

复合材料层合板拉压和面内剪切性能的分散性实验研究

Study of Experimental Investigation of Tensile Compress and In-plane Shear Properties Dispersibility of Composite Laminate

朱振涛, 王佩艳, 王富生, 岳珠峰

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

ZHU Zhen-tao, WANG Pei-yan, WANG Fu-sheng, YUE Zhu-feng

(Department of Engineering Mechanics, Northwestern

Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 针对纤维增强 T300/QY8911 复合材料层合板进行大子样纵向拉伸、压缩实验和面内剪切实验, 得到了材料拉伸、压缩、面内剪切的主要力学性能参数。研究纤维增强复合材料的刚度和强度特性, 发现纵向拉压以及面内剪切应力-应变曲线都几乎为直线, 具有脆性破坏的特点。并且利用统计学原理对实验结果进行统计分析, 研究各力学性能参数的分布特性, 结果表明: 三参数威布尔分布、正态分布、对数正态分布能较好地描述各力学性能参数的分布规律, 最后给出复合材料层合板拉、压、剪切性能的分散性参数。

关键词: 复合材料; 力学性能; 分散性; 实验研究

中图分类号: TB 332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2010)06-0020-06

Abstract: For fiber reinforced T300/QY8911 composite laminate, the tensile, compress and in-plane shear experiments were carried out to get main mechanical characters. The strength and rigidity characters of the fiber reinforced composites are studied and found that the stress-strain relations of tension compression and shear are almost linear, specimen's failure is abrupt. The distribution properties of the mechanical characters are also studied with the method of statistical analysis. The result of the statistical analysis shows that 3-parameter weibull distribution, Normal distribution and lognormal distribution are good functions to describe the distribution properties of the mechanical characters. Finally, the parameters of the dispersibility of the tensile compress and shear properties of composite laminate are given.

Key words: composite laminate; mechanical property; dispersibility; experimental investigation

复合材料因为比强度高、比刚度高、可设计性强、抗疲劳断裂性能好、耐腐蚀、结构尺寸稳定以及便于大面积成形等独特优点, 使其在航空领域应用日益广泛, 继铝、钢、钛之后, 已迅速发展成四大航空结构材料之一。复合材料结构设计的一个发展趋势是充分利用该材料的优越性能, 不断挖掘材料潜力。一个最重要的表现就是提高其设计许用值。但是, 随着许用值的提高, 其安全问题越来越受到人们的重视。所以对复合材料性能的准确预测、评估成为研究的焦点。复合材料的许多破坏失效现象(比如断裂)与复合材料的细观结构有密切关系。由于复合材料的细观结构和组元材料的性能具有分散性, 所以导致复合材料的平均性能也表现出一定的分散性^[1]。这就要求对材料弹性性能的分散性进行研究。文献[2]对纤维体积分数的随机性进

行了研究。文献[3]研究了组分材料性能随机变化时, 复合材料宏观性能的分散性。文献[4]对纤维位置随机变化引起的材料性能的分散性进行了研究。然而, 以上研究大都是建立在计算机模拟基础上的, 本研究通过对复合材料层合板进行大子样的拉伸、压缩以及面内剪切实验, 获得了材料的强度、模量以及泊松比。通过分析实验结果, 得到大子样下复合材料层合板拉伸、压缩以及剪切性能的有实验结果支撑的分散性模型, 为可靠性模型的建立提供更为真实的模型和数据。

1 实验

实验用的复合材料层合板取自某型号飞机的平尾部位, 其铺层顺序为[90/0/-45/45/90/0]_s, 外面有一

层正交编织铺层。复合材料的基体是 QY8911 双马来酰胺树脂, 增强物为 T300 碳纤维束。实验在 Instron5567 试验机上进行, 加载速率 0.2mm/min。用应变片来采集应变, 在拉压实验件表面几何中心粘贴 ($0^{\circ}, 90^{\circ}$) 正交电阻应变花, 用来测量纵向和横向应变值; 在剪切实验件表面则粘贴 ($\pm 45^{\circ}$) 电阻应变花, 来测量 $\pm 45^{\circ}$ 的应变值。

拉伸压缩试样的形状如图 1 所示, 剪切试样见图 2。为防止试件被试验机夹头压碎, 试件的两端贴有硬铝加强片。压缩试件的长度比拉伸试件短是为了保证试件不发生弯曲破坏, 并且压缩实验和剪切实验中还要注意实验件与夹具之间的连接细节。拉伸压缩试样的尺寸见表 1。

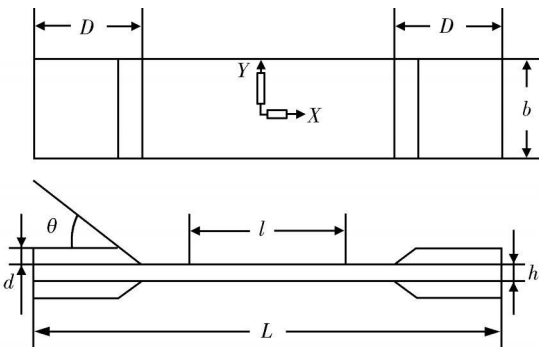


图 1 拉压试件示意图
Fig. 1 Tensile and compress specimen

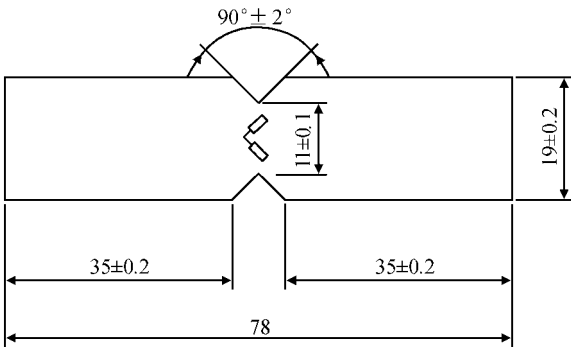


图 2 剪切试件示意图
Fig. 2 Shear specimen

表 1 拉压试样尺寸

Table 1 The dimension of tensile and compress specimen							
	L/mm	b/mm	h/mm	l/mm	D/mm	d/mm	$\theta/(^{\circ})$
Tensile specimen	170	25	2	70	50	2	30
Compress specimen	110	12.5	2	20	45	2	30

2 实验结果与分析

2.1 拉伸实验结果与分析

图 3 是拉伸试件破坏后的断口形貌, 可以看出各

铺层断裂位置不一, 厚度方向呈现参差断口, 破坏的方式有纤维束的拉断、纤维束的拔出和分层, 并有很明显的“层拔出”现象, 这是因为 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 纤维束之间结合较好时, 纵向裂纹很少从同一层面内的 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 纤维束之间扩展, 大部分沿层间扩展, 发生分层, 当 0° 纤维束拉伸断裂拔出时, 将 90° 纤维束带走, 形成层状拔出。对实验件从开始加载一直到试件的最后破坏, 整个应力-应变曲线几乎都呈线性特征, 说明试件发生的是脆性断裂。本实验共对 90 个实验件进行了拉伸实验, 最终得到抗拉强度值 90 组、弹性模量值 88 组、泊松比 87 组。以下的分析统计都是建立在实验得到的抗拉强度和由曲线得到的弹性模量和泊松比基础上的。对 90 个拉伸实验件的抗拉强度、弹性模量、泊松比进行统计分析, 计算得到各自的均值、标准差以及变异系数, 统计结果列于表 2。

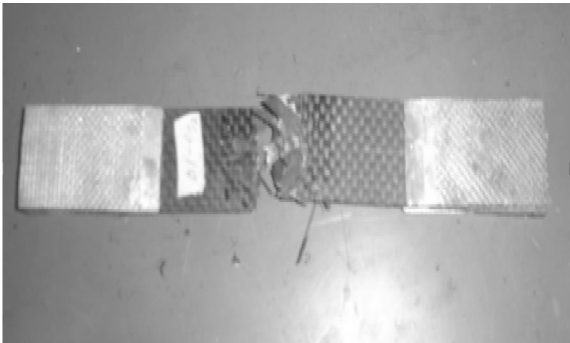


图 3 破坏后的拉伸试件
Fig. 3 Fracture of the tensile specimen

表 2 拉伸实验结果统计

Table 2 The statistics of tension results			
Physical quantity	Tensile strength	Tensile modulus	Poisson's ratio
	S_T/MPa	E_T/GPa	ν^T
Average value	621.84	63.345	0.17949
Standard deviation	43.81	4.586	0.02228
Coefficient of variation	0.0705	0.0724	0.1241

对 90 组实验数据在 Anderson-Darling 经验拟合基础上, 采用穷举法对数据进行统计分析, 并根据以下假设检验来检验数据的分布特性:

设经验分布函数 $F_n(x)$ 是总体分布函数 $F(x)$ 的估计, 假设检验问题为:

$$H_0: F(x) = F_0(x) \quad H_1: F(x) \neq F_0(x)$$

Anderson-Darling 统计量为:

$$AD = n \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - F_0(x)]^2 [F_0(x)(1 - F_0(x))]^{-1} dF_0(x)$$

Anderson-Darling 检验的 P 值方法为: 给定显著水平 α , 计算 p 值:

$$p = P\{AD \geq AD_0\}$$

其中 AD_0 是根据样本观测值 x_1, x_2, \dots, x_n 计算得到的 AD 值, 当 $p < \alpha$ 时, 拒绝假设 H_0 , 否则接受假设 H_0 , 即认为统计数据服从从所设的分布函数。

此时给定的显著水平 $\alpha = 0.05$, 即置信区间为 95%, 统计结果表明, 抗拉强度和拉伸模量与三参数威布尔分布拟合较好, 具体的拟合曲线和分布概率观测图见图 4, 5 和图 6, 7, 其中抗拉强度和拉伸模量与三参数威布尔分布拟合的 P 值均大于 0.5, 远远大于显著水平 $\alpha = 0.05$ 。拉伸泊松比与正态分布拟合较好, 具体的拟合分布直方图见图 8, 图 9 为拉伸泊松比的正态分布拟合概率图, 由图可知当置信区间为 95%, 泊松比分布为正态分布时, 有两个实验数据没有在置信区间内, 其余数据均位于置信区间以内。其中泊松比与正态分布拟合的 P 值为 0.316, 也远大于显著水平 $\alpha = 0.05$, 说明实验数据与正态分布拟合的很好。

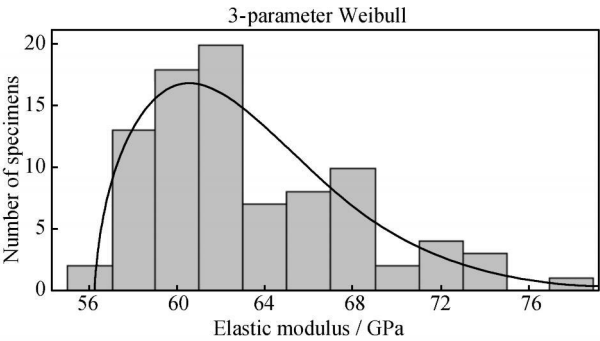


图 6 拉伸模量分布直方图
Fig. 6 Histogram of tensile elastic modulus

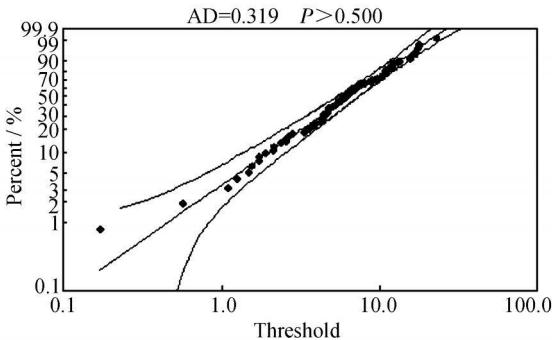


图 7 拉伸模量的分布拟合概率图
Fig. 7 3-parameter Weibull probability plot

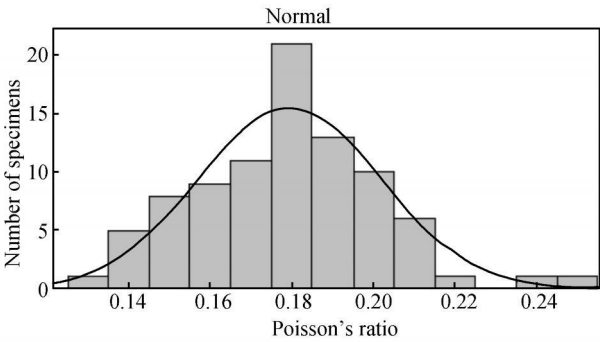


图 8 拉伸泊松比分布直方图
Fig. 8 Histogram of tensile poisson's ratio

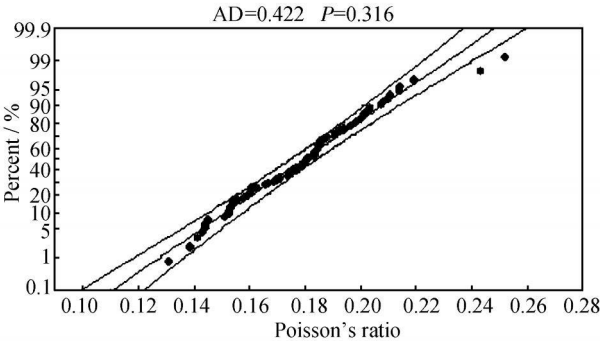


图 9 拉伸泊松比的分布拟合概率图
Fig. 9 Normal probability plot of tensile poisson's ratio

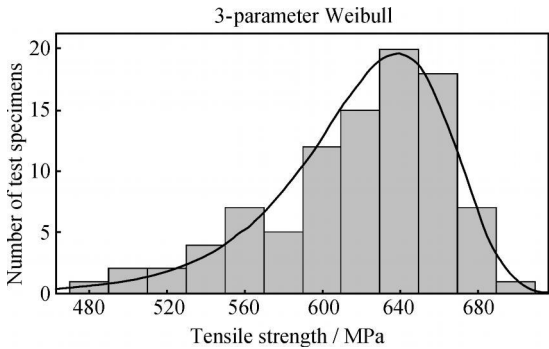


图 4 抗拉强度分布直方图
Fig. 4 Histogram of tensile strength

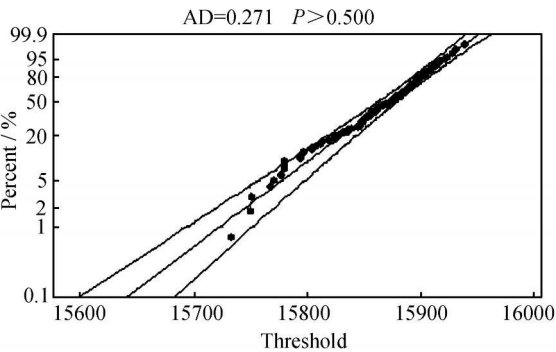


图 5 抗拉强度的分布拟合概率图
Fig. 5 3-parameter weibull probability plot

根据以上的统计结果, 并结合图 4~ 9 可得到该复合材料的分散性模型, 具体表达式为: 抗拉强度

$$S_T \sim 3\text{-parameter}$$

$$\text{Weibull}(475, 3, 15892, 1, -15251),$$

$$f(x) = \frac{475.3}{15892.1} (x + 15251)^{474.3} \exp\left[-\left(\frac{x + 15251}{15892.1}\right)^{475.3}\right]$$

拉伸模量 $E_T \sim 3\text{-parameter Weibull}(1.6039, 7.9476, 56.2228)$, $f(x) = \frac{1.6039}{7.9476^{1.6039}} (x - 56.2228)^{0.6039} \exp\left[-\left(\frac{x - 56.2228}{7.9476}\right)^{1.6039}\right]$

泊松比 $\nu \sim N(0.17949, 0.000496)$,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.02228} \exp\left[-\frac{(x - 0.17949)^2}{2 \times 0.02228^2}\right]$$

2.2 压缩实验结果与分析

压缩实验得到的应力-应变曲线形式和拉伸实验的应力-应变曲线基本一致, 曲线呈线性特征, 最后发生脆性断裂。以下是对由 82 个压缩实验件得到的 82 组压缩强度, 80 组压缩模量和 80 组泊松比进行的统计分析, 将其均值和标准差列于表 3。

表 3 压缩实验结果统计

Table 3 The statistics of compress results

Physical quantity	Compress strength S_c / MPa	Compress modulus E_c / GPa	Poisson's ratio ν
Average value	415.39	54.388	0.17136
Standard deviation	81.16	6.716	0.03277
Coefficient of variation	0.1954	0.1235	0.1912

比较拉伸实验结果和压缩实验结果, 发现拉伸实验的强度、模量和泊松比与压缩实验有所不同。可以发现, 拉伸强度明显大于压缩强度, 这主要是由于两者的破坏机理不同, 拉伸强度主要由纤维束的拉伸强度决定, 而压缩强度主要是由纤维束和基体之间的界面性能以及纤维束的压剪组合破坏情况所决定; 还可以发现, 由压缩实验得到的各材料性能的参数的变异系数均大于拉伸实验, 说明压缩实验的数据分散性较拉伸实验大。将该批实验数据在 Anderson-Darling 经验拟合基础上, 采用穷举法对数据进行统计分析, 分别给出压缩强度、压缩模量和压缩泊松比的分布直方图及分布拟合概率图, 如图 10~ 15 所示。

从图 10~ 15 可以看出, 压缩强度和压缩模量与正态分布(Normal)拟合的较好, 其与正态分布拟合的 P 值分别达到 0.792 和 0.789, 远大于给定的显著水平 $\alpha=0.05$ 。并且当压缩强度和压缩模量服从正态分布时, 实验数据能完全落在 95% 的置信区间以内, 这充分说明了压缩强度和压缩模量服从正态分布是真实可信的。而压缩泊松比则与对数正态分布拟合较好,

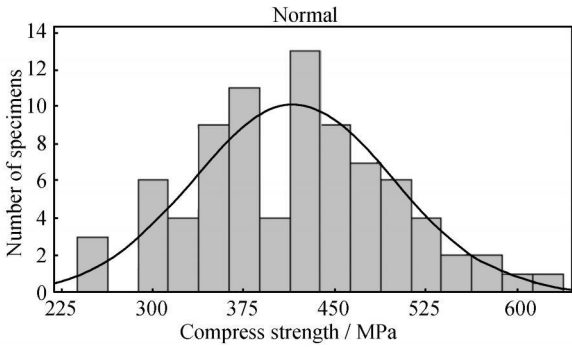


图 10 压缩强度分布直方图

Fig. 10 Histogram of compress strength

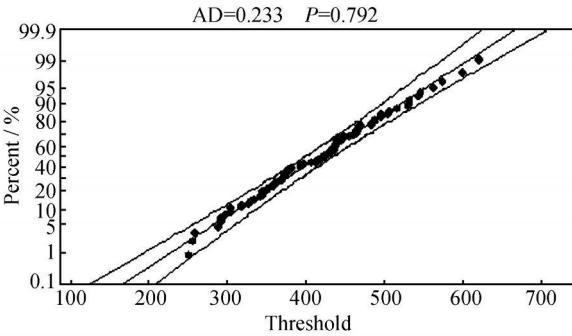


图 11 压缩强度的分布拟合概率图

Fig. 11 Normal probability plot of compress strength

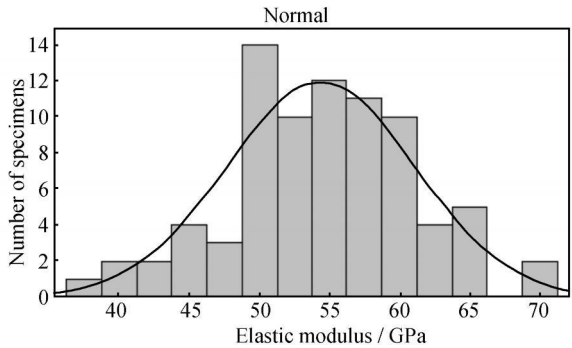


图 12 压缩模量分布直方图

Fig. 12 Histogram of compress elastic modulus

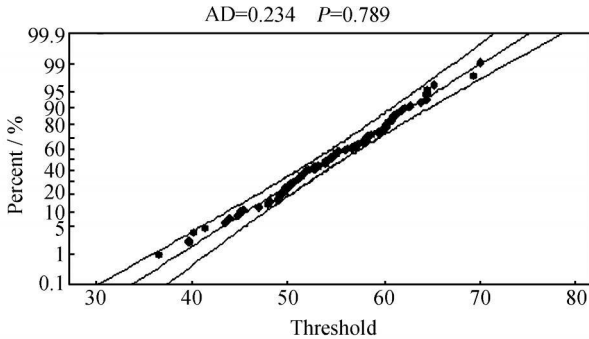


图 13 压缩模量的分布拟合概率图

Fig. 13 Normal probability plot of compress elastic modulus

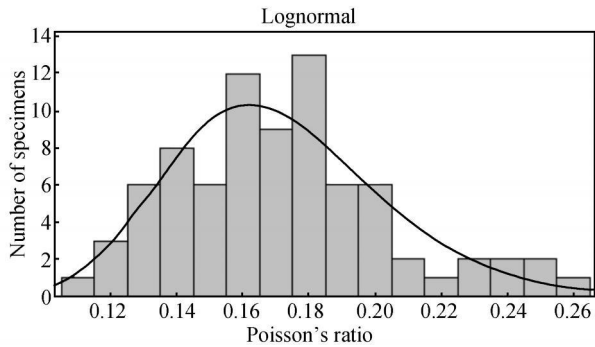


图 14 压缩泊松比分布直方图
Fig. 14 Histogram of compress poisson's ratio

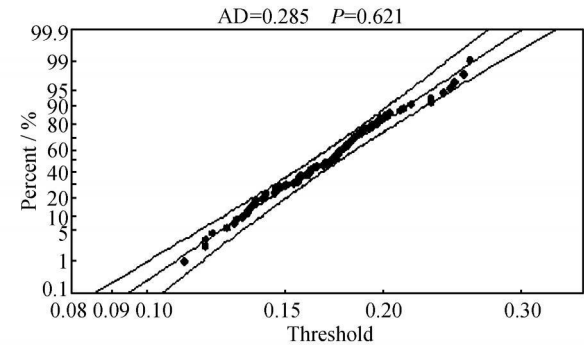


图 15 压缩泊松比的分布拟合概率图
Fig. 15 Lognormal probability plot of compress poisson's ratio

Anderson-Darling 的 AD 统计量为 0.285, 拟合的 P 值为 0.621 大于 $\alpha = 0.05$ 。另外其他的一些检验, 如相关系数法、变异系数法等也显示压缩泊松比与对数正态分布拟合的很好。

根据图 10~ 15 拟合的曲线, 可以得到该材料压缩性能的分散性模型, 其具体表达式如下:

压缩强度 $S_c \sim N(415.39, 6586.36)$, 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 81.16} \exp\left[-\frac{(x - 415.39)^2}{2 \times 81.16^2}\right]$$

压缩模量 $E_c \sim N(54.388, 45.111)$, 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 6.716} \exp\left[-\frac{(x - 54.388)^2}{2 \times 6.716^2}\right]$$

压缩泊松比 $\nu^c \sim \ln(-1.7816, 0.1879)$, 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.1879x} \exp\left[-\frac{(\ln x + 1.7816)^2}{2 \times 0.1879^2}\right]$$

2.3 剪切实验结果与分析

对 30 个剪切实验件的剪切强度、剪切模量进行统计分析, 将计算得到的各量的均值及标准差列于表 4。

图 16~ 19 是 30 组剪切强度和剪切模量的统计分布图, 通过对 T 300/ QY8911 复合材料的剪切强度性能的统计分布检验发现, 剪切强度性能遵循对数正态分布; 而剪切模量则遵循正态分布。由分布拟合的概

表 4 剪切实验结果统计

Table 4 The statistics of shearing results

Physical quantity	Shear strength S_{xy} / MPa	Shear modulus G_{xy} / GPa
Average value	161.36	12.087
Standard deviation	25.95	2.216
Coefficient of variation	0.1608	0.1833

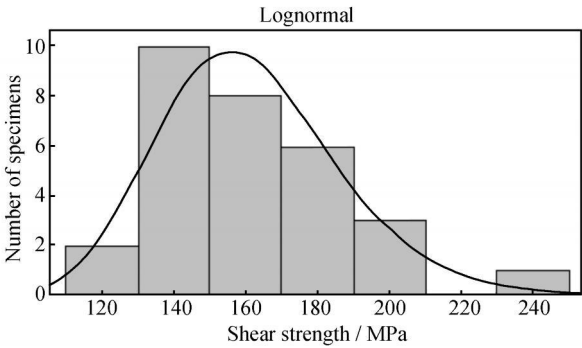


图 16 剪切强度分布直方图
Fig. 16 Histogram of shear strength

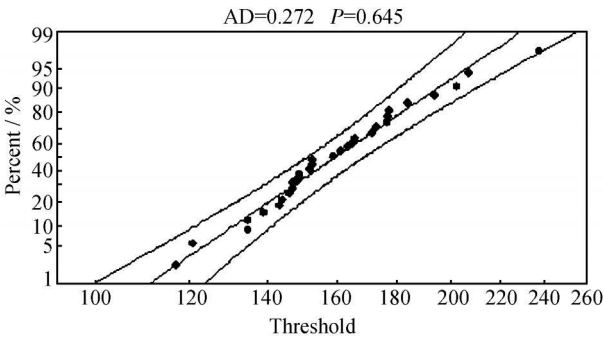


图 17 剪切强度的分布拟合概率图
Fig. 17 Lognormal probability plot of shear strength

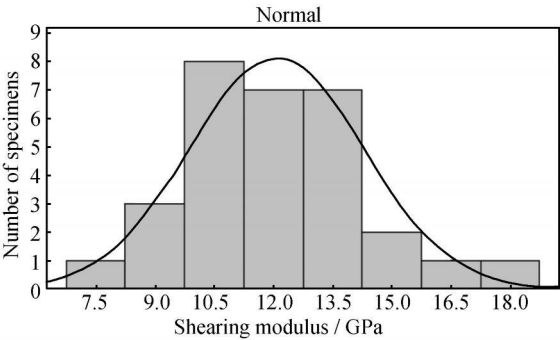


图 18 剪切模量分布直方图
Fig. 18 Histogram of shear modulus

率图(图 17, 19)可以清楚地看到不管是强度数据还是模量数据均位于指定的 95% 的置信区间内, 说明了实验数据与所给定的分布是符合的。并且经假设检验发

现, 剪切强度和剪切模量都通过了 Anderson-Darling 拟合优度检验。

根据剪切实验数据统计分析的结果, 得到材料剪切性能的分散性模型, 具体表达式如下:

剪切强度 $S_{xy} \sim \ln(5.0718, 0.1553)$, 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.1553x} \exp\left[-\frac{(\ln x - 5.0718)^2}{2 \times 0.1553^2}\right]$$

剪切模量 $G_{xy} \sim N(12.087, 2.216^2)$, 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 2.216} \exp\left[-\frac{(x - 12.087)^2}{2 \times 2.216^2}\right]$$

3 结论

(1) T300/QY8911 复合材料层合板的纵向拉、压以及剪切应力-应变曲线均为直线, 其破坏可认为是脆性破坏。

(2) 通过对拉、压、剪实验结果的统计分析, 认为抗拉强度和拉伸模量服从三参数威布尔分布; 压缩强度、压缩模量、剪切模量以及拉伸泊松比服从正态分布; 剪切强度和压缩泊松比则服从对数正态分布。得到了复合材料拉、压、剪切性能的分散性模型参数, 并给出了分散性模型的具体表达式。

(3) 本实验方法和分析过程可以用于研究复合材料其他结构性能参数的分散性。可扩充由实验结果支持的材料参数分散性模型库, 为可靠性应用理论的研究提供真实可靠的数据, 缩短可靠性理论到实际应用的研究周期。

参考文献

- [1] GRAHAM L L, GURLEY B K, MASTER F. Nongaussian simulation of local material properties based on a moving window technique[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2003, 18: 223-234.
- [2] 范建华, 杨庆雄. 复合材料弹性模量随机计算模型[J]. 复合材料学报, 1998, 15(4): 134-138.
- [3] 宋迎东, 孙志刚, 高希光. 纤维增强复合材料有效性能分散性的研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 230-235.
- [4] 高希光, 宋迎东, 孙志刚. 纤维位置随机引起的复合材料性能分散性研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 584-589.
- [5] 王佩艳, 岳珠峰. 大子样下复合材料层合板拉伸性能分散性研究[J]. 机械强度, 2007, 29(6): 1005-1008.
- [6] GUILLAUMAT L, HAMDOUM Z. Reliability model of drilled composite materials[J]. Composite Structures, 2006, 74: 467-474.
- [7] NGAH M F, YOUNG A. Application of the spectral stochastic finite element method for performance prediction of composite structures[J]. Composite Structures, 2007, 78: 447-456.
- [8] 熊峻江, 刘洪天, 寇长河, 等. 复合材料可靠性设计的小子样系数法[J]. 复合材料学报, 2001, 18(3): 111-118.
- [9] 邓建, 古得生, 李夕兵. 确定可靠性分析 Weibull 分布参数的概率加权矩法[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 609-613.
- [10] 傅惠民. 分散性和落入概率整体推断方法[J]. 机械强度, 2006, 28(2): 216-219.

收稿日期: 2009-04-13; 修订日期: 2009-11-20

作者简介: 朱振涛(1981—), 男, 硕士研究生, 现从事先进复合材料力学行为研究工作, 联系地址: 北京市 9200 信箱 10 分箱 13 号(100076), E-mail: ztzh2008@yahoo.com.cn

(上接第 19 页)

- [7] RAO A V, KULDARNI M M, AMALNERKAR D P. Superhydrophobic silica aerogels based on methyltrimethoxysilane precursor[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2003, 330: 187-195.
- [8] RAO A V, KULKARNI D P, SETH T. Surface chemical modification of silica aerogels using various alkyl-alkoxy/chloro silanes[J]. Applied Surface Science, 2003, (206): 262-270.
- [9] RAO A V, MANISH S K. Hydrophobic properties of TMOS/TMES based silica aerogels[J]. Materials Research Bulletin, 2002, 37: 1667-1677.
- [10] RAO A V, PAJONK G M. Effect of methyltrimethoxysilane as a co-precursor on the optical properties of silica aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285: 202-209.
- [11] RAO A V, HARANATH D. Effect of methyltrimethoxysilane as a synthesis component on the hydrophobicity and some physical

properties of silica aerogels[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 1999, 30: 67-273.

- [12] RAO A V, PAJONK G M. Effect of methyltrimethoxysilane as a co-precursor on the optical properties of silica aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285: 202-209.
- [13] FRITZ S, GLAUBITT W, SCHUBERT U. Hydrophobic aerogels from Si(OMe)₄M eSi(OMe)₃ mixtures[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1992, 145: 85-89.

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划项目(0701012B)

收稿日期: 2009-05-30; 修订日期: 2009-09-25

作者简介: 吴亚迪(1987—), 男, 主要从事纳米复合材料的研究, 联系地址: 北京市海淀区 81 号信箱 12 号分箱(100095), E-mail: mikko_wu@126.com