对材料压缩性能的影响。所获结果为进一步研究三维六向编织复合材料的刚度、强度预报奠定了基础。

关键词： 三维六向；编织复合材料；力学性能；失效
中图分类号： TB332 **文献标识码**：A

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF 3D 6-DIRECTIONAL BRAIDED COMPOSITES

XU Kun[1], XU Xiwu*[1], WANG Hai[2]
(1. Research Institute of Structures and Strength, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: The main mechanical properties of the 3D 6-directional braided composites were obtained by tensile, compressive, in-plane shear, and compressive after impact experiments. The bar specimens with two types of holes, mechanical circular hole or braided circular hole, were used for tensile and compressive tests. The damage modes and failure mechanism of the material under tensile, compressive and shearing loads were experimentally studied. The influence of the two types of holes (mechanical hole and braided hole) on the tensile and compressive mechanical properties was analyzed. The effect of impact on the compressive mechanical properties was also studied. The present work establishes a foundation for the predictions of stiffness and strength of the 3D 6-directional braided composites.

Keywords: 3D 6-directional; braided composites; mechanical properties; failure

三维编织复合材料作为一种新型轻质高效的结构材料，其刚度、强度等基本力学性能研究是材料应用于结构设计的重要前提。但由于三维编织复合材料细观结构的复杂性，给材料的力学性能分析和预报带来了巨大困难。目前，主要的研究方法有实验研究[1~12]和基于细观几何模型的理论研究[13,14]。

实验研究对于三维编织复合材料的开发与应用具有其独特而不可替代的作用。通过实验不仅可以评价及验证材料的力学性能，为其结构设计、分析提供实验数据，而且通过研究材料的破坏模式和失效机理，可为提出合理的强度失效准则和预报模型奠定基础。因此，许多学者都对此给予了高度关注。Macander 等[1]首先通过实验发现，三维编织物能较大幅度提高材料厚度方向的强度和刚度；Fukuta[2]研究表明，三维编织材料的冲击后压缩强度较层合板高；李嘉禄等[3]针对轴向增强和非轴向增强三维多向编织复合材料，研究了其拉伸和弯曲力学性能；孙慧玉[4]研究了切割对三维编织结构拉伸性能的影响；庞宝君等[5]通过实验研究了材料非线性力学行为随编织角的变化规律及编织参数对破坏模式的影响；唐国翌等[6]分析了多向编织复合材

收稿日期：2004-12-15；收修改稿日期：2005-03-28
基金项目：江苏省研究生培养创新工程(2005065)；南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(4003019017)
通讯作者：许希武，教授，博士生导师，主要从事复合材料结构力学、飞行器结构完整性评定技术和计算力学等领域的研究
E-mail：xwxu@nuaa.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

料的力学特性和断口形貌；杨朝坤[7]开展了三维四步编织复合材料的拉伸、压缩和弯曲实验研究；Nakai[8]等分析了编织孔和机械孔对材料拉伸性能的影响；Tang[9]等对三维编织材料的抗冲击性能进行了实验研究；Shu[10]等研究了二维三轴编织碳纤维复合材料的压缩性能；卢子兴[11]研究了编织角对三维四向编织复合材料压缩失效机理的影响；王波等[12]研究了三维编织 C/SiC 复合材料拉伸和压缩的损伤扩展及破坏规律。这些工作加深了对编织材料力学行为的认识，但由于三维编织材料力学性能受多种因数影响明显，材料制备价格昂贵，实验研究还很不充分，仍需大量实验来研究分析其破坏规律和变形；同时，目前研究主要针对平面织物和三维四向、五向编织材料，关于三维六向编织复合材料力学行为研究的文献报道尚未见到。

为较系统地研究三维六向编织复合材料的力学行为，本文作者通过拉伸、开孔拉伸、压缩、开孔压缩、面内剪切及冲击后压缩实验，从宏观角度研究了该材料的基本力学行为和破坏规律，获得了该材料的主要力学性能参数，分析了开孔类型(机械孔、编织孔)对材料拉、压性能的影响，研究了材料的冲击后压缩性能。所获结论为进一步研究三维六向编织复合材料的刚度、强度问题奠定了实验基础。

1　试件参数及实验描述

三维六向编织复合材料作为一种新型的复合材料结构形式，以三维四向编织工艺为基础，通过增加面内长度方向(z 向)的轴向筋纱和宽度方向(y 向)的横向筋纱而成，织物内典型的纱线空间走向见图 1。增强纤维为 T300(3000-40B)，基体为 QY8911。纤维束规格为：编织纱 6 K，纵向(z 向)筋纱 3 K，横向(y 向)筋纱 6 K；z 向筋纱根数和编织纱根数相同，y 向筋纱每一平面的根数为 3 根，每隔一个花节长度加一组。材料的纤维体积含量为 53 %，各向纤维含量见表 1。织物表面编织角为 24°，花节高度为 5.6 mm。所有试件由天津工业大学编织，航空 625 所负责成型制造，试件尺寸如图 2(a)～2(f)所示。

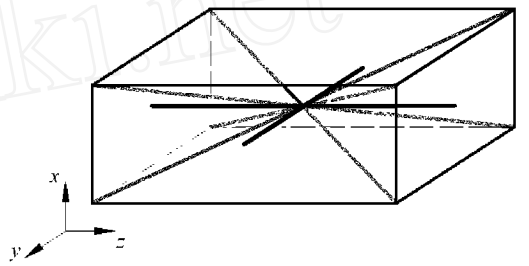


图 1　纱线空间走向

Fig. 1　Spatial orientations of the yarns

表 1　各向纤维质量分数

Table 1　Mass fraction of the yarns in different directions

Yarns in different directions	The diagonal	z axis	y axis
Mass fraction/ %	75	12	13

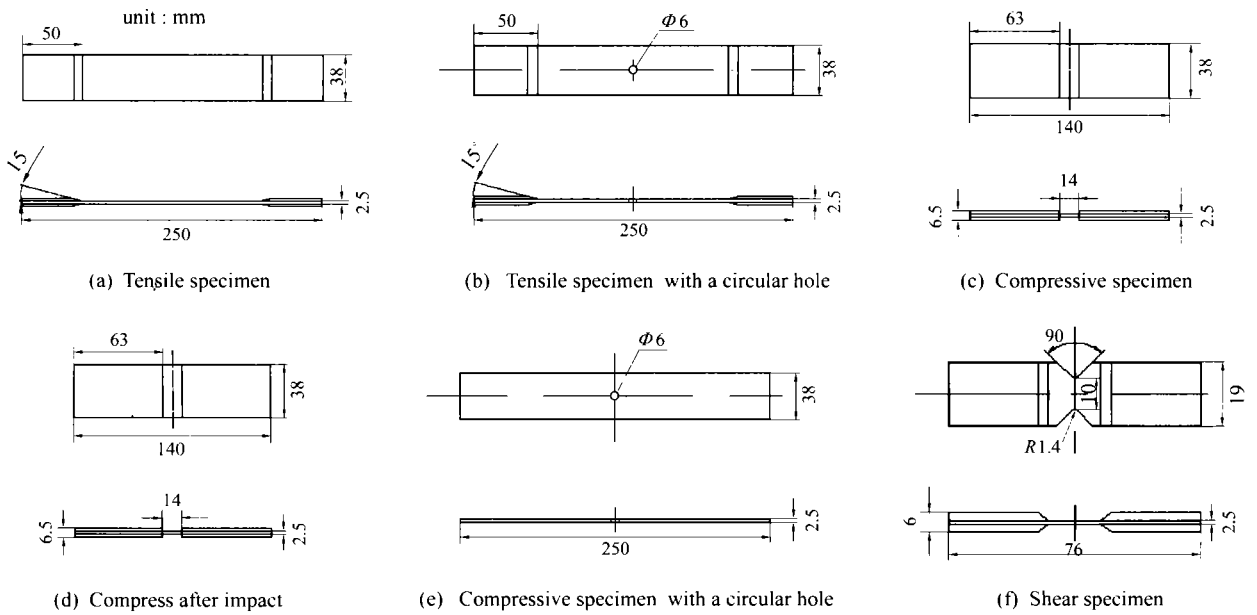


图 2　试件形状与尺寸

Fig. 2　Shapes and dimensions of the specimens

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　实验内容及参照标准

Table 2　Experiments and the adopted standards

No.	Tensile experiments			Compressive experiments			Shear	Compress after impact
	Tensile	with a mechanical circular hole	with a braided circular hole	Compressive	with a mechanical circular hole	with a braided circular hole		
Standards	GB 3354 - 82	HB 6740 - 93	HB 6740 - 93	GB 3856 - 83	HB 6741 - 93	HB 6741 - 93	HB 7237 - 95	HB 6739 - 93
Serial number	T1-T5	TH1-TH5	TH6-TH10	C1-C5	CH1-CH5	CH6-CH10	S1-S5	CAI1-CAI5
Amount	5	5	5	5	5	5	5	5

由于目前编织复合材料还没有统一的实验规范和测试标准，实验及相应夹具的设计制造均参照层板复合材料国标(GB)或航标(HB)进行，表 2 给出了实验的全部内容及参照标准。拉、压实验，采用正反对称贴片采集应变数据，应变片规格为 BE120-6AA(栅长为 6 mm)。拉伸、压缩实验应使载荷通过试件厚度的中心，以防止附加弯矩的产生。面内剪切实验采用 ±45°应变花，应变花正反两面对称贴于剪切试件 V 型开口处，并使应变片栅区中心正好通过 V 型开口的中心线，以便测量试件的剪切应变。装夹剪切试件时，应保证载荷通过试件 V 型开口的中心线，从而在 V 型开口处形成纯剪区。冲击后压缩实验参照标准 HB 6739 - 93 进行，冲击头是半径为 6.25 mm 的半球面，因试件厚度方向每 1 mm 的冲击能量为 4.45 J，试件厚度方向尺寸为 2.5 mm，故冲击能量为 11.125 J (4.45 ×2.5 = 11.125 J)。

所有实验均通过 WDW-E2000 微机控制电子式万能试验机进行。采用位移控制加载，速率为 0.02 mm/s，环境温度为 21°，湿度为 19%。应变数据利用 YJ-33 数字应变仪采集，通过电测法计算材料的弹性常数。

2　实验结果与分析

2.1　基本力学性能

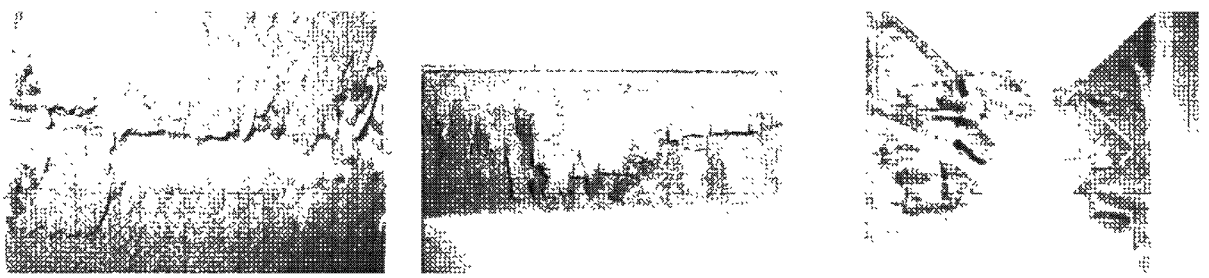
拉伸实验时载荷-位移曲线呈线性，在试件破坏的瞬间载荷突然下降。表 3 给出了拉伸试件的主要力学性能参数：平均拉伸强度为 477.841 MPa，平均纵向模量为 64.42 GPa，平均拉伸断裂应变为 7764 με。可见，材料在拉伸载荷作用下表现为线弹性，具有脆性破坏特征。

表 3　拉伸力学性能参数

Table 3　Tensile mechanical property parameters

No.	Tensile strength/ MPa	μ_{yz}	E_z/ GPa	$\varepsilon/\mu\varepsilon$
T1	458.480	0.341	63.46	8757
T2	424.296	0.276	61.78	6882
T3	499.258	0.301	62.18	8037
T4	500.742	0.380	61.64	8040
T5	506.429	0.339	69.03	7106
Average	477.841	0.328	64.42	7764

图 3(a)为拉伸试件的破坏断口形貌。经宏观断口观察表明，拔出的纤维束截面近为圆柱状，基体无明显的塑性变形，纤维具有明显的正应力拉伸断裂特征。试件在中部发生断裂，断口基本平齐。这说明在拉伸载荷作用下，由于树脂基体弹性模量远小于碳纤维且试件轴向编织角只有 24°，纤维承担着主要的载荷并处于一种较为均匀的拉伸状态，基体变形相对较大，只能通过剪切作用于纤维。随着载荷的增大，增强纤维的断裂导致了试件最终失效，纤维控制着材料的拉伸力学性能。



(a) Tensile　(b) Compressive　(c) Shear

图 3　拉伸、压缩和剪切试件的破坏断口形貌

Fig. 3　Fracture morphologies of the tensile, compressive and shear specimens

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

纵向压缩实验中，试件载荷-位移曲线呈近似线性。表4给出了材料的压缩力学性能参数：平均破坏强度为348.64 MPa，泊松比为0.327，平均纵向压缩模量为22.51 GPa。可见，三维六向编织复合材料的纵向压缩模量小于材料的纵向拉伸模量。

表4　压缩力学性能参数

Table 4　Compressive mechanical property parameters

No.	Compressive strength/ MPa	μ_{yz}	E_z/ GPa
C1	331.44	0.285	26.64
C2	339.53	0.210	22.94
C3	364.68	0.390	18.85
C4	349.69	0.429	24.44
C5	357.88	0.323	19.66
Average	348.64	0.327	22.51

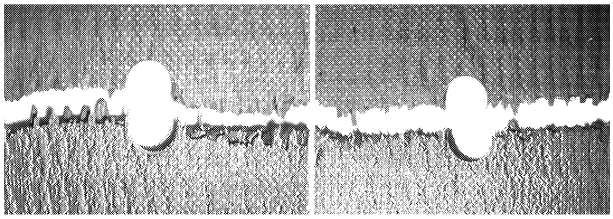
图3(b)给出了压缩试件的破坏断口形貌。经宏观观察可见，试件于中部破坏，压溃的纤维向两侧明显崩裂突出，压缩破坏面与横截面成45°方向，具有明显的脆性压缩破坏特征。实验过程中，表面局部基体存在一定脆裂现象，但试件在最后瞬间失效前保持了纤维束网格的完整性。这说明对于编织角为24°的试件，表面的局部基体脆裂对材料的压缩强度没有直接影响。但随着损伤的积累和纤维与基体界面的逐步破坏，基体再无法提供对纤维束的支撑和保护作用时，纤维束会大幅度压屈失稳而失效。所以，界面性能对材料的压缩强度影响特别明显，纤维束的失稳压屈导致材料的最终失效。

面内剪切实验中，试件载荷-位移曲线开始具有明显的线性，随后呈非线性。表5列出了材料的初始剪切力学性能参数：剪切强度均值为153.305 MPa，模量为7.151 GPa。

图3(c)给出了面内剪切试件的破坏断口形貌。实验观察发现，随着载荷的增大，当载荷-位移曲线开始出现非线性时，试件剪切区出现了局部基体脆裂，但试件仍能继续承受载荷，只是材料的剪切刚度开始减小。随着基体失效的扩展，剪切区纤维束发生了一定的位移偏转。此时，试件已无法承载，载荷-位移曲线上载荷明显下降，随着控制位移的增大，纤维束在最后失效时具有明显的拉伸断裂特征。形成这种现象的原因是：随着剪切载荷的增大，局部基体承受复杂应力开始脆裂，当载荷增大到一定程度时，纤维与基体的界面发生脱粘，逐渐失去了对纤维束的支持和固定作用，使纤维束无法承受剪切载荷。所以，基体和界面对材料的剪切性能起着明显的控制作用，剪切破坏不具有脆性破坏特征。

2.2　开孔对材料拉、压性能的影响

图4给出了开孔拉伸试件的破坏断口形貌。机械开孔试件和编织开孔试件均在开孔处发生断裂，断口截面呈小锯齿状，有一定的毛刺现象，表明材料最终破坏时有相当的能量突放。但断口整体上基本平齐，说明试件受力较为均匀，可见由于面内增强筋纱的加入，改善了材料的面内性能，特别是在试件开孔处的剩余横截面上，由于未截断的轴向增强筋纱和编织纱的共同作用，使载荷得以均匀地分配和传递，降低了因机械开孔所造成的纤维非连续性影响。故机械开孔和编织开孔试件的破坏断口形貌相似。



(a) with a mechanical hole　　(b) with a braided hole

图4　开孔试件拉伸破坏断口形貌

Fig. 4　Tensile fracture morphologies of the specimens with two types of holes

表6给出了机械开孔试件和编织开孔试件的拉伸破坏强度。由表3可知，拉伸试件的平均破坏强

表5　剪切性能参数

Table 5　Shear mechanical property parameters

No.	S1	S2	S3	S4	S5	Average
Shear strength/ MPa	177.122	119.379	169.042	153.112	147.870	153.305
Shear modulus/ GPa	7.625	6.147	8.055	7.785	6.142	7.151

表6　开孔试件拉伸破坏强度

Table 6　Tensile strength of the specimen with a hole

No.	with a mechanical hole					with a braided hole				
	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8	TH9	TH10
Tensile strength/ MPa	358.10	405.78	324.86	389.16	351.08	345.57	363.93	383.38	388.29	352.06
Average / MPa			365.80					366.65		

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 7　开孔试件压缩破坏强度

Table 7　Compressive strength of the specimen with a hole

No.	with a mechanical hole					with a braided hole				
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10
Compressive strength/ MPa	181. 10	252. 02	250. 49	266. 39	195. 84	195. 20	177. 31	299. 28	304. 93	252. 49
Average/ MPa			229. 17					245. 80		

度为 477. 841 MPa。机械孔试件的平均剩余强度为 365. 80 MPa，为拉伸强度的 76. 55 %；编织孔试件的平均剩余强度为 366. 65 MPa，为拉伸强度的 76. 73 %。可见，机械开孔和编织开孔试件的拉伸剩余强度几乎相同，均达到原拉伸强度的 76 %，两类开孔对该材料的开孔拉伸强度没有影响；同时，开孔拉伸剩余强度表明，三维六向编织复合材料对开孔的敏感性比较低，有利于利用该材料进行结构的开孔细节设计。

图 5 给出了开孔压缩试件的破坏断口形貌。机械开孔和编织开孔试件均在开孔处发生破坏，压缩破坏面与横截面成 45 °，因压溃而折断的纤维向两侧崩裂突出。从试件宏观断口分析，两类试件最后都因剪切作用而发生破坏，总体上机械孔和编织孔试件并无太大差异，但机械孔试件的破坏面明显比编织孔试件光整一些，更具有脆性破坏特征，说明编织孔试件在承压时可较好地保持织物的整体性。

(a) with a mechanical hole　　(b) with a braided hole

图 5　开孔试件压缩破坏断口形貌

Fig. 5　Compressive fracture morphologies of the specimens with two types of holes

表 7 给出了开孔压缩试件的破坏强度。由表 4 可知，材料的压缩破坏强度为 348. 64 MPa。机械孔试件的压缩剩余强度为 229. 17 MPa，为压缩强度的 65. 73 %；编织孔试件的压缩剩余强度为 245. 80 MPa，为压缩强度的 70. 50 %。可见，机械孔试件比编织孔试件的压缩破坏强度小，说明编织孔比机械孔对试件压缩性能的影响要小，材料对编织开孔的敏感性更低一些。

2. 3　冲击后材料的压缩力学性能

试件按层板标准冲击后，对损伤区域进行制孔，在试件中部留下直径约为 10 mm 的孔洞，孔径周围十分光整，没有明显的纤维松散或毛刺现象。图 6 给出了冲击后压缩试件的破坏断口形貌。压溃的纤维在破坏处明显向两侧崩裂突出，其程度比开孔压缩试件较为显著。破坏瞬间，声响特别明显，能量释放更为剧烈。

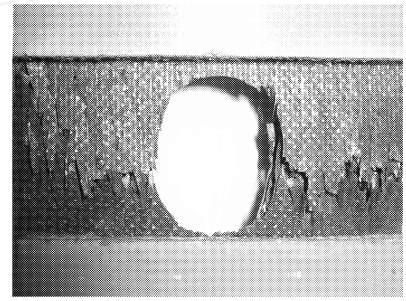


图 6　冲击后压缩破坏断口形貌

Fig. 6　Fracture morphology of compress after impact

表 8 给出了冲击后压缩试件的破坏强度。材料平均破坏强度为 171. 63 MPa，为原压缩强度的 49. 22 %。冲击后试件的最大损伤尺度(孔径为 10 mm)为开孔压缩试件损伤尺度(孔径为 6 mm)的 1. 67 倍，前者的损伤面积更是后者的 2. 78 倍。但冲击后压缩强度仍达到了原压缩强度的近 50 %，而机械开孔压缩试件的破坏强度为原压缩强度的 65 %。单就造成的静态损伤而言，随着孔径损伤尺度的增大，材料的压缩破坏强度并没有按比例递减，而是较好地保持了抗压缩的能力。所以，孔径尺度对材料开孔压缩强度的影响规律还有待于进一步研究，而且就 CAI 强度而言，三维六向编织复合材料对低速冲击损伤还是比较敏感的。

表 8　冲击后压缩强度

Table 8　Compressive strength after impact

No.	CAI1	CAI2	CAI3	CAI4	CAI5	Average
CAI strength/ MPa	164. 30	142. 50	179. 76	172. 66	198. 91	171. 63

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3　结　论

(1) 三维六向编织复合材料在小编织角情况下，拉伸载荷-位移曲线呈线性，脆性破坏；压缩载荷-位移曲线呈近似线性；剪切载荷-位移曲线初始时为线性，随后表现出非线性，剪切破坏不具有脆性破坏特征。

(2) 纤维控制着材料的拉伸力学行为，界面性能对材料的压缩和剪切性能影响显著，纤维束的压屈失稳导致了材料的压缩破坏。

(3) 编织孔和机械孔对三维六向编织复合材料的开孔拉伸强度没有影响，开孔拉伸剩余强度达到原拉伸强度的 76 %。

(4) 编织孔压缩剩余强度为原压缩强度的 70 %，机械孔压缩剩余强度为原压缩强度的 65 %。编织孔比机械孔对材料的开孔压缩性能影响要小。

(5) 冲击后压缩试件的破坏强度约为材料原压缩强度的 50 %，就 CAI 强度而言，三维六向编织复合材料对低速冲击损伤还是比较敏感的。

参考文献：

[1] Macander A B, Crane R M, Camponeschi E T, *et al*. Fabrication and mechanical properties of multi-dimensionally (X-D) braided composite materials [A]. In: Whitney J M, ed. Composite Materials: Testing and Design (7th Conf.) [C]. Philadelphia: ASTM, 1986. 422 - 443.

[2] Fukuta K. Three-dimensional braided composite material [J]. *Journal of the Japan Society for Composites Materials*, 1995, 21(2): 51 - 60.

[3] 李嘉禄，肖丽华，董学允. 立体多向编织结构对复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 1996, 13(3): 71 - 75.
Li Jialu, Xiao Lihua, Dong Fuyun. Influence of three dimensional and multidirectional braid structures on the properties of composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1996, 13(3): 71 - 75.

[4] 孙慧玉，吴长春. 纺织结构复合材料力学性能的实验研究[J]. 实验力学, 1997, 12(3): 335 - 341.
Sun Huiyu, Wu Changchun. Experimental research on mechanical properties of composites materials with textile structure [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997, 12(3): 335 - 341.

[5] 庞宝君，杜善义，韩杰才，等. 三维四向编织/环氧复合材料实验研究[J]. 复合材料学报, 1999, 16(4): 136 - 141.
Pang Baojun, Du Shanyi, Han Jiecai, *et al*. Experimental investigation of three-dimensional four-directional braided carbon/epoxy composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1999, 16(4): 136 - 141.

[6] 唐国翌，闫允杰，陈锡花，等. 多向编织碳纤维复合材料的断裂及微观形貌[J]. 清华大学学报(自然科学板), 1999, 39(10): 4 - 7.
Tang Guoyi, Yan Yunjie, Chen Xihua, *et al*. Fracture mechanism and fracture morphology of multi-dimensional braided carbon fiber/epoxy resin composites [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 1999, 39(10): 4 - 7.

[7] 杨朝坤. 编织结构复合材料力学性能的分析与测试[J]. 玻璃钢/复合材料, 2002(3): 11 - 14.
Yang Chaokun. Testing and analyzing mechanical properties of braided composite materials [J]. *FRP/CM*, 2002(3): 11 - 14.

[8] Nakai Asami, Ohki Takeru, Takeda Nobuo, *et al*. Mechanical properties and micro-fracture behaviors of flat braided composites with a circular hole [J]. *Composite Structures*, 2001, 52: 315 - 322.

[9] Tang Guoyi, Yan Yunjie, Chen Xihua, *et al*. Dynamic damage and fracture mechanism of three-dimensional braided carbon fiber/epoxy resin composites [J]. *Materials and Design*, 2001, 22: 21 - 25.

[10] Shu Ching Q, Waas Anthony M, Shahwan K W, *et al*. Compressive response and failure of braided textile composites. Ⅰ: Experiments [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2004, 39: 635 - 648.

[11] 卢子兴，胡　奇. 三维编织复合材料压缩力学性能的实验研究[J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 67 - 72.
Lu Zixing, Hu Qi. Experimental investigation into the compressive mechanical properties of three dimensional braided composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(6): 67 - 72.

[12] 王　波，矫桂琼，潘文革，等. 三维编织 C/SiC 复合材料的拉压实验研究[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 110 - 114.
Wang Bo, Jiao Guiqiong, Pan Wenge, *et al*. Tensile and compress experimental investigation of three-dimensionally braided C/SiC composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(3): 110 - 114.

[13] 卢子兴，杨振宇，李仲平. 三维编织复合材料力学行为研究进展[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 1 - 7.
Lu Zixing, Yang Zhenyu, Li Zhongping. Development of investigation into mechanical behaviour of three dimensional braided composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(2): 1 - 7.

[14] 徐　焜，许希武，汪　海. 三维四向编织复合材料的几何建模和刚度预报[J]. 复合材料学报, 2005, 22(1): 133 - 138.
Xu Kun, Xu Xiwu, Wang Hai. On geometrical model and stiffness prediction of 3D 4-directional braided composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(1): 133 - 138.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net