

夹层结构弯曲性能试验方法

1 范围

本标准规定了夹层结构弯曲性能的试验原理、试验设备、试样、状态调节、试验步骤、计算、试验结果及试验报告等。

本标准适用于测定夹层结构承受弯曲时面板的应力和芯子的剪切应力；夹层结构的弯曲刚度和剪切刚度，夹层结构面板的弹性模量和芯子的剪切模量；也适用于测定面板与芯子之间的胶接强度。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 1446—2005 纤维增强塑料性能试验方法总则

GB/T 1455 夹层结构或芯子剪切性能试验方法

GB/T 3961 纤维增强塑料术语

3 术语和定义

GB/T 3961 确定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

弯曲面板强度 flexure facing strength

夹层结构在弯曲载荷作用下，面板破坏时面板所承受的最大应力。

3.2

弯曲芯子剪切强度 flexure core shear strength

夹层结构在弯曲载荷作用下，芯子破坏时芯子所承受的最大剪切应力。

3.3

弯曲胶层强度 flexure adhesive layer strength

夹层结构在弯曲载荷作用下，胶层破坏时胶层所承受的最大剪切应力。

3.4

外伸梁三点弯曲 overhanging beam three point bending

带有外伸臂长梁，在跨中加集中载荷，在跨中、两外伸点上安装三只位移传感器，测出跨中、左右外伸点的挠度，以便计算出夹层结构弯曲刚度和剪切刚度。

4 试验原理

通过夹层结构长梁试样的三点弯曲试验测定面板的弯曲强度，通过夹层结构短梁试样的三点弯曲测定芯子的剪切强度，通过夹层结构长梁试样的外伸梁三点弯曲测定弯曲刚度和剪切刚度，从而测定面板的弹性模量和芯子的剪切模量。

5 试验设备和试验条件

5.1 试验机应符合 GB/T 1446—2005 第 5 章的规定。

5.2 加载压头及支座见图1。加载压头垫块平面部分宽度应满足 $10\text{ mm} \leq B \leq 30\text{ mm}$ 。支座处可以自由转动的垫块,平面部分的宽度应满足 $10\text{ mm} \leq B' \leq 20\text{ mm}$ 。

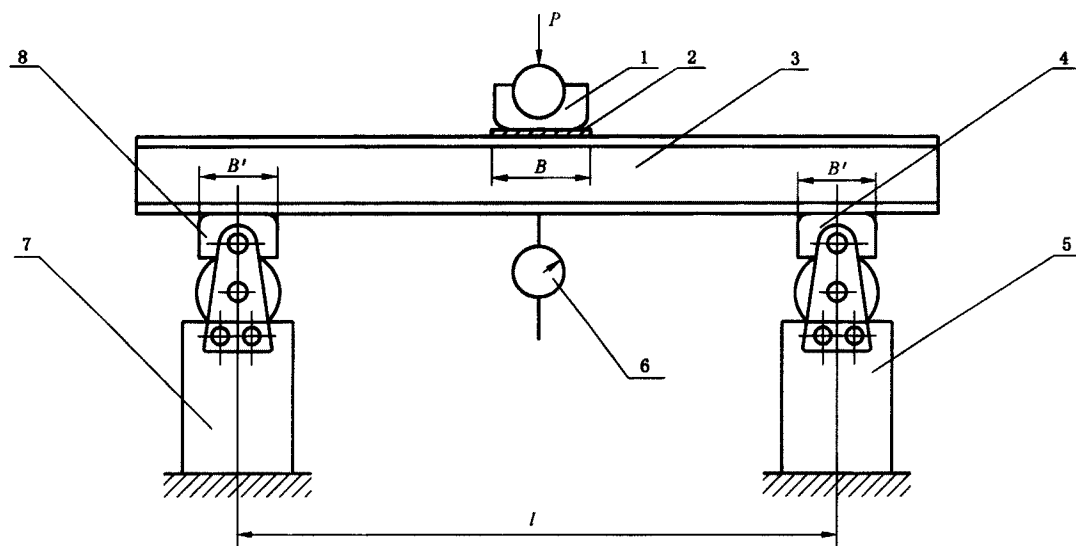
5.3 加载压头与试样之间垫上一块硬质橡胶垫片,其宽度大于压头宽度,厚度为 $3\text{ mm} \sim 5\text{ mm}$ 。

5.4 位移传感器,变形计,精度 0.001 mm 。

5.5 游标卡尺、卡钳,精度为 0.01 mm 。

5.6 加载速度随试样跨距、厚度及材料性能而改变。一般情况下,测强度时为 $(2 \sim 5)\text{ mm/min}$,测刚度时为 $(0.5 \sim 1.0)\text{ mm/min}$ 。

5.7 试验环境条件按 GB/T 1446—2005 第3章规定。



- 1——加载压头垫块;
2——橡胶垫片;
3——试样;
4、8——支座垫块;
5、7——支座;
6——位移传感器。

图1 三点弯曲试验装置示意图

6 试样

6.1 试样为矩形横截面的长方形形状。

6.2 试样厚度与夹层结构制品厚度相同。当夹层结构制品厚度未定时,为测定面板弯曲强度和芯子剪切性能,芯子厚度取 15 mm ,面板厚度取 $0.3\text{ mm} \sim 1.0\text{ mm}$ 。

6.3 试样宽度应小于跨距的二分之一。

6.3.1 对于硬质泡沫塑料、轻木等连续芯子,试样宽度为 60 mm 。

6.3.2 对于蜂窝、波纹等格子型芯子,试样宽度为 60 mm ,或至少应包括4个完整格子。

6.4 试样长度为跨距加 40 mm 或加二分之一厚度,选其中数值大者,跨距根据试验目的而定。

6.4.1 测定芯子剪切强度时,三点弯曲(见图1)的跨距应满足式(1):

$$l \leq \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot t_t}{\tau_{cb}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

l ——跨距,单位为毫米(mm);

σ_t ——面板的拉、压许用应力,单位为兆帕(MPa);

t_t ——面板厚度,单位为毫米(mm);

τ_{cb} ——芯子的剪切强度,单位为兆帕(MPa)。

6.4.2 测定面板强度时,三点弯曲的跨距应满足式(2):

$$l \geq \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot t_t}{\tau_c} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

σ_t ——面板的拉、压强度,单位为兆帕(MPa);

τ_c ——芯子的剪切许用应力,单位为兆帕(MPa)。

6.4.3 测定夹层结构的弯曲刚度、剪切刚度时,采用外伸梁三点弯曲(见图2),其跨距一般取式(1)等式值,外伸臂长度 a 为跨距的三分之一或二分之一。

6.4.4 对于纤维增强塑料等复合材料夹层结构,跨距、外伸臂长度等参见附录B。

6.5 对于正交各向异性结构,试样分纵向和横向两种。

6.6 试样加工按 GB/T 1446—2005 中 4.1.1 的规定。

6.7 试样数量按 GB/T 1446—2005 中 4.3 的规定。

7 状态调节

试样的状态调节按 GB/T 1446—2005 中 4.4 的规定。

8 试验步骤

8.1 试样外观检查按 GB/T 1446—2005 中 4.2 的规定。

8.2 将合格试样编号,测量试样跨距内任意三处的宽度和厚度,取算术平均值。面板厚度取名义厚度或同一批试样的平均厚度。测量精度按 GB/T 1446—2005 中 4.5 的规定。对格子型芯子的夹层结构试样,记录横截面上格子壁的数目。

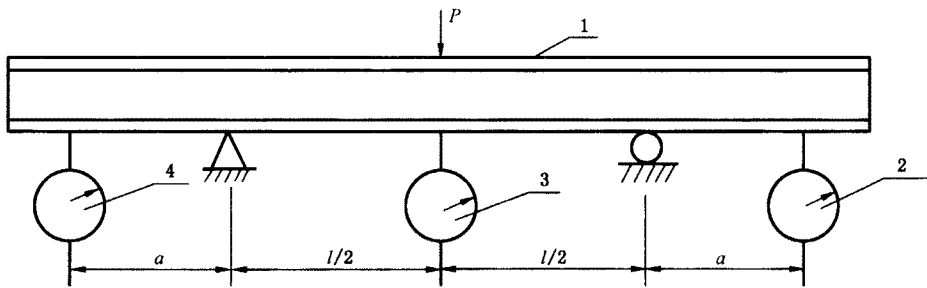
8.3 按选定跨距调整支座,跨中安装位移传感器,见图1。测刚度时,按外伸梁三点弯曲方法安装三只位移传感器,见图2。

8.4 测定强度时,把试样安放在弯曲试验的支座上,加上加载压头,并在压头与试样之间垫上一块硬质橡胶垫片,调整试验机零点,按选定的加载速度,均匀连续加载至试样破坏,读取破坏载荷,观察并记破坏形式。

8.5 测定刚度时,施加预加载荷(破坏载荷的15%~20%),消除试样与支座间的空隙,卸至初载(破坏载荷的5%),调整仪表零点,然后以破坏载荷的5%为级差,按规定的加载速度,分级加载至破坏载荷的40%~50%,记录各级载荷和相应挠度值。若需整个载荷-挠度资料,则应测到破坏为止。如有自动记录仪表,可以连续加载。

注1:若出现载荷示值下降或停顿现象,则以此时的载荷示值作为破坏载荷。

注2:芯子剪切强度和剪切模量按 GB/T 1455 测定为宜。



- 1——试样；
2、4——外伸点的位移传感器；
3——跨中的位移传感器；
l——跨距；
a——外伸臂长度。

图 2 外伸梁三点弯曲示意图

9 计算

- 9.1 绘制载荷-挠度曲线。
9.2 芯子的剪切应力按式(3)计算：

$$\tau_c = \frac{P \cdot K}{2 \cdot b \cdot (h - t_f)} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- τ_c ——芯子剪切应力，单位为兆帕(MPa)；
P——跨中载荷，单位为牛顿(N)；
K——无量纲数；
b——试样宽度，单位为毫米(mm)；
h——试样厚度，单位为毫米(mm)；
 t_f ——试样面板厚度，单位为毫米(mm)。

如果 K 取 1，则上式不计及面板承受的剪切，当计及面板承剪时，K 按式(4)、(5)计算：

$$K = 1 - e^{-A} \dots\dots\dots (4)$$

$$A = \frac{l}{4t_f} \left[\frac{6G_c(h - t_f)}{E_f \cdot t_f} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- e——自然对数的底；
A——无量纲数，按式(5)计算；
 G_c ——芯子剪切模量，单位为兆帕(MPa)；
 E_f ——面板弹性模量，单位为兆帕(MPa)。

当 P 为破坏载荷，破坏发生面板与芯子脱胶时，则式(3)计算的结果为胶接剪切强度。

当 P 为比例极限载荷时，则式(3)计算的结果为芯子剪切比例极限。

- 9.3 面板应力按式(6)计算：

$$\sigma_f = \frac{P \cdot l}{4b \cdot t_f(h - t_f)} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- σ_f ——面板中的拉、压应力，单位为兆帕(MPa)。

当 P 为破坏载荷，并且发生面板拉断或压缩皱折等破坏现象时，则式(6)计算的结果为夹层结构弯曲时的面板强度。

9.4 夹层结构弯曲刚度按式(7)计算:

$$D = \frac{l^2 \cdot a \cdot \Delta P}{16 f_1} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

D ——夹层结构的弯曲刚度,单位为牛顿·平方毫米($N \cdot mm^2$);

a ——外伸臂长度,单位为毫米(mm);

ΔP ——载荷-挠度曲线初始段的载荷增量值,单位为毫米(mm);

f_1 ——对应 ΔP 的外伸点的挠度增量值(取左右两点的平均值),单位为毫米(mm)。

9.5 面板的弹性模量按式(8)计算:

$$E_t = \frac{D}{J} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

E_t ——面板弹性模量,单位为兆帕(MPa);

J ——夹层结构惯性矩,单位为四次方毫米(mm^4)。

$$J = \frac{(h^3 - h_c^3) \cdot b}{12(1 - \mu_t^2)} \dots\dots\dots (9)$$

或:

$$J = \frac{b \cdot t_t (h - t_t)^2}{2} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

h_c ——试样中芯子厚度,单位为毫米(mm);

μ_t ——面板的泊松比。

注:式(9)中已略去芯子的弯曲刚度,式(10)中已略去芯子和面板本身的弯曲刚度。

9.6 夹层结构的剪切刚度按式(11)计算:

$$U = \frac{l \cdot \Delta P}{4 \left(f - \frac{l}{3a} \times f_1 \right)} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

U ——夹层结构的剪切刚度,单位为牛顿(N);

f ——对应 ΔP 试样跨中的挠度增量值,单位为毫米(mm)。

9.7 芯子的剪切弹性模量,按式(12)计算:

$$G_c = \frac{U}{b(h - t_t)} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

G_c ——芯子剪切弹性模量。

9.8 不同面板夹层结构的弯曲性能计算见附录 C。

9.9 蜂窝芯子的蜂壁剪切性能计算见附录 D。

10 试验结果

按 GB/T 1446—2005 第 6 章的规定。

11 试验报告

按 GB/T 1446—2005 第 7 章的规定。

附 录 A
(资料性附录)

本标准与 ASTM C393-00 章条编号对照

表 A.1 给出了本标准章条编号与 ASTM C393-00 章条编号对照一览表。

表 A.1 本标准与 ASTM C393-00 章条编号对照

本标准章条编号	对应的国外标准章条编号
1. 范围	1. 范围
2. 规范性引用文件	2. 参考文献
3. 术语和定义	—
—	3. 意义和应用
4. 试验原理	—
5. 试验设备和条件	4. 设备
6. 试样	5. 试样
7. 状态调节	6. 状态调节
8. 试验步骤	7. 步骤
9. 计算	8. 计算
10. 试验结果	—
11. 试验报告	9. 报告
—	10. 精度和偏差
—	11. 关键词

附 录 B
(资料性附录)
跨距参考表

对于纤维增强塑料等复合材料夹层结构,测芯子剪切强度的短梁跨距,外伸梁三点的跨距和外伸长度,测面板强度的三点弯曲跨距的参考数值列于表 B.1。

表 B.1 跨距参考表 单位为毫米

试样厚度	h	6~10	10~20	20~40
短梁测芯子剪切强度	l	100	160	200
外伸梁三点弯曲测刚度	l	120	160	200
	a	60	80	100
三点弯曲测面板强度	l	≥ 300	≥ 400	≥ 500
注:面板厚度小于或等于 1 mm。				

附 录 C
(规范性附录)

不同面板夹层结构弯曲性能计算公式

C.1 弯曲刚度

不同面板夹层结构弯曲刚度按式(C.1)、(C.2)计算:

$$D = \sum_{i=1}^2 E_i J_i = \frac{E_{f1} b}{3} e^3 + \frac{E_{f1} b}{3} (t_{f1} - e)^3 + E_{f2} t_{f2} b \left(h - e - \frac{t_{f2}}{2} \right)^2 + \frac{E_{f2} b t_{f2}^3}{12} \quad (\text{当 } t_{f1} > e) \quad \cdots (C.1)$$

$$D = \sum_{i=1}^2 E_i J_i = \frac{E_{f1} b t_{f1}^3}{12} + E_{f1} t_{f1} b \left(e - \frac{t_{f1}}{2} \right)^2 + E_{f2} t_{f2} b \left(h - e - \frac{t_{f2}}{2} \right)^2 + \frac{E_{f2} b t_{f2}^3}{12} \quad (\text{当 } t_{f1} < e) \quad \cdots (C.2)$$

$$e = \frac{1/2 E_{f1} t_{f1}^2 + E_{f2} t_{f2} \left(h - \frac{t_{f2}}{2} \right)}{E_{f1} t_{f1} + E_{f2} t_{f2}} \quad \cdots (C.3)$$

式中:

D ——夹层结构弯曲刚度,单位为牛顿·平方毫米(N·mm²);

E_{f1} ——上面板的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

b ——试样宽度,单位为毫米(mm);

e ——夹层结构中性轴距上面板上表面的距离,单位为毫米(mm);

t_{f1} ——上面板厚度,单位为毫米(mm);

E_{f2} ——下面板的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

t_{f2} ——下面板厚度,单位为毫米(mm);

h ——试样厚度,单位为毫米(mm)。

注:弯曲刚度 D 已略去芯子的弯曲刚度。

当略去面板本身的弯曲刚度时,夹层结构弯曲刚度近似地为:

$$D = \frac{E_{f1} t_{f1} E_{f2} t_{f2} (h + h_c)^2 b}{4(E_{f1} t_{f1} + E_{f2} t_{f2})} \quad \cdots (C.4)$$

式中:

h_c ——芯子厚度,单位为毫米(mm)。

C.2 面板应力

下面板受拉的应力按式(C.5)计算:

$$\sigma_{f2} = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{E_{f2} (h - e)}{D} \quad \cdots (C.5)$$

式中:

σ_{f2} ——下面板受拉应力,单位为兆帕(MPa);

P ——跨中载荷,单位为牛顿(N);

l ——跨距,单位为毫米(mm)。

上面板受压的应力按式(C.6)计算:

$$\sigma_{f1} = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{E_{f1} e}{D} \quad \cdots (C.6)$$

式中:

σ_{f1} ——上面板受压应力,单位为兆帕(MPa)。

附录 D

(资料性附录)

蜂壁芯子的蜂壁剪切性能计算公式

D.1 蜂壁剪切应力按式(D.1)计算:

$$\tau_s = \frac{P}{2n \cdot t_s(h - t_f)} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- τ_s ——蜂壁剪切应力,单位为兆帕(MPa);
- P ——跨中的载荷,单位为牛顿(N);
- n ——试样横截面上的单层蜂壁数;
- t_s ——单层蜂壁厚度,单位为毫米(mm);
- h ——试样厚度,单位为毫米(mm);
- t_f ——面板厚度,单位为毫米(mm)。

当 P 破坏载荷时,按式(D.1)计算的结果为蜂壁剪切强度。

D.2 蜂壁剪切弹性模量按式(D.2)计算:

$$G_s = \frac{U}{n \cdot t_s(h - t_f)} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

- G_s ——蜂壁剪切弹性模量,单位为兆帕(MPa);
- U ——剪切刚度,单位为牛顿(N)。

D.3 对于其他格子型芯子壁的剪切性能,可以按式(D.1)、(D.2)原理计算。
