

玻璃纤维复合材料不同温度条件拉伸强度统计分布

Tensile Strength Distribution of Glass Fiber Reinforced Composites at Different Temperatures

王海鹏, 陈新文, 李晓骏, 马丽婷, 苏 彬

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

WANG Hai-peng, CHEN Xin-wen, LI Xiao-jun, MA Li-ting, SU Bin
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 根据两种不同温度(80℃、室温)条件下玻璃纤维复合材料拉伸强度试验数据, 利用简单线性回归方法, 对不同温度条件下材料拉伸强度进行了拟合, 预报了低温(-55℃)条件下的拉伸强度, 通过与试验结果对比, 发现吻合较好, 为今后玻璃纤维复合材料的应用提供一定的参考。

关键词: 玻璃纤维复合材料; 拉伸强度; 简单线性回归

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)07-0076-03

Abstract: The tensile strength of glass fiber reinforced composites was tested using tensile method at different temperatures and the strength distribution was studied on simple linear regression. The tensile strength at different temperatures was fitted, furthermore, the tensile strength at lower temperature was predicted, and the predicted results are basically in agreement with the experimental data. The present work established a reference for the application of glass fiber reinforced composites.

Key words: glass fiber reinforced composite; tensile strength; simple linear regression

纤维增强树脂基复合材料由于其优异的力学性能和材料性能的可设计性等特点, 在航空工业中得到广泛的应用。随着新材料的涌现和新技术的发展, 复合材料在飞机上的用量也越来越大, 特别是直升机方面, 其中, PAH-2 武装直升机复合材料用量达 80%, NH-90 战术运输直升机复合材料用量达 95%^[1]。飞机在服役情况下, 不可避免的要受温度变化的影响。为了给复合材料的设计和使用提供必需的参考, 准确预报复合材料的性能和可靠性, 考察不同温度条件下材料力学性能是很有必要的。

对于玻璃纤维复合材料等脆性材料的拉伸强度分布, 已经进行了很多研究, 普遍认为其强度服从 Weibull 分布^[2], 许多研究工作比较了不同温度对于复合材料强度的影响, 但是对于不同温度条件下复合材料强度分布规律的研究还不多见。材料基本性能的回归分析旨在获得作为确定性因素(如温度、铺层和湿度)的函数的特征响应(如拉伸强度)的基准值, 利用回归分析方法, 可以确定不同温度条件对于材料拉伸强度的影响。Hinkelmann 等人对于回归模型的有效性进行了详细的讨论^[3,4]。

本工作根据两种不同温度(80℃、室温)条件下玻璃纤维复合材料拉伸强度试验数据, 利用简单线性回

归方法, 对不同温度条件下材料拉伸强度进行了拟合, 预报了低温(-55℃)条件下的拉伸强度, 通过与试验结果对比, 发现吻合较好。为今后玻璃纤维复合材料的应用提供一定的参考。

1 试验

1.1 试验用材料

试验用材料为北京航空材料研究院生产的玻璃布预浸料制成的复合材料层合板。组份为: 3238A/EW250F; 铺层方式: [0]₆。

1.2 试样及试验方法

拉伸试验参照 GB/T1447-2005, 试样为 180mm × 10mm × 2mm 哑铃型试样, 标距为 50mm, 加载速度为 2mm/min。高低温试验参照 GB/T9979-2005, 保温时间为 20min。拉伸试验利用 MTS sintech 65/G 型材料试验机, 每种温度条件下 6 根试样。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

3238A/EW250F 复合材料 0° 层压板不同温度条

件下拉伸强度分别见表 1。

表 1 3238A/EW250F 复合材料 0° 层压板不同温度条件下拉伸强度
Table 1 Tensile strength of 3238A/EW250F composites at different temperatures

Specimen number	Tensile strength at 23℃/MPa	Tensile strength at 80℃/MPa	Tensile strength at - 55℃/MPa
1	545	461	646
2	546	485	640
3	556	474	625
4	525	461	659
5	502	475	663
6	550	442	589

2 2 3238A/EW250F 复合材料层合板拉伸强度统计分布

材料基本性能的回归分析旨在获得作为确定性因素(如温度、铺层和湿度)的函数的特征响应(如拉伸强度)的基准值。将测得的响应值称为观测值,将描述对应于这些观测值的条件的值称为协变量^[5]。本工作中三种温度条件下试样均为同一批次生产,只是试验温度条件不同,可以用简单线性回归模型来分析。

2. 2. 1 简单线性回归

假设选择 n 个彼此不同的 x 值, x_1, x_2, \dots, x_n , 并观测到响应的 y 值, 那么数据由 n 对数值组成

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

为了使统计分析有效, 必需有 $n \geq 3$ 并且至少有两个不同的 x 值。用 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ 表示 β_0 和 β_1 的估计值。那么对于不必是试验值(x_1, x_2, \dots, x_n)之一的任意的 x 值, 可得一预计值或拟合值 \hat{y} , 即

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \tag{1}$$

通常采用最小二乘法估计 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ 。设 β_0^* 和 β_1^* 为 β_0 和 β_1 的任意估计值。令

$$Q(\beta_0^*, \beta_1^*) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i^*)^2 \tag{2}$$

式中 $\hat{y}_i^* = \beta_0^* + \beta_1^* x_i$ 。

最小二乘估计值 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ 就是使 $Q(\beta_0^*, \beta_1^*)$ 最小的 β_0^* 和 β_1^* 的值。它们由下式给出

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \tag{3}$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{4}$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \sum_{i=1}^n y_i / n \\ \bar{x} &= \sum_{i=1}^n x_i / n \end{aligned} \tag{5}$$

要检查在水平 α 下回归是否显著, 令

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2}{n - 2} \tag{6}$$

并定义样本内平方和 SSE 、样本间平方和 SSR 和总平方和 SST , 其中

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2 \tag{7}$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \tag{8}$$

$$SSR = SST - SSE \tag{9}$$

然后定义

$$F = \frac{SSR}{S_y^2} \tag{10}$$

它是具有自由度为 $(1, n - 2)$ 的 F 分布。如果式 (10) 的值超过自由度数 $\nu_1 = 1$ 和 $\nu_2 = n - 2$ 的 F 分布的 $1 - \alpha$ 分位数, 则回归是有意义的。

对于给定的 x_0 , B 基准值满足 $B(x_0)$ 是平均值为 $f(x_0) = \beta_0 + \beta_1 x_0$ 、方差为 σ^2 的正态分布的 B 基准值的条件。在简单线性回归情况下, B 基准值可以确定如下, 对于 $x = x_0$, 计算 B 值

$$B = (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0) - K_B S_y \tag{11}$$

$$K_B = t_{\nu, 0.95}(\delta) \sqrt{\frac{1 + \Delta}{n}} \tag{12}$$

且 $t_{\nu, 0.95}$ 是自由度为 $\nu = n - 2$ 、偏心参数为 δ 的偏心 t 分布的 95 百分位数。

$$\delta = \frac{1.282}{\sqrt{\frac{1 + \Delta}{n}}} \tag{13}$$

和

$$\Delta = \frac{n(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{14}$$

2 2 2 3238A/EW250F 复合材料层压板拉伸强度简单线性回归拟合

由表 1 所列室温和高温条件下 3238A/EW250F 复合材料层压板拉伸强度,通过简单线性回归,计算低温条件下层压板等拉伸强度。

通过最小二乘法,可以得到 $\beta_0 = 565.98, \beta_1 =$

- 1.25, 因此最小二乘回归直线方程为:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x = 565.98 - 1.25x \tag{13}$$

通过方差分析,检验回归分析的显著度。方差分析见表 2。

表 2 方差分析表
Table 2 The analysis of variance

Source of vatiation	Degrees of freedom	Sum of square	Mean square	Fcalc
Regression	1	15123	15123	
Error	10	3174.7	317.47	47.64
Total	11	18297.7		

F 检验值超过自由度 $\nu_1 = 1$ 和 $\nu_2 = n - 2 = 10$ 的 F 分布的 0.95 分位数 4.96, 说明样本间的变异具有统计显著性, 线性回归是有意义的。

从图 1 可以看出, 3238A/EW250F 复合材料层压板拉伸强度随温度变化呈现线性分布, 利用公式(13)计算-55℃条件下, 层压板拉伸强度为 634.73MPa, 试验平均值为 640 MPa, 两者偏差仅为 0.82%, 精度非常高。

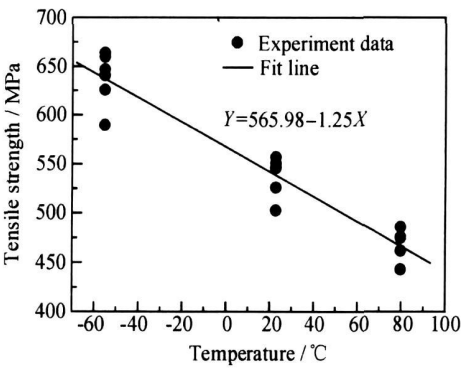


图 1 不同温度拟合曲线图
Fig 1 Fit line of different temperatures

在简单线性回归情况下, -55℃条件下材料 B 基准值为:

$$B = (\beta_0 + \beta_1 x_0) - K_B S_y = 565.98 - 1.25 \times (-55) - 3.61 \times 17.82 = 570.4 \text{ MPa}$$

3 结论

根据 80℃、室温 23℃条件下玻璃纤维复合材料拉

伸强度试验数据, 利用简单线性回归方法, 对不同温度条件下材料拉伸强度进行了拟合, 预报了低温-55℃条件下的拉伸强度, 通过与试验结果对比, 发现吻合较好, 两者偏差仅为 0.82%, 精度非常高, 说明不同温度条件下玻璃纤维复合材料拉伸强度符合线性分布, 可以利用简单线性回归方法进行低温性能的预报。

利用简单线性回归方法, 确定了 3238A/EW250F 复合材料层压板拉伸强度拟合模型及低温条件下 B 基值, 为今后玻璃纤维复合材料的应用提供一定的参考。

参考文献

[1] 黄承恭, 吴建华. 复合材料在直升机上的应用与发展[A]. 复合材料-生命、环境与高技术[C]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
[2] FOK S L, MITCHELL B C, SMART J, et al. A numerical study on the application of the Weibull theory to brittle materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(10): 1171-1179.
[3] HINKELMANN K, KEMPTHOME O. Design and Analysis of Experiments Volume 1: Introduction to Experimental Design[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
[4] BOX G E P, HUNTER W G, HUNTERS J S. Statistics for Experimenters[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981.
[5] 高允彦. 正交及回归试验设计方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.

收稿日期: 2007-08-20; 修订日期: 2007-12-10
作者简介: 王海鹏(1979-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事复合材料力学性能测试与表征研究. 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱(100095). E-mail: hdjcp99@sohu.com.cn