

文章编号: 1000-3851(2009)01-0190-06

三点弯曲试验弯剪耦合效应分析及测试结果修正方法

袁 辉, 温卫东*, 崔海涛, 徐 颖

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 三点弯曲试验中存在着弯剪耦合效应, 通过引入弯剪耦合系数, 利用 Tsai - Hill 强度准则建立弯剪耦合方程, 定量分析了弯剪耦合作用, 提出了复合材料三点弯曲试验结果修正方法。研究表明: 弯剪耦合效应会对复合材料三点弯曲试验结果产生比较大的影响。在弯剪耦合效应作用下, 弯曲强度测试误差随弯剪强度比的增大而增大, 剪切强度的测试误差随弯剪强度比的增大而减小。当弯剪耦合系数一定时, 由耦合引起的测试误差的大小取决于梁的跨高比与材料的弯剪强度比的比值。对试验结果修正后, 增加了不同跨高比下的三点弯曲试验结果的可比性, 反映了材料的固有属性。

关键词: 三点弯曲; 弯曲强度; 剪切强度; 耦合; 修正方法

中图分类号: TB301 **文献标志码:** A

Coupling effect and its correction on experimental results of three-point bend

YUAN Hui, WEN Weidong*, CUI Haitao, XU Ying

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Coupling of flexure and shear exists in three-point bend beams. The coupling coefficients of flexure and shear were introduced, and the coupling equations of flexure and shear were deduced based on Tsai - Hill criteria. The coupling effect of flexure and shear was analyzed quantitatively, and the modification method of the experimental results was presented. It was shown that the experimental results of three-point bend were influenced obviously by the coupling of flexure and shear. The flexural strength error from the coupling effect increased with the flexural - shear strength ratio, whereas the shear strength error decreased with it. For the given coupling coefficients of flexure and shear, the test errors were determined by the division of span-height ratio into the flexural-shear strength ratio. The experimental results were modified by the modification methods, and the correctional results of three-point bend on different span-height ratios became more comparable. The inherent properties were reflected by the correctional results.

Keywords: three-point bend; flexural strength; shear strength; coupling; correction method

三点弯曲试验作为测试材料弯曲性能的常用方法已在世界各国学术和工程领域得到广泛应用, 短梁三点弯曲试验还被用来测试材料的剪切强度, 许多国家都制定了相应的试验标准^[1-2]。

三点弯曲梁中同时存在着弯曲应力和剪切应力, 弯剪耦合作用必然会对测试结果产生影响。尽管通常认为弯剪耦合作用会使测试结果偏低, 但对具体影响程度说法不一, 尤其对各向异性的复合材料而言, 不同的学者对不同材料的研究得出了不同的结论。文献[3-5]认为, 三点弯曲试验结果取决

于梁的破坏模式, 当梁呈剪切破坏时, 剪切强度基本不变, 表现为最大弯曲应力随跨高比线性增加, 当梁呈拉伸或压缩破坏时, 弯曲强度基本不变, 也就是说弯剪耦合作用可以忽略。文献[6]的实验研究表明, 三点弯曲试验在不同跨高比下的弯曲强度测试结果差别显著。文献[7]指出, 只有在远离临界跨高比时, 弯剪耦合作用才可以忽略。理论上可以采用较大的跨高比来降低弯剪耦合作用对弯曲强度测试结果的影响, 但过大的跨高比又会带来一些其他问题, 如大挠度等^[8]。如何定量分析三点弯曲

收稿日期: 2008-02-27; 收修改稿日期: 2008-05-25

通讯作者: 温卫东, 教授, 主要从事先进复合材料力学性能研究 E-mail: gswwd@nuaa.edu.cn.

试验中的弯剪耦合作用, 较准确地评估由耦合引起的测试误差, 并对试验结果进行修正, 一直是困扰人们的难题。

本文中通过引入弯剪耦合系数, 利用 Tsai-Hill 强度准则建立弯剪耦合方程, 定量分析复合材料三点弯曲梁中的弯剪耦合作用, 提出了复合材料三点弯曲试验结果的修正方法, 并采用该方法对实验数据进行了修正。

1 三点弯曲梁力学模型

图 1 为三点弯曲梁力学模型示意图。当梁承受载荷为 P 时, 梁的最大弯曲应力 σ_m 与最大剪切应力 τ_m 为

$$\sigma_m = \frac{3PL}{2bh^2}, \tau_m = \frac{3P}{4bh} \quad (1)$$

其中: P 为载荷; L 为梁的跨距; b 为梁的宽度; h 为梁的高度。

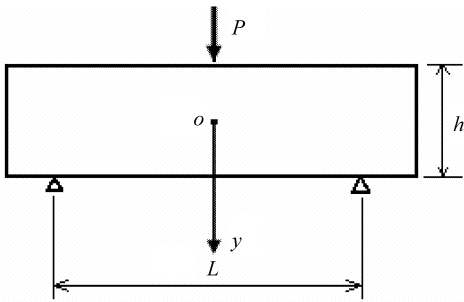


图 1 三点弯曲试验示意图

Fig. 1 Sketch map of three-point bend beam

若梁呈拉伸或压缩破坏时, 记实测弯曲强度 $X_{mes} = \sigma_m$; 若梁呈剪切破坏时, 记实测剪切强度 $S_{mes} = \tau_m$ 。一些文献^[9]将呈剪切破坏的梁的最大弯曲应力也称作弯曲强度, 将呈拉伸或压缩破坏的梁的最大剪切应力也称作剪切强度, 我们认为这种说法并不妥当, 对此情形本文中只称作最大弯曲应力或最大剪切应力。

由式(1)可知, 梁的最大弯剪应力比值 σ_m/τ_m 取决于梁的跨高比 n , 即

$$\sigma_m/\tau_m = 2n \quad (2)$$

尽管三点弯曲梁的最大弯曲应力处相应的剪切应力为零, 最大剪切应力处相应的弯曲应力为零, 但实际上梁的跨中横截面上同时存在着的弯曲应力和剪切应力必然会存在耦合作用, 采用三点弯曲法测出的弯曲强度或剪切强度会比材料的真实属性低。因此, 应当对测试结果予以修正。

2 修正方法

定义弯曲应力耦合系数 α 为梁的破坏模式呈剪切破坏时对破坏产生贡献的耦合弯曲应力与最大弯曲应力的比值; 定义剪切应力耦合系数 β 为梁的破坏模式呈拉伸或压缩破坏时对破坏产生贡献的耦合剪切应力与最大剪切应力的比值, 统称弯剪耦合系数。由定义可见, $0 < \alpha < 1$; $0 < \beta < 1$ 。

假设复合材料三点弯曲梁在宏观尺度上均匀连续, 材料为线弹性, 且拉压模量相等。由于梁的跨中横截面主要只有弯曲应力和剪切应力, 可以采用简化的 Tsai-Hill 准则来判断梁的失效:

$$\frac{\sigma^2}{X^2} + \frac{\tau^2}{S^2} = 1 \quad (3)$$

其中: S 为材料在梁的水平截面内的剪切强度; 当梁的破坏发生在拉应力区域时 X 为材料在 x 方向(梁的长度方向)上的拉伸强度; 当梁的破坏发生在压应力区域时 X 为材料在 x 方向上的压缩强度。由于材料强度的分散性和尺寸效应, X 值可能会高于材料拉伸或压缩实验的测试结果^[10]。

由式(3)可知, 当梁只受弯曲应力破坏时, $\tau = 0$, $\sigma = X$; 当梁只受剪切应力破坏时, $\sigma = 0$, $\tau = S$ 。因此, 弯曲强度 X_{mes} 的修正值为 X , 剪切强度 S_{mes} 的修正值为 S 。

利用简化的 Tsai-Hill 准则(式(3))建立弯剪耦合方程, 对梁的弯剪耦合作用进行定量分析。当梁的破坏模式为拉伸或压缩破坏时, 弯剪耦合方程为

$$\frac{\sigma_m^2}{X^2} + \frac{(\beta\tau_m)^2}{S^2} = 1 \quad (4)$$

当梁的破坏模式为剪切破坏时, 弯剪耦合方程为

$$\frac{(\alpha\sigma_m)^2}{X^2} + \frac{\tau_m^2}{S^2} = 1 \quad (5)$$

根据实验数据的多少和已知条件的不同, 修正方法可分为以下 3 类。

2.1 直接修正

对确定跨高比下的试验结果单独进行修正可采用直接修正方法。

2.1.1 对实测弯曲强度 X_{mes} 进行修正

若梁的破坏模式为拉伸或压缩破坏, 将式(2)代入式(4), 则修正弯曲强度为

$$X = \sigma_m / \sqrt{1 - \frac{\beta^2 \sigma_m^2}{4n^2 S^2}} \quad (6)$$

由上式可见, 欲对实测弯曲强度 X_{mes} 进行直接

修正, 必须已知材料在梁的水平截面内的剪切强度 S 。

2.1.2 对实测剪切强度 S_{mes} 进行修正

若梁的破坏模式为剪切破坏, 将式(2)代入式(5), 则修正剪切强度为

$$S = \tau_m / \sqrt{1 - \frac{4\alpha^2 n^2 \tau_m^2}{X^2}} \quad (7)$$

由上式可见, 欲对实测剪切强度 S_{mes} 进行直接修正, 必须已知材料 x 方向的拉压强度的较小值 X 。

2.2 联合修正

对于 2 组不同跨高比下的试验结果, 在材料 x 方向上的拉伸或压缩强度 X 和梁的水平截面内的剪切强度 S 均未知时, 若忽略跨高比对弯剪耦合系数的影响, 则可以进行联合修正。2 组跨高比不同的弯曲试验可分为 3 种情况。

2.2.1 1 组为拉伸或压缩破坏, 1 组为剪切破坏

将跨高比为 n_1 的拉伸或压缩破坏梁的实测弯曲强度 $X_{mes} = \sigma_{m,1}$ 和最大剪切应力 $\tau_{m,1}$ 代入式(4), 将跨高比为 n_2 的剪切破坏梁的实测剪切强度 $S_{mes} = \tau_{m,2}$ 和最大弯曲应力 $\sigma_{m,2}$ 代入式(5), 两式联立求解可得修正弯曲强度 X 和修正剪切强度 S :

$$X = 2\sigma_{m,1}\tau_{m,2} \sqrt{\frac{n_1^2 - \alpha^2 \beta^2 n_2^2}{4n_1^2 \tau_{m,2}^2 - \beta^2 \sigma_{m,1}^2}} \quad (8)$$

$$S = \sigma_{m,1}\tau_{m,2} \sqrt{\frac{n_1^2 - \alpha^2 \beta^2 n_2^2}{n_1^2 \sigma_{m,1}^2 - 4\alpha^2 n_1^2 n_2^2 \tau_{m,2}^2}} \quad (9)$$

2.2.2 2 组都为拉伸或压缩破坏

将跨高比为 n_1 、 n_2 的拉伸或压缩破坏梁的实测弯曲强度 $X_{mes,1} = \sigma_{m,1}$ 、 $X_{mes,2} = \sigma_{m,2}$ 和最大剪切应力 $\tau_{m,1}$ 、 $\tau_{m,2}$ 分别代入式(4), 两式联立求解可得修正弯曲强度 X 和剪切强度 S :

$$X = \sigma_{m,1}\sigma_{m,2} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 \sigma_{m,2}^2 - n_2^2 \sigma_{m,1}^2}} \quad (10)$$

$$S = \frac{\beta\sigma_{m,1}\sigma_{m,2}}{2n_1 n_2} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{\sigma_{m,1}^2 - \sigma_{m,2}^2}} \quad (11)$$

2.2.3 2 组都为剪切破坏

将跨高比为 n_1 、 n_2 的剪切破坏梁的实测剪切强度 $S_{mes,1} = \tau_{m,1}$ 、 $S_{mes,2} = \tau_{m,2}$ 和最大弯曲应力 $\sigma_{m,1}$ 、 $\sigma_{m,2}$ 分别代入式(5), 两式联立求解可得弯曲强度 X 和修正剪切强度 S :

$$X = 2\alpha\tau_{m,1}\tau_{m,2} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{\tau_{m,1}^2 - \tau_{m,2}^2}} \quad (12)$$

$$S = \tau_{m,1}\tau_{m,2} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 \tau_{m,1}^2 - n_2^2 \tau_{m,2}^2}} \quad (13)$$

需要指出的是: 式(10)和式(13)中均未包含弯剪耦合系数 α 和 β , 这并不表示修正结果与弯剪耦合系数无关, 而是因为 2 组不同跨高比下的拉伸或压缩破坏梁的实测弯曲强度, 已经体现了弯曲破坏受剪切应力影响的程度, 2 组不同跨高比下的剪切破坏梁的实测剪切强度, 也已经体现了剪切破坏受弯曲应力影响的程度。

理论上 2 组试验都为拉伸或压缩破坏时, 不仅可以联合修正弯曲强度, 还可以推算出材料在梁的水平截面内的剪切强度 S , 如式(11), 但这种推算结果对弯剪耦合系数的取值比较敏感, 可能会存在比较大的偏差, 只能作为参考。由 2 组剪切破坏试验结果推算出的 x 方向的拉伸或压缩强度同样也是如此。利用这种推算结果对弯剪耦合系数取值的敏感性, 可以根据试验结果反推弯剪耦合系数 α 、 β , 本文作者将在后面讨论。

在采用联合修正方法时, 应尽量避免使用跨高比相近的两组实验结果进行修正。

2.3 拟合修正

对于多组不同跨高比下的试验结果, 若忽略跨高比对弯剪耦合系数的影响, 则可以采用最小二乘法进行拟合修正。

设共有 $p+q$ 组不同跨高比下的试验结果 ($p+q \geq 3$), 其中 $1 \sim p$ 组为拉伸或压缩破坏, $p+1 \sim p+q$ 组为剪切破坏, 令

$$F = \sum_{i=1}^p \left[\frac{\sigma_{m,i}^2}{X^2} + \frac{(\beta\tau_{m,i})^2}{S^2} - 1 \right]^2 + \sum_{i=p+1}^{p+q} \left[\frac{(\alpha\sigma_{m,i})^2}{X^2} + \frac{\tau_{m,i}^2}{S^2} - 1 \right]^2 = \sum_{i=1}^p \left[\frac{\sigma_{m,i}^2}{X^2} + \frac{\beta^2 \tau_{m,i}^2}{4n_i^2 S^2} - 1 \right]^2 + \sum_{i=p+1}^{p+q} \left[\frac{4n_i^2 \alpha^2 \tau_{m,i}^2}{X^2} + \frac{\tau_{m,i}^2}{S^2} - 1 \right]^2 \quad (14)$$

当 F 取最小值时, 上式须满足以下条件

$$\frac{\partial F}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial S} = 0 \quad (15)$$

由式(15)可求解出修正弯曲强度 X 和修正剪切强度 S 。

3 修正方法的分析与讨论

3.1 弯剪耦合系数的确定

要对弯剪耦合作用下的三点弯曲试验结果进行

修正, 必须首先确定弯剪耦合系数 α 、 β 。

由式(12)可知

$$\alpha = \frac{X}{2\tau_{m,1}\tau_{m,2}} \sqrt{\frac{\tau_{m,1}^2 - \tau_{m,2}^2}{n_2^2 - n_1^2}} \quad (16)$$

可见, 材料 x 方向的拉伸或压缩强度 X 已知时, 可以通过 2 组不同跨高比下均呈剪切破坏模式的弯曲试验结果求出弯曲应力耦合系数 α 。在材料 x 方向的拉伸或压缩强度 X 未知时, 可以用实测弯曲强度 X_{mes} 代替 X , 求得弯曲应力耦合系数 α 的近似值。

由式(11)可知

$$\beta = \frac{2n_1n_2S}{\sigma_{m,1}\sigma_{m,2}} \sqrt{\frac{\sigma_{m,1}^2 - \sigma_{m,2}^2}{n_1^2 - n_2^2}} \quad (17)$$

可见, 材料在梁的水平截面内的剪切强度 S 已知时, 可以通过 2 组不同跨高比下均呈拉伸或压缩破坏模式的弯曲试验结果求出剪切应力耦合系数 β 。在材料在水平截面内的剪切强度 S 未知时, 可以用实测剪切强度 S_{mes} 代替 S , 求得剪切应力耦合系数 β 的近似值。

若有多组(大于 4 组)不同跨高比下的试验结果, 则可以将弯剪耦合系数 α 、 β 作为未知数与 x 、 S 一起拟合求解。求解公式如下:

$$\frac{\partial F}{\partial X} = 0, \frac{\partial F}{\partial S} = 0, \frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial F}{\partial \beta} = 0 \quad (18)$$

其中函数 F 的表达式如式(14)。

3.2 临界跨高比的确定

三点弯曲梁在跨高比 n 较大时呈拉伸或压缩破坏模式, 在跨高比 n 较小时呈剪切破坏模式, 理论上存在某一临界跨高比 n_c , 当 $n > n_c$ 时梁呈拉伸或压缩破坏模式, 当 $n < n_c$ 时梁呈剪切破坏模式。

当 $n = n_c$ 时, 梁的破坏同时满足式(4)和式(5), 联立可求出临界跨高比

$$n_c = \frac{X}{2S} \sqrt{\frac{1-\beta^2}{1-\alpha^2}} = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{1-\beta^2}{1-\alpha^2}} \quad (19)$$

其中: v 为材料的弯剪强度比, 即 $v = X/S$ 。

由式(19)可知, 弯剪耦合作用会影响梁的临界跨高比, 但当弯剪耦合系数 α 、 β 相等时, 梁的临界跨高比与不考虑弯剪耦合作用时一致。

3.3 三点弯曲试验测试误差分析

将 $v = X/S$ 代入式(4)得

$$\frac{\sigma_m}{X} = 1/\sqrt{1 + \left(\frac{\beta v}{2n}\right)^2} \quad (20)$$

记由弯剪耦合引起的弯曲强度测试误差为 ξ , 则

$$\xi = \left[1 - 1/\sqrt{1 + \left(\frac{\beta v}{2n}\right)^2}\right] \times 100\% \quad (21)$$

由式(21)可知, 弯曲强度测试误差 ξ 随剪切应力耦合系数 β 的增大而增大, 当 $\beta=0$ 时, 误差 ξ 为零。

将 $v = X/S$ 代入式(5)得

$$\frac{\tau_m}{S} = 1/\sqrt{1 + \left(\frac{2n\alpha}{v}\right)^2} \quad (22)$$

记由弯剪耦合引起的剪切强度测试误差为 η , 则

$$\eta = \left[1 - 1/\sqrt{1 + \left(\frac{2n\alpha}{v}\right)^2}\right] \times 100\% \quad (23)$$

由式(23)可知, 剪切强度测试误差 η 随弯曲应力耦合系数 α 的增大而增大, 当 $\alpha=0$ 时, 误差 η 为零。

当弯剪耦合系数 α 和 β 确定时, 弯剪耦合作用引起的弯曲强度或剪切强度测试误差大小取决于跨高比与弯剪强度比的比值 n/v 。

图 2 给出了 $\alpha=\beta=0.5$ 时, 三点弯曲试验测试误差随 n/v 的变化规律。当 $n/v < 0.5$ 时, 梁呈剪切破坏, 剪切强度测试误差 η 随 n/v 的增大而增大, 即弯剪强度比 v 确定时, 跨高比 n 越大, 剪切强度测试误差 η 越大; 跨高比 n 确定时, 弯剪强度比 v 越大, 剪切强度耦合测试误差 η 越小。当 $n/v > 0.5$ 时, 梁呈弯曲破坏, 弯曲强度测试误差 ξ 随 n/v 的增大而减小, 即弯剪强度比 v 确定时, 跨高比 n 越大, 弯曲强度测试误差 ξ 越小; 跨高比 n 确定时, 弯剪强度比 v 越大, 弯曲强度测试误差 ξ 越大。当 $n/v = 0.5$ 时, 弯剪耦合最严重。若取 $\alpha=\beta=0.5$, 则拉伸或压缩破坏模式下的弯曲强度和剪切破坏模式下的剪切强度的最大测试误差均为 10.56%。

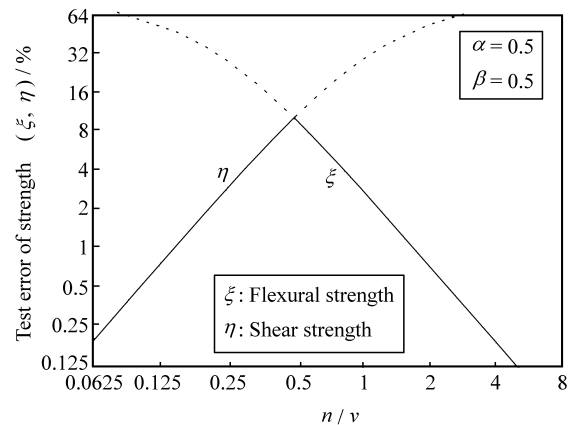


图 2 三点弯曲试验的测试误差曲线

Fig. 2 Experimental error curves of three-point bend

工程实践中, 人们对材料的弯剪强度比 v 通常会有一个大致的认识。因此, 确定跨高比下的实测

弯曲或剪切强度可以通过图 2 直接进行粗略地修正, 简单且快捷。此外, 图 2 还可以为研究人员设计实验方案提供指导。

4 修正方法实验验证

4.1 实验数据修正

对单向 C/C 复合材料在 3 种不同跨高比下进行三点弯曲实验研究。3 组三点弯曲试验跨高比分别为 $n_1 = 4$ 、 $n_2 = 8$ 、 $n_3 = 12$, 试验件高度均为 5 mm, 测试结果如表 1 所示。

表 1 不同跨高比下单向 C/C 复合材料三点弯曲的试验测试结果

Table 1 Experimental results of three-point bend of unidirectional C/C composites on different span-height ratios

Span-height ratio	Tested flexural strength/ MPa	Tested shear strength / MPa	Modes of damage
$n_1 = 1$	—	$S_{mes, 1} = 19.10$	Shear
$n_2 = 8$	$X_{mes, 2} = 249.3$	—	Compressive
$n_3 = 12$	$X_{mes, 3} = 266.9$	—	Compressive

采用本文中提出的修正方法对试验结果进行修正, 修正方法有: 直接修正、联合修正、拟合修正。由于实验数据不足, 粗取弯曲应力耦合系数 $\alpha = 0.5$; 以 $S_{mes, 1}$ 代替 S , 由式(18)计算出剪切应力耦合系数 $\beta \approx 0.590$, 修正结果如表 2 所示。表 2 还给出了取 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.5$ 及 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 2/3$ 时的修正结果。

修正结果分析: (1) 若以 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.590$ 时拟合修正结果为准, 即 $X = 282.2$ MPa、 $S = 19.83$ MPa, 则跨高比为 4、8、12 时的试验结果误差分别为

3.7%、11.7%、5.4%, 这说明对试验结果进行修正是非常必要的; (2) 取 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta \approx 0.590$ 时, 采用不同修正方法对试验结果进行修正, 修正结果趋于一致; (3) 不同跨高比下梁的实测弯曲强度相差较大(8%), 缺乏可比性, 而修正后的弯曲强度比较接近, 反映了材料的固有属性; (4) 在实验数据不足, 难以确定弯剪耦合系数时, 取 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.5$ 或 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 2/3$, 可以对试验结果进行粗略修正, 弯曲强度拟合修正后误差分别为 2.6%、2.7%, 比修正前明显减小; (5) 剪切应力耦合系数 β 的取值对弯曲强度的修正结果影响较大, β 取值偏小时会导致弯曲强度修正不足, β 取值偏大时会导致弯曲强度修正过度; (6) 直接修正过程中的近似取值会使修正结果略大; (7) 对 2 组实测弯曲强度进行联合修正, 其修正结果不受弯剪耦合系数 α 、 β 取值的影响。

4.2 文献实验数据分析

文献[9]采用三点弯曲法测试了含插入界面相的单向玻璃纤维增强树脂基复合材料在不同跨高比下的弯曲性能, 并对试验数据进行了分析。实验表明: 当跨高比较小时, 梁呈剪切破坏, 最大弯曲应力随跨高比的增大而增大; 当跨高比较大时, 梁呈拉伸或压缩破坏, 弯曲强度变化不大。文献[9]将试验数据拟合为一条折线, 当跨高比较小时, 最大弯曲应力随跨高比线性增大; 当跨高比较大时, 弯曲强度恒定; 折点对应的跨高比为临界跨高比。本文中考虑弯剪耦合作用, 采用式(14)、式(18)对实验数据进行拟合, 拟合曲线如图 3 所示。

由图 3 可见: (1) 本文拟合曲线比文献拟合曲线更加接近实验数据点, 更加合理地反映了实验数

表 2 三点弯曲试验弯曲强度与剪切强度的修正结果

Table 2 Flexural strength and shear strength correctional results of three-point bend

MPa

Correction methods	$\alpha = 0.5; \beta = 0.590$		$\alpha = 0.5; \beta = 0.5$		$\alpha = 0.5; \beta = 2/3$	
	Correctional flexural strength	Correctional shear strength	Correctional flexural strength	Correctional shear strength	Correctional flexural strength	Correctional shear strength
Direct correction	$n_1 = 4 (X \approx X_{mes, 3})$	—	19.93	—	19.93	—
	$n_2 = 8 (S \approx S_{mes, 1})$	284.4	—	273.0	—	297.1
	$n_3 = 12 (S \approx S_{mes, 1})$	284.2	—	279.0	—	289.6
United correction	$n_1 = 4, n_2 = 8$	281.3	19.85	270.9	19.91	292.9
	$n_1 = 4, n_3 = 12$	282.8	19.84	278.0	19.86	284.6
	$n_2 = 8, n_3 = 12$	284.0	—	284.0	—	284.0
Simulate correction		282.2	19.83	274.9	19.86	289.9

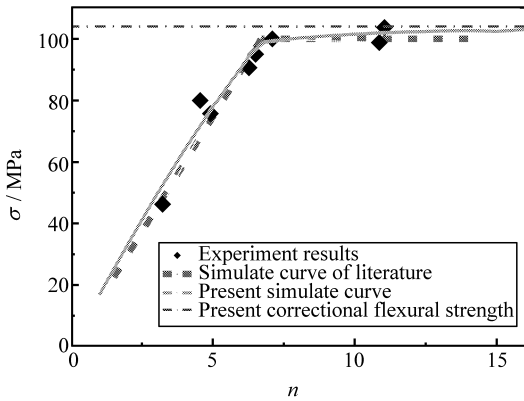


图3 弯曲强度随跨高比的变化曲线

Fig. 3 Curves of flexural strength vs span-height ratio

据的变化规律,说明考虑弯剪耦合作用对实验数据进行拟合更符合实际情况;(2)本文拟合曲线说明,当跨高比较小时,剪切破坏受耦合弯曲应力的影响随着跨高比的增大而增大,实测剪切强度逐渐降低,对应的最大弯曲应力随跨高比的增幅趋缓;当跨高比较大时,弯曲破坏受耦合剪切应力的影响随着跨高比的增大而减小,实测弯曲强度逐渐增大并趋于修正弯曲强度;(3)本文拟合结果说明,文献拟合曲线低估了材料的实际弯曲强度,约4.2%;(4)考虑弯剪耦合作用后,缓和了临界跨高比处最大弯曲应力变化趋势的突变,更符合实际情况。

5 结 论

分析了复合材料三点弯曲梁的弯剪耦合效应,提出了复合材料三点弯曲试验结果修正方法,同时得出以下结论。

(1) 弯曲强度测试误差随弯剪强度比的增大而增大;剪切强度测试误差随弯剪强度比的增大而减小。当弯剪耦合系数确定时,弯曲强度和剪切强度的测试误差大小取决于跨高比与弯剪强度比的比值。在临界跨高比处,弯剪耦合最严重,耦合引起的误差最大。

(2) 修正结果反映了材料的固有属性,通过修正可以增加不同跨高比下的三点弯曲试验结果的可比性。三点弯曲试验测试误差曲线既可以直接用来

对实测弯曲或剪切强度进行简单、粗略地修正,又可以为研究人员设计实验方案提供指导。

参考文献:

- [1] ASTM D790M - 93. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials [S]. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1993.
- [2] ISO-14125. Fiber reinforced plastic composite determination of flexural properties [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2001.
- [3] 赵渠森. 复合材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 178-181.
Zhao Qusen. Composites [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979: 178-181.
- [4] Rosensaft M, Marom G. Evaluation of bending test methods for composite materials[J]. Journal of Composites Technology & Research, 1985, 7(1): 12-16.
- [5] 周少荣, 乔生儒. C/C 复合材料高温弯曲力学性能研究[J]. 材料工程, 2001(6): 16-18.
Zhou Shaorong, Qiao Shengru. Study of flexural properties of C/C composite at high temperature[J]. Journal of Materials Engineering, 2001(6): 16-18.
- [6] Alander Pasi, Lassila Lippo V J, Vallittu Pekka K. The span length and cross-sectional design affect values of strength [J]. Dental Materials, 2005, 21: 347-353.
- [7] 李家驹, 李延红, 曾汉民. 论复合材料弯曲实验[J]. 玻璃钢/复合材料, 1996(4): 14-18.
Li Jiaju, Li Yanhong, Zeng Hanmin. Study on composite bending experiment [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 1996(4): 14-18.
- [8] Hoodginso J M. 先进纤维增强复合材料性能测试[M]. 白树林, 戴兰宏, 张庆明, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 103-116.
Hoodginso J M. Mechanical testing of advanced fibre composites[M]. Bai Shulin, Dai Lanhong, Zhang Qingming, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 103-116.
- [9] Tillie M N, Lam T M, Girard J F. Insertion of an interphase synthesized from a functionalized silicone into glass - fiber/epoxy composites [J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(5): 659-663.
- [10] 王丹勇, 温卫东. 复合材料单向层合板损伤失效试验研究[J]. 复合材料学报, 2007, 24(5): 142-148.
Wang Danyong, Wen Weidong. Experimental research on damage failure of unidirectional laminas [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(5): 142-148.