复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第 26 卷 第 3 期 6 月 2009 年
Vol. 26 No. 3 June 2009

文章编号：1000-3851(2009)03-0018-06

湿热、紫外环境对 T300/QY8911 复合材料孔板静力性能的影响

彭 雷，张建宇，鲍 蕊，费斌军*
（北京航空航天大学 固体力学研究所，北京 100191）

摘 要： 采用试验方法研究了湿热、紫外环境对 T300 碳纤维/QY8911 双马树脂复合材料静力拉伸和压缩性能的影响。针对 T300/QY8911 复合材料层板的中心开孔试件，进行了常温干态、湿热环境、紫外辐射以及湿热和紫外共同作用下的静力拉伸和压缩试验。吸湿试验的结果表明，T300/QY8911 复合材料试件的平衡吸湿率在 0.6%左右。静力试验的结果表明：孔板的拉伸强度受到环境的影响较小；湿热会降低由基体性能主导的压缩强度、刚度等复合材料性能，吸湿后 75℃和 105℃环境下试验件压缩强度分别下降 6.8%和 20.3%；而紫外使复合材料孔板的压缩强度有所升高，300 MJ/m^{2}以上的紫外辐射量使试验件的压缩强度提高了 10%左右，显示其对复合材料的性能有着更为复杂的影响规律，并且可能与湿热的影响存在交互作用。

关键词： 复合材料；湿热；紫外辐射；静力性能
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Effects of hygrothermal and ultraviolet conditions on static properties of T300/QY8911 laminated composites containing an open hole

PENG Lei, ZHANG Jianyu, BAO Rui, FEI Binjun*
(Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The environmental effects of the hygrothermal and UV (ultraviolet) conditions on carbon/bismaleimide composites' static tensile and compressive properties were presented. Specimens with open holes, manufactured by T300/QY8911 laminates, were tested under the environments of normal, hygrothermal, UV and hygrothermal/UV. The moisture absorption tests results indicate that the balance moisture content of the specimens is around 0.6%. The static tests reveal that the tensile strength is hardly affected by the environments. The compressive strength and modulus of the laminates, dominated by the matrix, are reduced by the hygrothermal conditions. The compressive strength of specimen decreases by 6.8% and 20.3% on the condition of 75℃ and 105℃ after moisture absorption, respectively. However, the compressive strength increases by about 10% after UV exposure (above 300 MJ/m^2), indicating their influence on the composite material is more complex, as interaction of the hygrothermal and UV conditions may exist.

Keywords: composites; hygrothermal condition; ultraviolet radiation; static property

碳纤维/树脂基复合材料具有比强度、比刚度高的特点，在现代航空领域的应用越来越多。除了承受各种复杂的载荷外，复合材料的性能还受着各种环境因素的影响，主要包括温度、潮湿环境、紫外辐射、化学腐蚀[1]，这些环境通过各种不同的机制对复合材料的力学性能产生影响。

国内外许多学者[2-8]的研究表明温度和湿度共同作用下的湿热环境对复合材料结构的力学性能有很大的影响。吸湿和高温是湿热环境下复合材料性能下降的主要原因。层间剪切强度、拉伸强度、压缩强度、破坏应变、刚度等复合材料主要的静力性能往往会随着吸湿量的增加而降低[2]。吸湿会导致复合材料聚合物基体可逆或不可逆的塑化，伴随着温度的影响，会显著改变基体材料的刚度和韧性。

收稿日期： 2008-05-12；**收修改稿日期：** 2008-10-13
通讯作者： 费斌军，教授，主要研究方向为结构疲劳可靠性、概率断裂力学 E-mail：feibj@buaa.edu.cn

同时湿热会引起复合材料尺寸上的变化，纤维材料和基体材料在尺寸变化上的不一致会产生导致纤维/基体界面性能下降的应力[3]。从微观尺度上来看，吸湿会使聚合物基体中的高分子链段被打断[4]，温度的升高又使得高分子链段具有更高的能量而变得不稳定[5]，这些因素均导致湿热环境下复合材料性能的变化。

国内对大气环境下紫外辐射引起复合材料性能变化的研究较少，国外一些学者[9-12]的研究结果认为紫外辐射会引起高分子聚合物类基体材料的老化，使其性能显著下降，而对碳纤维等纤维材料的性能基本无影响。高分子聚合物材料受紫外辐射的影响主要表现在 2 个方面：(1)表面颜色的变化。随着辐射量的增加，受紫外辐射的表面会呈现出越来越深的黄色。(2)力学性能的变化。紫外辐射会降低基体材料的强度、刚度等性能[9]。发生上述变化的根本原因是基体材料中的高分子聚合物吸收紫外线中具有比可见光更高能量的光子，从而具有更高的活化能以破坏化学键，在氧的参与下发生化学反应[10]。

目前对湿热或紫外环境下复合材料性能变化的研究大都将重点放在吸湿量、温度、紫外辐射量等环境因素对树脂材料、复合材料单向板或简单层板力学性能的影响上，而对含缺口、复杂铺层等实际工程中可能使用的复合材料结构在环境因素影响下力学性能变化的研究还较少。实际结构使用的铺层一般层数较多、铺层角度变化复杂，缺口会打断纤维的连续性并带来应力集中，这些因素都使得复合材料层板的力学性能受环境影响的规律有所变化。同时目前还很少对湿热和紫外辐射共同作用下复合材料力学性能的变化进行研究。本文中针对含中心开孔的均衡对称板，通过试验的方法研究湿热环境、紫外辐射对复合材料静力拉伸和压缩性能的影响规律，同时探讨湿热和紫外共同作用对复合材料力学性能的影响。

1　试　验

1.1　试验件与试验环境

采用的试验件分为开孔拉伸板和开孔压缩板，试件的形式分别参照 HB 6740－93 和 HB 6741－93 标准，拉伸试验件的尺寸为 Φ6 mm×300 mm×36 mm，压缩试验件为 Φ6 mm×250 mm×36 mm，均采用 T300 碳纤维/QY8911 双马来酰亚胺树脂预浸料制备。铺层形式为$[45/-45/0/-45/45/0/-45/90/0/45/\bar{0}]_S$，厚度均值为 2.54 mm，孔隙率不大于 1%，纤维体积含量均值为 63%。

试验安排如表 1 所示，每组试验各有 5 个试件。其中湿热环境是指对试验件在一定的温湿度环境下进行吸湿后再在相应的温度下进行静力试验；紫外环境中的数值表示辐射量；湿热与紫外共同作用下的试验顺序为：吸湿→紫外→补充吸湿，即对试验件首先进行平衡吸湿试验，然后进行紫外辐射，达到要求辐射量后，再进行补充吸湿，使每组试验件的吸湿量达到紫外试验前的平均吸湿量。

表 1 试验环境

Table 1　Test environments

Factor	Environment	Symbol	Test
None	Dry，25℃	D	Tension，Compression
Hygrothermal condition	Moisture，25℃	H1	Tension，Compression
	Moisture，75℃	H2	Tension，Compression
	Moisture，105℃	H3	Tension，Compression
UV	UV(160 MJ/m²)	UV1	Tension，Compression
	UV(300 MJ/m²)	UV2	Compression
	UV(600 MJ/m²)	UV3	Compression
UV and Hygrothermal condition	Moisture，75℃，UV(160 MJ/m²)	H2UV1	Tension，Compression
	Moisture，105℃，UV(160 MJ/m²)	H3UV1	Tension，Compression

1.2　吸湿试验

吸湿试验参照 HB 7401－96 标准进行，将试件在模拟大气最恶劣环境的 71℃、RH85%的环境中进行吸湿，试验设备为 HYGROS 1200C 型环境箱(意大利)。试验中每 24 h 将试件取出称量，称量设备为 FA2004 型电子分析天平。吸湿率由下式计算：

$$M = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100\%$$

式中：W 为吸湿后的质量；W_0 为试样烘干至工程干态时的质量。

经过 276 h 的吸湿后，试验件达到平衡吸湿状态，拉伸与压缩试件的平均吸湿率分别为 0.583% 和 0.632%。

1.3　紫外辐射试验

紫外辐射试验可以通过外场太阳光暴露和试验室加速模拟 2 种方法实现。由于一般情况下外场暴

露的自然环境是不可重复的，且很耗时，本文中选择通过试验室加速模拟的方法进行紫外辐射试验。试验室加速试验采用的光源应当与自然环境下太阳光相近，而氙灯光具有很宽的光谱范围，被证明可以很好地模拟太阳光辐射[10]。采用 LXD－70A 氙灯光老化试验箱来进行紫外辐射试验，试验参考了 GJB 150.7－86 标准，试验箱内温度控制为 35℃±5℃，湿度控制在 RH40%±10%。

紫外试验完成后，对试验件质量进行称量，发现吸湿试验件的吸湿量损失严重，基本恢复到吸湿前的水平。这主要是由于氙灯光中红外光对试验件的加热效应，使吸湿量散失。

图 1 给出了紫外辐射前后试验件表面变化的对比，可以看到，160 MJ/m^2 和 300 MJ/m^2 的紫外辐射强度均使试验件表面呈现明显的黄色(图中显示灰度越来越深)。

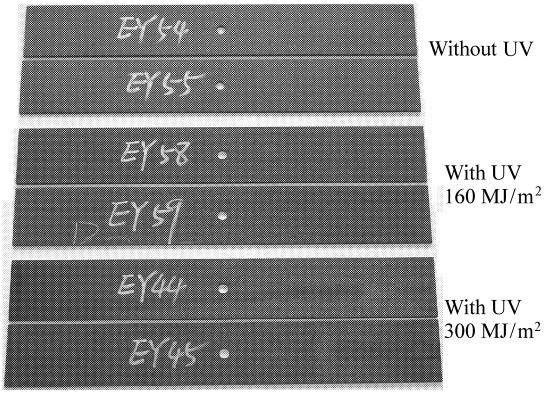

图 1　紫外辐射前后试件表面颜色变化

Fig. 1　Color change before and after UV exposure

1.4　静力拉伸与压缩试验

静力试验均在 Instron 8803 电液伺服材料试验机上完成。静力拉伸试验参照 HB 6740－93 标准进行，静力压缩试验参照 HB 6741－93 标准。为了防止试验件的整体屈曲失稳，压缩试验采用了带边界支持的防失稳夹具。图 2 给出了静力试验破坏后的试件形态。

2　试验结果及分析

2.1　吸湿率曲线

图 3 给出了 T300/QY8911 拉伸与压缩试件的平均吸湿率随时间变化的曲线。吸湿开始 2～3 天的时间为快速吸湿阶段，之后吸湿速率逐渐降低，吸湿率曲线趋于平缓。在快速吸湿阶段之后，压缩

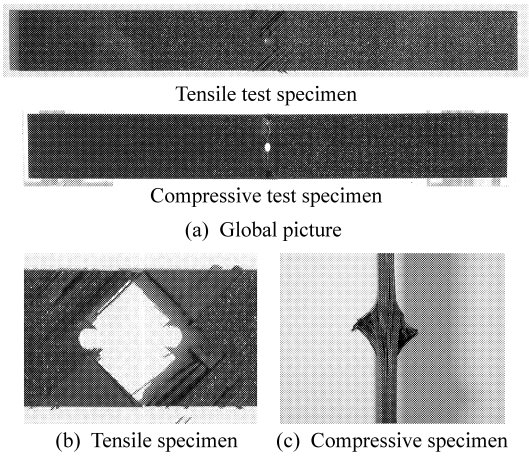

图 2　破坏后的试验件

Fig. 2　Specimens after damage

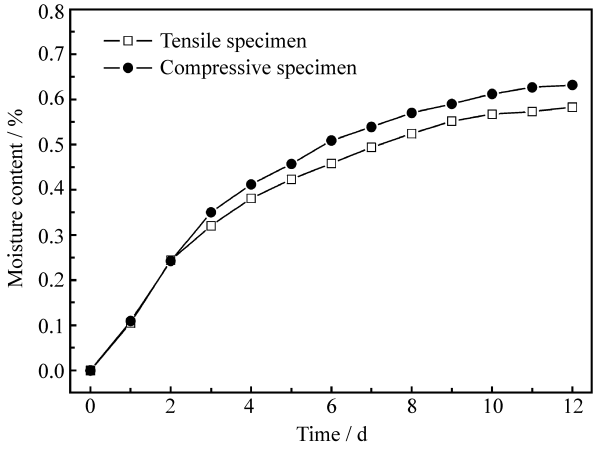

图 3　T300/QY8911 试件的吸湿率曲线(71℃，RH 85%)

Fig. 3　Moisture content curve of T300/QY8911 (71℃，RH 85%)

试验件的吸湿量高于拉伸试验件，这可能受到试验件尺寸、加工批次、工艺及试验称量误差等因素的影响。

2.2　静力拉伸性能

图 4(a)给出了不同的环境下 T300/QY8911 复合材料孔板拉伸强度的试验结果，包括试验均值及数据分散带。可以看到，湿热与紫外环境基本不影响含孔试件的拉伸强度。

图 4(b)给出了拉伸延伸率在不同试验环境下的变化。与常温干态环境相比，湿热环境下延伸率的均值略有增大，紫外辐射后延伸率均值略有降低，但除吸湿后 75℃环境下延伸率增大 8.5%外，其余环境延伸率变化并不显著。湿热与紫外辐射共同作用下的延伸率综合了湿热和紫外对拉伸试件延伸率的影响，与常温干态环境下相当。

图 4(c)给出试验件结构刚度随环境的变化。

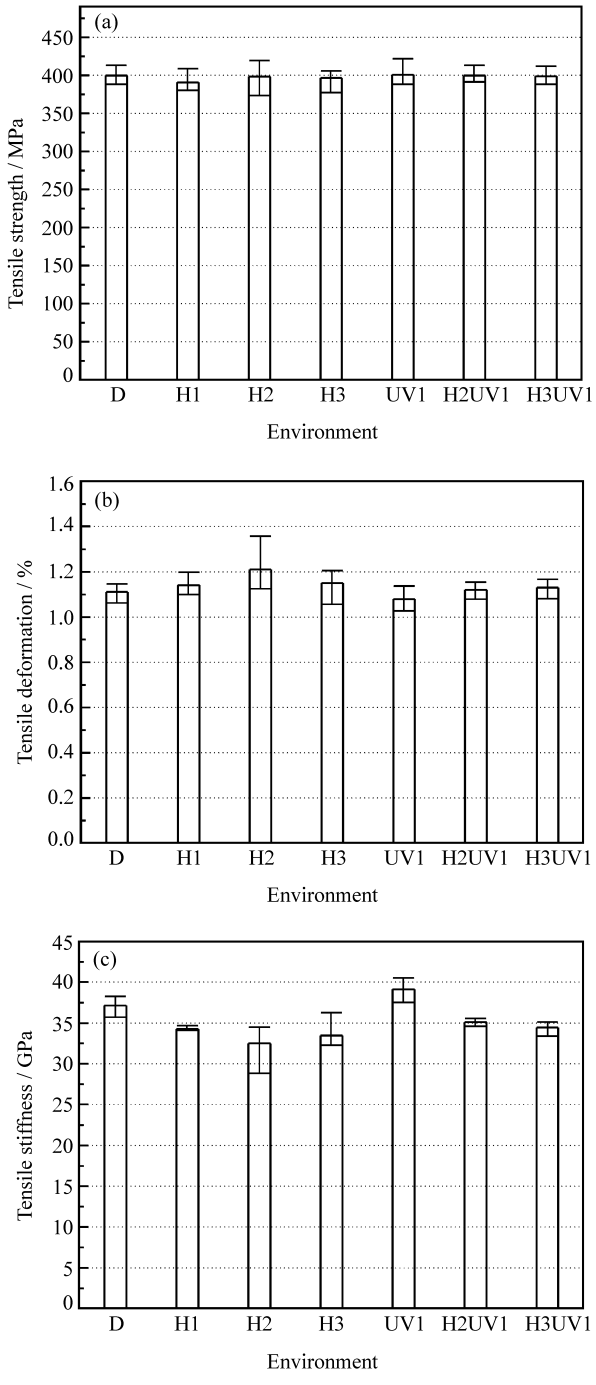

图 4　T300/QY8911 拉伸强度、延伸率及刚度随环境的变化

Fig. 4　Tensile strength, deformation and stiffness of T300/QY8911 specimen vs environment

可以看出，拉伸刚度受到了环境的显著影响，表 2 给出了各环境下拉伸刚度及相对常温干态环境下的变化率。湿热环境使试件拉伸刚度下降，而紫外辐射则提高了拉伸刚度；同延伸率一样，湿热和紫外的共同作用平衡了两者的影响。从数值上来看，湿热对拉伸刚度的影响强于紫外的影响，H2UV1 和 H3UV1 环境下的拉伸刚度都较常温干态下有所下降。

从机制上来讲，湿热降低了树脂基体材料的强度、刚度等性能，对纤维性能的影响则很小。紫外辐射对复合材料的影响也主要体现在对树脂基体材料性能的影响上。已有研究[9]表明，紫外辐射会降低树脂基体的拉伸与剪切强度、刚度、破坏应变等性能。复合材料层板纤维方向的拉伸强度主要由纤维强度决定，因此受环境影响很小。试验结果也表明，孔板的拉伸强度基本不受湿热、紫外环境的影响，但其延伸率和结构刚度受到基体材料韧性和刚度变化的影响。延伸率的试验结果反映出湿热环境对树脂基体的塑化以及紫外辐射对树脂基体的脆化的影响。拉伸刚度的试验结果同样反映了湿热降低了树脂材料刚度的影响，但紫外辐射却使孔板的拉伸刚度略有升高，表明紫外辐射对 QY8911 基体材料模量的影响有着更为复杂的规律，应当进行更为基础和细致的研究。

2.3　静力压缩性能

T300/QY8911 孔板的压缩强度和结构刚度的试验结果如图 5 所示。吸湿后的常温环境只增大了压缩强度的分散性，并未影响其均值；湿热环境下孔板的压缩强度随着温度的增加而有明显的降低；而紫外环境使得孔板的压缩强度有了较为明显的升高。表 3 给出了各环境下孔板压缩强度的对比。湿热和紫外环境对孔板试件压缩刚度均值的影响规律与压缩强度相似，但除了 H3 和 H3UV1 环境下压缩刚度相对比常温干态下分别下降 7.9% 和 6.1% 外，其余环境下压缩刚度的变化并不显著。

复合材料压缩强度受基体材料性能的影响较大，湿热环境下 T300/QY8911 孔板的压缩强度试验结果反映了湿热降低树脂基体强度的影响。但紫外环境下试件的压缩强度比常温干态下增大。虽然有研究者曾提到在某些情况下吸湿会使某些由基体主导的复合材料力学性能有所提高[4]，但在紫外对复合材料的影响上却没有类似的报告。这表明紫外可能以更为复杂的方式对复合材料树脂基体的性能产生影响。这可能是紫外辐射导致试件中心孔边的表层产生了损伤，降低了孔边的应力集中，因此使得孔板的整体压缩强度有所升高。由于本试验中只采用了 1 种铺层的试件，这一结论有待进一步的验证。

表 2　各种环境下 T300/QY8911 试验件的拉伸刚度

Table 2　Tensile modulus of T300/QY8911 specimen

Environment	D	H1	H2	H3	UV1	H2UV1	H3UV1
Tensile modulus/GPa	37.13	34.27	32.50	33.43	39.14	35.12	34.46
Compare to dry/%	0	−7.7	−12.5	−10.0	5.4	−5.4	−7.2

表 3　各种环境下 T300/QY8911 试验件的压缩强度

Table 3　Compressive strength of T300/QY8911 specimen

Environment	D	H1	H2	H3	UV1	UV2	UV3	H2UV1	H3UV1
Compressive strength/GPa	344.8	342.5	321.5	275.0	367.9	381.2	383.6	355.5	263.1
Compare to dry/%	0	−0.7	−6.8	−20.3	6.7	10.5	11.3	3.1	−23.7

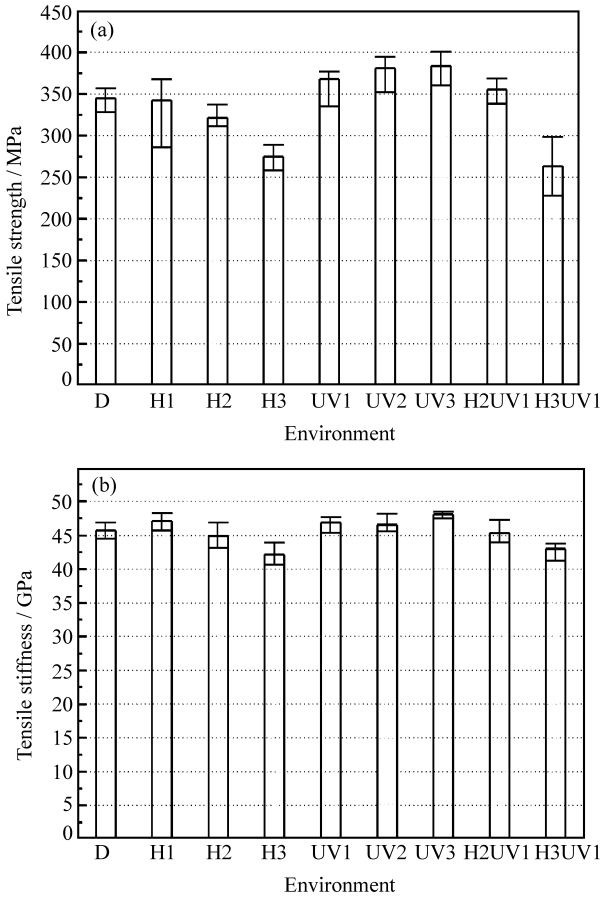

图 5　T300/QY8911 压缩强度及刚度随环境的变化

Fig. 5　Compressive strength and stiffness of T300/QY8911 specimen vs environment

另一值得注意的现象是，比较 H2 和 H2UV1，H3 和 H3UV1 可以发现，有无紫外吸湿后 75℃环境和吸湿后 105℃环境下的压缩强度分别产生了相反的影响。160 MJ/m^2 的紫外辐射增加了吸湿后 75℃环境下的压缩强度，但降低了吸湿后 105℃环境下的压缩强度。这说明湿热与紫外对复合材料压缩强度的影响存在交互作用，而不是简单的叠加。

3　结　论

（1）T300/QY8911 试件在 71℃、85%相对湿度环境下的平衡吸湿率在 0.6%左右。

（2）湿热和紫外环境对 T300/QY8911 均衡对称孔板的拉伸强度没有影响；湿热对树脂材料的塑化及紫外对树脂的脆化导致湿热和紫外环境下试件延伸率分别有所增大和降低；孔板试件的拉伸刚度在湿热环境下降，但在紫外辐射后却有所上升。

（3）湿热环境降低了 T300/QY8911 均衡对称孔板的压缩强度；但紫外辐射产生了相反的结果，表明紫外对复合材料树脂基体的性能可能有更为复杂的影响；同时湿热、紫外共同作用下压缩强度的试验结果表明 2 种环境对复合材料性能的影响存在交互作用。

参考文献：

[1]　Selzer R，Friedrich K. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fiber-reinforced polymer composites under the influence of moisture [J]. Composites Part A，1997，28A：595-604.

[2]　Wolff E G. Moisture effects on polymer matrix composites [J]. SAMPE Journal，1993，29(3)：11-19.

[3]　Costa M L，Rezende M C，de Almeida S F M. Strength of hygrothermally conditioned polymer composites with voids [J]. Journal of Composite Materials，2005，39(21)：1943-1961.

[4]　Zhou J，Lucas J P. Hygrothermal effects of epoxy resin Ⅰ：The nature of water in epoxy [J]. Polymer，1999，40：5505-5512.

[5]　李　敏，张宝艳. 改性双马树脂/碳纤维复合材料体系耐湿热性能研究[J]. 热固性树脂，2006，21(5)：25-27.

Lin Min, Zhang Baoyan. Study on the hydrothermal properties of a modified bismaleimide resin/carbon fiber composite [J]. Thermosetting Resin, 2006, 21(5): 25-27.

[6] Cândido G M, Costa M L, Rezende M C, et al. Hygrothermal effects on quasi - isotropic carbon epoxy laminates with machined and molded edges [J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(3): 490-496.

[7] Adda - Bedia E A, Bouazza M, Tounsi A, et al. Prediction of stiffness degradation in hygrothermal aged [$\theta_m/90_n$]s composite laminates with transverse cracking [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1/3): 199-205.

[8] 管国阳，矫桂琼，潘文革. 湿热环境下复合材料的混合型层间断裂特性研究[J]. 复合材料学报，2004，21(2)：82-86.
Guan Guoyang, Jiao Guiqiong, Pan Wen'ge. Experimental study on the interlaminar fracture toughness of composite laminate on hygrothermal conditions [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 82-86.

[9] Shokrieh M M, Bayat A. Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites [J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(20): 2443-2455.

[10] Jacques L F E. Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coating [J]. Progress in Polymer Science, 2000, 25: 1337-1362.

[11] Compston P, Schiemer J, Cvetanovska A. Mechanical properties and styrene emission levels of a UV - cured glass - fibre/vinylester composite [J]. Composite Structures, 2008, 86(1/3): 22-26.

[12] Gu H. Degradation of glass fibre/polyester composites after ultraviolet radiation [J]. Materials & Design, 2008, 29(7): 1476-1479.

KEYWORDS FOR COMPOSITES

A: MATERIAL

aramid fibre
carbon fibre
carbon-carbon composites
ceramic fibre
ceramic-matrix composites
discontinuous reinforcement
fabrics/textiles
fibres
foams
glass fibres
glasses
honeycomb
hybrid
intermetallics
lamina/ply
laminates
layered structures
metal-matrix composites
moulding compounds
nano-structures
particle-reinforcement
plates
polymer(textile)fibre
polymer-matrix composites (PMCs)
preform
prepreg
recycling
resins
smart materials
strand
tape
thermoplastic resin
thermosetting resin
thin films
tow
3-dimensional reinforcement
wood
yarn

B: PROPERTY

adhesion
anisotropy
buckling
chemical properties
corrosion
creep
cure behaviour
damage tolerance
debonding
defects
delamination
directional orientation
elasticity
electrical properties
embrittlement
environmental degradation
fatigue
fibre/matrix bond
fracture
fracture toughness
fragmentation
hardness
high-temperature properties
impact behaviour
interface/interphase
internal friction/damping
magnetic properties
mechanical properties
microstructure
optical properties/techniques
physical properties
plastic deformation
porosity
residual/internal stress
rheological properties
strength
stress concentrations
stress relaxation
stress transfer
surface properties
thermal properties
thermomechanical
transverse cracking
vibration
wear
wettability

（下转 194 页）