复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 22 卷 第 4 期 8 月 2005 年
Vol. 22 No. 4 August 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 04-0172-05

三维编织复合材料的疲劳性能

李嘉禄[1*], 杨红娜[2], 寇长河[3]
(1. 天津工业大学 复合材料研究所、先进纺织复合材料天津市重点实验室, 天津 300160,
2. 北京空间机电研究所, 北京 100076, 3. 北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083)

摘 要: 研究了三维编织复合材料的疲劳性能和编织结构对疲劳性能的影响。进行了应力比为 0.1、实验频率为 10 Hz 的拉-拉疲劳性能测试。结果表明, 三维编织复合材料的疲劳强度约为其抗拉强度的 60 %～80 %, 比金属材料的疲劳强度的相对值高。编织角是影响三维编织结构复合材料疲劳性能的一个主要因素。随着编织角的增大, 疲劳过程中易出现各种损伤, 而且伴随明显的升温现象。编织角大的试件在疲劳实验过程中模量变化明显, 并且呈现逐渐升高的趋势, 这与金属材料的双模量变化规律不同。在疲劳次数为 100 万次后, 试件的剩余强度高于静载拉伸强度, 这主要是由于在疲劳测试过程中, 试件内编织纱线的取向更接近受力方向所致。

关键词: 三维编织复合材料; 疲劳性能; 编织结构; 编织角
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

FATIGUE PROPERTIES OF THREE DIMENSIONAL BRAIDING COMPOSITES

LI Jialu[1,*], YANG Hongna[2], KOU Changhe[3]
(1. Composites Research Institute of Tianjin Polytechnic University & Tianjin Key Laboratory of Advanced Composite Materials, Tianjin 300160, China;
2. Beijing Institute of Mechanics and Electrics, Beijing 100076, China;
3. Solid Mechanics Institute of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The dynamic mechanical properties ——fatigue properties and the effect of braiding structures on the fatigue properties of three dimensional braiding composites were studied. Tensile-tensile fatigue tests were carried out at different maximum stress ratios. All the tests were run at a stress ratio $R(\sigma_{min}/\sigma_{max}) = 0.1$. The fatigue frequency was 10 Hz. The results show that the fatigue strength of three dimensional braiding composites is 60 %～80 % of its static strength, which is higher than that of metal material. The braiding angles have a great influence on the fatigue properties of 3-D braiding composites. The fatigue damage will be easy and the hysteresis heat will occur for the large braiding angle composites. The strain-stress curves of the specimens with large braiding angles are non-linear, and the modulus is increasing with the testing time increasing. The variational rule of fatigue properties of three dimensional composites contrasted with the metal's rules. After one million times of fatigue tests, the residual strength of the specimens is higher than the static test strength, which is due to fiber bundles being reoriented to a lower angle toward the tensile loading direction after the fatigue test.

Keywords: 3-D braiding composites; fatigue property; braiding-structure; braiding-angle

三维编织技术是 20 世纪 80 年代为适应对结构和多功能复合材料的需要而发展起来的一种高新纺织技术。三维编织复合材料是三维编织技术和现代复合材料技术相结合的产物, 它与传统复合材料有较大区别。层合复合材料因存在“层”而带来力学性能的弱点: 如易分层、开裂敏感和损伤扩展快、沿厚度方向的刚度和强度低、冲击韧性和损伤容限水平较低、层间剪切强度低等[1～3]。为了消除复合材料的“层”, 三维织物增强体系随之出现, 纤维束或纱线贯穿材料的长、宽、高三个方向形成一个不分层的三维整体网状结构, 这样从根本上解决了传统复合材料的缺陷, 为复合材料应用于结构件提

收稿日期: 2004-08-16; **收修改稿日期**: 2005-05-18
基金项目: 天津市自然科学基金 (023604811)
通讯作者: 李嘉禄, 教授, 主要从事三维纺织复合材料方面的研究工作; 会员证号: E63020004GJ E-mail: lijialu@tjpu.edu.cn

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

供了广阔的前景[4,5]。

三维编织复合材料的这些特点引起了人们的关注，研究的文章较多，但主要研究的是其静态力学性能，而对其动态力学性能研究得相对比较少[6~8]。本文中对碳纤维三维四向编织复合材料的拉伸-拉伸疲劳性能进行了初步的研究。研究了编织结构，即编织角对三维编织复合材料疲劳性能的影响。结果表明，编织角是影响三维编织结构复合材料疲劳性能的一个主要因素。

1 疲劳的定义和种类

国际标准化组织(ISO)把疲劳定义成一个专门术语："金属材料在应力或应变的反复作用下所发生的性能变化叫做疲劳，在一般情况下，这个术语特指那些导致开裂或破坏的性能变化"。这一描述也普遍适用于非金属材料和复合材料[9]。

疲劳破坏以许多不同的形式出现，它包括机械疲劳、蠕变疲劳、热机械疲劳、腐蚀疲劳、滚动接触疲劳、微观疲劳等。此外，根据破坏时的循环数的高低，疲劳可分为高周疲劳(或称高循环疲劳)和低周疲劳(或称低循环疲劳)。高周疲劳受应力幅控制，故又称应力疲劳，低周疲劳受应变幅控制，故又称应变疲劳，一般以 10^5 次做为高周疲劳与低周疲劳的分界点[10]。

本文作者主要讨论了碳纤维三维四向编织复合材料的拉伸-拉伸的机械疲劳性能。

2 实 验

2.1 试件的形状和尺寸

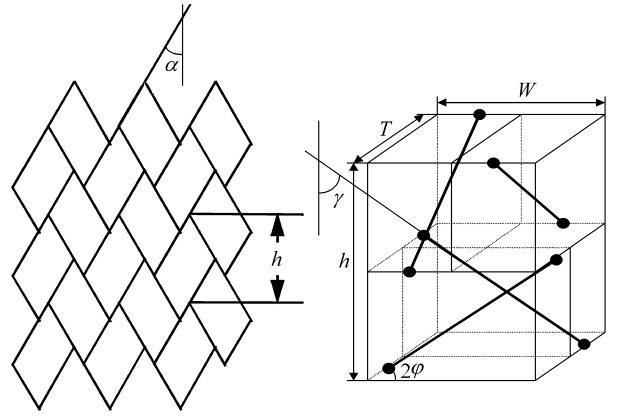
本疲劳实验所用三维编织复合材料试件的编织方法为四步法 1×1 编织方法，编织结构为三维四向结构，所用的编织纱种类均为 12K T300 碳纤维。根据 GB1447—83(玻璃纤维增强塑料拉伸性能实验方法)试件形状为长方体，其尺寸见表 1。

表 1 试片尺寸

Table 1 Sizes of sample

Parameters	Length L	Thickness h	Width b	Distance between grips L_0
Data/ mm	250	4~6	25	170

在三维编织复合材料中，一般以编织角来表示编织纱线的走向。编织角包括表面编织角 α 和内部编织角 γ，如图 1(a)、图 1(b)所示，它们之间是相关的。由于表面编织角容易测量和控制，所以表面编织角经常被用作三维编织复合材料的一个结构参数[11,12]。本文中除特别说明的以外，编织角代表表面编织角。



(a) Surface braiding angle (b) Inner braiding angle

图 1 三维编织复合材料编织角形态示意图

Fig. 1 Braiding angles of 3-D braiding composites

2.2 试件参数

三维编织复合材料试件的结构为具有不同编织角的三维四向编织结构，具体的尺寸和参数见表 2 和表 3。表 2 为测试静拉伸载荷的三维编织复合材料试件的参数，表 3 为测试疲劳性能的三维编织复合材料试件的参数。为保证试件拉伸时钳口处不首先破坏，在试件的两端分别粘贴 2 mm 厚的玻璃钢加强片。

表 2 测试静拉伸载荷的三维编织复合材料试片参数

Table 2 Parameters of composites samples for tensile tests

No.	Sizes/ mm	Surface braiding angle/ (°)	Fiber volume fraction/ %
LA1-1	250×24.91×4.324	12.80	45.57
LA1-2	250×24.84×4.290	12.95	45.22
LA1-3	250×24.89×4.328	13.40	44.94
LA2-1	250×24.88×4.312	19.9	45.76
LA2-2	250×24.76×4.326	19.5	45.19
LA2-3	250×24.96×4.128	20.0	47.86
LA3-1	250×25.05×4.300	30.0	48.73
LA3-2	250×25.00×4.330	29.1	48.29
LA3-3	250×24.94×4.534	30.1	47.63

表 3 测试疲劳性能的三维编织复合材料试件参数

Table 3 Parameters of composites samples for fatigue tests

No.	Sizes/ mm	Surface braiding angle/ (°)	Fiber volume fraction/ %
FA1-4	250×24.90×4.372	13.50	45.08
FA2-5	250×24.76×4.284	19.5	45.78
FA2-6	250×24.78×4.284	20.9	47.31
FA3-4	250×24.91×4.420	29.9	48.91
FA3-6	250×25.07×4.342	28.3	47.40
FA3-8	250×24.95×4.444	30.5	49.39
FA3-10	250×24.96×4.418	30.9	48.64

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

2.3　复合固化

复合材料试件所用的基体均为 TDE-85 环氧树脂，复合固化采用 RTM(Resin transfer molding)工艺，即树脂传递模塑工艺。

2.4　实验设备

实验设备为 MTS880-50 kN 和 500 kN 疲劳实验机，其载荷、应变测试，静载时误差不大于 1 %，疲劳时不大于 2 %。

实验疲劳应力比为 $R = 0.1$，为拉-拉疲劳实验。实验水平按各组静载破坏载荷平均值的 60 %、70 %、80 %为疲劳的高载荷。疲劳实验达到 1×10^6 次停止实验并静载拉断给出剩余强度。疲劳实验频率使用 10 Hz。

疲劳实验的过程中实验结果受实验频率、应力比、高载等多种因素的影响，因此合理设计实验方案非常重要。本实验中应力比选择 $R = 0.1$，主要考虑卸载过程中避免出现应力值为负，试件受压的现象发生。实验选取的高载由应力水平和静载拉伸强度而定。实验频率由仪器测量范围和工作量等因素综合决定。

3　实验结果

表 4 为不同编织角的三维编织复合材料试件的静拉伸载荷的测试结果的平均值，表 5 为三维编织复合材料试件疲劳性能的测试结果，表 5 中的静拉伸破坏载荷源自表 4。

表 4　三维编织复合材料试件静拉伸载荷数据(平均值)

Table 4　Tensile properties (Average)

No.	Breaking load/ kN	Strength / MPa	Initial modulus/ GPa	Failure strain/ %
LA1	72.37	683	82.7	0.84
LA2	41.57	394	49.8	0.79
LA3	32.01	300	34.8	0.88

从表 5 的疲劳性能测试结果可以看出，FA2 组试件当应力水平选取为静载拉伸破坏载荷的 80 %时，它的疲劳寿命在 1×10^6 次以上；FA3 组试件应力水平选取为静载拉伸破坏载荷的 70 %时，它的疲劳寿命也在 1×10^6 次以上，FA1 组试件数量较少，但应力水平选取为静载拉伸破坏载荷的 60 %时，疲劳寿命同样在 1×10^6 次以上。其次由表 5 还可以看出，试件在经历 100 万次疲劳加载实验后剩余强度均高于静载拉伸强度。

疲劳实验在不同疲劳次数时测试了应力-应变曲线。与金属材料常见的低周疲劳应力-应变曲线变化相反，三维编织复合材料疲劳应力-应变曲线随编织角度的不同变化规律有所不同，具体情况如图 2、图 3、图 4、所示。

图 2 为 FA1-4 号试件在疲劳实验过程中疲劳次数分别为 1 次、3 万次、10 万次、50 万次和 100 万次过程中的应力-应变关系曲线。实验选取的应力水平为静载拉伸强度的 60 %。由图 2 可知，试件在疲劳实验过程中应力-应变曲线为明显的线性，且整个实验过程中试件模量变化不大，当加载次数为 100 万次时出现微小的塑性变形。应变量均小于 0.5 %。

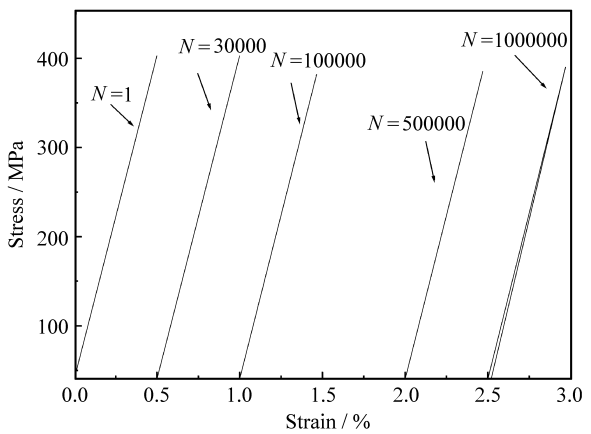


图 2　FA1-4 试件疲劳过程应力应变图

Fig. 2　Strain-stress curves during fatigue tests of sample FA1-4

表 5　三维编织复合材料试件疲劳性能数据表

Table 5　Fatigue properties

No.	Breaking load/ kN	Fatigue stress level/ %	High load / kN	Fatigue life / $\times 10^4$ times	Residual load/ kN	Initial modulus/ GPa
FA1-4	72.37	60	43.423	100, stop		80.0
FA2-5	41.57	80	33.253	100, stop	52.789	73.7
FA2-6	41.57	80	33.253	100, stop	48.536	56.8
FA3-4	32.01	80	25.612	0.179		21.8
FA3-6	32.01	60	19.209	100, stop	40.669	32.8
FA3-8	32.01	70	22.411	100, stop	35.364	28.8
FA3-10	32.01	70	22.411	100, stop	36.485	32.0

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

图 3 为 FA2-5 号试件在疲劳实验过程中疲劳次数分别为 1 次、1 万次、10 万次、50 万次和 100 万次过程中的应力-应变关系曲线，实验选取的应力水平为静载拉伸强度的 80 %。由图 3 可知，试件在疲劳实验过程中应力-应变曲线初始阶段为线性，随着载荷量的增加出现非线性，材料的模量呈逐渐上升的趋势。随着疲劳次数的增加，这种现象越来越明显。试件在不同疲劳次数时的应变量均大于 FA1 组试件，并随着疲劳实验次数的增加而增大。

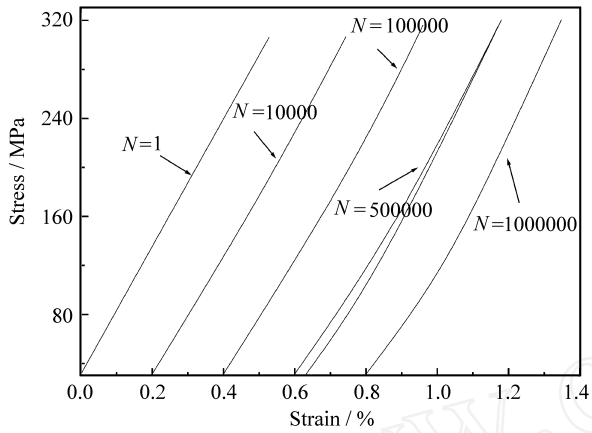


图 3 FA2-5 试件疲劳过程应力应变图

Fig. 3 Strain-stress curves during fatigue tests of sample FA2-5

图 4 为 FA3-8 号试件在疲劳实验过程中 N 为 1 次、5000 次、1 万次、10 万次、50 万次和 100 万次过程中的应力-应变关系曲线，实验选取的应力水平为静载拉伸强度的 70 %。由图 4 可知，与以上两组试件相比，该组试件不同疲劳次数中均出现塑性变形，而且与 FA2 组相比，加载过程中模量变化更加明显，随着载荷的增大逐渐加大。但经过一定的疲劳实验次数后模量变化现象减弱。

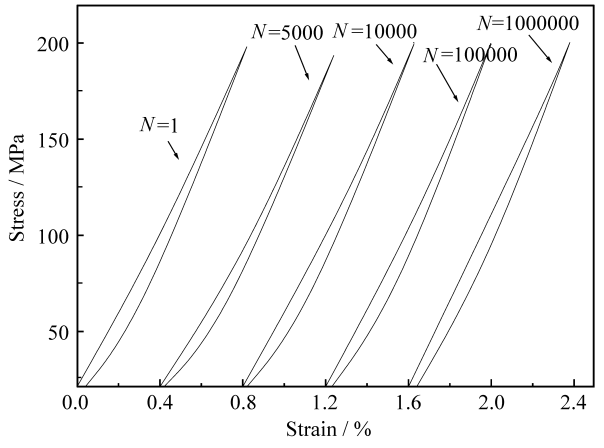


图 4 FA3-8 试件疲劳过程应力应变图

Fig. 4 Strain-stress curves during fatigue tests of sample FA3-8

4 讨论与分析

(1) 三维编织复合材料试件在疲劳实验后的剩余强度大于静载拉伸破坏强度。

实验结果表明(见表 5)，三维编织复合材料疲劳实验试件的剩余强度是静载拉伸破坏强度的 110 %～127 %。其主要原因是随着疲劳次数的增加，试件内部的部分树脂基体发生塑性变形，变形量逐渐累积，在拉伸外力的作用下，试件内部纱线与编织方向的倾斜角度发生变化，沿编织方向的纱线取向度有所提高，使试件的承载能力增强，致使在经过 100 万次反复拉伸实验后测得的试件剩余强度与静载拉伸强度相比有所提高。

同时，经过疲劳实验，三维编织的整体性进一步增强。图 5 为测试剩余拉伸强度后，试件拉伸断口的 SEM 照片。由图 5 可以看出，纤维束发生断裂，纤维束内只有少量的纤维拔出现象，纤维束断口较平齐，表现出纤维整体的协同作用，这是该复合材料剩余强度较高的另一个原因。

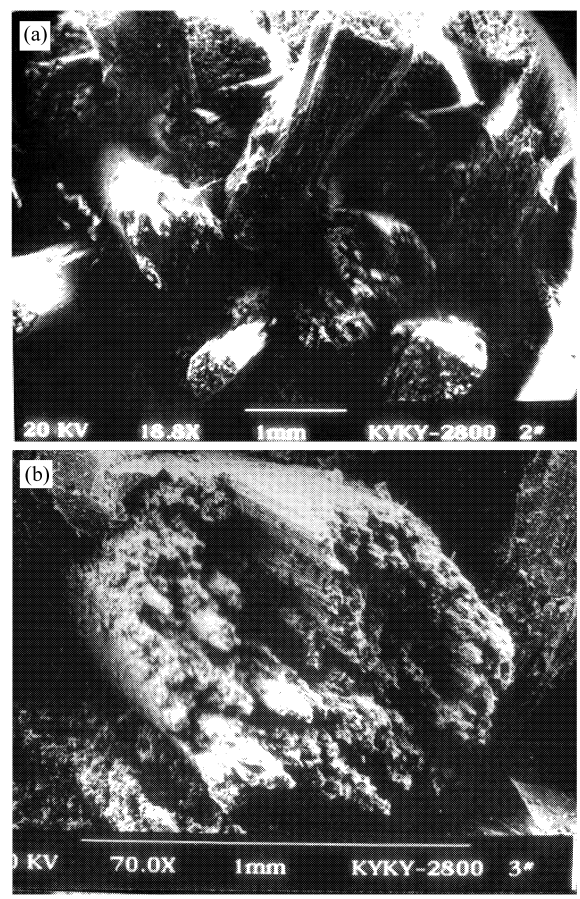


图 5 疲劳试件测剩余强度时拉伸断口截面的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photographs of break cross section

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

(2) 三维编织复合材料中的纤维取向对其疲劳性能有重要影响。

编织角小的试件(FA1 组)疲劳实验过程中应力-应变曲线呈现出明显的线性，随着编织角的增大，FA2 组和 FA3 组试件的应力-应变曲线偏离线性，模量均有逐渐升高的趋势。这是因为编织角小的试件在拉伸载荷的作用下，沿编织方向承载能力强，在做疲劳实验的过程中纤维与编织方向的倾斜角度变化不明显，即纱线沿编织方向的取向度变化不明显，致使应力-应变曲线表现为线性，模量基本不发生变化。编织角大的试件在初始阶段纤维与基体共同作用，应力-应变曲线表现为线性，随着疲劳次数的增加，纤维与编织方向的倾角有逐渐变小的趋势，纤维沿编织方向的取向度逐渐提高，致使纤维在编织方向的承载能力增强，模量逐渐增大。呈现如图 3、图 4 所示的变化趋势。

在疲劳实验过程中编织角小的试件几乎不升温，编织角大的试件有明显的升温现象。编织角大的试件在拉伸载荷的反复作用下，纤维重新取向的趋势比较大，故受摩擦阻尼作用比较显著，以热能形式散出。

(3) 三维编织复合材料试件结构的均匀性对疲劳性能也有较大的影响。

在疲劳实验中，有个别试件，例如 FA3-4，在实验次数比较少的情况下就发生损坏。仔细分析这些试件损坏的基本原因是试件的编织结构不够均匀，损坏发生在编织角有歧变的位置。因此，做好编织工艺的质量控制，保证编织结构的一致性，是提高三维编织复合材料力学性能的关键因素。

同时，疲劳实验中，应力水平选定后，由静载拉伸实验测得的平均强度值决定了高载的数值。因此，高载数值是否合适将直接影响到疲劳实验的测试结果。如果静载拉伸强度数值分散性大，将给高载的选取带来麻烦，并将直接影响到疲劳性能数据最终的准确获得。而试件编织结构的均匀性直接影响到静载拉伸强度数值分散性的大小。所以，为了准确获得疲劳性能数据值，除了保持实验环境的相对稳定，加大实验试件的数量外，还应保证试件质量的一致性。

(4) 三维编织复合材料疲劳强度的相对值要优于金属材料疲劳强度的相对值，同时两者的疲劳过程也不完全相同。

碳纤维三维编织复合材料的拉伸疲劳强度是其抗拉强度的 60 %～80 %，而金属疲劳强度只是其抗拉强度的 30 %～50 %[13]。金属材料疲劳裂纹出现后，很快引起灾难性的破坏，而没有明显的预兆。三维编织复合材料在疲劳过程中，裂纹先在纤维或基体薄弱处出现，再扩展到结合面，损伤逐渐累积，直至破坏，并有明显的破坏先兆。这表明三维编织复合材料具有较好的损伤容限和疲劳寿命。

同时，编织角大的三维编织复合材料试件在疲劳实验过程中模量变化明显，并且有逐渐升高的趋势，而金属材料在疲劳过程中是双模量的变化规律，二者疲劳过程中应力-应变变化的规律不完全相同。

参考文献:

[1] 吴德隆，沈怀荣. 纺织结构复合材料的力学性能 [M]. 长沙：国防科技大学出版社，1998. 5 - 10.

[2] Brookstein D. Braiding of a three-dimensional article through select fiber placement [P]. U S Patent: 5123458, 1994-10-23.

[3] McConnell R, Popper P. Complex shaped braided structures [P]. U S Patent: 4719837, 1988-01-19.

[4] 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 J L, Xiao L H, Dong F Y. Influence of three dimensional and multidirectional braid structures on the properties of composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1996, 13(3): 71 - 75.

[5] 修英姝，陈　利，李嘉禄. 三维编织复合材料制件的细观单胞分析[J]. 复合材料学报，2003，20(4)：63 - 66.
Xiu Y S, Chen L, Li J L. Analyzing the mechanical properties of 3-D braided composite structures by cell-element [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(4): 63 - 66.

[6] 李嘉禄，孙　颖，李学明. 二步法方型三维编织复合材料力学性能及影响因素[J]. 复合材料学报，2004，21(1)：90 - 94.
Li J L, Sun Y, Li X M. Research on the mechanical properties and the effectors of the two-step 3D braided composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(1): 90 - 94.

[7] 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 Z X, Yang Z Y, Li Z P. Development of investigation into mechanical behaviour of three dimensional braided composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(2): 1 - 7.

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

[9] 王中光译. 材料的疲劳 [M]. 北京：国防工业出版社，1993. 56 - 88.

[10] 徐　灏. 疲劳强度 [M]. 北京：高等教育出版社，1988，50 - 99.

[11] 陈　利，李嘉禄，李学明. 三维编织中纱线的运动规律[J]. 复合材料学报，2002，19(2)：71 - 74.
Chen L, Li J L, Li X M. Analysis of the yarn movement in 3D braids [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(2): 71 - 74.

[12] 李嘉禄，刘　谦. 三维编织复合材料中纤维束走向的研究[J]. 纺织学报，1999，20(4)：7 - 10.

[13] 冼杏娟，李端义. 复合材料破坏分析及微观图谱 [M]，北京：科学出版社，1993. 10 - 45.

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