复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第2期 4月 2013年
Vol. 30 No. 2 April 2013

文章编号：1000-3851(2013)02-0254-06

# 木塑结构板材的可靠性预测

于贵文[1,2]，胡英成*[2]
（1. 哈尔滨商业大学 轻工学院，哈尔滨 150028；2. 东北林业大学 材料科学与工程学院，哈尔滨 150040）

**摘 要：** 通过纵波传播、纵向共振和弯曲振动三种方法对木塑结构板材的动态弹性模量（MOE）进行了无损检测。采用三点弯曲试验检测木塑结构板材的静态弹性模量和最大弯曲力（$F_m$）。运用最大弯曲力和动态弹性模量之间的回归方程，预测相同木塑结构板材的最大弯曲力，并采用一次二阶矩法评价木塑结构板材基于预测和检测的最大弯曲力的可靠性指标。结果表明：动态弹性模量和最大弯曲力间存在较强的相关性；基于预测最大弯曲力的可靠度大于基于检测最大弯曲力的可靠度，其最大差值为0.66%。

**关键词：** 木塑结构板材；无损检测；弹性模量；最大弯曲力；可靠性预测
**中图分类号：** TB332 **文献标志码：** A

## Reliability prediction for wood-plastic structural planks

YU Guiwen[1,2], HU Yingcheng*[2]
(1. Light Industry College, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;
2. College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The dynamic modulus of elasticity (MOE) of wood-plastic structural planks was measured nondestructively by the longitudinal transmission, longitudinal vibration, and flexural vibration test. Three point bending test was used to measured the static MOE and maximum bending force ($F_m$). The maximum bending force of same wood plastic structural planks was predicted by the regression formulas between dynamic MOE and $F_m$, and the First-Order Second-Moment method (FOSM) was used to analyze reliability index based on measured and predicted $F_m$. The results indicate that there is a significant correlation between dynamic MOE and $F_m$. The reliabilities of the wood-plastic structural planks based on predicted $F_m$ are slightly greater than that based on measured $F_m$, in which the biggest difference is 0.66%.

**Keywords:** wood-plastic structural plank; nondestructive testing; modulus of elasticity; maximum bending force; reliability prediction

振动法无损检测是基于材料的共振频率与弹性模量具有数学关系的原理，利用振动测量得到材料的共振频率，进而得到动态弹性模量[1]。国内外的许多学者对木材及其复合材料的振动无损检测进行了大量的研究工作：如利用云杉板材[1]、木质梁[2]、单板层积材[3]、纤维板[4]、木塑复合材料[5]的无损检测，得到了材料的动态弹性模量，并分析了动态弹性模量均值的精确性，以及动态弹性模量与静态弹性模量（或静曲强度）之间的相关性，建立了无损检测试验与弯曲试验之间数据的联系，为运用无损检测方法分析木塑复合材料的可靠性提供了理论依据；通过CFRP复合层板的无损检测[6]，验证了敲击法无损检测具有较高的灵敏度。

材料的可靠性研究主要集中在金属及其复合材料[7-8]、陶瓷[9]、木质层压板[10-12]等领域，其研究方法主要有一次二阶矩法、改进一次二阶矩法和蒙托卡罗法等，为木塑复合材料的可靠性研究提供了科学方法。

本文中以挤出成型的聚乙烯基木塑复合材料为研究对象，用其制造弹药箱。根据弹药箱的受力特

**收到初稿日期：** 2012-02-11；**收到修改稿日期：** 2012-05-17；**网络出版时间：** 2012-11-12 10:36:09
**网络出版地址：** www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20121112.1036.021.html
**基金项目：** 中央高校基本科研业务费专项资金（DL12EB03）；国家自然科学基金（31170516，31010103905）；黑龙江省自然科学基金（C201014）
**通讯作者：** 胡英成，教授，博士生导师，主要研究方向：木质复合材料及其力学性能研究 E-mail：yingchenghu@163.com

点，其底板木塑复合材料的力学性能和可靠性是弹药箱安全性能的关键因素。通过纵波传播、纵向共振和弯曲振动三种无损检测方法检测试件的动态弹性模量；通过三点弯曲试验获得试件的静态弹性模量和最大弯曲力；采用一次二阶矩法计算其可靠度。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 主要试验材料

试验材料采集于山东邹平三立特公司，为挤出成型聚乙烯基木塑结构板材，其密度为 1.29 g/cm$^3$，木塑比分别为 55%和 45%，试件的尺寸为 340 mm×60 mm×15 mm。

试验前，将所有的试件放入温度为(20±2)℃、相对湿度为 65%±5%的恒温室中，保持木塑结构板材的质量和内部湿度平衡。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 无损检测试验方法

动态弹性模量($E_V$)通过纵波传播方法获得，如图 1 所示。在试验中，声波通过试件的传播时间由快速傅里叶变换分析仪检测。声速和动态弹性模量可通过下式计算[13-15]：

$$V = l/T \tag{1}$$

$$E_V = \rho V^2 \tag{2}$$

式中：$V$ 是声速；$l$ 是试件的长度；$T$ 是声波的传播时间；$E_V$ 是通过纵波传播方法检测的动态弹性模量；$\rho$ 是试件的密度。

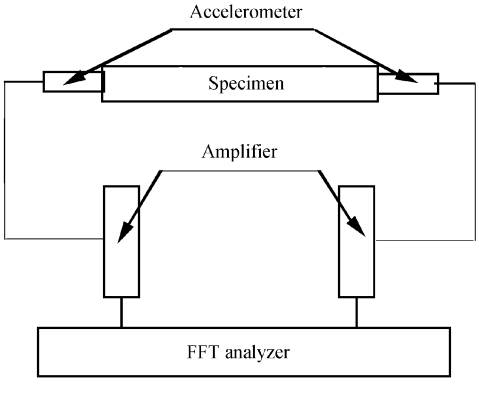


图 1 木塑结构板材的纵波传播试验

Fig. 1 Longitudinal transmission test of wood-plastic structural planks

纵向共振弹性模量($E_P$)通过纵向共振方法获得，如图 2 所示。试验中，用手轻轻地夹持试件的中间位置，用小锤敲击一端，敲击声波经扩音器放大，被快速傅里叶变换分析仪接收。其弹性模量可用下式计算[13-15]：

$$E_P = \rho\left(\frac{2lf_n}{n}\right)^2, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \tag{3}$$

式中：$E_P$ 是通过纵向共振方法检测的动态弹性模量；$\rho$ 是试件的密度；$l$ 是试件的长度；$f_n$ 是声频。

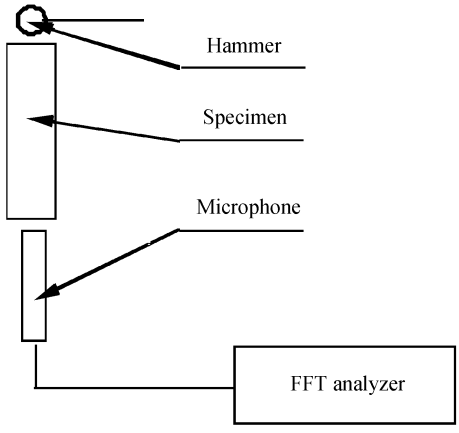


图 2 木塑结构板材的纵向共振试验

Fig. 2 Longitudinal vibration test of wood-plastic structural planks

动态弹性模量($E_1$)通过弯曲振动方法获得，如图 3 所示。试件平行地悬挂在两根线绳上，其悬挂点在试件两端 0.224$L$ 处，该点相当于整个振动系统的节点。振动频率通过高频的放大器进入快速傅里叶变换分析仪[13-15]。

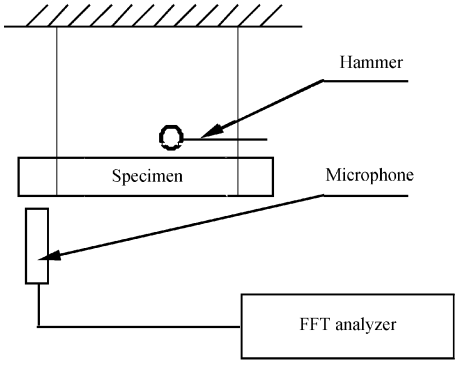


图 3 木塑结构板材的弯曲振动试验

Fig. 3 Flexural vibration test of wood-plastic structural planks

#### 1.2.2 静态弯曲试验方法

静态弯曲试验在温度 20 ℃，相对湿度 65%的试验室进行。

根据美国材料试验标准(ASTM D790－03)，应用最大载荷 100 kN 的万能试验机，以 10 mm/min 的

加载速度达到最大载荷，检测木塑结构板材的静态弹性模量和最大弯曲力，如图 4 所示。静态弹性模量($E_B$)可通过下式得到[16]：

$$E_B = L_1^3 m/(4bh^3) \tag{4}$$

式中：$E_B$ 是静态弹性模量；$L_1$ 是支撑跨度；$b$ 是试件的宽度；$h$ 是试件的厚度。

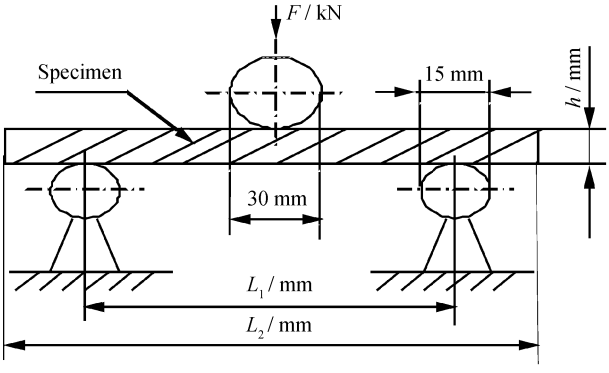


图 4　木塑结构板材的三点弯曲试验

Fig. 4　Three point bending test of wood-plastic structural planks

### 1.3　参数计算

木塑结构板材的力学试验结果参数(均值 $\mu$，标准差 $\sigma$，变异系数 COV)的计算公式如下：

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \tag{5}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \mu)}{n-1}} \tag{6}$$

$$\mathrm{COV} = \sigma/\mu \tag{7}$$

### 1.4　试验步骤

共有 40 块尺寸为 340 mm×60 mm×15 mm 的试件，分成 2 组，在每组中，各有 20 个相同规格的试件。

在第一组中，所有试件的动态弹性模量通过纵波传播、纵向共振和弯曲振动三种无损检测方法检测，相同试件的静态弹性模量和最大弯曲力通过三点弯曲试验检测。通过相关性分析，获得动态弹性模量和最大弯曲力间的回归方程。

在第二组中，所有试件的力学特性应通过上述的方法检测。根据在第 1 组中得到的线性回归方程，用不同的动态弹性模量预测相应试件的最大弯曲力，并采用一次二阶矩法，分析基于预测和检测最大弯曲力的试件的可靠度。

## 2　结果与讨论

### 2.1　动态和静态弹性模量

表 1 为第一组聚乙烯基木塑结构板材的力学试验结果。可见，通过纵波传播法取得的动态弹性模量($E_V$)是所有动态弹性模量中的最大值；通过纵向共振法获得的动态弹性模量($E_P$)处于 $E_V$ 和通过弯曲振动法获得的动态弹性模量($E_1$)之间；所有动态弹性模量均大于静态弹性模量。动态和静态弹性模量标准差的变化范围为 0.08 ～ 0.20 GPa，且动态和静态弹性模量的变异系数小于 3.1%，因此，动态和静态的弹性模量均值具有较高的精确性。

**表 1　第一组聚乙烯基木塑结构板材的力学试验结果**

**Table 1　Mechanical test results of polyethylene-based wood-plastic structural planks in group 1**

| Parameters | $E_V$ | $E_p$ | $E_1$ | $E_B$ |
|---|---|---|---|---|
| $\mu$ /GPa | 8.40 | 5.03 | 4.72 | 3.28 |
| $\sigma$ /GPa | 0.20 | 0.07 | 0.08 | 0.10 |
| COV/% | 2.06 | 1.47 | 1.60 | 3.01 |

Note: $E_V$ is dynamic modulus of elasticity (MOE) of longitudinal transmission; $E_P$ is dynamic MOE of longitudinal vibration; $E_1$ is dynamic MOE of flexural vibration; $E_B$ is static MOE; $\mu$ is mean value; $\sigma$ is standard deviation; COV is variation coefficient.

### 2.2　相关性分析

#### 2.2.1　$E_V$ 和 $F_m$ 的相关性分析

$E_V$ 和 $F_m$ 的回归曲线如图 5(a)所示。通过 $E_V$ 和 $F_m$ 之间的回归分析，可获得下列线性回归方程：$F_m = 0.2494E_V - 1.2122$，由于 $R_V = 0.7782 > R_{18,0.02} = 0.516$，所以 $E_V$ 和 $F_m$ 之间存在较强的相关性。

#### 2.2.2　$E_P$ 和 $F_m$ 的相关性分析

$E_P$ 和 $F_m$ 之间的回归曲线如图 5(b)所示。根据 $E_P$ 和 $F_m$ 之间的回归分析，下列线性回归方程可获得 $F_m = 0.6425E_P - 2.342$，由于 $R_P = 0.8718 > R_{18,0.02} = 0.516$，所以 $E_P$ 和 $F_m$ 之间存在较强的相关性。

#### 2.2.3　$E_1$ 和 $F_m$ 的相关性分析

$E_1$ 和 $F_m$ 之间的回归曲线如图 5(c)所示。根据 $E_1$ 和 $F_m$ 之间的回归分析，可获得下列线性回归方程：$F_m = 0.5975E_1 - 1.9468$，由于 $R_1 = 0.8106 > R_{18,0.02} = 0.516$，所以 $E_1$ 和 $F_m$ 间存在较强相关性。

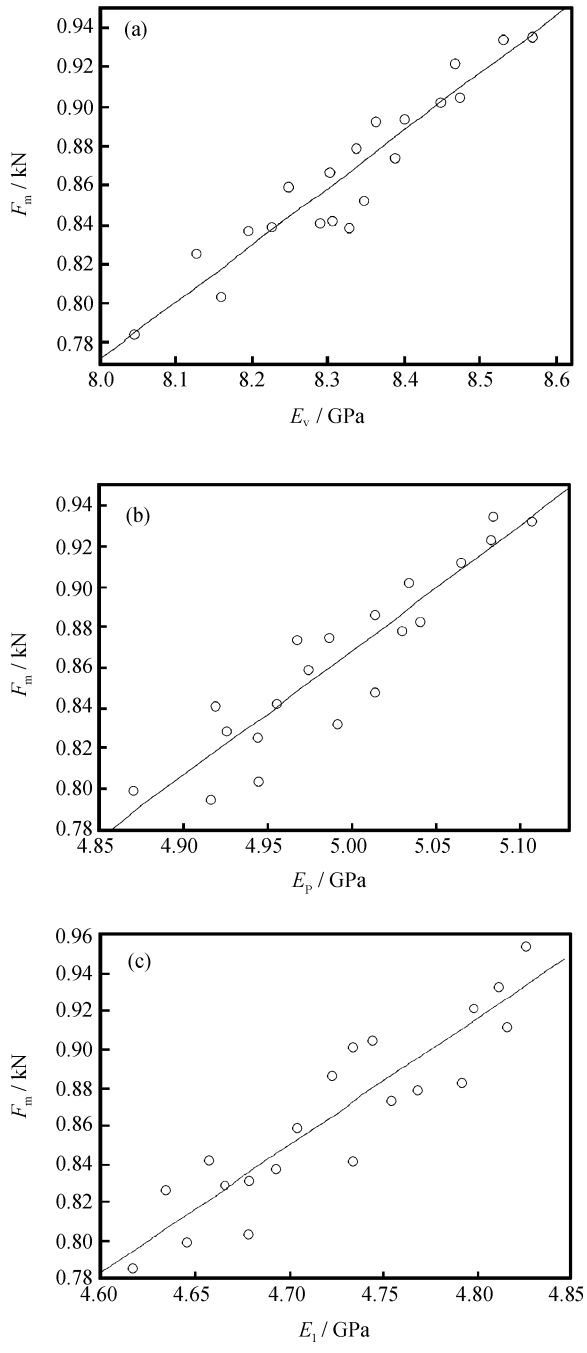


图 5　聚乙烯基木塑结构板材的动态弹性模量($E_V$、$E_P$、$E_1$)与最大弯曲力($F_m$)的回归曲线

Fig. 5　Regression curves between dynamic MOE ($E_V$, $E_P$, $E_1$) and maximum bending force ($F_m$) of polyethylene-based wood-plastic structural planks

## 3　可靠性分析

### 3.1　第二组试件的动态和静态试验分析

有许多随机变量影响试件的性能，一些可以检测，一些不能被检测，只能通过试验分析推断[17]。

采用上述三种无损检测方法，检测第二组试件的动态弹性模量。利用三点弯曲试验，获得相同试件的静态弹性模量和最大弯曲力。当第二组试件各参数的均值保留至百分位时，与第一组试件各参数的均值基本相同，具体数据可参照表 1。

### 3.2　第二组试件的最大弯曲力预测

在第二组中，根据测得的三种动态弹性模量，分别运用第一组试件三种动态弹性模量和最大弯曲力的回归方程，预测其最大弯曲力，预测和检测的最大弯曲力均值列于表 2 中。结果显示：预测的最大弯曲力均值大于检测的最大弯曲力均值，但是，预测和检测的最大弯曲力的变异系数几乎相等。

**表 2　第二组聚乙烯基木塑结构板材的预测和检测最大弯曲力**

**Table 2　Predicted and measured maximum bending force of polyethylene-based wood-plastic structural planks in group 2**

| Parameters | $F_{mm}$ | $F_{mv}$ | $F_{mp}$ | $F_{m1}$ |
|---|---|---|---|---|
| $\mu$ /kN | 0.86 | 0.88 | 0.89 | 0.87 |
| $\sigma$ / kN | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.05 |
| COV/% | 5.57 | 5.58 | 5.61 | 5.46 |

Note: $F_{mm}$ is measured maximum bending force ($F_m$); $F_{mv}$ is predicted $F_m$ based on $E_V$; $F_{mp}$ is predicted $F_m$ based on $E_P$; $F_{m1}$ is predicted $F_m$ based on $E_1$.

### 3.3　可靠性指标方程

由于试件的结构抗力分析结果近似于正态分布，所以，一次二阶矩方法用于计算其可靠度。

关于试件可靠性分析的极限状态方程，考虑通常情况下所承受载荷，以及死载和活载的影响，其可靠性分析的极限状态方程如下式[18]：

$$Z = R - S_Q - S_G \tag{8}$$

式中：$R$ 是试件的结构抗力；$S_Q$ 是活载；$S_G$ 是死载。

在进行可靠性分析时，传统地只考虑极限状态方程，容易引发事故，抗力或弯曲力用测得的最大值代替。当预计的载荷超出预计的强度时，事故将发生[19]。因此，本研究考虑了一个确定的木塑结构板材使用一次二阶矩方法的安全性，使用了安全系数，具体的方程如下：

$$R_s = \mu_R(1 - \alpha_R \nu_R) \tag{9}$$

$$S_s = \mu_S(1 + \alpha_S \nu_S) \tag{10}$$

式中：$R_s$ 和 $S_s$ 是考虑载荷的不确定性的两个变量；$\mu_R$ 是平均抗力；$\mu_S$ 是平均载荷；$\alpha_R$ 和 $\alpha_S$ 是抗力和载荷的安全系数；$\nu_R$ 和 $\nu_S$ 分别代表结构抗力和载荷的变异系数。

可靠性指标($\beta$)可通过式(5)、式(6)以及式

(8)～(10)获得，然后根据式(11)和式(12)计算其可靠度：

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_G - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_G^2 + \sigma_Q^2}} \tag{11}$$

$$P_r = \Phi(\beta) \tag{12}$$

式中：$\beta$ 是可靠性指标；$\mu$ 是均值；$\sigma$ 是标准差；$P_r$ 是可靠度；$\Phi(\beta)$ 是标准正态分布的概率函数。

### 3.4　可靠性的实例分析

以 87 式机枪弹为例，全弹长度为 57～58 mm，弹头直径为 5.8 mm，全弹质量约为 0.014 kg[20]。弹药箱用上述的木塑结构板材制作，最大容量为 5000 发，平均分装在两个小铁箱中，每个小铁箱中有 5 个容量为 500 发的小纸盒，然后，放入弹药箱中，小铁箱的长度方向与弹药箱底板的长度方向垂直。假定每个小铁箱都是刚性整体，质心处于中心处，考虑弹药箱底板的平整性和小铁箱的重力，木塑结构板材可能承受的最大载荷约为 0.7 kN，且载荷服从正态分布。各参数的安全值可参考表 3。基于检测和预测断裂模量的可靠性指标和可靠性列于表 4 中。

**表 3　第二组聚乙烯基木塑结构板材的安全系数和安全值**

**Table 3　Safety factors and safety values of polyethylene-based wood-plastic structural planks in group 2**

| Parameters | Values |
|---|---|
| Safety factor of $R$, $\alpha_R$ | 2 |
| Safety factor of $\mu_G$, $\alpha_G$ | 1 |
| Safety factor of $\mu_Q$, $\alpha_Q$ | 2 |
| Safety value of $F_{mm}$, $R_m$/kN | 0.853 |
| Safety value of $F_{mv}$, $R_v$/kN | 0.876 |
| Safety value of $F_{mp}$, $R_p$/kN | 0.886 |
| Safety value of $F_{ml}$, $R_l$/kN | 0.863 |
| Safty value of constant load $S_G$ /kN | 0.0041 |
| Standard deviation of $\mu_G$, $\sigma_G$ /kN | 0.0006 |
| Safety value of medial load $S_Q$ /kN | 0.728 |
| Standard deviation of $S_Q$, $\sigma_Q$ /kN | 0.016 |

**表 4　聚乙烯基木塑结构板材基于检测和预测最大弯曲力的可靠度**

**Table 4　Reliabilities of polyethylene-based wood-plastic structural planks based on predicted and measured maximum bending force**

| Parameters | $P_r$ | $P_V$ | $P_P$ | $P_l$ |
|---|---|---|---|---|
| Reliability indexes $\beta$ | 2.31 | 2.61 | 2.64 | 2.47 |
| Reliabilities $P_r$/% | 98.93 | 99.55 | 99.59 | 99.32 |

Note: $P_r$ is reliability based on $F_{mm}$; $P_V$ is reliability based on $F_{mv}$; $P_P$ is reliability based on $F_{mp}$; $P_l$ is reliability based on $F_{ml}$.

## 4　结　论

(1) 对于所有聚乙烯基木塑结构板材的动态试验和静态试验，动态弹性模量($E_V$、$E_P$、$E_l$)的均值均大于静态弹性模量($E_B$)的均值。

(2) 三种无损检测方法检测的木塑结构板材的动态弹性模量($E_V$、$E_P$、$E_l$)和最大弯曲力($F_m$)之间分别具有较强的相关性。

(3) 基于预测最大弯曲力($F_{mv}$、$F_{mp}$、$F_{ml}$)的木塑结构板材的可靠性指标($\beta$)的变化范围是 2.47～2.64，略大于基于检测的最大弯曲力($F_{mm}$)的可靠性指标($\beta$)值 2.31。

(4) 基于预测最大弯曲力($F_{mv}$、$F_{mp}$、$F_{ml}$)计算的木塑结构板材的可靠度值略大于基于检测最大弯曲力($F_m$)的可靠度值，其最大均值差为 0.66%。

## 参考文献：


[1] 江京辉，吕建雄，任海青，等. 动态弹性模量用于评估不同等级规格材的研究[J]. 南京林业大学学报，2008，32(2)：63-66.
Jiang Jinghui, Lü Jianxiong, Ren Haiqing, et al. Assessment of different grade dimension lumber by dynamicmodulus of elasticity [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2008, 32(2): 63-66.

[2] Emerson R N, Pollock D G, Kainz J A. Nondestructive evaluation technique for timber bridges [J]. NDT, 1999, 4(11): 5-10.

[3] 朱晓冬，王逢瑚，孙建平. 单板层积材动态弹性模量的无损检测[J]. 东北林业大学学报，2009，26(5)：30-32.
Zhu Xiaodong, Wang Fenghu, Sun Jianping. Nondestructive test on the dynamic modulus of elasticity for laminated veneer lumber [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 26(5): 30-32.

[4] 池德汝，童　昕，林新青. 纤维板的弹性模量及静曲强度的动态检测[J]. 木材加工机械，2006(5)：14-17.
Chi Deru, Tong Xin, Lin Xinqing. Dynamic detection for Young's modules and bend strength of fiberboard [J]. Wood Processing Machinery, 2006(5): 14-17.

[5] Nzokou P, Freed J, Kamdem D P. Relationship between non destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites [J]. Holz als Roh-unk Werkstoff, 2006, 64: 90-93.

[6] 冷劲松，杜善义，王殿富，等. 复合材料结构敲击法无损检测的灵敏度研究[J]. 复合材料学报，1995，12(4)：99-105.
Leng Jinsong, Du Shanyi, Wang Dianfu, et al. Sensitivity of the coin-tap method of nondestructive testing for composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1995, 12(4): 99-105.

[7] 张志刚，马中华，王金晶. 钢筋混凝土结构可靠度分析方法[J]. 山西建筑，2007，33(31)：94-95.

Zhang Zhigang, Ma Zhonghua, Wang Jinjing. Analysis methods of the reliability of the reinforced concrete structure [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(31): 94-95.

[8] 周振君，杨正方，肖志国，等.样板晶生长法制备 Y-TZP/ 板状氧化铝复相陶瓷的力学性能和可靠性[J].复合材料学报，2004，21(1)：29-32.
Zhou Zhenjun, Yang Zhengfang, Xiao Zhiguo, et al. Mechanical properties and reliability of Y - TZP/platelet - alumina composites by templated-alumina [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(1): 29-32.

[9] 李 辉，张立同，曾庆丰，等. 2D C/SiC 复合材料的可靠性评价[J].复合材料学报，2007，24(4)：95-100.
Li Hui, Zhang Litong, Zeng Qingfeng, et al. Reliability analysis of 2D C/SiC composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4): 95-100.

[10] 周玉辉，杨福江.高转速复合材料圆柱壳结构可靠性优化设计[J].复合材料学报，2011，28(3)：154-158.
Zhou Yuhui, Yang Fujiang. Optimal design on structure reliability of cylindrical composite shell rotating with a high speed [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(3): 154-158.

[11] 孙 秦，白金泽. 一种复合材料梁架结构的强度可靠性分析[J].应用力学学报，2002，19(3)：5-9.
Sun Qin, Bai Jinze. Analysis of strength reliability for a frame structure of composite laminated beam [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(3): 5-9.

[12] 安伟光，赵维涛，杨多和. 复合材料层合板的可靠性分析方法[J]. 宇航学报，2005，26(5)：672-675.
An Weiguang, Zhao Weitao, Yang Duohe. A method of reliability analysis for composite laminate [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5): 672-675.

[13] Hu Y, Nakao T, Nakai T, Gu J, Wang F. Dynamic properties of three types of wood - based composites [J]. Journal of Wood Science, 2005, 51: 7-12.

[14] Hu Y, Wang F, Gu J, Liu Y, Nakao T. Nondestructive test and prediction of modulus of elasticity of veneer - overlaid particleboard composite [J]. Wood Science and Technology, 2005, 39(6): 439-447.

[15] Cheng Fangchao, Hu Yingcheng. Reliability of timber structure design of poplar lumber with nondestructive testing methods [J]. Bioresources, 2011, 6(3): 3188-3198.

[16] ASTM D790—03. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plasticsand electrical insulating materials [S]. New York: ASTM International, 2003.

[17] Xue Bing, Hu Yingcheng. Reliability analysis of the structural laminated veneer lumber [J]. Materials Science Forum, 2009, 620-622: 157-160.

[18] Huang B, Du X. Analytical robustness assessment for robust design [J]. Struct Multidiscip Optim, 2007, 34(1): 23-37.

[19] Chen N Z, Sun H H, Soares C G. Reliability analysis of a ship hull in composite material [J]. Composite Structures, 2003, 62: 59-66.

[20] 于贵文.不同密度木塑结构板材的可靠性分析[J]. 包装工程，2011，32(9)：9-11.
Yu Guiwen. Reliability analysis of wood - plastic Structural planks with different density [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9): 9-11.

# 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

## C: ANALYSIS

analytical modelling
computational modelling
damage mechanics
finite element analysis(FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/methods

## D: TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testingoptical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

## E: MANUFACTURING/PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression mouldingconsolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up(manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration(RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)