

ASTM 标准: D 790-03

非增强和增强塑料及电绝缘材料弯曲性能标准试验方法¹

Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials¹

1 范围

1.1 这些试验方法包括非增强和增强塑料,包括高模量复合材料,以及电绝缘材料的弯曲性能的测量,这些材料的形式为矩形条状(试件),可以直接模压成形,或者从薄片或平板上切割。这些试验方法通常适合于刚性和半刚性的材料。然而,对于这些材料,并不能测量其弯曲强度,因为在这些试验方法规定的 5% 的应变极限下,试件的外表面处没有发生断裂或者失效。这些试验方法采用了适合于简支梁的三点加载系统。试验方法 D 6272 则采用四点加载方法。

1.1.1 方法 A,主要用于变形相对较小时即发生断裂的材料。

1.1.2 方法 B,主要用于试验过程中能承受大变形的材料。

1.1.3 方法 A 可以用于测量弯曲性能,主要是弯曲模量,除非材料规范有要求,而方法 B 仅用于测量弯曲强度。与方法 B 相比,方法 A 得到的正切模量数据显示出较小的标准差。

1.2 如果证明试验方法能满足材料试验的要求,则可以进行与方法 A 和 B 相符的比较试验。

1.3 以国际单位(SI)给出的数值作为标准,括号内的数值仅供参考。

1.4 本标准并未打算提及,如果存在的话,与使用有关的所有安全性问题。在使用本标准之前,本标准的用户有责任建立合适的安全与健康的操作方法,以及确定规章制度的适用性。

注 1——这些试验方法与 ISO 178 在技术上并不等同。

2 参考文献

2.1 ASTM 标准

D 618 塑料试验前状态调节方法²

Practice for Conditioning Plastics for Testing

D 638 塑料拉伸性能试验方法³

Test Method for Tensile Properties of Plastics

D 883 与塑料相关的术语²

Terminology Relating to Plastics

D 4000 特定塑性材料的分类体系³

Classification System for Specifying Plastic Materials

D 5947 固态塑料试件物理尺寸试验方法⁴

Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens⁴

D 6272 未增强和增强塑料及电绝缘材料的四点弯曲性能试验方法⁴

Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical

¹本试验方法由 ASTM 的塑料委员会 D20 审定,并由单层和层压板试验方法专业委员会 D20.10 直接负责。当前版本于 2003 年 3 月 10 日批准,2003 年 4 月出版。最初批准时间:1970 年。2002 年批准的上一版本为: D 790-02。

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

- Insulating Materials by Four-Point Bending
- E 4 试验机载荷标定方法⁵
- Practices for Force Verification of Testing Machines
- E 691 由实验室的结果确定一种试验方法的精度的操作规程⁶;
- Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

3 术语

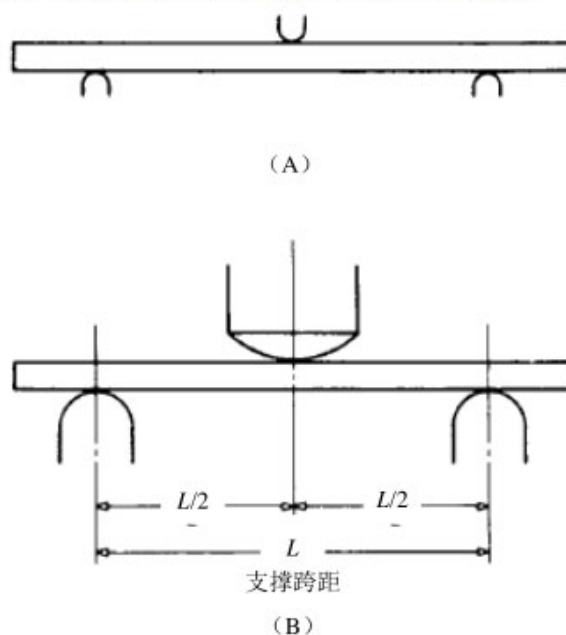
3.1 定义——适用于这些试验方法的术语在术语 D 883 和试验方法 D 638 的附录 A1 中给出。

4 试验方法概述

4.1 一个矩形截面的条状试件放置于两个支座上,通过位于两个支座中跨的加载头施加载荷(见图 1)。除非对于特定的层压材料要求采用较大的跨距-深度比(见第 7 节和注 8),否则,采用 16:1 的支座跨距-深度比。

4.2 使试件产生变形,直到试件外表面断裂,或者直到最大应变达到 5.0% (见 12.7),以两者中最早出现的情况为依据。

4.3 方法 A 是首选的试验方法,其加载速率(应变率)为 0.01 mm/mm/min (0.01 in/in/min),而方法 B 的加载速率(应变率)则为 0.10 mm/mm/min (0.10 in/in/min)。



注: (a) 最小半径=3.2mm(1/8in);

(b) 支座的最大半径=1.6 倍试件深度,加载头的最大半径=4 倍试件深度。

图 1 加载头和支座半径的允许范围

5 意义与用途

5.1 这些试验方法测量的弯曲性能对质量控制和(材料)鉴定是特别有用的。

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

5.2 对于采用这些试验方法（三点弯曲）在允许的最大应变下未发生破坏的材料，更适合采用四点弯曲试验。两种试验方法的区别在于最大的弯矩和最大的轴向纤维应力出现的位置不同。对于三点弯曲试验，最大的轴向纤维应力位于加载头处的直线上；而对于四点弯曲试验，最大的轴向纤维应力则位于两个加载头中间的区域。

5.3 弯曲性能随试件深度、温度、大气环境条件以及方法 A 和 B 给定的应变率的不同而改变（见注 8）。

5.4 在这些试验方法实施之前，应阅读测试试件的说明书，因为这些试验方法涉及到的试件的制备、状态调节、集合尺寸、试验参数、或者上述因素的组合均包含在材料说明书中。如果没有材料说明书，则采用默认条件。分类体系（Classification System）D 4000 中的表 1 列出了目前适用于塑料的 ASTM 材料标准。

6 设备

6.1 试验机——一台经过正确的标定的试验机在整个指示范围内能以一个恒定的横梁移动速度操作，并且载荷测量系统的误差不超过测量的最大载荷的 $\pm 1\%$ 。试验机应带有变形测量装置。在试验机的刚度应使得系统总的弹性变形不能超过试验过程中试件总变形的 1%，或者能够进行合适的修正。在使用的横梁速率下，载荷指示机构应无惯性滞后。试验机精度应采用与 E4 相一致的方法进行校验。

6.2 加载头和支座——加载头和支座应具有圆柱体表面。为了避免产生过大的凹痕，或者由于在加载头下出现应力集中而导致破坏，加载头和支座的半径应为 $5.0 \pm 0.1 \text{ m} (0.197 \pm 0.004 \text{ in})$ ，除非委托方指定或者同意（其他的尺寸）。如果使用其他的加载头和支座，则必须满足下列的要求：对于所有试件，最小的半径为 $3.2 \text{ mm} (1/8 \text{ in})$ ；对于深度为 3.2 mm 或更大的试件，支座的半径可以达到试件深度的 1.6 倍。如果出现明显的凹痕或发生压缩破坏，可以采用更大的半径。加载头与试件接触的弧应足够大，以防止试件与加载头的侧边接触（见图 1）。加载头的半径不应超过试件深度的 4 倍。

注 2——试验数据表明加载头和支座的几何尺寸对弯曲模量值和弯曲强度值有影响，加载头几何尺寸的影响较大。加载头和支座的几何尺寸应在材料说明书中给定。

6.3 千分尺——适合测量试件宽度和厚度的千分尺至少应具有 $0.025 \text{ mm} (0.001 \text{ in})$ 的分辨率。刚性和半刚性塑料的所有宽度和厚度均可采用带棘齿的手动千分尺来测量，适合于测量非刚性试件厚度的仪器应具有：一个 $25 \pm 2.5 \text{ kPa} (3.6 \pm 0.36 \text{ psi})$ 的接触测量压力，一个直径为 $6.35 \pm 0.025 \text{ mm} (0.250 \pm 0.001 \text{ in})$ 的可移动的圆形接触脚和一个下部固定平台，平台在所有方向上均应大于接触脚，并且在整个吸收区域与接触脚的平行度保持在 $0.005 \text{ mm} (0.0002 \text{ in})$ 内。接触脚和平台的平面度应满足试验方法 D 5947 中“标定”一节的要求。

7 试件

7.1 试件可以从薄片或平板上切割，或者直接模压成形，或者可以用模具加工到期望的最终尺寸。4.2 节和“计算”一节中用到的实际尺寸的测量应满足试验方法 D 5947 的要求。

注 3——试件需要抛光时，只能沿试件的长度方向进行。

7.2 薄片材料（层压热固性材料和用于电绝缘的特殊材料除外，包括硫化纤维和玻璃粘接云母）

7.2.1 厚度为 $1.6 \text{ mm} (1/16 \text{ in})$ 或更厚的材料——对于平面方向试验，试件的深度等于材料的厚度。对于侧向试验，试件的宽度等于材料的厚度，而深度不能超过宽度（见注 4 和注 5）。对于所有试验，支座的跨距等于 16（公差为 ± 1 ）倍的梁的深度；对于深度大于 $3.2 \text{ mm} (1/8 \text{ in})$ 的试件，其宽度不能超过支座跨距的 1/4。试件应足够长，以使得试件每一端超出支座至少 10% 的跨距长度，但在任何情况下每一端均不能小于 $6.4 \text{ mm} (1/4 \text{ in})$ 。支座应足够宽，以防止试件从支座上滑落。

注 4——尽量不要改变薄片的原始表面,然而,如果试验机的限制无法满足以上的准则,则必须对试件的一个或两个表面进行机械加工以得到期望的尺寸,并注明试件相对于总深度的位置。表面经过加工的试件与具有原始表面的试件的试验结果可能会有区别。因此,在较厚的薄片弯曲性能的说明书中,必须说明原始表面是否被改变。如果只对一个表面进行机械加工,则必须注明加工表面是位于梁的拉伸一侧,还是位于压缩一侧。

注 5——薄片因为太薄而无法满足试件的切割要求,因此不能进行侧向弯曲试验。如果试件的深度超过宽度,则可能发生屈曲。

7.2.2 厚度小于 1.6 mm(1/16 in)的材料——试件的长度和宽度分别为 50.8 mm(2 in)和 12.7 mm(0.5 in),平面方向试验的跨距为 25.4 mm(1 in)。

注 6——试验结果的计算采用这些试验方法引用的简支梁的公式,其基本假设是梁的宽度相对于跨距应该很小,因此,这些公式对这些尺寸并不完全适用。

注 7——如果试验机的灵敏度无法满足这些尺寸的试件的测量要求,则可以采用较宽的试件或较短的跨距,或者两者同时采用,但是跨距-深度比至少应为 14:1。试验报告中应给出所有的尺寸(见注 6)。

7.3 层压热固性材料和薄片以及用于电绝缘的平板材料,包括硫化纤维和玻璃粘接云母——对于纸基和织物基、切名义厚度超过 25.4 mm(1 in)的材料,应对试件的两个表面进行加工,使其深度达到 25.4 mm(1 in);而对于纸基和尼龙基、切名义厚度超过 12.7 mm(0.5 in)的材料,应对试件的两个表面进行加工,使其深度达到 12.7 mm(0.5 in)。应对支撑跨距-深度比进行选择,使得试件的外表面纤维因为承受弯矩而发生破坏(见注 8),因此,跨距-深度比必须大于 16:1(推荐 32:1 或 40:1)。如果层压材料在垂直于层压板方向上具有较低的压缩强度,则应采用较大直径(达到 4 倍深度)的加载头进行加载,以防止外表面纤维的提前损伤。

7.4 模压材料(热塑性和热固性材料)——对于平面方向试验的模压材料,推荐的试件尺寸为 127×12.7×3.2 mm(5×0.5×0.125 in),支座跨距-深度比为 16(公差为±1)。如果较厚的材料在模压成形时明显出现皱折或起泡,则应避免使用较厚的试件。

7.5 高强度增强复合材料,包括高度正交各向异性层压板——应对支撑跨距-深度比进行选择,使得试件的外表面纤维因为仅承受弯矩而发生破坏(见注 8),跨距-深度比必须大于 16:1(推荐 32:1 或 40:1)。对于某些高度各向异性的复合材料,即使跨距-深度比高达 40:1,剪切变形也将显著地影响模量的测量值。因此,对于这些材料,要求进行模量测量时,建议将跨距-深度比增大到 60:1,以消除剪切的影响,同时应注意,高度各向异性层压板的弯曲模量强烈依赖于铺层顺序,而拉伸模量则与铺层顺序无关,因而不需修正。

注 8——作为一个通用的规律,当拉伸强度与剪切强度之比小于 8:1 时,16:1 的支座跨距-深度比即可以满足试验要求,但是,对于具有较低面内剪切强度和较高(平行于支座跨度方向的)拉伸强度的复合材料层压板,则必须增大跨距-深度比。

8 试件数量

8.1 对于各向异性材料或者模压试件,每个样本至少应进行 5 个试件的试验。

8.2 对于薄片形式各向异性材料的每一个样本,至少对 5 个试件进行下列的状态调节。推荐的状态调节适用于进行平面方向和侧向试验的试件,这些试件从薄片上分别沿长度方向和横向切割。本试验方法中,“长度方向”表示各向异性的主轴,代表了薄片弯曲最强的方向;“横向”则表示薄片弯曲最弱的方向,与长度方向成 90°。

9 状态调节

9.1 状态调节——除非合同或者相关的 ASTM 材料说明进行了规定,否则,试验前应按试验方法 D 618 中的方法 A 在 23±2°C[73.4±3.6°F]和 50±5%相对湿度条件下对试件进行至少 40 小时的状态调节。为了解决不一致性,基准的试验前状态条件采用的公差范围为±1°C[±1.8°F]和±2%的相对湿度。

9.2 试验条件——除非合同或者相关的 ASTM 材料说明进行了规定,否则,应在 23±2°C[73.4±3.6°F]和 50±5%相对湿度条件下进行试验。为了解决不一致性,基准试验条件采用的公差范

围为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ [$\pm 1.8^{\circ}\text{F}$]和 $\pm 2\%$ 的相对湿度。

10 试验方法

10.1 方法 A

10.1.1 每次测量采用一个未进行试验的试件。在支撑跨距的中心测量试件的宽度和深度，测量精度为 0.03 mm(0.001 in)；对于深度小于 2.54 mm(0.1 in)的试件，深度的测量精度为 0.003 mm(0.0001 in)。所有的测量均应符合试验方法 D 5947。

10.1.2 支撑跨距根据第 7 节来确定，其误差应在确定值的 1%以内。

10.1.3 对于跨距连续可调的弯曲夹具，当跨距小于 63 mm(2.5 in)时，跨距的测量精度为 0.1 mm(0.004 in)；而当跨距大于或等于 63 mm(2.5 in)时，跨距的测量精度为 0.3 mm(0.012 in)。计算时采用跨距的实际测量值。对于跨距位置固定的弯曲试验夹具，应校准每一个位置对应的可调节的距离，使其与跨距相等。用于试验结果计算的这一距离值，即跨距，适用于在该位置进行的所有后续试验情况。关于跨距的确定和设置的详细信息见附录 A2。

10.1.4 用式(1)计算并设置试验机的横梁移动速率：

$$R = ZL^2 / 6d \quad (1)$$

式中：

R =横梁的移动速率，mm(in)/min

L =跨距，mm(in)

d =梁的深度，mm(in)

Z =外层纤维的应变率，mm/mm/min(in/in/min)， Z 应该等于 0.01。

任何情况下，横梁的实际移动速率与式(1)计算值的误差不能超过 $\pm 10\%$ 。

10.1.5 将加载头和支座对齐，以使圆柱体表面的轴线相互平行，并使加载头位于两个支座的中心。夹具的平行度可以通过带有平行凹槽的平板来调节，即完全对齐时，加载头和支座与凹槽贴合（见 A2.3）。将试件放置于支座中心，并使试件的长轴与加载头和支座垂直。

10.1.6 以一个给定的横梁速率对试件加载，同时测量载荷-位移数据。通过粘贴于试件下表面跨距中心处的应变片，或者测量加载头相对于支座的移动距离来测量位移值。载荷-位移曲线可以用于确定弯曲强度、弦向或切线弹性模量，以及通过载荷-位移曲线下部的面积来确定总能量（功）。采用必要的底部补偿方法（见附录 A1）对试件的支座和凹痕已经试验机的位移进行修正。

10.1.7 当试件外表面的最大应变达到 0.05 mm/mm (in/in)，或者在达到最大应变之前试件发生断裂（见注 9 和 10），即停止试验。此时的位移值可以采用式(2)并令 $r=0.05$ mm/mm(in/in)来计算：

$$D = rL^2 / 6d \quad (2)$$

式中：

D =中跨的位移，mm(in)

r =应变，mm/mm(in/in)

L =跨距，mm(in)

d =梁的深度，mm(in)

注 9——对于采用方法 A 而在 5%应变限制条件下不发生屈服或断裂的材料，可以采用方法 B 允许的较大的应变率以使得试件在规定的 5%应变限制条件下发生屈服或断裂，或者同时出现屈服和断裂。

注 10——应变超过 5%时，本试验方法不再适用。当采用方法 A 和 B 在 5%应变限制条件下不发生屈服或断裂时，用其他的力学性能来表征材料可能更为合适（例如，可以考虑试验方法 D 638）。

10.2 方法 B

10.2.1 每次测量采用一个未进行试验的试件。

10.2.2 除了试件外表面的应变率为 0.1 mm/mm(in/in)/min 之外，试验条件与 10.1 相同。

10.2.3 试件外表面的最大应变达到 0.05mm/mm (in/in) 时, 如果试件未发生断裂, 则停止试验 (见注 10)。

11 重新试验

11.1 对于在明显目视可见的缺陷处断裂的试件, 不能计算其断裂性能值, 除非这些缺陷是作为变量而进行研究的。对于性能值无法计算的试件, 应重新进行试验。

12 计算

12.1 除非曲线的底部区域不是由于间隙的拉紧、试件的支座或其他人为因素而引起的, 而是材料的真实响应, 否则, 应该采用与附录 A1 相符合的底部补偿方法。

12.2 弯曲应力(σ_f)——当一个均匀弹性材料以两点支撑、中心点加载的简支梁的方式进行弯曲试验时, 试件外表面的最大应力位于中点处。采用下面的公式可以计算载荷-位移曲线上任意一点处的应力值 (见注 11~13):

$$\sigma_f = 3PL / 2bd^2 \quad (3)$$

式中:

σ_f =中跨外表面纤维的应力, MPa(psi)

P =载荷-位移曲线上给定点的载荷, N(lbf)

L =跨距, mm(in)

b =梁的宽度, mm(in)

d =梁的深度, mm(in)

注 11——式(3)仅限于应力-应变直到破坏仍保持线性且破坏应变很小的材料。因为这种情况并不总是出现, 因此, 对于不是真实的 Hookean 材料, 用式(3)计算的应力值可能会有微小的偏差。式(3)适用于数据的比较和材料的鉴定, 但是, 对于这些试验方法的试件, 其外表面纤维的最大应变只能达到 5%。

注 12——对于高度正交各向异性层压板的试验, 最大应力并不总是发生于试件的外表面⁷。层压梁理论可以用于确定破坏时的最大拉伸应力。如果采用式(3)计算应力, 则可以得到一个基于均匀梁理论的近似的强度值, 这一近似的强度值强烈依赖于高度正交各向异性层压板的铺层顺序。

注 13——如果试件在两个支座之间出现过大的滑移, 则上述的计算是无效的。

12.3 大跨距梁的弯曲应力 (σ_f) ——如果跨距-深度比大于 16:1, 位移超过跨距的 10%, 可以采用下面的公式近似计算简支梁试件外表面的应力值 (见注 14):

$$\sigma_f = (3PL / 2bd^2)[1 + 6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)] \quad (4)$$

式中:

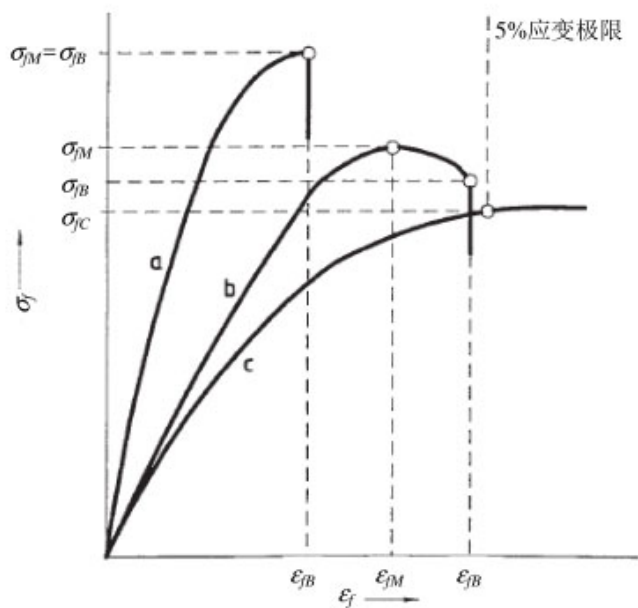
σ_f , P , L , b 和 d 的定义与式(3)相同,

D =跨距中心处试件中心线的位移, mm(in)

注 14——采用较大的跨距-深度比时, 在支座处会产生明显的端部集中力, 从而对简支梁的弯曲产生影响。大跨距-深度比的梁会出现相对较大的位移, 式(4)包含的附加项则是对端部集中力的影响进行近似修正的因子。

12.4 弯曲强度 (σ_{TM}) ——弯曲试验中试件承受的最大弯曲应力 (见注 12), 可以用式(3)或式(4)计算。对于在 5%应变下未断裂的材料, 其载荷-位移上对应于应变增加而载荷不再增加的点即为屈服点, Y (图 2 的曲线 B)。对于这些材料, 可以令 P 等于屈服点 Y 的载荷值来计算弯曲强度 (用式(3)或式(4))。

⁷ 对于这些影响的讨论, 见 C., Smith, W. S., and Wardle, M. W., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus and Properties of Fabric-Reinforced Laminates," *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674, 1979, pp. 228-262.



注：曲线 a：试件在屈服前断裂；

曲线 b：试件在 5%应变极限前屈服并断裂；

曲线 c：试件在 5%应变极限前既没有屈服也没有断裂。

图 2 弯曲应力-弯曲应变的典型曲线

12.5 弯曲偏移屈服强度——与应力-应变曲线初始直线段的切线偏移一给定应变量的应力-应变曲线的应力值即为偏移屈服强度。计算该性能值时必须给定一个偏移量。

注 15——这一值可能不同于 12.4 接定义的弯曲强度。两种计算方法在试验方法 D 638 的附录中给出。

12.6 破坏时的弯曲应力 (σ_{fb})——弯曲试验中试件破坏时的弯曲应力，可以用式(3)或式(4)计算。某些材料的载荷-位移曲线只显示出破坏点 B，而未出现屈服点（图 2 的曲线 a），这种情况下 $\sigma_{fb} = \sigma_{fm}$ 。而其他材料的屈服位移曲线可能同时有屈服点和破坏点 B，对于这些材料，可以令 P 等于破坏点 B 的载荷值来计算弯曲强度（用式(3)或式(4)）。

12.7 给定应变下的应力——令式(3)或式(4)中的 P 等于载荷-位移曲线上对应于给定应变值的位移处的载荷读数，可以计算给定应变下的试件外表表面的应力值。

12.8 弯曲应变， ϵ_f ——发生最大应变的中跨处试件外表面一个单元的长度的名义变化量，用式(5)可以计算任意位移下的弯曲应变值：

$$\epsilon_f = 6Dd / L^2 \quad (5)$$

式中：

ϵ_f =外表面的应变，mm/mm(in/in)

D=梁中心的最大位移，mm(in)

L=跨距，mm(in)

d=梁的深度，mm(in)

12.9 弹性模量

12.9.1 切线弹性模量——切线弹性模量通常称为“弹性模量”，是弹性范围内应力与对应的应变之比。在载荷-位移曲线上急剧上升的初始线性段画一条切线，并采用式(6)（对高度各向异性复合材料，见注 16）即可计算切线弹性模量。

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (6)$$

式中：

E_B =弯曲弹性模量，MPa(psi)

L=跨距，mm(in)

b =梁的宽度, mm(in)

d =梁的深度, mm(in)

m =载荷-位移曲线初始线性段切线的斜率, N/mm(lbf/in)

注 16——进行较小跨距-深度比的试验时, 剪切变形可能严重降低高度各向异性复合材料的模量, 因此, 测量这些复合材料的弯曲模量时, 推荐采用 60: 1 的跨距-深度比。测定弯曲强度时, 单独采用一组重复的试件进行小跨距-深度比的试验, 这样可以导致梁的外表面纤维沿下表面发生拉伸破坏。因为高度各向异性层压板的弯曲模量是铺层顺序的函数, 而拉伸模量并不依赖于铺层顺序, 因此, 不需要对拉伸模量进行修正。

12.9.2 割线模量——割线模量为应力-应变曲线上任意一点的应力-应变之比, 即连接原点与实际的应力-应变曲线上所选择的点的直线的斜率, 以 $\text{MPa}(\text{lb}/\text{in}^2)$ 表示。所选择的点应与合适的材料说明书或顾客的合同上预先给定的应力或应变点相一致。计算时采用式(6), 并令 m 等于载荷-位移曲线的割线的斜率。报告中应给出用于确定割线模量所选取的应力或应变点。

12.9.3 弦向模量 (E_f)——从载荷-位移曲线上的两个离散点可以计算弦向模量, 所选择的点应与合适的材料说明书或顾客的合同上两个预先给定的应力或应变点相一致。报告中应给出用于确定弦向模量所选取的应力或应变点。采用下面的公式计算弦向模量 E_f :

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1}) \quad (7)$$

式中:

σ_{f2} , σ_{f1} ——弯曲应力值, 用式(3)或式(4)计算以及在载荷-位移曲线上预先定义的点处测量

ϵ_{f2} , ϵ_{f1} ——弯曲应变值, 用式(5)或式(6)计算以及在载荷-位移曲线上预先定义的点处测量

12.10 算术平均值——对于每一组试验, 计算所有测量值的算术平均值, 结果保留三位有效数字, 并作为特定性能的“平均值”在报告中给出。

12.11 标准差——用下面的公式计算标准差 (估算的), 结果保留两位有效数字:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2) / (n - 1)} \quad (8)$$

式中:

s =估计的标准差;

X =单个观测值;

n =试件数量;

\bar{X} ——一组试件的算术平均值。

13 报告

13.1 报告应给出下列信息:

13.1.1 试验材料的证明文件, 包括: 类型、来源、制造商的代码号、形式、主要尺寸及历史 (对于层压复合材料, 应给出铺层顺序),

13.1.2 试件的切割和加载方向, 合适时,

13.1.3 状态调节方法,

13.1.4 试件的深度和宽度,

13.1.5 采用的试验方法 (A 或 B),

13.1.6 支撑跨距长度,

13.1.7 支撑跨距-深度比, 如果不是 16:1,

13.1.8 支座和加载头的半径, 如果不是 5mm,

13.1.9 横梁移动速率,

13.1.10 任意给定应力处的弯曲应变、平均值和标准差,

13.1.11 如果试件拒收, (给出) 拒收的原因,

13.1.12 正切、割线或弦向弯曲模量、平均值、标准差、以及确定割线或弦向模量时使用的应变水平,

- 13.1.13 弯曲强度（如果需要）、平均值、标准差，
- 13.1.14 达到和包括 5%的任意给定应变下的应力（如果需要）、相应的应变、平均值和标准差，
- 13.1.15 破坏时的弯曲应力（如果需要）、平均值和标准差，
- 13.1.16 5%应变极限内特性，是否屈服、或断裂、或者同时屈服和断裂、或者其他现象，
- 13.1.17 使用的试验方法特定版本的日期。

14 精度与偏差⁸

14.1 表 1 和表 2 是基于 1984 年开展的与 E 691 一致的 round-robin 试验、并在 6 个试验室采用方法 A 得到的 6 种材料的试验结果。对于每一种材料，所有试件的来源均相同，每一个“试验结果”均为 5 个独立测量值的平均值。对于每一种材料，每一个试验室得到了两组试验结果。

14.2 表 1 和表 2 中 r 和 R 的含义——如果 S_r 和 S_R 是从一个足够大的样本数据而得到的，并且对于每一个试验结果，其平均值均来源于 5 个试件，那么：

14.2.1 重复性——如果在同一个试验室得到的两组试验结果的偏差大于该材料的 r 值，则两组试验结果不等效。 r 表示在同一个试验室、同一天、由同一操作者使用相同的设备、对同一种材料获得的两组试验结果之间最大偏差的范围。

14.2.2 再现性——如果在不同的试验室得到的两组试验结果的偏差大于该材料的 R 值，则两组试验结果不等效。 R 表示在不同的试验室、由不同的操作者使用不同的设备、对同一种材料获得的两组试验结果之间最大偏差的范围。

14.2.3 14.2.1 和 14.2.2 节判断的正确性具有大约 95%(0.95)概率。

14.2 偏差——由于没有标准的参考材料或参考的试验方法，因此本试验方法不能确定偏差。

表 1 弯曲强度

材料	平均值, 10 ³ psi	以 10 ³ psi 的百分比表示的值			
		$V_r^{(1)}$	$V_R^{(2)}$	$r^{(3)}$	$R^{(4)}$
ABS	9.99	1.59	6.05	4.44	17.2
DAP 热固性	14.3	6.58	6.58	18.6	18.6
铸造丙烯酸	16.3	1.67	11.3	4.73	32.0
GR 聚酯	19.5	1.43	2.14	4.05	6.08
GR 聚碳酸酯	21.0	5.16	6.05	14.6	17.1
SMC	26.0	4.76	7.19	13.5	20.4

- (1) V_r = 指定材料的试验室内的离散系数，首先通过所有特定试验室的试验结果得到试验室内的标准差：

$$S_r = \sqrt{[(S_1)^2 + (S_2)^2 + \dots + (S_n)^2] / n}$$
，然后 $V_r = S_r / \text{材料的平均值} \times 100$ 。
- (2) V_R = 试验室之间的再现性，以离散系数的形式表示： $S_R = \sqrt{S_r^2 + S_L^2}$ ，其中 S_L 为试验室平均标准差， $V_R = S_R / \text{材料的平均值} \times 100$ 。
- (3) r = 两组试验结果之间的试验室内的临界值，等于 $2.8 \times V_r$ 。
- (4) R = 两组试验结果之间的试验室间的临界值，等于 $2.8 \times V_R$ 。

⁸ 支持数据来源于 ASTM，要求 RR: D20-1128。

表 2 弯曲模量

材料	平均值, 10 ³ psi	以 10 ³ psi 的百分比表示的值			
		$V_r^{(1)}$	$V_R^{(2)}$	$r^{(3)}$	$R^{(4)}$
ABS	338	4.79	7.69	13.6	21.8
DAP 热固性	485	2.89	7.18	8.15	20.4
铸造丙烯酸	810	13.7	16.1	38.8	45.4
GR 聚酯	816	3.49	4.2	9.91	11.9
GR 聚碳酸酯	1790	5.52	5.52	15.6	15.6
SMC	1950	10.9	13.8	30.8	39.1

(1) V_r =指定材料的试验室内的离散系数，首先通过所有特定试验室的试验结果得到试验室内的标准差：

$$S_r = \sqrt{\left[(S_1)^2 + (S_2)^2 + \dots + (S_n)^2 \right] / n}$$
，然后 $V_r = S_r / \text{材料的平均值} \times 100$ 。

(2) V_R =试验室之间的再现性，以离散系数的形式表示： $S_R = \sqrt{S_r^2 + S_L^2}$ ，其中 S_L 为试验室平均标准差， $V_R = S_R / \text{材料的平均值} \times 100$ 。

(3) r =两组试验结果之间的试验室内的临界值，等于 $2.8 \times V_r$ 。

(4) R =两组试验结果之间的试验室间的临界值，等于 $2.8 \times V_R$ 。

注 17——注意：下面关于 r 和 R 的表达式（14.2~14.2.3 节）仅仅表示考虑这些试验方法的近似精度的一种方法。表 2 和表 3 给出的数据并不能严格的用于材料的接受或拒收，因为这些数据来源于特定的 round-robin 试验，不能代表其他的批次、环境条件、材料或试验室。这些试验方法的使用者应该采用 E 691 的原则，以得到特定试验室和材料、或者特定试验室之间的数据。14.2~14.2.3 节的原则对于这样的数据可能是有效的。

15 关键词

15.1 弯曲性能；塑料；刚度；强度

附录

(强制信息)

A1 底部补偿

A1.1 典型的应力-应变曲线（见图 A1.1）含有一个底部区域，AC，它并不代表材料的特性，而是由于间隙的拉紧和试件的对中度或安装定位等人为因素造成的。为了获得正确的参数值，如模量、应变、偏移屈服点，必须对这些人为因素进行补偿，以给出修正的应变零点或延长轴线。

A1.2 对于具有 Hookean（线性）行为区域的材料（见图 A1.1），曲线线性段（CD）的延长线应该通过应力轴线的零点。截距（B）即为应变零点，如果可能，必须测量所有的延长值或应变值，包括屈服偏移量（BE）。直线 CD（或它的延长线）上任意一点的应力值除以同一点的应变值（从应变零点 B 测量）即可得到弹性模量。

A1.3 对于不具有任何线性区的材料（见图 A1.2），在拐点 H' 处沿最大斜率构造一条切线，可以得到同样的应变零点底部修正。延长线与应变轴向相交于点 B'，即修正的应变零点。将点 B' 作为应变零点，曲线上任意一点（G'）的应力值除以该点的应变值即可得到切线模量（直线 B'G' 的斜率）。对于这些没有线性区的材料，试图使用通过拐点的切线作为基准来确定偏移屈服点，其结果可能是不可接受的。

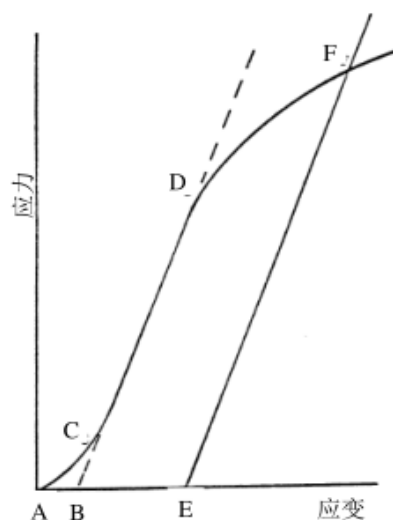


图 A1.1 具有 Hookean 区域的材料

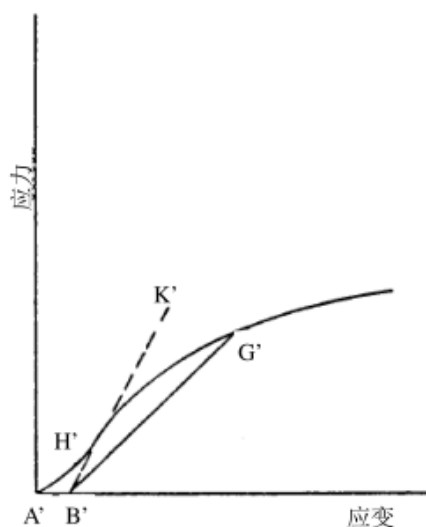


图 A1.2 没有 Hookean 区域的材料

A2 跨距的测量和设定

A2.1 对于跨距可调的弯曲夹具，在计算应力、模量和应变时，支座间的跨距保持为常数或采用实际测量值是很重要的，并且加载头应正确定位并与支座具有良好的对中度。使用跨距可调的弯曲夹具时，采用下列的一些简单步骤可以改善试验结果的重复性。

A2.2 跨距的测量

A2.2.1 用于试验结果计算所需要的技术是确保正确的跨距，而不是一个估计的跨距。

A2.2.2 在试件完全接触的跨距中心划一条永久的线或标记，标记的类型取决于支座是否固定或可旋转（见图 A2.1 和 A2.2）。

A2.2.3 使用读数至少为 0.1mm(0.004in)的带有尖点的游标卡尺测量两个支座间的跨距，并用跨距的实际测量值进行计算。

A2.3 跨距的设定和加载头的对中度——为了确保一个固定的天对天的跨距设定，并确保加载头的对中度 and 定位正确，应该对使用的每一种标准跨距制造一个简单的夹具。图 A2.3 的夹具的示例是很有用的。

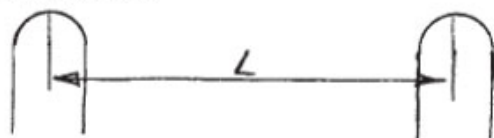


图 A2.1 固定的试件支座的标记

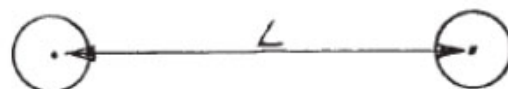


图 A2.2 可旋转的试件支座的标记

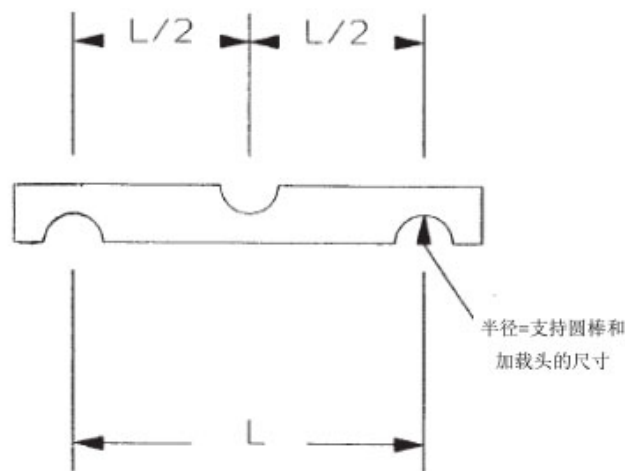


图 A2.3 用于设定加载头和跨距及对中的夹具

附 录

(非强制性信息)

X1 弯曲试验机柔度修正方法

X1.1 引言

X1.1.1 万能试验设备驱动系统总是显示出一个特定的柔度水平，它可以用横梁位移与试件的实际位移之间的偏差来表征，这种偏差是关于加载框架的刚度、驱动系统的驱动机构、加载单元柔度和夹具柔度的函数。为了正确地测量材料的弯曲模量，应对这种柔度进行测量，并从试验数据减去。未修正的弯曲模量低于修正后的弯曲模量，材料的刚度越大，系统柔度对试验结果的影响也越大。

X1.1.2 当采用位移计/引伸计测量试件的实际位移量时，则不需要对试验机的柔度进行修正。

X1.2 术语

X1.2.1 柔度——试验机驱动系统的位移值与试件的实际位移之间的偏差。

X1.2.2 柔度修正——对试验设备位移进行修正的一种分析方法，可以定量消除试验设备柔度对测量值的影响。

X1.3 设备

X1.3.1 万能试验机

X1.3.2 载荷单元

X1.3.3 包含加载头和试件支撑的弯曲夹具

X1.3.4 用于对位移修正的计算机软件

X1.3.5 具有光滑表面并且弯曲刚度至少大于试验材料 100 倍的钢棒，其长度至少比跨距长 13mm，跨度应与试件的宽度一致，厚度必须保证达到或超过目标刚度。

X1.4 安全预防措施

X1.4.1 当载荷达到 90%的载荷单元额定值时，应停止万能试验机横梁的移动，以避免载荷单元损坏。

X1.4.2 测量柔度曲线时，加载速率不能超过 2mm/min。因为钢棒不容易变形，如果速度太快，很容易超过载荷单元的额定值。

X1.5 方法

注 X1.1——每次对试验机的设置改变，例如，载荷单元改变或弯曲夹具在试验机上重新安装，都应该确定新的柔度修正曲线。如果弯曲试验在试验机上进行，且设置没有改变，则无须重新计算柔度曲线。

注 X1.2——如果带有计算机软件的其他试验机可以自动进行柔度修正，应参考软件使用手册，以确定如何实现修正。

X1.5.1 确定柔度的方法如下：

X1.5.1.1 设定试验系统，使其与实际的试验结构形式配套。

X1.5.1.2 将钢棒放入试验夹具中，使其与实际试验的试件的位置完全相同。

X1.5.1.3 将横梁速度设定为 2mm/min 或更小，开始在试验方向移动横梁，并记录衡量位移与和对应的载荷值。

X1.5.1.4 增加载荷，直到超过试验中预计的最大载荷值，然后停止衡量的移动，并返回试验前的

位置。

X1.5.1.5 从加载头接触钢棒开始，直到达到预计的最大载荷，记录的载荷-位移曲线即为试验系统的柔度。

X1.5.2 用于柔度修正的方法如下：

X1.5.2.1 在满足测量要求的横梁条件下进行材料的弯曲试验。

X1.5.2.2 最好的方法是采用计算机软件进行柔度修正，但是，如果没有的软件，则应按下列的方法对柔度进行手动修正。在材料的载荷-位移曲线上确定用于模量计算的位移（D）范围，对于杨氏模量，应选择曲线上比例极限以下的急剧升降段；对于割线和弦向模量，应分别给定一个或多个应变水平。对于两个选择的位移点（D1，D2），从位移轴向上作两条垂直线，直到与材料的载荷-位移曲线相交。对于某些情况，在进行底部补偿修正后，这些点中的一个点可能位于位移零点。在载荷-位移曲线上，从这些点画两条水平线，直到与载荷（P）轴相交，并确定载荷值（L1，L2）。

X1.5.2.3 采用钢棒的柔度修正载荷-位移曲线，对载荷（P）轴上的 L1 和 L2 进行标记。从这两点画两条水平线，直到与钢棒载荷-位移曲线的载荷轴相交，然后，从载荷-位移曲线上的这两点向下作两条垂直线，直到与位移轴相交。从位移轴上的这两点即可确定修正量（c1，c2），并可用于试验材料的位移测量。

X1.5.2.4 从位移测量值（D1，D2）可以确定修正量（c1，c2），从而可以得到试件位移的真实测量值（D1-c1，D2-c2）。

X1.6 结论

X1.6.1 弦向模量的计算

X1.6.1.1 采用 12.2.3 中的公式，计算图 X1.1 中载荷点 L1 和 L2 处的应力（ $\sigma f1$ ， $\sigma f2$ ）。

X1.6.1.2 采用 12.8 中的式（5），计算图 X1.3 中位移点 D1-c1，D2-c2 处的应变（ $\epsilon f1$ ， $\epsilon f2$ ）。

X1.6.1.3 根据 12.9.3 中的式（7），计算弦向弯曲模量。

X1.6.2 割线模量的计算

X1.6.2.1 除了 $\sigma f1=0$ ， $L1=0$ 和 $D1-c1=0$ 外，计算与确定弦向模量的应变测量值处的割线模量。

X1.6.3 杨氏模量的计算

X1.6.3.1 从图 X1.1 中选择 L1 和 L2 的载荷，并从图 X1.3 中选择 D1-c1 和 D2-c2 的应变，确定比例极限以下曲线急剧升降段的斜率 m。

X1.6.3.2 根据 12.9.1 中的式（6），计算杨氏模量。

改变的概括

本节对这些试验方法的改变部分进行了标识。为了便于使用，D 20 委员会强调了对这些试验方法的使用可能影响的改变部分。本节包含了对这些改变的描述和/或发生改变的理由。

D 790-03

（1）增加了附录 X1。

D 790-02

- (1) 修改了 9.1 和 9.2 节。

D 790-00

- (1) 修改了 12.1 节。

D 790-99

- (1) 修改了 10.1.3 节。

D 790-98

- (1) 改写了 4.2 节，使试验方法更接近 ISO 178。
- (2) 增加了图 2，阐明了弯曲特性，以便观察和定义屈服和断裂特性，并确定应力-应变曲线上这些点的正确位置。