



中华人民共和国国家标准

GB/T 41501—2022/ISO 19927:2018

纤维增强塑料复合材料 双梁法测定层间剪切强度和模量

Fibre-reinforced plastic composites—Determination of interlaminar
strength and modulus by double beam shear test

(ISO 19927:2018, IDT)

2022-04-15 发布

2022-11-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验原理	3
5 仪器设备	4
6 试样	6
7 试样数量	7
8 状态调节	7
9 试验步骤	7
10 计算及结果表示	8
11 精密度	11
12 试验报告	12
附录 A (资料性) 有关计算层间剪切模量 G_{13} 的附加细节	13
附录 B (资料性) 实验室间的研究	16
参考文献	20

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件等同采用 ISO 19927:2018《纤维增强塑料复合材料 双梁法测定层间剪切强度和模量》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国建筑材料联合会提出。

本文件由全国纤维增强塑料标准化技术委员会(SAC/TC 39)归口。

本文件起草单位：北京玻璃钢研究设计院有限公司、中国航发北京航空材料研究院、武汉理工大学、常州市宏发纵横新材料科技股份有限公司、南京航空航天大学、北京玻璃钢院检测中心有限公司、江苏恒神股份有限公司、双一科技盐城有限公司、威海拓展纤维有限公司、浙江恒石纤维基业有限公司、常州达姆斯检测技术有限公司。

本文件主要起草人：王占东、田垚暉、朱四荣、谈昆仑、陶杰、彭兴财、薛鹏、孙双宝、相文航、刘连学、谈源。

纤维增强塑料复合材料

双梁法测定层间剪切强度和模量

1 范围

本文件规定了用双梁法(DBS)测定纤维增强塑料复合材料的层间剪切强度和层间剪切模量。

本文件适用于能发生可接受层间剪切失效的玻璃纤维或碳纤维增强热固性塑料复合材料。

本文件仅适用于具有对称和均衡铺层的层合板,以避免试验结果受到弯曲/扭转或弯曲/拉伸耦合变形的影响(见 6.2)。本文件尤其适用于纤维沿试样长度方向(轴向)排列的单向层合板。

对于具有特定铺层、基体和纤维(例如天然纤维)的层合板,需评估分层失效性来判定是否适用于本文件。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 291 塑料 试样状态调节和试验的标准环境(Plastics—Standard atmospheres for conditioning and testing)

注: GB/T 2918—2018 塑料 试样状态调节和试验的标准环境(ISO 291:2008,MOD)

ISO 472 塑料 术语(Plastics—Vocabulary)

注: GB/T 2035—2008 塑料术语及其定义(ISO 472:1999,IDT)

ISO 1268(所有部分) 纤维增强塑料 试验板制备方法(Fibre-reinforced plastics—Methods of producing test plates)

注: GB/T 27797(所有部分) 纤维增强塑料 试验板制备方法[ISO 1268(所有部分)]

ISO 2602 试验结果的统计处理和解释 平均值的估计 置信区间(Statistical interpretation of test results—Estimation of the mean—Confidence interval)

ISO 5893 橡胶和塑料试验设备 拉伸、弯曲和压缩型(恒速驱动) 规范[Rubber and plastics test equipment—Tensile, flexural and compression types(constant rate of traverse)—Specification]

注: GB/T 17200—2008 橡胶塑料拉力、压力和弯曲试验机(恒速驱动) 技术规范(ISO 5893:2002,IDT)

ISO 16012 塑料 试样线性尺寸的测定(Plastics—Determination of linear dimensions of test specimens)

3 术语和定义

ISO 472 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

ISO 和 IEC 维护的用于标准化的术语数据库地址如下:

——ISO 在线浏览平台:<https://www.iso.org/obp>

——IEC 电子开放平台:<http://www.electropedia.org/>

3.1

临界载荷 critical load

F_{crit}

可接受失效模式下(见 9.5)分层时的载荷。

注: 见模式 1~模式 3。

3.2

层间剪切强度 interlaminar shear strength

$\tau_{13\text{max}}$

由临界载荷计算出的剪切强度。

注: 见 10.1。

3.3

层间剪切模量 interlaminar shear modulus

G_{13}

由载荷-挠度曲线斜率计算出的剪切模量。

注: 见 10.2。

3.4

跨距 span

L

最外侧支点之间的距离。

3.5

试样坐标轴 specimen coordinate axes

注 1: 与层合板纵轴平行的方向定义为“1”方向, 与层合板纵轴垂直的方向定义为“2”方向(见 ISO 1268-4), 垂直于层合板的方向定义为“3”方向(即沿层合板厚度的方向)。

注 2: 见图 1。

3.5.1

纵向拉伸模量 longitudinal tensile modulus

E_{11}

试样纵向或“1”方向的拉伸模量。

注: 单位为吉帕(GPa)。

3.5.2

横向拉伸模量 transverse tensile modulus

E_{22}

试样横向或“2”方向的拉伸模量。

注: 单位为吉帕(GPa)。

3.5.3

面内剪切模量 in-plane shear modulus

G_{12}

1-2 平面内的剪切模量。

注: 单位为吉帕(GPa)。

3.5.4

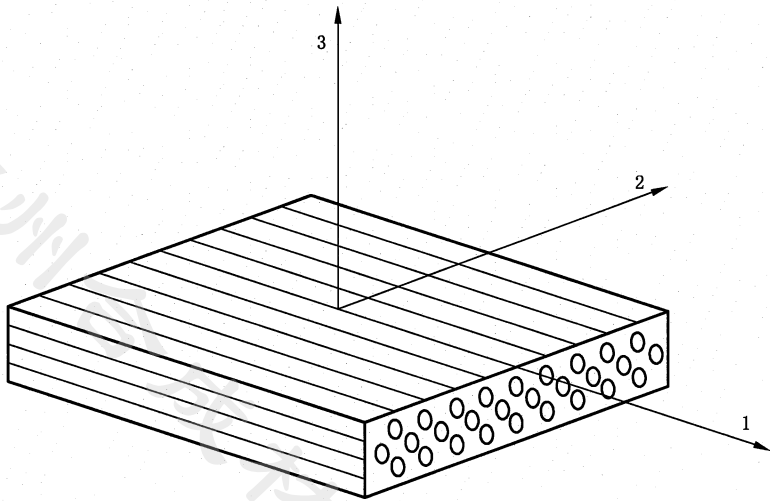
面内泊松比 in-plane poisson ratio

ν_{12}

1-2 平面内的泊松比。

注 1: 无量纲。

注 2: 3.5.1~3.5.4 中所定义的工程弹性常数由制造商给出或测试得到,工程弹性常数用于计算层间剪切模量(见 10.2)。



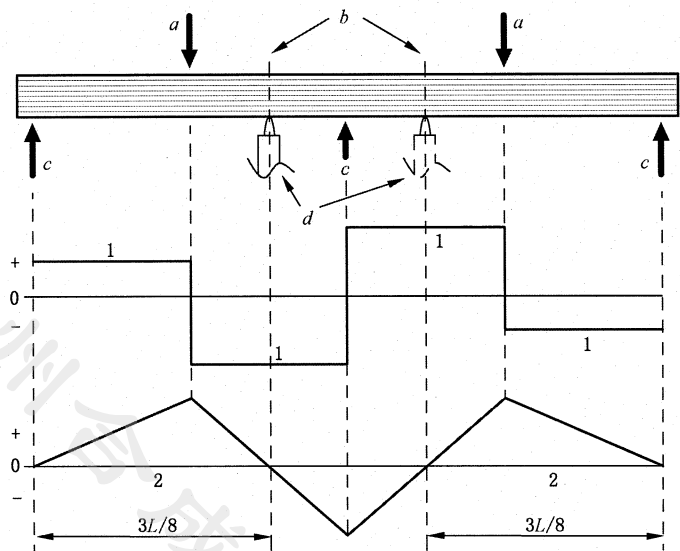
标引序号说明:

- 1——与层合板纵轴平行的方向;
- 2——与层合板纵轴垂直的方向;
- 3——垂直于层合板的方向(即沿层合板厚度的方向,铺贴的各层均垂直于这个方向)。

图 1 单向纤维增强塑料复合材料层合板坐标轴

4 试验原理

对矩形截面梁试样进行五点弯曲加载,施加的载荷在两加载压头之间产生两个纯剪切截面,如图 2 所示。当发生分层失效时,试样所承受的临界载荷用于测定层间剪切强度,试样在载荷作用下所产生的挠度用于测定层间剪切模量。为计算层间剪切模量,应获得或测试以下工程弹性常数: E_{11} 、 E_{22} 、 G_{12} 和 ν_{12} 。



标引序号说明：
1——层间剪切应力；
2——弯曲应力；
a——载荷；
b——纯剪切截面；
c——支撑力；
d——挠度测量点。

图 2 DBS 试样应力分布

5 仪器设备

5.1 试验机

5.1.1 通则

试验机符合 ISO 5893 和 5.1.2 及 5.1.3 的规定。

5.1.2 试验速度

试验速度 *v* 应能保持恒定,符合 ISO 5893 的规定。

5.1.3 载荷指示装置

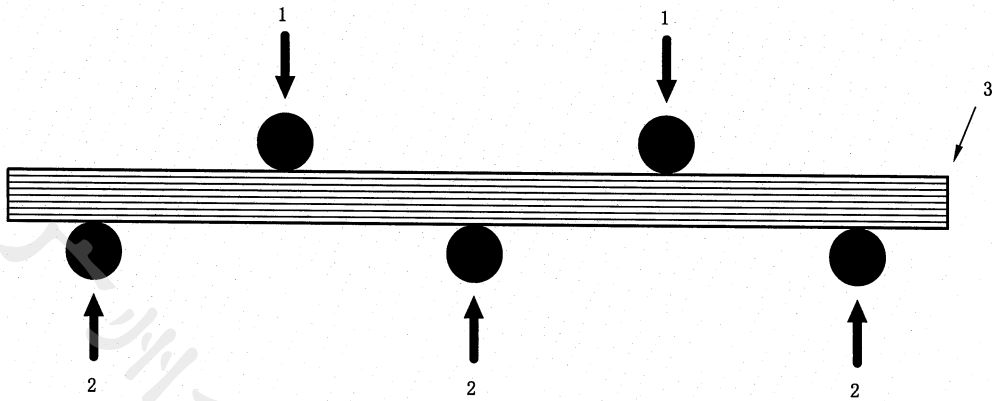
载荷的示值误差小于被测载荷的±1%(见 ISO 7500-1 定义的 1 级)。

5.2 尺寸测量仪器

精度为 0.01 mm 或更优的尺寸测量仪器,用于测量试样的厚度 *h* 和宽度 *b*。尺寸测量仪器应有与被测试样表面相适应的接触面(如:平面对平整、光洁的表面;半球面对不规则的表面)。

5.3 加载装置

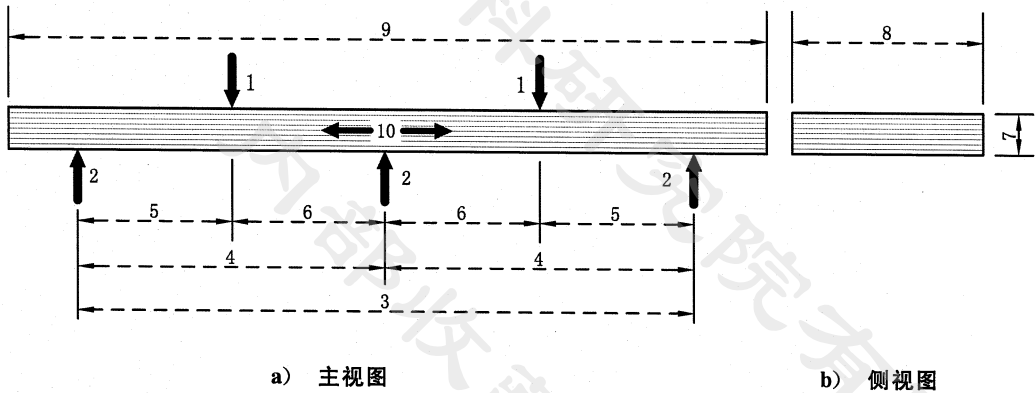
跨距可调的 5 点弯曲夹具,如图 3 所示。加载压头及支座在跨距内均匀定位(公差为±0.2 mm),如图 4 所示。加载压头及支座的圆角直径为 6_{-0.1}⁰ mm。典型加载装置如图 5 所示。



标引序号说明：

- 1——加载压头；
- 2——支座；
- 3——试样。

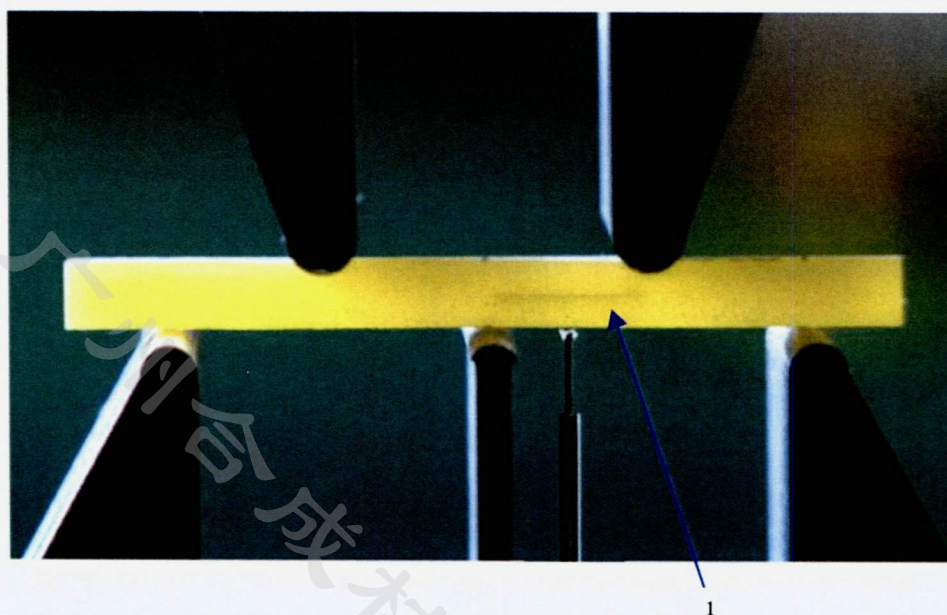
图 3 双梁剪切夹具



标引序号说明：

- 1——加载点；
- 2——支撑点；
- 3——跨距；
- 4——1/2跨距；
- 5——外区；
- 6——内区；
- 7——试样厚度；
- 8——试样宽度；
- 9——试样长度；
- 10——纤维方向(单向试样)。

图 4 用于测定层间剪切强度和模量的试样及加载和支撑试样的位置



标引序号说明:

1——层间裂纹。

图 5 用于测定层间剪切强度和模量的典型加载装置

5.4 位移测量装置

选用合适的位移传感器(如:DVRT 型 LVDT 或单臂位移计)测量试样跨距内区中点处(即距外侧支座位置 $0.375L$ 处)的挠度。记录装置宜能连续记录试样下表面的位移,位移的示值误差小于被测位移的 $\pm 1\%$ (见 ISO 9513 定义的 1 级)。位移测量装置应定期进行校准,并能溯源。

6 试样

6.1 形状和尺寸

6.1.1 推荐试样尺寸

A 型试样的宽度 b 应为 $10\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$,厚度 h 应为 $2\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$,长度 l 应为 30 mm 。A 型试样的横截面与 ISO 14130 中标准试样的横截面相同。

B 型试样的宽度 b 应为 $8\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$,厚度 h 应为 $4\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$,长度 l 应为 60 mm 。

如有争议,应采用 A 型试样进行层间剪切强度的测定。

6.1.2 可选试样尺寸

可选试样的宽度和厚度之比应为 5,长度和厚度之比应为 15,与 A 型试样保持一致。

6.2 试样制备

6.2.1 通则

试验板的制备应按 ISO 1268(所有部分)或其他规范/协议,试验板能加工出一批试样(至少 5 个)及额外的备用试样(见 9.5)。层合板应具有对称和均衡的铺层,以避免试验结果受到弯曲/扭转或弯曲/

拉伸耦合变形的影响。若材料规范未给出或经相关方同意,试验板应为单向(UD)或 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 织物铺层形式。若能获得可接受的失效模式,也可采用其他试验板(如:多轴向)。试验板的 0° 、 x 方向或轴向应被标注。

6.2.2 试样加工

试样在机械加工过程中,不应出现影响材料性能的损伤,机械加工见 ISO 2818 和 ISO 527-4:1997 附录 A。

6.3 试样检查

试样应平整无扭曲,表面和边缘无裂纹、划痕、麻点、凹坑和毛刺。为检查试样是否符合这些要求,应将试样紧贴在直尺、直角尺或平板上,用目视观测或用千分尺(或类似尺寸测量仪器)对试样进行测量检查。经目测或测量,试样有一项或几项不符合要求时,应舍弃不符合要求的试样或在测试前再加工以满足形状和尺寸要求。试样长度方向任意一点的厚度偏差不应超过平均厚度的 $\pm 5\%$ 。

7 试样数量

应至少测试 5 个试样,并能获得可接受的层间剪切失效(检查可接受失效模式见 9.5)。

如需精密度更高的平均值,试样数量可多于 5 个,可由平均值的置信区间评估精密度(95%置信水平,见 ISO 2602)。

8 状态调节

如在材料规范中有明确规定,按规定对试样进行状态调节;如没有规定,应选择 ISO 291 中最适合的条件对试样进行状态调节,除非相关方另有规定。

9 试验步骤

9.1 试验环境

如在材料规范中有明确规定,按规定的试验环境对试样进行试验;如没有规定,应选择 ISO 291 中最适合的环境进行试验,除非相关方另有规定(例如:在高温或低温下进行试验)。

9.2 试样尺寸

测量试样在跨距中点处的宽度和厚度,精确至 0.02 mm,见 ISO 16012。

试验跨距设置为试样厚度的 10 倍(例如:A 型试样跨距为 20 mm,B 型试样跨距为 40 mm),视待测试样的类型而定。

9.3 试验速度

如在材料规范中有明确规定,按规定的试验速度;如没有规定,试验速度 v 应为 1 mm/min。(试验机试验速度的误差要求)见 ISO 5893。

9.4 数据采集

在整个试验过程中,连续记录载荷和挠度,如图 6 所示。

9.5 可接受失效模式

检查并记录失效模式,如图 7 所示。

试样应在中面或附近平面发生层间破坏,模式 1~模式 3 是可接受的。

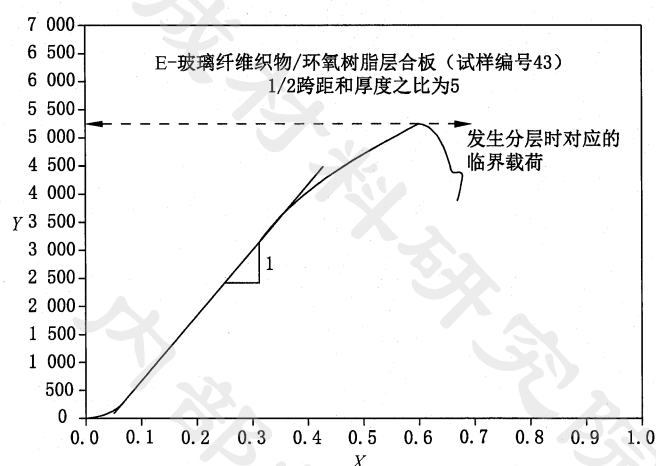
模式 4~模式 7 是不可接受的,应剔除不可接受的试样。应取备用试样重新进行试验,剔除试样的数量应被记录。

9.6 临界载荷

记录临界载荷作为失效载荷,如图 6 和图 7 所示。

9.7 载荷-挠度曲线斜率

在载荷-挠度曲线上,计算初始线性响应段切线的斜率,如图 6 所示。



标引序号说明:

Y——载荷,单位为牛(N);

X——挠度,单位为毫米(mm);

1——斜率。

图 6 显示初始线性响应段切线斜率的典型载荷-挠度曲线

10 计算及结果表示

10.1 层间剪切强度

按公式(1)计算层间剪切强度 $\tau_{13\max}$:

$$\tau_{13\max} = 33F_{\text{crit}}/64bh \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$\tau_{13\max}$ ——层间剪切强度,单位为兆帕(MPa);

F_{crit} ——临界载荷,单位为牛顿(N);

b ——试样宽度,单位为毫米(mm);

h ——试样厚度,单位为毫米(mm)。

计算层间剪切强度的算术平均值;如需要,按 ISO 2602 计算标准差和平均值的 95%置信区间。

层间剪切强度保留 3 位有效数字。

10.2 层间剪切模量

按公式(2)计算层间剪切模量 G_{13} 。

示例：在公式(2)~公式(5)中，A 材料 B 型试样的工程弹性常数和尺寸值已给出，其值为： $E_{11} = 159 \text{ GPa}$ ； $E_{22} = 8.5 \text{ GPa}$ ； $G_{12} = 4.6 \text{ GPa}$ ； $\nu_{12} = 0.32$ ； $L = 42 \text{ mm}$ ； $b = 9.42 \text{ mm}$ ； $h = 4.11 \text{ mm}$ 。A 材料 B 型试样的 C_1 、 C_2 和 D_{11}^{-1} 的含义、单位和名义值见表 1。

表 1 A 材料 B 型试样的 C_1 、 C_2 和 D_{11}^{-1} 的含义、单位和名义值

符号	含义	单位	名义值
D_{11}^{-1}	梁试样弯曲刚度矩阵的 逆矩阵对角线上的第一个元素	$(\text{GPa} \cdot \text{mm}^3)^{-1}$	0.002 782
C_1	常数	mm/kN	1.708 6
C_2	常数	1/mm	0.010 2

注：有关公式(2)推导的更多细节见附录 A。

$$G_{13} = \frac{C_2 \left(1 - \frac{43}{s} C_1\right)}{16 C_1 \left(1 - \frac{25}{8s} C_1\right)} \left[-1 \pm \sqrt{1 + \frac{128 C_1 \left(1 - \frac{25}{8s} C_1\right)}{s \left(1 - \frac{43}{s} C_1\right)^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_1 = \frac{L^3}{12 \, 288 \sum_{i=1}^n (E_i I_i)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_2 = \frac{L}{128 k_s A} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\sum_{i=1}^n (E_i I_i) = \frac{b}{D_{11}^{-1}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- G_{13} ——层间剪切模量，单位为吉帕(GPa)；
- s ——载荷-挠度曲线斜率的倒数，单位为毫米每千牛(mm/kN)；
- A ——试样的横截面积(bh)，单位为平方毫米(mm^2)；
- k_s ——矩形梁截面切变系数，数值取 5/6，无量纲；
- L ——跨距，单位为毫米(mm)；
- $E_i I_i$ ——梁试样的弯曲刚度，单位为千牛平方毫米($\text{kN} \cdot \text{mm}^2$)。

计算层间剪切模量的算术平均值；如需要，按 ISO 2602 计算标准差和平均值的 95%置信区间。
层间剪切模量保留 3 位有效数字。

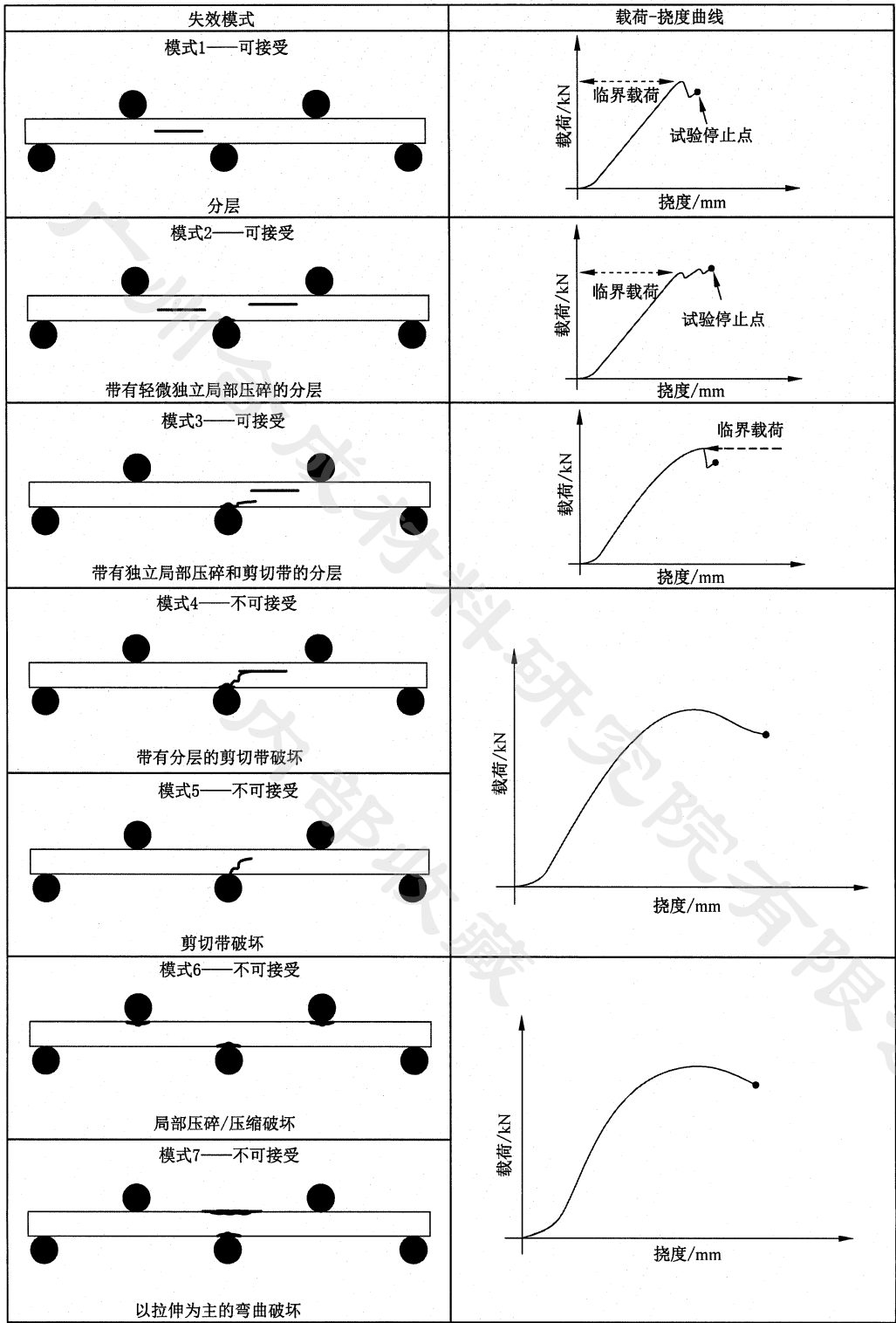


图 7 可接受和不可接受的失效模式和相关载荷-挠度曲线

11 精密度

通过实验室间的研究,本试验方法的精密度总结如下。此次研究涉及 7 个试验地点和 3 种不同的复合材料:

- a) 单向碳纤维/环氧树脂;
- b) 平纹编织碳纤维/环氧树脂;
- c) 8 枚缎纹编织 E-玻璃纤维/环氧树脂。

关于精密度的更多细节见附录 B 和表 2~表 5。

表 2 三种材料重复性、再现性和平均层间剪切强度

材料	厚度 mm	重复性条件		再现性条件		平均值 $\tau_{13\max}$ MPa
		S_r	r	S_R	R	
A.碳纤维/ 环氧树脂 1	2	4.2	11.6	6.3	17.5	138.3
	4	2.6	7.2	3.0	8.5	131.7
B.碳纤维/ 环氧树脂 2	2	3.1	8.7	3.6	10.2	86.0
	4	2.8	7.9	4.1	11.5	87.2
C.E-玻璃纤维/ 环氧树脂	2	1.3	3.6	2.4	6.9	61.7
	4	0.7	2.1	1.4	3.8	59.2

表 3 三种材料重复性和再现性与平均层间剪切强度的比值

材料	厚度 mm	重复性条件		再现性条件	
		S_r %	r %	S_R %	R %
A.碳纤维/ 环氧树脂 1	2	3.0	8.4	4.6	12.7
	4	2.0	5.5	2.3	6.5
B.碳纤维/ 环氧树脂 2	2	3.6	10.1	4.2	11.9
	4	3.2	9.1	4.7	13.2
C.E-玻璃纤维/ 环氧树脂	2	2.1	5.8	3.9	11.2
	4	1.2	3.5	2.4	6.4

表 4 三种材料重复性、再现性和平均层间剪切模量

材料	厚度 mm	重复性条件		再现性条件		平均值 G_{13} GPa
		S_r	r	S_R	R	
A.碳纤维/ 环氧树脂 1	2	0.3	1.0	0.6	1.6	2.1
	4	0.2	0.4	0.2	0.5	2.1

表 4 三种材料重复性、再现性和平均层间剪切模量 (续)

材料	厚度 mm	重复性条件		再现性条件		平均值 G_{13} GPa
		S_r	r	S_R	R	
B.碳纤维/ 环氧树脂 2	2	0.2	0.6	0.4	1.1	2.1
	4	0.2	0.5	0.2	0.7	2.1
C.E-玻璃纤维/ 环氧树脂	2	0.2	0.6	0.3	0.7	1.9
	4	0.1	0.4	0.8	2.2	2.1

表 5 三种材料重复性和再现性与平均层间剪切模量的比值

材料	厚度 mm	重复性条件		再现性条件	
		S_r %	r %	S_R %	R %
A.碳纤维/环氧树脂 1	2	15.8	44.3	26.7	74.8
	4	7.6	21.3	8.8	24.7
B.碳纤维/ 环氧树脂 2	2	9.6	27.0	17.7	49.7
	4	8.7	24.3	11.9	33.3
C.E-玻璃纤维/ 环氧树脂	2	11.1	31.0	14.1	39.4
	4	6.8	19.1	37.7	105.7

12 试验报告

试验报告应包含以下内容:

- 本文件名称及执行文件编号;
- 被测材料的完整标识,包括类型、来源、制造商代码、组成和所知的历史等;
- 试验日期;
- 试样尺寸;
- 试样制备方法;
- 试样状态调节和试验的标准环境,如需要,根据有关材料或产品相关的标准所增加的特殊状态调节;
- 试样数量;
- 每个试样的试验结果,如需要,给出载荷-挠度曲线;
- 试验结果的平均值;
- 失效模式;
- 关于试样是否有被剔除的声明及有剔除时的理由;
- 如需要,给出标准差和平均值的 95% 置信区间;
- 任何未按本文件规定的操作以及可能影响试验结果的任何事件。

附录 A

(资料性)

有关计算层间剪切模量 G_{13} 的附加细节

A.1 通则

用能量法求解层间剪切模量。为便于分析,图 4 转换为带有附加符号的图 A.1。

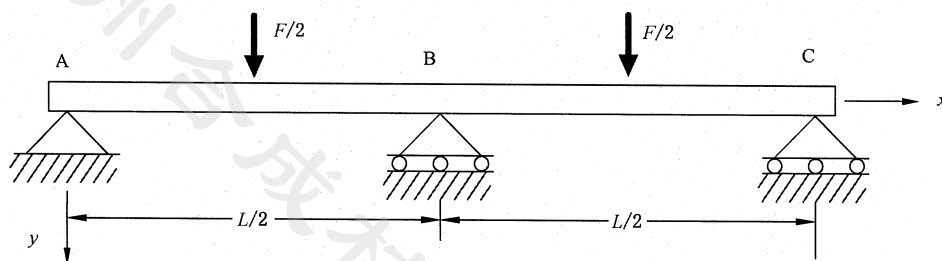


图 A.1 用于测定层间剪切强度和模量的试样及加载和支撑试样的位置

A.2 卡氏第二定理的应用

由于梁的外加载荷和支撑结构对称,所以只需考虑四个区域中的一半。中心支座(B)处的总挠度由公式(A.1)和公式(A.2)给出:

$$\Delta_B = 2 \int_0^{L/4} \frac{M}{EI} \frac{dM}{dR_B} dx + 2 \int_{L/4}^{L/2} \frac{M}{EI} \frac{dM}{dR_B} dx + 2 \int_0^{L/4} \frac{V}{k_s GA} \frac{dV}{dR_B} dx + 2 \int_{L/4}^{L/2} \frac{V}{k_s GA} \frac{dV}{dR_B} dx \quad \text{..... (A.1)}$$

$$R_A = \frac{F}{2} - \frac{R_B}{2} \quad \text{..... (A.2)}$$

梁左侧两个区域弯矩、剪力的表达式及其对 R_B 的导数分别由公式(A.3)~公式(A.10)给出:

$$-R_A x + M = 0 \therefore M = R_A x = \frac{F}{2} x - \frac{R_B}{2} x \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \text{..... (A.3)}$$

$$-R_A x + \frac{F}{2} \left(x - \frac{L}{4} \right) + M = 0 \therefore M = R_A x - \frac{F}{2} \left(x - \frac{L}{4} \right) = \frac{FL}{8} - \frac{R_B}{2} x \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{L}{2} \quad \text{..... (A.4)}$$

$$\frac{dM}{dR_B} = -\frac{x}{2} \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \text{..... (A.5)}$$

$$\frac{dM}{dR_B} = -\frac{x}{2} \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{L}{2} \quad \text{..... (A.6)}$$

$$-R_A + V = 0 \therefore V = R_A = \frac{F}{2} - \frac{R_B}{2} x \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \text{..... (A.7)}$$

$$-R_A + \frac{F}{2} + V = 0 \therefore V = R_A - \frac{F}{2} = -\frac{R_B}{2} \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{L}{2} \quad \text{..... (A.8)}$$

$$\frac{dV}{dR_B} = -\frac{1}{2} \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

$$\frac{dV}{dR_B} = -\frac{1}{2} \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{L}{2} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

由于支座 B 处的挠度一定为零,所以结合公式(A.3)~公式(A.10),解出公式(A.1)中的全部积分项,可得出公式(A.11):

$$R_B = \frac{11k_s GAL^2 + 96EI}{k_s GAL^2 + 12EI} \cdot \frac{F}{16} = \frac{1 + \frac{96EI}{11k_s GAL^2}}{1 + \frac{12EI}{k_s GAL^2}} \cdot \frac{11}{16} F \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

A.3 单位载荷法(F_0)的应用

为保持梁的变形特性,在外加载荷与中心支座之间的两个中点处,分别施加两个单位载荷 F_0 ,如图 A.2 所示。

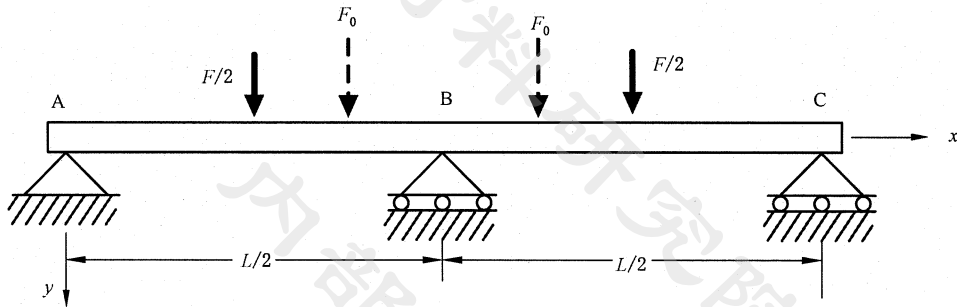


图 A.2 用于测定层间剪切强度和模量的试样及加载和支撑试样的位置(单位载荷法)

R_A 的关系式由公式(A.12)给出:

$$R_A = \frac{F}{2} - \frac{R_B}{2} + F_0 \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

梁左侧两个区域剪力的表达式及其对 F_0 的导数分别由公式(A.13)~公式(A.18)给出:

$$V = R_A = \frac{F}{2} - \frac{R_B}{2} + F_0 \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

$$V = R_A - \frac{F}{2} = -\frac{R_B}{2} + F_0 \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{3L}{8} \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

$$V = R_A - \frac{F}{2} - F_0 = -\frac{R_B}{2} \quad \text{当 } \frac{3L}{8} < x < \frac{L}{2} \quad \dots\dots\dots (A.15)$$

$$\frac{dV}{dF_0} = 1 \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \dots\dots\dots (A.16)$$

$$\frac{dV}{dF_0} = 1 \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{3L}{8} \quad \dots\dots\dots (A.17)$$

$$\frac{dV}{dF_0} = 0 \quad \text{当 } \frac{3L}{8} < x < \frac{L}{2} \quad \dots\dots\dots (A.18)$$

梁左侧两个区域弯矩的表达式及其对 F_0 的导数分别由公式(A.19)~公式(A.24)给出:

$$M = R_A x = \frac{Fx}{2} - \frac{R_B}{2} x + F_0 x \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

$$M = R_A x - \frac{F}{2} \left(x - \frac{L}{4} \right) = \frac{FL}{8} - \frac{R_B}{2} x + F_0 x \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{3L}{8} \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

$$M = R_A x - \frac{F}{2} \left(x - \frac{L}{4} \right) - F_0 \left(x - \frac{3L}{8} \right) = \frac{FL}{8} - \frac{R_B}{2} x + \frac{3F_0 L}{8} \quad \text{当 } \frac{3L}{8} < x < \frac{L}{2} \quad \dots\dots\dots (A.21)$$

$$\frac{dM}{dF_0} = x \quad \text{当 } 0 < x < \frac{L}{4} \quad \dots\dots\dots (A.22)$$

$$\frac{dM}{dF_0} = x \quad \text{当 } \frac{L}{4} < x < \frac{3L}{8} \quad \dots\dots\dots (A.23)$$

$$\frac{dM}{dF_0} = \frac{3L}{8} \quad \text{当 } \frac{3L}{8} < x < \frac{L}{2} \quad \dots\dots\dots (A.24)$$

A.4 卡氏第二定理的应用

根据卡氏第二定理可得出：

$$\begin{aligned} \Delta = & \int_0^{L/4} \frac{M}{EI} \frac{dM}{dF_0} dx + \int_{L/4}^{3L/8} \frac{M}{EI} \frac{dM}{dF_0} dx + \int_{3L/8}^{L/2} \frac{M}{EI} \frac{dM}{dF_0} dx + \int_0^{L/4} \frac{V}{kGA} \frac{dV}{dF_0} dx + \int_{L/4}^{3L/8} \frac{V}{kGA} \frac{dV}{dF_0} dx \\ & + \int_{3L/8}^{L/2} \frac{V}{kGA} \frac{dV}{dF_0} dx = \frac{41FL^3}{3072EI} - \frac{39R_B L^3}{2048EI} + \frac{FL}{8kGA} - \frac{3R_B L}{16kGA} \quad \dots\dots\dots (A.25) \end{aligned}$$

将公式(A.11)代入公式(A.25)中的 $R_{B,s}$ (即 Δ/P) 为载荷-挠度曲线斜率的倒数, 对于本文件涉及的双梁法, k 即为 k_s , 重新化简可得出:

$$k_s^2 A^2 L^2 (98304EI_s - 25L^3) G^2 + 32EI k_s A (36864EI_s - 129L^3) G - 36864E^2 I^2 L = 0 \quad \dots\dots\dots (A.26)$$

式中, k_s 取 5/6, 这是考虑层间剪切应力沿厚度方向变化的某一标准通用取值。

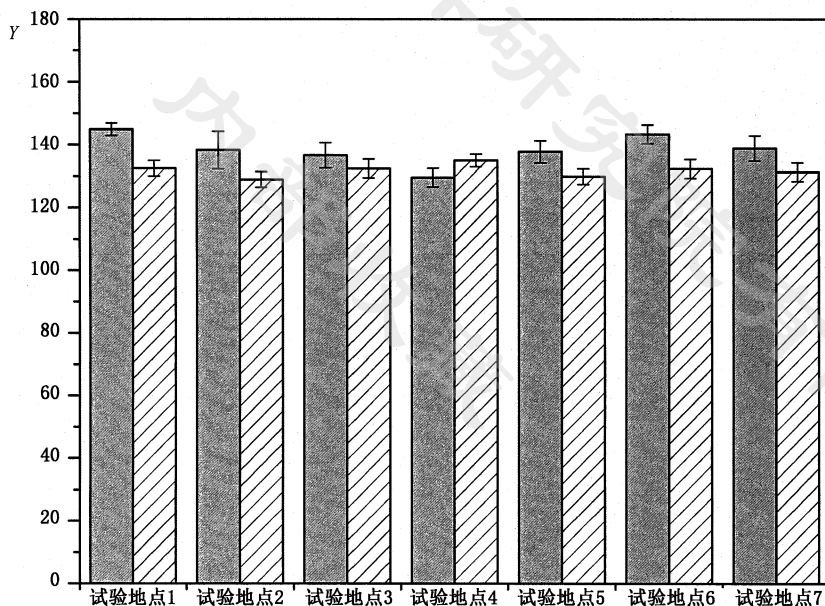
公式(A.26)的根在公式(2)中给出, 正根为层间剪切模量 G_{13} 的值。

附录 B
(资料性)
实验室间的研究

根据 ISO 5725-1 进行了实验室间的研究。本文件的试验程序草案用于获得“精密度数据”，即重复性和再现性。研究的主要特点如下。

- 5 个参与机构,共 7 个试验地点;包括 1 所大学、1 个材料供应商的 2 个独立试验地点、1 个终端用户的 2 个独立试验地点、1 个试验机制造商和 1 个国家级检测机构。三种不同的复合材料为:单向(UD)碳纤维/环氧树脂、平纹编织(PW)碳纤维/环氧树脂、8 枚缎纹编织(8HS)E-玻璃纤维/环氧树脂。
- 两种不同的试样厚度,2 mm 和 4 mm。
- 四套试验夹具在试验地点之间轮换。
- 外侧支座的圆角直径仅为 5 mm(标准中为 6 mm),此差异不被认为是显著的。
- 每组试验结果的平均值至少用 5 个有效测试数据来计算。
- 第 11 章中给出了根据 ISO 5725(所有部分)获得的精密度数据。

层间剪切(ILS)强度数据见图 B.1~图 B.4、表 B.1、表 B.2。



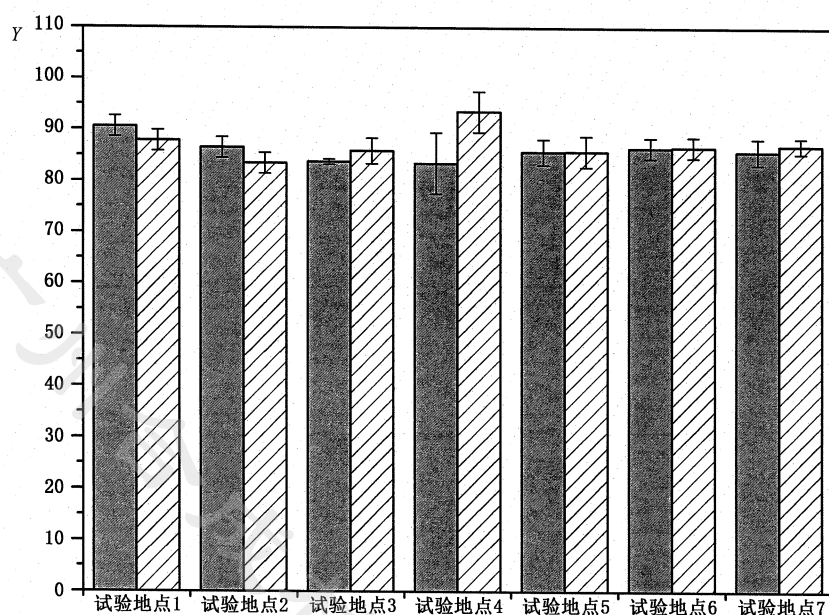
标引序号说明:

Y——DBS 法测定 ILS 强度(MPa);

■——2 mm 厚度 A 材料(单向碳纤维/环氧树脂);

▨——4 mm 厚度 A 材料(单向碳纤维/环氧树脂)。

图 B.1 DBS 法测定 A 材料(单向碳纤维/环氧树脂)的 ILS 强度数据



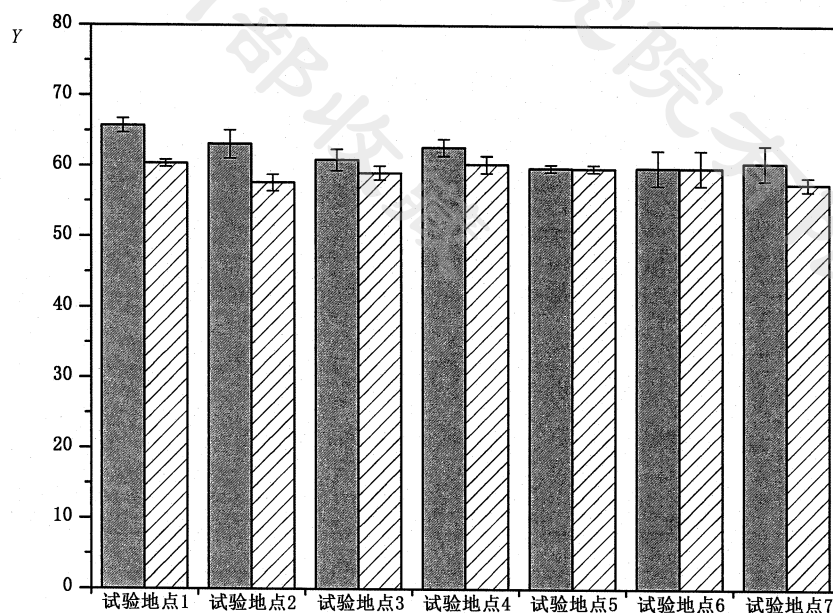
标引序号说明：

Y——DBS 法测定 ILS 强度(MPa)；

■——2 mm 厚度 B 材料(平纹编织碳纤维/环氧树脂)；

▨——4 mm 厚度 B 材料(平纹编织碳纤维/环氧树脂)。

图 B.2 DBS 法测定 B 材料(平纹编织碳纤维/环氧树脂)的 ILS 强度数据



标引序号说明：

Y——DBS 法测定 ILS 强度(MPa)；

■——2 mm 厚度 C 材料(8 枚级纹编织 E-玻璃纤维/环氧树脂)；

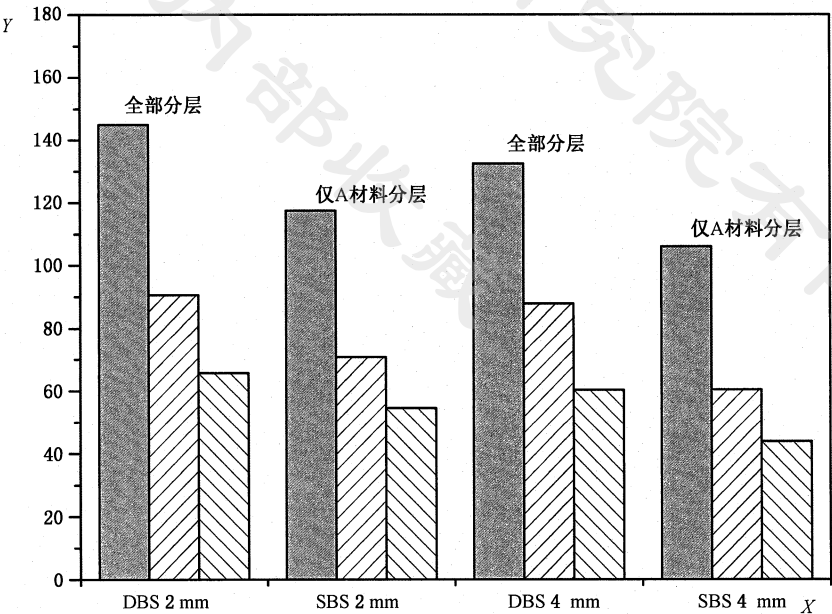
▨——4 mm 厚度 C 材料(8 枚级纹编织 E-玻璃纤维/环氧树脂)。

图 B.3 DBS 法测定 C 材料(8 枚级纹编织 E-玻璃纤维/环氧树脂)的 ILS 强度数据

表 B.1 DBS 法测定 L/2t 为 5 的三种复合材料的 ILS 强度数据

单位为兆帕

材料和厚度	A 2 mm	A 4 mm	B 2 mm	B 4 mm	C 2 mm	D 4 mm
b/t	5	2	5	2	5	2
试样地点 1	144.93	132.51	90.57	87.85	65.74	60.38
试样地点 2	138.28	128.91	86.53	83.52	63.10	57.65
试样地点 3	136.62	132.42	83.81	85.92	60.90	59.07
试样地点 4	129.50	135.00	83.50	93.57	62.66	60.29
试样地点 5	137.77	129.88	85.76	85.84	59.76	59.72
试样地点 6	143.34	132.34	86.54	86.69	59.78	59.76
试样地点 7	138.88	131.38	85.87	87.03	60.49	57.49
平均层间剪切强度 MPa	138.47	131.78	86.08	87.20	61.78	59.19
标准差 MPa	5.00	1.98	2.33	3.12	2.19	1.19
离散系数 %	3.61	1.50	2.71	3.58	3.54	2.01



标引序号说明：
Y——ILS 强度(MPa)；
X——DBS 法和短梁法(SBS)分别测定 2 mm 和 4 mm 厚度试样；
■——A 材料(单向碳纤维/环氧树脂)；
///——B 材料(平纹编织碳纤维/环氧树脂)；
///——C 材料(8 枚缎纹编织 E-玻璃纤维/环氧树脂)。

图 B.4 在试验地点 1 测定三种复合材料的 ILS 强度数据

表 B.2 DBS 法测定 $L/2t$ 为 5 的三种复合材料的 ILS 强度增加量(相比于 SBS 法)

复合材料	A (单向碳纤维/ 环氧树脂)	B (平纹编织碳纤维/ 环氧树脂)	C (8 枚缎纹编织 E-玻璃纤维/环氧树脂)
试验方法	SBS→DBS	SBS→DBS	SBS→DBS
2 mm 厚度	+27.4	+19.8	+11.2
4 mm 厚度	+26.4	+27.4	+16.5

参 考 文 献

- [1] ISO 527-4:1997, Plastics—Determination of tensile properties—part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites
 - [2] ISO 2818, Plastics—preparation of test specimens by machining
 - [3] ISO 5725-1:1994, Precision test methods—part 1: Guide for the determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory test
 - [4] ISO 7500-1, Metallic materials—Verification of static uniaxial testing machines—part 1: Tension/compression testing machines—Verification and calibration of the force-measuring system
 - [5] ISO 9513, Metallic materials—Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing
 - [6] ISO 14130, Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method
 - [7] EN 2377, Specification for glass fibre reinforced plastics. Test method. Determination of apparent interlaminar shear strength
 - [8] EN 2563, Carbon fibre reinforced plastics. Unidirectional laminates. Determination of the apparent interlaminar shear strength
 - [9] ASTM D2344, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and their Laminates
 - [10] ASTM D3846, In-plane Shear Strength of Reinforced Plastics
 - [11] ASTM D5379, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method
 - [12] ASTM D7078, Standard Test Method for shear Properties of Composite Materials by V-notched Rail Shear Method
 - [13] ECCM16—16TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Seville, Spain, 22-26 June 2014 1 Double beam shear (DBS) as a new test method for determining interlaminar shear properties of composite laminates, G. Zhou, P.H. Nash, J. Whitaker, N. Jones
 - [14] ICCM-20—INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS 2015 Copenhagen, double beam shear (DBS)—A new test method for determining interlaminar shear properties of composite laminates, G. Zhou, P.H. Nash, J. Whitaker, N. Jones
 - [15] BS 4994, Specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics(Withdrawn)
 - [16] BS 6464, Specification for reinforced plastics pipes, fittings and joints for process plants (Withdrawn)
-