

# ASTM D 3410/D 3410M-03<sup>ε1</sup>

## 剪切加载无支持工作段的聚合物基复合材料

### 压缩性能标准试验方法<sup>1</sup>

本标准以固定的编号 D 3410/D 3410M 出版；编号后的数字表示最初采用的或最近版本的年号。带括号的数据表明最近批准的年号。上标 (ε) 表明自最近版本或批准以后进行了版本修改。

注ε1——编号 D 6641/D 6641M 于 2001 年 12 月修订为双重标准。

本标准已经被美国国防部批准使用。

## 1 范围

1.1 本试验方法用于测定高模量纤维增强的聚合物基复合材料的面内压缩性能。复合材料形式限定于连续或不连续纤维增强的复合材料，其弹性性能相对于试验方向是正交各向异性的。本试验标准通过楔形夹头接触面的剪切将压缩力引入到试件中。这种压缩力的传递方式不同于试验方法 D 695，D 695 通过端部加载方式将压缩力传递到试件中，D 6641/D 6641M 中的压缩力是以剪切和端部组合加载的方式传递的，而 D 5467/D 5467M 则采用四点弯曲方法将压缩力传递到薄蒙皮蜂窝夹层梁中。

1.2 本试验方法适用于由单向带、湿纤维束铺放、纺织物（例如织物）、短纤维制成的复合材料，或类似的产品形式。某些产品形式可能与本试验方法的要求有所不同。

1.3 以国际单位 (SI) 或英制单位 (inch-pound) 给出的数值可以单独作为标准。正文中，英制单位在括号内给出。每一种单位制之间的数值并不严格等值，因此，每一种单位制都必须单独使用。由两种单位制组合的数据可能导致与本标准不一致。

注 1——其他测量树脂基复合材料压缩性能的方法见试验方法 D 695, D 5467/D 5467M 和 D 6641/D 6641M。

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。

## 2 参考文献

### 2.1 ASTM 标准

D 695	刚性塑料压缩性能试验方法 <sup>2</sup> Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics
D 792	置换法测量塑料密度和比重（相对密度）试验方法 <sup>2</sup> Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
D 883	与塑料相关的术语 <sup>2</sup> Terminology Relating to Plastics
D 2584	弯曲增强树脂燃烧质量损失试验方法 <sup>3</sup> Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins
D 2734	增强塑料空隙含量试验方法 <sup>3</sup> Test Method for Void Content of Reinforced Plastics
D 3171	复合材料组分含量测试方法 <sup>4</sup>

<sup>1</sup>本试验方法由 ASTM 的复合材料委员会 D30 审定，并由单层和层压板试验方法专业委员会 D30.04 直接负责。当前版本于 2003 年 6 月 10 日批准，2003 年 8 月出版。最初于 1975 年批准，上一版本为：D 3410/D 3410M，于 1995 年批准。

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

D 3878	Test Method for Constituent Content of Composite Materials 复合材料术语 <sup>4</sup>
D 5229/D 5229M	Terminology of Composite Materials 聚合物基复合材料吸湿性能及平衡状态调节试验方法 <sup>4</sup>
D 5379/D5379M	Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials 采用 V 形缺口梁方法的复合材料剪切性能试验方法 <sup>4</sup>
D 5467/D5467M	Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method 采用夹层梁的单向聚合物基复合材料压缩性能试验方法 <sup>4</sup>
D 6641/D 6641M	Test Method for Compressive Properties of Unidirectional Polymer Matrix Composites Using a Sandwich Beam 用联合加载压缩 (CLC) 试验夹具测量聚合物基复合材料压缩性能的试验方法 <sup>4</sup>
E 4	Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using the Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture 试验机载荷标定方法 <sup>5</sup>
E 6	Practices for Force Verification of Testing Machines 与力学试验方法相关的术语 <sup>5</sup>
E83	Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing 引伸计分类及标定的操作规程 <sup>5</sup> ;
E 111	Practice for Verification and Classification of Extensometers <sup>5</sup> 杨氏模量、正切模量及弦向模量试验方法 <sup>5</sup> ;
E 122	Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus 选择样本尺寸用以估计批次或工艺质量测量的操作规程 <sup>6</sup> ;
E 132	Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process 室温下泊松比试验方法 <sup>5</sup> ;
E 177	Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature ASTM 试验方法中各项精度和偏差的使用的操作规程 <sup>6</sup> ;
E 251	Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods 粘贴式金属电阻应变片特性试验方法 <sup>5</sup> ;
E 456	Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages 与质量和统计有关的术语 <sup>6</sup> ;
E 1237	Terminology Relating to Quality and Statistics 粘贴式电阻应变片安装指南 <sup>5</sup> ;
E 1309	Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages 数据库中纤维增强聚合物基复合材料的标识指南 <sup>4</sup>
E 1434	Guide for the Identification of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Materials in Databases 数据库中纤维增强聚合物基复合材料的力学性能试验数据记录指南 <sup>4</sup>
	Guide for Recording Mechanical Test Data of Fiber-Reinforced Composite

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

<sup>6</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

## 2.2 ASTM 附件

压缩夹具, D 3410 方法 B<sup>7</sup>

## 2.3 其他文件

ANSI Y14.5M-1982<sup>8</sup>

ANSI/ASME B46.1-1985<sup>8</sup>

## 3 术语

3.1 术语 D 3878 定义了与高模量纤维及其复合材料有关的术语。术语 D 883 定义了与塑料有关的术语。术语 E 6 定义了与力学试验有关的术语。术语 E 456 和操作规程 E 177 定义了与统计有关的术语。当各个标准定义的术语之间发生矛盾时,术语 D 3878 优先于其他标准。

3.2 本标准专用术语定义:

3.2.1 名义值——仅存在于名称中,出于便于表示的目的,指定了一个可测量的性能。公差可能被作为一个名义值,用于为性能确定一个可接受的范围。

3.2.2 正交各向异性材料——具有下列特性的材料:在每一个给定的点处均有三个互相垂直的对称平面,并以此定义主材料坐标系。

3.2.3 主材料坐标系——轴线与材料内部对称平面垂直的坐标系。

3.2.4 参考坐标系——用于定义铺层方向的层压复合材料的坐标系。参考坐标系中的一条轴线被定义为参考轴(通常为  $x$  轴),用于指定位置;相对于参考轴,在层压板的每一个单层中引入一个主轴,用以定义该层的铺层方向。

3.2.5 特殊正交各向异性——对主材料坐标系中观察到的一种正交各向异性材料的一种描述。在层压复合材料中,从参考坐标系中观察到的特殊正交各向异性层压板是 $[0_i/90_j]_{ns}$ 族的对称均衡的层压板,即应力-应变关系的弯曲耦合项为 0。

3.2.6 过渡应变,  $e^{\text{transition}}$ ——在双线性应力-应变或应变-应变曲线上的两个基本线性段之间的过渡区中间范围的应变值。(横向应变-纵向应变曲线用于测量泊松比)。

3.3 符号:

3.3.1  $A$ ——试样最小横截面面积。

3.3.2  $B_y$ ——试样弯曲百分比。

3.3.3  $CV$ ——给定性能的样本的离散系数(以百分数表示)。

3.3.4  $E$ ——试验方向上的弹性模量。

3.3.5  $F^{\text{cu}}$ ——极限压缩应力(压缩强度)。

3.3.6  $G_{xz}$ ——厚度方向的剪切弹性模量

3.3.7  $h$ ——试样厚度。

3.3.8  $i, j, n$ ——铺层代码,材料中的一个铺层或一组铺层的重复数。

3.3.9  $L_g$ ——引伸计标距。

3.3.10  $n$ ——每个样本的试样数。

3.3.11  $P$ ——试样承受的载荷。

3.3.12  $P^f$ ——试样破坏时承受的载荷。

3.3.13  $P^{\text{max}}$ ——试样破坏前承受的最大载荷。

- 3.3.14  $s$ ——铺层代码，表明代码前面的铺层相对于试件中面是对称重复的
- 3.3.15  $s_{n-1}$ ——给定性能的样本的标准差。
- 3.3.16  $w$ ——试样宽度。
- 3.3.17  $x_i$ ——给定性能在一个样本中单个试样的试验结果。
- 3.3.18  $\bar{x}$ ——给定性能在一个样本中的平均值或均值（估计平均值）。
- 3.3.19  $\bar{\epsilon}$ ——应变传感器或引伸计上读出的正应变值。
- 3.3.20  $\nu^c$ ——压缩泊松比。
- 3.3.21  $\sigma_c$ ——压缩正应力。

## 4 试验方法概述

4.1 具有一个恒定矩形截面的平坦条状材料，试件的示意图如图 1-4 所示，通过沿夹块的剪切力承受压缩载荷。采用如图 5-7 所示的专用夹具的楔形夹块施加剪切力。楔形夹块的设计对夹具特性的影响将在 6.1 中将讨论。

4.2. 为了得到压缩试验结果，将试件安装于试验夹具中，并将夹具放置于试验机的两个平台之间，施加压缩载荷。采用该试验夹具和试件，由破坏前承受的最大载荷可以确定材料的极限压缩应力。采用应变或位移传感器测量应变，可以确定材料的应力-应变响应，从而可以得到材料的极限压缩应变、压缩弹性模量、压缩泊松比和过渡应变。

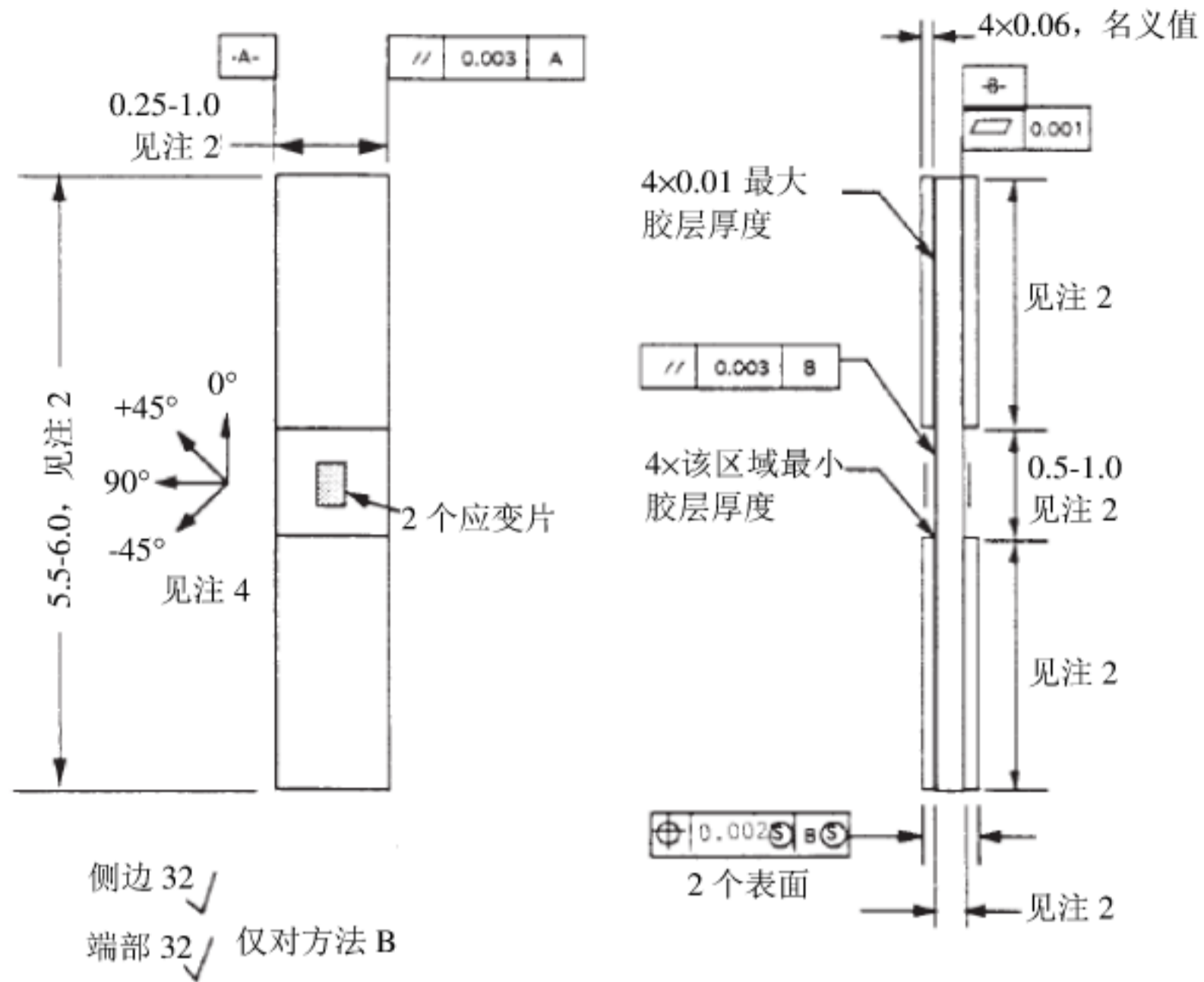
## 5 意义与用途

5.1 制定本试验方法是为了得到用于材料规范、研究与开发、质量保证以及结构设计和分析的压缩性能数据。影响压缩特性并应该在报告中给出的因素包括：材料、材料制备和铺贴方法、试件铺层顺序、试件制备、试件状态调节、试验环境、试件对中和夹持、试验速度、在某一温度下的时间、孔隙含量和增强体的体积百分比。本试验方法可以得到的试验方向的性能参数包括：

- 5.1.1 极限压缩强度；
- 5.1.2 极限压缩应变；
- 5.1.3 压缩弹性模量（线性或弦向）；
- 5.1.4 压缩泊松比；
- 5.1.5 过渡应变。



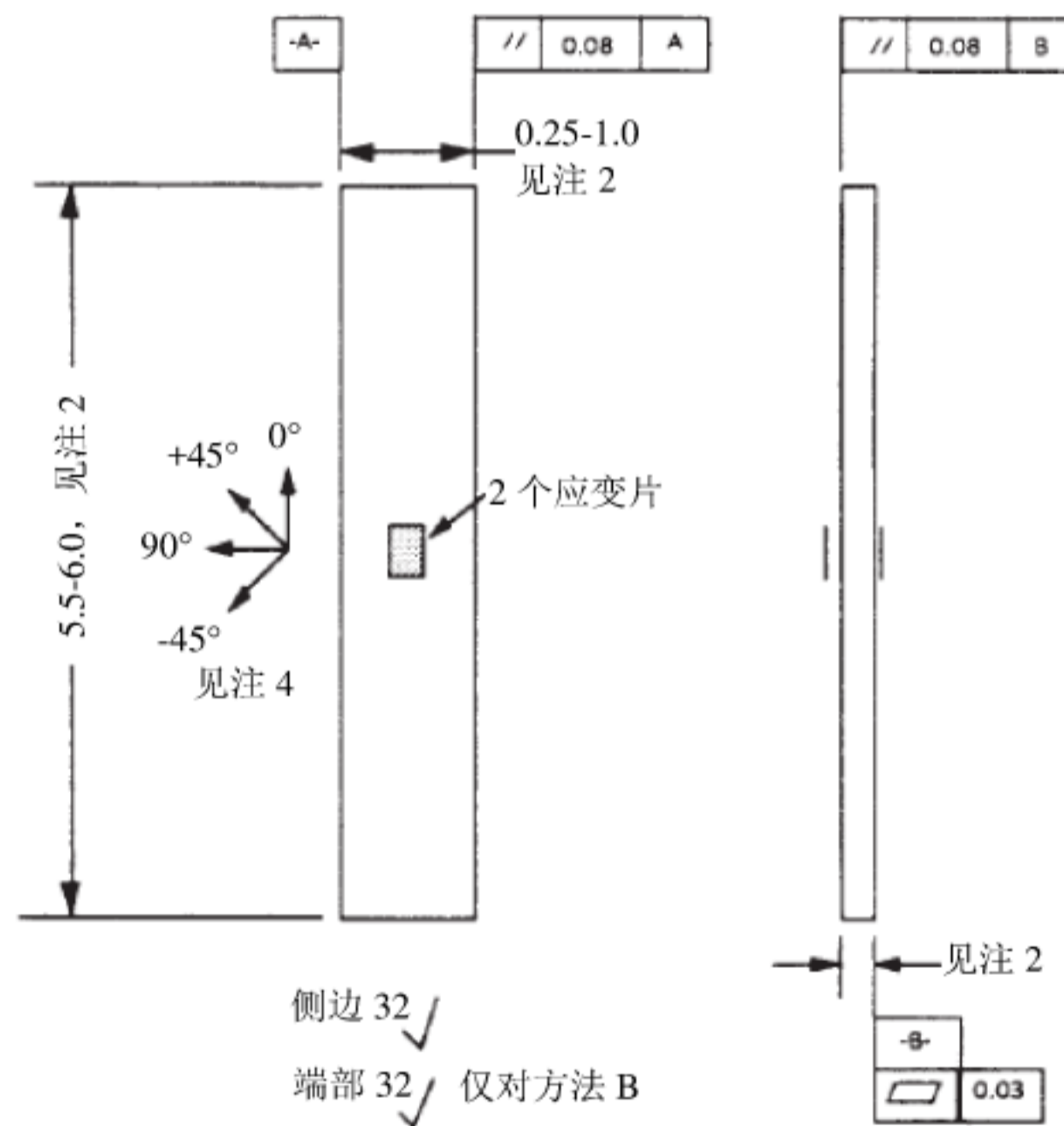




注:

1. 图纸标注与 ANSI Y14.5M-1982 和 ANSI/ASME B46.1-1985 一致;
2. 宽度、厚度、工作段长度、加强片长度和总长度的推荐值见试验标准的第 8 节和表 2、表 3;
3. 材料、铺层方向、加强片的使用、加强片材料、加强片角度及胶粘剂的值见试验标准;
4. 相对于-A-的铺层方向的公差为 $\pm 0.5^\circ$ 。

图 3 压缩试件图 (英制, 含加强片)



注:

1. 图纸标注与 ANSI Y14.5M-1982 和 ANSI/ASME B46.1-1985 一致;
2. 宽度、厚度、工作段长度和总长度的推荐值见试验标准的第 8 节和表 2、表 3;
3. 材料、铺层方向的值见试验标准;
4. 相对于-A-的铺层方向的公差为 $\pm 0.5^\circ$ 。

图 4 压缩试件图 (英制, 无加强片)



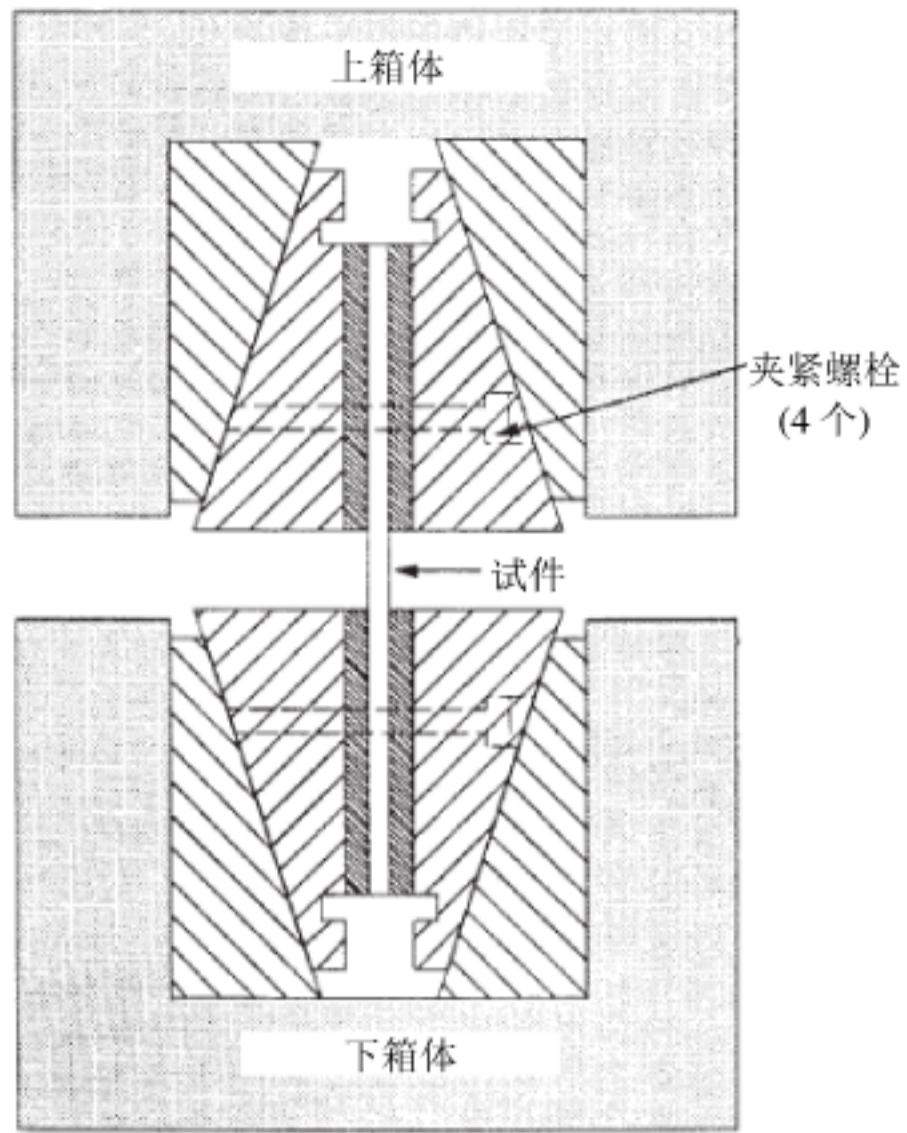


图 5 压缩试验夹具示意图

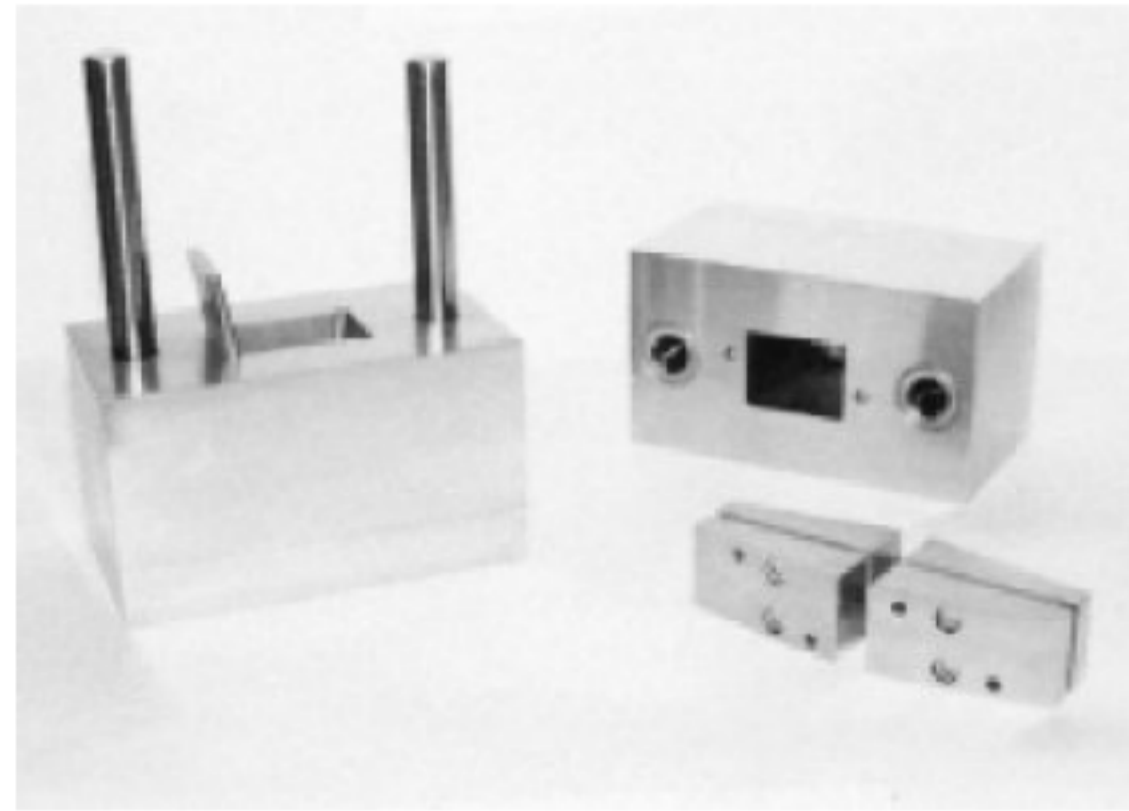


图 6 压缩试验夹具照片

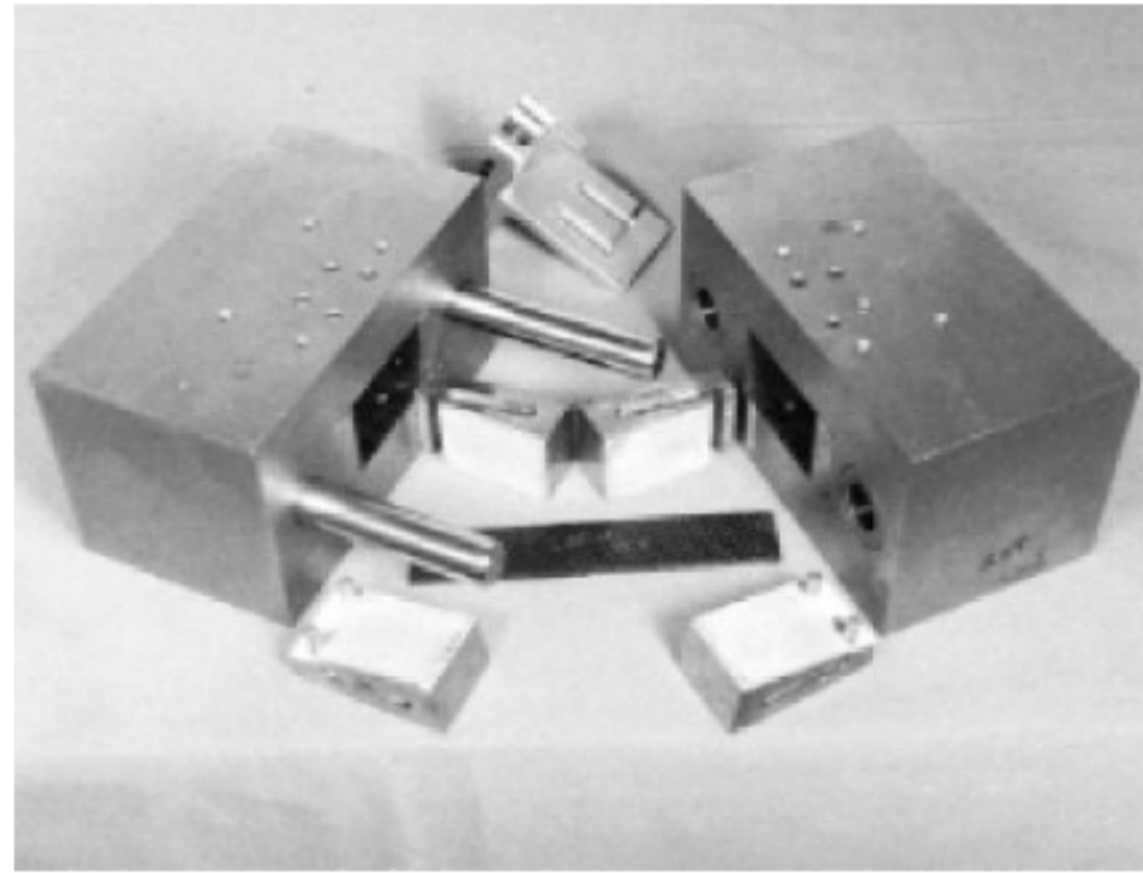
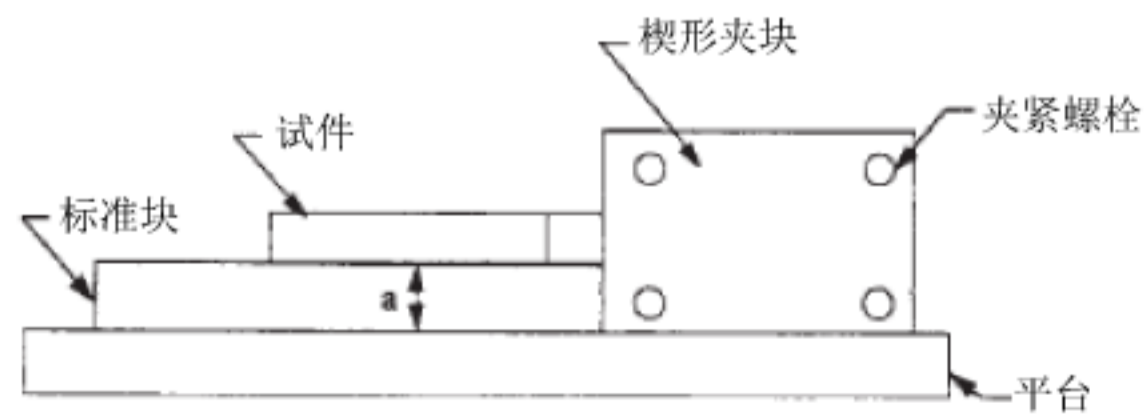
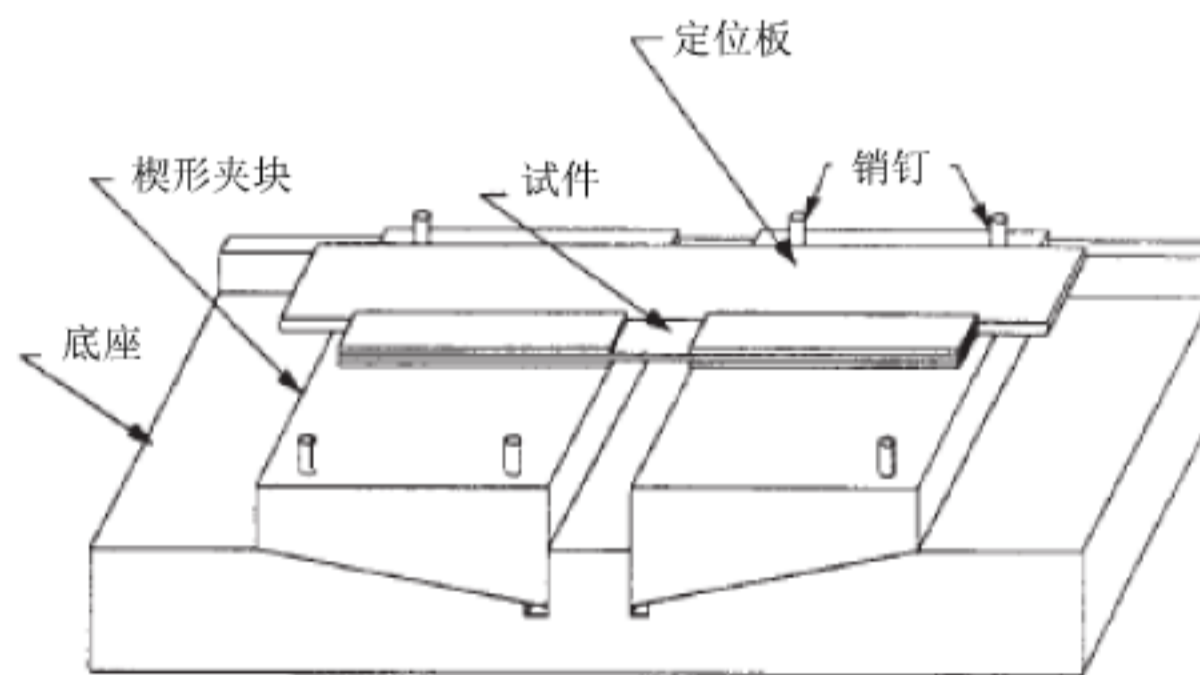


图 7 压缩试验夹具照片



需要一个合适高度的标准块对试件与夹块对中。

图 8 夹具箱体外试件与楔形夹块对中的两种夹具（其它对中方法见 7.2.2）

## 6 影响因素

6.1 试验夹具特性——本试验方法通过带锥度的矩形楔形夹块将力传递到试件上。矩形楔形夹块的设计是为了消除本试验方法最初采用的所谓 Celanese 压缩试验夹具(1)<sup>9</sup>的圆锥形楔形夹块的间隙问题。包含了 Celanese 压缩试验方法细节的本试验方法的早期版本，包括试验方法 D 3410/D 3410M-95，仍然有效。楔形夹块组件的匹配表面经过表面抛光的其他的夹具对试验结果有显著影响。因为这些表面要承受滑动接触，所以表面必须过打磨、润滑和无刻痕（11.5.1 节）。

注 2——可以接受的楔形夹块匹配表面的光滑度的范围为 2-12 $\mu\text{in. rms}$ ，平均值为 7 $\mu\text{in. rms}$ 。

6.1.1 在特殊使用时，楔形夹块的试件夹持面通常比较粗糙。例如，锯齿状（7-8 个锯齿/cm）或热喷涂碳化钨颗粒（100 粒）的夹持面（见 8.3.3）。

6.2 试验方法的敏感性——对于单一的材料体系，不同的试验方法会得到不同的压缩强度。这种差异可能来源于试件对中度的影响、试件几何尺寸的影响和夹具的影响，即使将此影响减少到最小。参考文献(1, 2)中给出了不同试验方法之间试验结果的差别的实例。

6.3 材料和试件制备——较差的材料制造方法、不恰当的试件加工导致的损伤以及纤维准直度失控都会对压缩模量，特别是极限压缩应力，造成影响。应尽可能仔细地维持相对于试件坐标系的纤维准直度，虽然没有标准的工艺规程确保这种准直度。可靠的工艺规程包括如下：在靠近与纤维方向平行的一条侧边处将固化后的单向层压板切开，以确定 0°方向，或者在平行于 0°的方向上铺设一条具有对比颜色的小支数纤维束（在碳纤维层压板中铺设芳纶纤维，在芳纶或玻璃纤维层压板中铺设碳纤维），并作为预浸带制造或壁板制造的一部分。

6.4 加强片和公差——本试验方法的试验结果数据受加强片的平整度和平行的影响，因此，应确保满足试件的公差要求。加强片与试件粘贴后，通常要求对加强片表面进行精细打磨。

6.5 厚度和工作段长度的选择——本试验方法的工作段是无支持的，因此，对试件工作段长度和试件厚度的选择需要折衷考虑。工作段长度必须足够短，以消除欧拉（柱）弯曲；由于夹持的影响，工作段长度也必须足够长，以使应力衰减到单轴压缩，并使泊松效应最小化。8.2.3 节给出了最小厚度的要求。

6.6 夹持——高百分比的夹持引起的破坏，特别是与材料数据的高分散性一起出现时，表明试件的夹持有问题。

6.7 系统对中度——过大的弯曲将导致试件提前破坏以及错误的弹性模量测定值。应尽力消除试验系统的弯曲，弯曲的发生可能有下列原因：(1)不对中（或超差）的夹头或夹具(2)不合适的试件安装，或(3)较差的试件制备。

6.8 角铺层层压板的边缘效应——含有偏轴层的层压板的边缘软化会导致过早的破坏和较低的刚度。因为这些原因，角铺层层压板的强度和模量可能会偏低。对于准各向同性层压板和 0°层百分比很高的层压板，边缘影响很小。

## 7 设备

7.1 千分尺——采用一个合适直径的千分尺，其球形面放在不规则表面一侧，例如层压板真空袋一侧表面，平的基准面放在机加边或很光滑的模具一侧表面。仪器的精度应是其最小读数在试件宽度和厚度尺寸的 1%以内。对于典型试件的几何尺寸，精度为 $\pm 2.5\mu\text{m}[\pm 0.0001\text{in}]$ 的仪器能满足对试件厚度的测量；精度为 $\pm 25\mu\text{m}[\pm 0.001\text{in}]$ 的仪器能满足对试件宽度的测量。

7.2 压缩夹具：

7.2.1 夹具——夹具使用矩形楔块并且适用于不同宽度和厚度的试件。夹具的剖面图及照片如图 5-7 所示。每一组夹持试件的楔形夹块组成一组配对的楔形块，并与上下楔形箱体相匹配。使用不同厚度的楔形块，该试验夹具可以进行不同厚度试件的试验。如图 5 所示，楔形

<sup>9</sup> 括号内数字表示本试验方法参考文献的序号。



夹块有时在外端部开槽，以安装端部挡块。当上紧夹块的螺钉时，试件的端部可以紧靠挡块，以确保每一对楔形夹块所夹持的试件长度相等。挡块可以在试验前移去，或者保留在原有位置以提供不同于剪切加载试件的一定程度（不可调节的）端部载荷。在试件加载时，挡块可以确保每一对楔形块的位移相等，从而减少试件的弯曲。通常情况下，下楔形箱体放置于试验机的下平台上，而上楔形箱体则与试验机的上衡量接触。

7.2.2 试件对中装置——本试验方法得到的压缩试验结果对于试件与试验夹具楔形块纵轴的对中度很敏感。试件的对中可以采用对中装置或在楔形箱体外侧用机械方式固定试件采用一个标准度量块（如图 8 所示），或者在试件安装于夹具箱体的楔形夹块中后，使用特制的装置或直角尺。对于其他不同的对中装置和方法，如果能达到相同的效果，则可以接受。

7.3 试验机——试验机应与操作规程 E 4 相一致，并满足以下要求：

7.3.1 试验机加载头——试验机应有两个加载头，其中至少有一个可以沿试验机的轴线移动。

7.3.2 夹具附件——夹具的上部分通常和试验机上横梁直接相接，下横梁的平台用于支撑夹具的下部分。平台的厚度至少为 20 mm[0.75in.]。夹具应与试验机匹配，而试验机应带有一个能消除角度约束的接头，如试验机上的半球与半球形凹槽配套。

注 3——本试验方法可以采用能消除角度约束的接头，例如半球，和刚性且相互平行的两个衡量(3)。为了确定最佳的试验夹具结构形式，采用无加强片的铝试件和背对背式粘贴应变片的方法对试验夹具进行检验，可以确定结构形式对试验结果精度和重复性的影响。

7.3.3 传动机构——试验机的传动机构应当能使可移动的加载头相对于固定加载头具有一个可控制的位移速率。可移动的加载头的位移速率按照 11.3 节的规定调节。

7.3.4 载荷指示器——试验机的载荷传感器应能指示试件承受的总载荷。该装置应在规定的试验速率下无惯性滞后，且在整个载荷范围内给出的载荷精度应在显示值的±1%以内，如 E4 的规定。涉及的载荷范围对于模量计算可能偏低，而对于强度计算可能偏高，或者两者同时存在。

注 4——同一试验中，为了在一个大范围内获得精确的载荷数据，例如同时确定弹性模量和极限载荷时，可以对于载荷单元及其标定提出特殊要求。对于某些设备可能要求特殊的标定方法。对于某些材料和载荷单元的组合，不可能同时精度地测量弹性模量和极限强度，此时，模量和强度的测量必须通过独立的试验，并对每一个试验采用不同的载荷单元范围来实现。

7.4 应变指示装置——应同时测量试件正反两面的纵向应变，以便对试件的弯曲效应进行修正并能发现欧拉（柱）屈曲。本试验方法所允许的最少试件数量为 5 件时，应对所有 5 个试件均进行背对背的应变测量。如果试验的试件多于 5 个，只要所有的试件均使用同一个试验夹具并在试验中采用相同的载荷框架（见注 5），在整个试验过程中没有对试件或试验方法进行改进，而且最初 5 个试件的弯曲效应满足 11.9.1 节的要求，那么对编号大于 5 的试件则可采用单个应变指示装置。如果不满足这些条件，那么所有的试件必须背对背地安装应变测量装置。测量泊松比时，应对试件安装横向的应变测量装置。因为试件的工作段较短，所以推荐使用应变片。应变指示装置与试件的粘贴不应导致试件表面损伤。

注 5——试验夹具的两部分应可以从加载框架中移走，如 11 节的要求。

7.4.1 粘贴式电阻应变片的选择——应变片基于试验方法和试验材料类型而折衷选择。应变片的有效丝栅长度为 3mm[0.125in]或更小（1.5mm[0.063in]更合适）。应变片的标定应遵循试验方法 E 251。对于机织物层压板试验，应变片的选择应该考虑到应变片的有效长度至少应等于机织物的特征重复单元。关于复合材料的应变片使用的指南如下文所述，文献(4, 5)对此进行了讨论。

7.4.1.1 与操作规程 E 1237 相一致的纤维增强的复合材料的表面处理，可能穿透基体材料并损伤增强纤维，从而导致不正确的试件破坏。表面处理过程中，不能使增强纤维裸露或损伤。应变片制造商应提供关于表面处理的指南和推荐用于复合材料的胶粘剂。

7.4.1.2 应选择较大电阻的应变片，以减少低导电率材料的热影响，最好使用 350 Ω 或更高电阻的应变片。另外，应使用与预期精度（推荐 1-2V）一致的尽可能小的应变片激励电压，

以进一步降低应变片的能耗。应变片导致试样发热可能直接影响材料的性能，或者由于应变片温度补偿系数与试件材料热膨胀系数之间的不同，而影响应变的显示值。

7.4.1.3 即使是在标准实验室大气环境下进行试验，也推荐采用温度补偿。非室温环境试验要求进行温度补偿。如果可能，可以使用具有相同铺层和相同应变片方向的随炉试件（模拟标定试件）进行热应变补偿。

7.4.1.4 应变片的选择应考虑应变片的横向敏感性。应变片制造商应给出横向敏感性的修正方法。这对于采用横向应变片测量泊松比尤其重要，如注 15 所述。

7.4.2 引伸计——引伸计至少应满足操作规程 E 83 中 B-2 级有关应变范围的要求，且应在与操作规程 E 83 相符的整个应变范围内进行标定。对于特别硬的材料，或对于横向应变的测量，B-2 级引伸计允许的系统误差可能太大。在给定的试验速度下，引伸计不能有惯性滞后。

7.5 调节箱——在非试验室环境下调节材料时，要求采用温度/湿度可控的环境调节箱，并能将温度保持在所要求温度的 $\pm 3^{\circ}\text{C}$  [ $\pm 5^{\circ}\text{F}$ ] 以内，湿度保持在所要求湿度的 $\pm 5\%$  以内。调节箱的环境条件在正常范围内应能连续自动或手动控制。

7.6 环境试验箱——对于不同于大气环境的试验室条件的试验环境，要求采用环境试验箱。在力学试验中，环境试验箱能将试件工作段的温度保持在所要求温度的 $\pm 3^{\circ}\text{C}$  [ $\pm 5^{\circ}\text{F}$ ] 以内。另外，试验箱应该能维持试验所要求的环境条件，如液体暴露或相对湿度。

## 8 取样和试件

8.1 取样——对每种试验情况至少应进行 5 个试件的试验，除非利用较少的试件可以得到有效的结果，如设计试验的情况。为了得到具有统计意义的数据，应参考操作规程 E 122 中所述的方法，并给出取样方法。

注 6——如果试件要经过环境调节达到平衡，且具有相同的类型或几何尺寸，但通过称量试件本身的重量并不能正确测量试件的重量变化（例如有加强片的试件），这时，可采用具有相同名义厚度和适当尺寸的随炉件（无加强片）来确定需调节的试件是否达到平衡。

8.2 几何形状——试件应具有恒定的矩形横截面，试件宽度的变化不超过 $\pm 1\%$ ，厚度的变化不超过 $\pm 2\%$ 。试件的几何尺寸要求如表 1 所示，推荐的几何尺寸如表 2 所示。有加强片和无加强片、包含尺寸公差的试件示意图分别如图 1 和图 2（国际单位）以及图 3 和图 4（英制单位）所示。试件的宽度和厚度应包含足够数量的纤维或纱，使其在统计上代表整个材料，否则，本试验方法不能用于材料的试验。

表 1 压缩试件几何尺寸要求（如果不同应注明）

参 数	要 求
试件要求	
形状	恒定矩形截面
试件总长度	按要求 <sup>A</sup>
试件工作段长度	按要求 <sup>A</sup>
试件宽度	按要求 <sup>A</sup>
试件厚度	见表 3
试件宽度公差	宽度的 $\pm 1\%$
试件厚度公差	厚度的 $\pm 2\%$
加强片要求（如果使用）	
加强片端部的试件厚度偏差	厚度的 $\pm 1\%$

8.2.1 试件宽度——推荐的试件名义宽度如表 2 所示。

8.2.2 试件厚度——试件厚度、工作段长度及宽度的关系如式(1)所示。预计的模量越低，预计的极限压缩应力越高，为了防止试验段发生欧拉（柱）屈曲，试件的厚度就越大。对于



由试件和夹具公差引起的弯矩而产生的梁-柱影响，可以采用式(1)对欧拉屈曲简支条件的保守假设进行补偿。使用背对背的应变测量要求（7.4 节）可以对试件稳定性和试验结果的质量作出最终的评价。表 3 给出了最小试件厚度的计算值，其中，最小试件厚度的计算值是关于加载方向上预计模量和极限压缩应力的一个函数，计算时采用的工作段长度为 12, 20 和 25mm[0.5, 0.75 和 1.0in]， $G_{xz}$  假设为 4GPa[600000psi]（也可用 D5379/D5379M 确定  $G_{xz}$ ）。

$$h \geq \frac{l_g}{0.9069 \sqrt{\left(1 - \frac{1.2F^{cu}}{G_{xz}}\right) \left(\frac{E^c}{F^{cu}}\right)}} \quad (1)$$

其中：

$E^c$ =纵向弹性模量，GPa[psi]，

$F^{cu}$ =极限压缩应力，MPa[psi]

$G_{xz}$ =厚度方向的剪切模量，GPa[psi]

$h$ =试件厚度，mm[in]

$l_g$ =工作段长度，13mm[0.50in]

注 7——式(1)中，对于欧拉屈曲的简支条件的保守假设基于线弹性材料响应。常用的复合材料的剪切特性为高度非线性，即使对于夹持条件，非弹性屈曲计算得到的屈曲载荷也并不总是高于弹性简支条件。采用背对背的应变片可以确保式（1）得到的厚度值足以防止欧拉屈曲的发生。背对背的应变测量也显示出由于误差而引起的而次弯曲效应。

表 2 压缩试件几何尺寸推荐值

纤维方向	宽度 mm(in)	工作段长度 mm(in)	加强片长度 mm(in)	总长度 mm(in)	加强片厚度 mm(in)
0°单向	10(0.5)	10-25(0.5-1.0)	65(2.5)	140-155(5.5-6.0)	1.5(0.06)
90°单向	25(1.0)	10-25(0.5-1.0)	65(2.5)	140-155(5.5-6.0)	1.5(0.06)
特殊正交各向异性	25(1.0)	10-25(0.5-1.0)	65(2.5)	140-155(5.5-6.0)	1.5(0.06)

表 3 要求的试件最小厚度，mm(in)

10mm(0.5in)工作段长度所要求的最小厚度，mm(in)						
纵向模量 GPa(Msi)	预计的压缩强度 $F^{CU}$ ，MPa(ksi)					
	300(50)	600(100)	900(150)	1200(200)	1500(250)	1800(300)
25(5)	1.27(0.058)	1.89(0.087)	2.45(0.114)	3.02(0.142)	3.64(0.174)	4.36(0.214)
50(7)	1.00(0.049)	1.33(0.074)	1.73(0.096)	2.14(0.120)	2.58(0.147)	3.08(0.180)
75(10)	1.00(0.041)	1.09(0.062)	1.41(0.081)	1.74(0.101)	2.10(0.123)	2.52(0.151)
100(15)	1.00(0.040)	1.00(0.050)	1.22(0.066)	1.51(0.082)	1.82(0.101)	2.18(0.123)
200(20)	1.00(0.040)	1.00(0.044)	1.00(0.057)	1.07((0.071)	1.29(0.087)	1.54(0.107)
300(30)	1.00(0.040)	1.00(0.040)	1.00(0.047)	1.00(0.058)	1.05(0.071)	1.26(0.087)
400(50)	1.00(0.040)	1.00(0.040)	1.00(0.040)	1.00(0.045)	1.00(0.055)	1.09(0.068)
500(70)	1.00(0.040)	1.00(0.040)	1.00(0.040)	1.00(0.040)	1.00(0.057)	1.00(0.057)
20mm(0.75in)工作段长度所要求的最小厚度，mm(in)						
纵向模量 GPa(Msi)	预计的压缩强度 $F^{CU}$ ，MPa(ksi)					
	300(50)	600(100)	900(150)	1200(200)	1500(250)	1800(300)
25(5)	2.53(0.087)	3.77(0.131)	4.90(0.171)	6.04(0.214)	7.28(0.262)	8.72(0.320)
50(7)	1.79(0.074)	2.67(0.111)	3.46(0.145)	4.27(0.180)	5.15(0.221)	6.17(0.271)
75(10)	1.46(0.062)	2.18(0.092)	2.83(0.121)	3.49(0.151)	4.21(0.185)	5.04(0.226)
100(15)	1.27(0.05)	1.89(0.075)	2.45(0.099)	3.02(0.123)	3.64(0.151)	4.36(0.185)
200(20)	1.00(0.044)	1.33(0.065)	1.73(0.086)	2.14(0.107)	2.58(0.131)	3.08(0.160)
300(30)	1.00(0.040)	1.09(0.053)	1.41(0.070)	1.74(0.087)	2.10(0.107)	2.52(0.131)
400(50)	1.00(0.040)	1.00(0.041)	1.22(0.054)	1.51(0.068)	1.82(0.083)	2.18(0.101)



500(70)	1.00(0.040)	1.00(0.040)	1.10(0.046)	1.35(0.057)	1.63(0.070)	1.95(0.086)
<b>25mm(1.0in)工作段长度所要求的最小厚度, mm(in)</b>						
纵向模量	预计的压缩强度 $F^{CU}$ , MPa(ksi)					
GPa(Msi)	300(50)	600(100)	900(150)	1200(200)	1500(250)	1800(300)
25(5)	3.17(0.116)	4.72(0.174)	6.12(0.228)	7.55(0.285)	9.10(0.349)	10.91(0.427)
50(7)	2.24(0.098)	3.33(0.147)	4.33(0.193)	5.34(0.241)	6.44(0.295)	7.71(0.361)
75(10)	1.83(0.082)	2.72(0.123)	3.53(0.161)	4.36(0.201)	5.26(0.247)	6.30(0.302)
100(15)	1.58(0.067)	2.36(0.101)	3.06(0.132)	3.77(0.164)	4.55(0.201)	5.45(0.247)
200(20)	1.12(0.058)	1.67(0.087)	2.16(0.114)	2.67(0.142)	3.22(0.174)	3.86(0.214)
300(30)	1.00(0.047)	1.36(0.071)	1.77(0.093)	2.18(0.116)	2.63(0.142)	3.15(0.174)
400(50)	1.00(0.040)	1.18(0.055)	1.53(0.072)	1.89(0.090)	2.28(0.110)	2.73(0.135)
500(70)	1.00(0.040)	1.05(0.047)	1.37(0.061)	1.69(0.076)	2.04(0.093)	2.44(0.114)

8.2.3 试件总长度和工作段长度——通过加强片长度和选取的工作段长度来确定试件总长度和工作段长度，具体要求如表 1，图 1 和图 2 所示。试件工作段长度的选择要权衡考虑，即，工作段长度必须足够短，以消除欧拉（柱）弯曲；由于夹持的影响，工作段长度也必须足够长，以使应力衰减到单轴压缩，并使泊松效应最小化(6, 7)。在剪切加载的压缩试件中，允许应力衰减所要求的距离随着试件厚度和  $E_x / G_{xz}$  比的增加而增加。对于典型的碳/环氧试件 ( $E_x=138.6\text{GPa}[20.1\text{Msi}]$ ,  $G_{xz}=4.6\text{GPa}[0.67\text{Msi}]$ ,  $h=2.4\text{mm}[0.094\text{in}]$ )，在  $2.4\text{mm}[0.094\text{in}]$  处达到均匀单轴压缩应力状态。对于这种材料，结果表明  $12\text{mm}[0.5\text{in.}]$  的工作段长度足以满足应力衰减。文献(4)的数据表明，对于单轴碳纤维或玻璃纤维增强的环氧，允许应力衰减的工作段长度为  $12\text{mm}[0.5\text{in.}]$ 。对于能使复合材料具有较高  $E_x / G_{xz}$  比值（例如玻璃/PTFE 聚四氟乙烯， $E_x / G_{xz}=406$ ）的基体材料，这一工作段长度并不足以达到应力衰退。文献(8)的试验研究表明，剪切加载类型试件对工作段长度的敏感度低于临界屈曲长度。推荐的  $12\text{-}25\text{mm}[0.5\text{-}1.0\text{in}]$  试件工作段长度即可以满足应力衰退长度的要求，又可以满足欧拉屈曲长度的要求。工作段长度大于  $25\text{mm}[1.0\text{in}]$  时，所要求的试件厚度（8.2.3 和表 3）可能不适宜于普通夹具。推荐的加强片长度为  $64\text{mm}[2.5\text{in}]$ ，试件长度总为  $140\text{-}155\text{mm}[5.5\text{-}6.0\text{in}]$ 。

8.3 加强片的使用——一般不要求使用加强片。选择试件公差和夹持方法的关键因素，是将载荷成功的引入到试件并防止试件由于明显的载荷突变而引起的提前破坏。因此，使用加强片和加强片的主要设计参数的确定依据是其最终的结果为：可接受的破坏模式和破坏部位。如果可接受的破坏模式的出现频率相当高 (>试验次数的 50%)，则不需要改变给定的夹持方法（见 11.10 节）。

8.3.1 在纤维方向上进行单向材料试验时，推荐在试件上粘贴加强片。然而，对于单向  $[90]_n$  材料、 $[0_i/90_j]_{ns}$  或  $[90_i/0_j]_{ns}$  层压板 ( $j \geq i$  时) 以及织物材料，不用加强片也经常能进行成功的试验。

8.3.2 加强片几何形状——典型加强片结构形式如图 1 和图 3 所示。推荐使用带斜角的  $90^\circ$ （无锥度）加强片。加强片的厚度可以不同，但通常为  $1.5\text{mm}[0.06\text{in}]$ 。能使试件在工作段内发生压缩破坏的加强片结构形式的选择，依赖于试件材料、试样铺层方向和使用的夹头类型。出于对中目的，加强片的厚度必须相同，表面必须平行。

8.3.3 摩擦加强片——试验时，加强片并不总是需要粘贴在试验材料上才能有效地将载荷传递到试件上。摩擦加强片，未粘接的加强片通过夹头压力保持在某一位置，在加强片和试件之间经常使用砂布或一些别的细金刚砂，已在某些试验中得到了成功地应用。在特定情况下，浅锯齿状楔形夹头通过在夹头与试件之间只采用砂布作为接触面也得到了成功地应用。但是，使用的金刚砂必须能承受较大的压缩载荷。试验中发现有些类型的砂布由于金刚砂的碎裂而失去作用<sup>10</sup>。一种替代方法就是使用表面经过碳化钨热喷涂处理的夹头(9)。

8.3.4 加强片材料——使用加强片时，最常用的加强片材料是钢和连续 E 玻璃纤维增强的聚合物基材料（机织物或无纬布），其结构形式为 $[0/90]_{ns}$ 层压板。对于在纤维方向进行试验的单向碳纤维增强复合材料，推荐将加强片粘贴在试件上。对于单向碳纤维增强复合材料，钢和 E 玻璃纤维织物加强片都可得到满意的结果(10)。

8.3.5 胶粘剂材料——试验时，任何符合环境要求的高伸长率（韧性）胶粘剂均可用于加强片与试验材料的粘贴。试验过程中，要求采用均匀厚度的胶层，以使弯曲效应最小。

## 8.4 试件制备

8.4.1 壁板制造——纤维直线度的控制是非常重要的，纤维直线度差将降低材料测量的性能，不规则的纤维排列也将增大离散系数。在第 6 部分讨论了保持纤维直线度的推荐方法。报告中应给出壁板的制备方法。

8.4.2 机械加工方法——试件的制备非常重要。试件应单独压模成型，以避免边缘和切割效应或从平板上切割试件。如果试件是从平板上切割下来的，应采取相应的措施以避免由于不适当的加工方法而引起切口、划痕、粗糙或不平的表面、或者分层。并通过水润滑的精确切割、碾磨或磨削，得到试件最终尺寸。模压或机械加工的试件边缘的平直度和平行度应在规定的公差范围内。

8.4.3 标记——为了便于区分试件，且能追溯到原材料，应对试件作标记。在某种意义上，试件的标记应既不受试验的影响，又不影响试验。

## 9 标定

9.1 所有测量仪器的精度应已标定过，并在有效使用期内。

## 10 状态调节

10.1 标准状态调节方法——作为试验的一部分，除非规定了不同的环境条件，否则应按试验方法 D 5229/D 5229M 中的方法 C 对试件进行状态调节，并在标准试验室大气环境（ $23\pm 3^{\circ}\text{C}$  [ $73\pm 5^{\circ}\text{F}$ ] 和  $50\pm 10\%$  相对湿度）中储存和试验。

## 11 试验步骤

### 11.1 试验前规定的参数

11.1.1 压缩试件取样方法、试样类型和几何形状和状态调节的随炉件（如果需要）。

11.1.2 压缩性能和数据的报告形式。

注 8——试验前确定特定的材料参数、精度和数据的报告要求，以便适当的选择测试仪器和数据记录设备。估计工作应力和应变水平，以便于选择传感器、标定仪器和确定仪器设置。

11.1.3 环境调节试验参数

11.1.4 如果进行了试验，用于确定密度和增强体体积的取样方法、试件几何形状和试验参数。

### 11.2 一般说明

11.2.1 报告试验方法的任何偏差，无论是有意还是无意的。

11.2.2 如果报告了比重、密度、增强体体积或空隙体积，那么必须从进行压缩试验的同一块板上取样作为试件。比重和密度由试验方法 D 792 得到。由试验方法 D 3171 的基体溶解方法，或者，对于特定的增强材料，例如玻璃和陶瓷，用试验方法 D 2584 中的基体蒸发方法，计算组分材料的体积百分比。试验方法 D 2734 中的空隙含量计算公式可用于试验方法 D 2584 和 D3171。

11.2.3 如果要求，在应变片粘贴前或粘贴后对试件进行状态调节。如果使用了随炉件，则



对随炉件进行状态调节。

注 9——状态调节前粘贴应变片可能阻止应变片下的局部吸湿，调节环境可能使应变片胶粘剂的性能退化，或者两者同时发生。另一方面，由于其他原因在状态调节后可能无法粘贴应变片，或者应变片的粘贴可能引起状态调节平衡的损失。报告中应注明粘贴应变片的试件在单独使用前的停留时间。

11.2.4 在最终的试件加工和状态调节之后，但在压缩试验前，在工作段内三个不同的位置由  $A=w \times h$  确定试件的面积，并给出以上三个位置测量面积的平均值，其精度见 7.1 节。记录该平均面积，其单位为  $\text{mm}^2[\text{in}^2]$ 。

11.2.5 如图 1-4 所示，试件（见 7.4 节）两个表面均使用应变片（或引伸计）。

11.3 试验速度——设置试验速度，使得在工作段内能产生一个几乎恒定的应变率。如果试验机无法实现应变控制模式，则通过重复的控制和调节加载速率，并测量应变传感器与时间的响应关系，便可近似的保持一个几乎恒定的应变率。应变率的选择应使试件在 1-10 分钟内破坏。如果不能合理地估算材料的极限应变，则最初的试验应以标准速度进行，直到获得材料的极限应变和系统的柔度，从而可以调节应变率。建议的标准速度为：

11.3.1 应变控制试验——标准应变率为 0.01/min。

11.3.2 恒定夹头速度试验——标准的横梁位移速率为 1.5mm/min[0.05mm/min]。

注 10——使用楔形夹头，特别是使用柔性加强片材料，会导致附加的系统柔度。某些情况下，实际应变率比从横梁速率估算的应变率低 10-50 倍。

11.4 试验环境——将试件调节到期望的湿度，如果可能，在与状态调节的液体暴露水平相同的情况下进行试验。然而，如对一个潮湿的试件进行升温试验的情况，将其放置在普通试验机环境箱中是不切实际的。这种情况下，可能需要在无液体暴露控制下进行升温试验，而在力学试验中可能会造成湿度的损失。减少环境箱内的暴露时间可以使湿度的损失最小，尽管要小心以确保试件温度达到平衡。通过在不可控环境箱里放置潮湿粗糙的纤维增加相对湿度，以及在环境箱外放置一个滴水瓶来保持湿度，可进一步减少适度的损失。另外，夹具预先加热，快速升温，可以使试验前达到预定温度的时间最短。暴露于试验环境时，可采用环境调节的随炉件来测量湿度的损失。试验前称量随炉件，随炉件与试件同时放置在试验环境箱中。试件破坏后迅速取出随炉件，重新称重，即可确定湿度损失。应记录对试验环境的任何改进。

11.4.1 如果试验环境与状态调节环境不同，则应在要求的状态调节环境中存贮试件，直到试验开始。

11.4.2 在 25mm[1.0in]的试件工作段内安装一个合适的热电偶检测试验温度。保持试件和随炉件的温度，如果其中一个用于热应变补偿或湿度损失评估，则要求保持在所要求温度的  $\pm 3^\circ\text{C}[\pm 5^\circ\text{F}]$  以内。对试件（和随炉件）安装热电偶是一个非常有效的测量方法。

## 11.5 夹具安装

注 11——以下试验步骤适用于立式试验机。

11.5.1 确保夹具的楔形块的光滑表面、导向杆和轴承平坦（楔形块）、抛光、润滑并且无划痕和无腐蚀。

11.5.2 检查试验机平台的平行度和楔形箱体的匹配表面的状态，如果需要可进行修正。

11.5.3 把下楔形箱体放置于下平台上。上楔形箱体固定在上横梁上，或插入下楔形箱体夹具中，并与下楔形箱体对中。当载荷单元与所要求的横梁连接时，整个组合件必须与载荷的作用线对中。

11.5.4 当导向杆进入配套箱体的匹配轴承中时，移动横梁，使两个箱体靠近。下箱体的导向杆应足够长，以使导向杆在楔形块/试件组合件进入或离开箱体时始终保持在轴承中。

## 11.6 试件/安装

11.6.1 如果必要，移开试验机的横梁，敞開箱体间的距离，使楔形上下楔形夹块组合件可



以取出。

11.6.2 如果在箱体外侧通过夹块/试件的组合件可以完成试件的对中（见 7.2.2），则进行该步骤。将完整的夹块/试件组合件安装于下箱体中，并使上下箱体靠近，具体描述见 11.6.6。

注 12——楔形夹块在放入到箱体后，其端部应相互保持平齐，以避免产生弯矩从而导致试件在夹持端提前破坏。对于不使用加强片的试件，在试件表面与夹块之间放置一层折成条状的中等粒度的砂布（砂砾面朝向试件），以对试件提供不产生滑移的夹持，从而使得试件表面不产生锯齿状损伤。对于使用加强片的试件，将试件装入到夹块中，使加强片完全被夹头夹持。

11.6.3 如果试件与夹具箱体中的楔形夹块对中，则提升下箱体组合件中下夹块的位置，使夹持面张开，插入试件。把试件放入上下夹块中，上下夹块闭合后，应使整个夹持长度与夹块表面完全接触。将试件从侧边对中（见 7.2.2），放下夹块，轻轻夹紧试件。按照要求放置好预先粘贴的传感器的连接导线。

11.6.4 如果需要，松开上楔形夹块，使其处于完全张开的位置。移动试验机横梁，使两个箱体靠近，将试件的上端插入张开的上楔形夹块中。停止横梁的移动，将载荷置零。

11.6.5 夹紧上夹块，检查试件的垂直位移。与下夹块一样，上夹块闭合后，应使试件的整个夹持长度与夹块表面完全接触。如果需要，调整横梁位置，重复 11.6.5 的步骤。

11.6.6 保持夹块对试件的夹紧，观察载荷指示仪，移动横梁，使两个箱体之间的距离缓慢靠近。当试件开始承受压缩载荷时，停止横梁的移动。试验前带有少量的初始压缩力，随后立即释放，有利于对夹具夹块的定位。预载应尽量小，不能超过材料极限载荷的 5%，而且在试验结果中应记录方法的使用。

11.7 传感器的安装——除了应变片，如果使用了应变传感器，应粘贴在试件中跨的宽度方向的中点位置。将试件上粘贴的应变片或应变传感器与应变记录装置连接。消除预载，并将应变传感器调零。

11.8 加载——以特定的加载速率对夹具加载，直到试件破坏，同时记录数据。

11.9 数据记录——连续或定期记录载荷-应变（或位移）数据。如果观测到过渡区或第一层破坏，则记录该点的载荷、应变和损伤模式。如果试件破坏，则记录最大载荷、破坏载荷以及破坏瞬间或尽可能接近破坏瞬间的应变（或传感器位移）。

注 13——记录能解释试验的异常和夹持或试件打滑问题的有价值的其他数据，包括载荷-夹头位移数据和载荷-时间数据。

11.9.1 如果试件两个相对表面的载荷-应变斜率或载荷-应变曲线的斜率不同，则表明试验发生弯曲。对于有效的弹性性能试验结果，用式(2)计算的弯曲百分比应小于 10%。应在计算弦向模量的应变范围的中点处确定弯曲百分比（表 4）。对于有效的强度和破坏应变数据，其要求与破坏应变相同，这一要求适合于采用背对背应变测量的所有 5 个试件。如果可能，应记录弯曲百分比-平均应变曲线，以用于确定破坏模式。

$$B_y = \text{弯曲百分比} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \times 100 \quad (2)$$

式中：

$B_y$  = 试件弯曲百分比

$\epsilon_1$  = 应变片 1 的应变读数

$\epsilon_2$  = 应变片 2 的应变读数

$\epsilon_{ave}$  = 最靠近弯曲应变检测点的纵向应变平均值  $(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$

表 4 用于试件对中和弦向模量计算应变范围

用于弦向模量计算的纵向应变范围		弯曲百分比的纵向应变 检查点, $\mu\epsilon$
起始点, $\mu\epsilon$	中点, $\mu\epsilon$	
1000 <sup>A</sup>	3000	2000

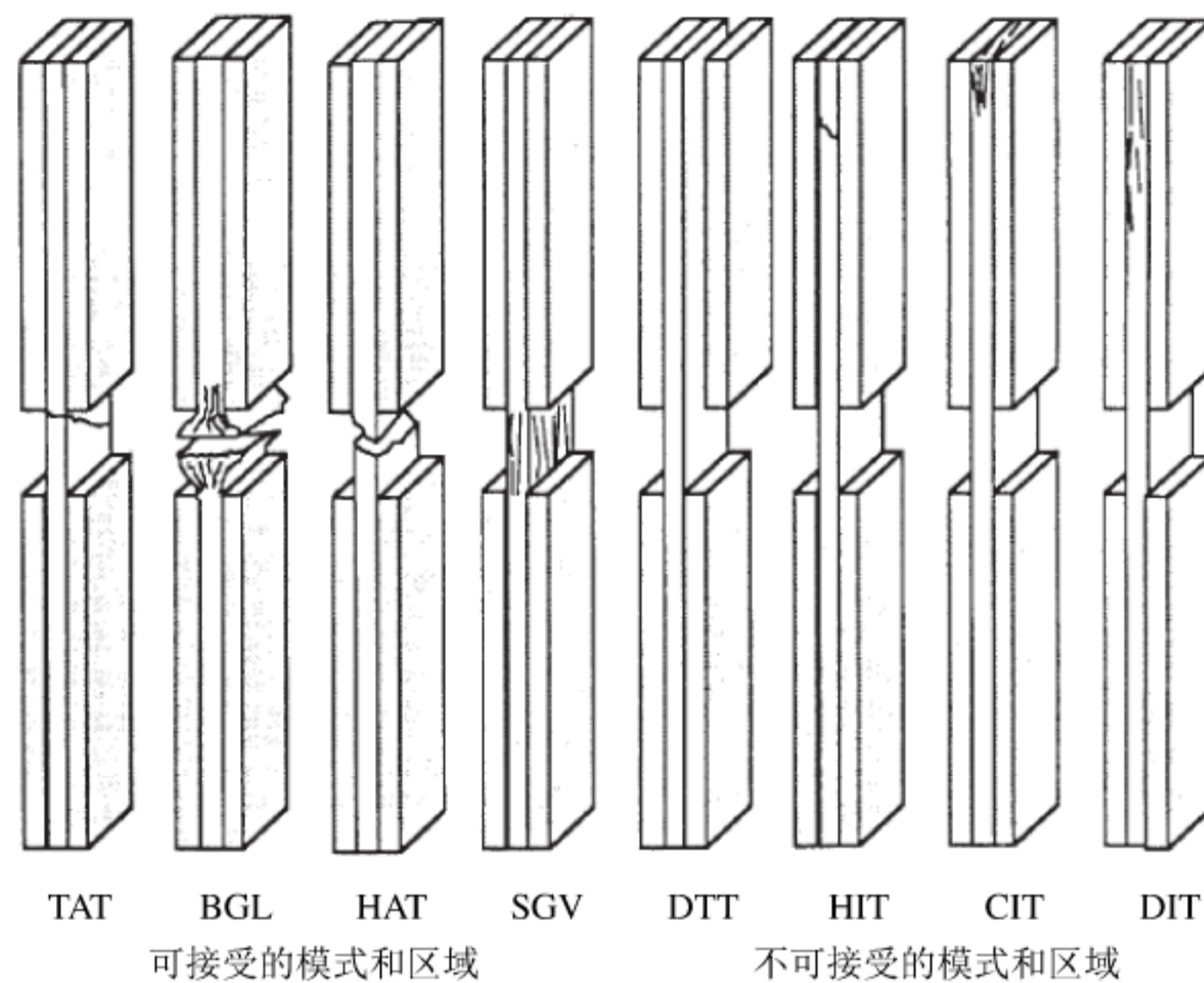
<sup>A</sup> 该应变范围特指应力-应变曲线的下部分。对于破坏应变低于 6000 $\mu\epsilon$ 的材料，推荐的应变范围为 25%~50%的极限应变。

11.9.2 试件相对两个表面的应变读数迅速偏离，或弯曲百分比迅速增加，都预示欧拉（柱）屈曲的出现，这是本试验方法不可接受的压缩破坏模式。任何欧拉屈曲的出现都应记录。

11.10 破坏标识代码——记录试件的破坏模式、破坏区域及破坏位置。选择基于三部分代码的一个标准破坏标识代码，如图 9 所示。在破坏模式 M 的括号中包含每一个合适的破坏模式代码可以用来描述复合模式的破坏。例如，对于在工作段中间出现 A-斜角、K-弯折、S-纵向劈裂的[90/0]<sub>ns</sub>层压板，一个典型的工作段破坏的破坏模式代码为 M(AKS)GM。所有目视可见的试件破坏及相应的破坏标识代码（4 种可接受、4 种不可接受）如图 9 所示。

11.10.1 可接受的破坏模式——破坏标识编码的第一个字母描述了破坏模式。除了根部压碎和欧拉屈曲以外，图 9 中“第一个字母”表的所有破坏模式都是可接受的。试验过程或试验后，欧拉屈曲破坏模式不能通过目视来检测，而必须采用背对背的应变指示装置，通过应力-应变或载荷-应变曲线来检测（见 7.4）。

11.10.2 可接受的破坏区域——最理想的破坏区域位于工作段中间，因为夹持/加强片对该区域受的影响最小。因为本试验方法的试件工作段较短，所以破坏位置很有可能位于工作段的夹块/加强片的根部区域。虽然不像工作段中间那么理想，也是可接受的破坏区域。如果样本内有相当大比例(>50%)的破坏发生在夹块或加强片接触面上，必须重新检查试件的载荷引入方式。应该考虑的因素包括：加强片对中度、加强片材料、加强片胶粘剂、夹块类型、夹块压力和夹块对中度。任何发生在试件夹块/加强片部分的破坏都是不可接受的。



第一个字母		第二个字母		第三个字母	
破坏模式	代码	破坏区域	代码	破坏位置	代码
斜角	A	夹块/加强片内	I	底部	B
劈开	B	夹块/加强片处	A	顶部	T
端部压碎	C	工作段	G	左侧	L
分层	D	多区域	M	右侧	R
欧拉屈曲	E	加强片胶粘剂	T	中间	M
通过厚度	H	变化	V	变化	V
弯折	K	未知	U	未知	U
横向	L				
复合模式	M(xyz)				
纵向劈裂	S				
横向剪切	T				
爆炸	X				



其它	0
----	---

图9 压缩试件的三部分破坏标识代码及所有试件破坏示意图

## 12 计算

12.1 压缩应力/极限压缩应力——用式(3)计算极限压缩强度，结果保留三位有效数字。如果要计算压缩模量，则用式(4)确定所要求的每一个数据点的压缩应力。

$$F^{cu} = P^{max} / A \quad (3)$$

$$\sigma_i^c = P_i / A \quad (4)$$

式中：

$F^{cu}$  = 压缩强度，MPa[psi]；

$P^{max}$  = 破坏前最大载荷，N[lbf]；

$P_i$  = 第  $i$  个数据点的载荷，N[lbf]；

$A$  = 试验段的横截面积， $mm^2[in^2]$ ；

$\sigma_i^c$  = 第  $i$  个数据点的压缩应力，MPa[psi]。

12.2 压缩应变和极限压缩应变——如果要计算压缩应变或极限压缩应变，分别用式(5)和式(6)确定所要求的每一个数据点的平均压缩应变。结果保留三位有效数字。

$$\epsilon_i^c = (\epsilon_{1i} + \epsilon_{2i}) / 2 \quad (5)$$

$$\epsilon^{cu} = (\epsilon_1^{cu} + \epsilon_2^{cu}) / 2 \quad (6)$$

式中：

$\epsilon_i^c$  = 第  $i$  个数据点的平均压缩应变， $\mu\epsilon$ ，

$\epsilon_{1i}$  = 第  $i$  个数据点应变片 1 的压缩应变， $\mu\epsilon$ ，

$\epsilon_{2i}$  = 第  $i$  个数据点应变片 2 的压缩应变， $\mu\epsilon$ ，

$\epsilon^{cu}$  = 平均极限压缩应变， $\mu\epsilon$ ，

$\epsilon_1^{cu}$  = 应变片 1 的极限压缩应变， $\mu\epsilon$ ，

$\epsilon_2^{cu}$  = 应变片 2 的极限压缩应变， $\mu\epsilon$ 。

12.3 压缩弹性模量：

12.3.1 压缩弦向弹性模量——从表 4 中选择合适的用于确定弦向模量的应变范围。用式(7)由应力-应变数据计算压缩弦向弹性模量。如果应变范围端点的数据（常常以数字数据形式出现）无效，则使用与其最接近的有效数据点的数据。压缩弦向弹性模量保留三位有效数字，应给出计算时使用的应变范围。弦向模量的图例如图 10 所示。

12.3.1.1 推荐的应变范围仅适用于在推荐的应变范围内没有出现过渡区（应力-应变曲线上斜率明显变化的区域）的材料。如果在推荐的应变范围内出现了过渡区，那么应采用一个更合适的应变范围，并在报告中说明。

$$E^{chord} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad (7)$$

式中：

$E^{chord}$  = 弦向弹性模量，MPa[psi]；

$\Delta\sigma$  = 表 4 中两个应变点之间压缩应力的差值，MPa[psi]；

$\Delta\epsilon$  = 表 4 中两个应变点之间平均压缩应变的差值，（采用绝对应变，不用微应变，通常为 0.002）。

12.3.2 压缩弹性模量（其他定义）——可以计算并给出使用者自行定义的其他弹性模量。如果得到并给出了这样的数据，应给出其定义、所用的应变范围，结果保留三位有效数字。试验方法 E 111 提供了用于确定弹性模量的其他指导。

注 14——其他模量定义的一个例子为：对表现出固有的双线性应力-应变特性的材料的次弦向弹性模量。次弦向模量的例子



如图 10 所示。

## 12.4 压缩泊松比：

注 15——如果使用粘贴式电阻应变片，对于复合材料，由于横向敏感性对横向应变片的影响而引起的误差通常大于金属材料。泊松比的精确测量要求对该影响进行修正。应变片制造商应提供横向敏感性修正系数的相关资料。

12.4.1 弦向法测量的压缩泊松比——从表 4 中选择合适的用于确定泊松比的应变范围，测量（通过绘图或其他方法）纵向应变区间的两个端点（平行于加载方向的测量值） $\epsilon_l$  处的横向应变（垂直于加载方向的试件的面内应变） $\epsilon_t$ 。如果应变范围端点的数据无效（经常以数字数据形式出现），则采用与其最接近的可用数据点的数据。在合适的应变范围内，用式(8)计算泊松比，结果保留三位有效数字。

12.4.1.1 测定泊松比时，横向应变应与合适的纵向应变匹配。例如，横向应变片的输出信号应与安装在试件同一侧临近位置的纵向应变片的输出信号相匹配。如果使用背对背的横向应变片，对输出信号进行平均，并与纵向应变的平均值进行比较。

$$v^c = \Delta\epsilon_t / \Delta\epsilon_l \quad (8)$$

式中：

$v^c$  = 泊松比；

$\Delta\epsilon_t$  = 两个纵向应变点之间的横向应变的差值，

$\Delta\epsilon_l$  = 表 4 中两个应变点之间的纵向压缩应变的差值（采用绝对应变，不用微应变，通常取 0.001、0.002 或 0.005）。

12.4.2 压缩泊松比（其他定义）——可以计算并给出使用者自行定义的其他泊松比。如果得到并给出了这样的数据，应给出其定义、所用的应变范围，结果保留三位有效数字。试验方法 E 132 提供了用于确定泊松比的其他指导。

12.5 过渡应变——需要时，可以通过双线性的纵向应力-纵向应变曲线或双线性的横向应力-横向应变曲线来确定过渡应变。分别对两个线性区域作最佳的线性拟合或弦线，延长两条直线直到它们相交，确定对应于交点的纵向应变，并记录该值作为过渡应变，结果保留三位有效数字。报告中应给出线性拟合方法（如果使用）和用于确定线性拟合或弦线的应变范围。过渡区的图例如图 10 所示。

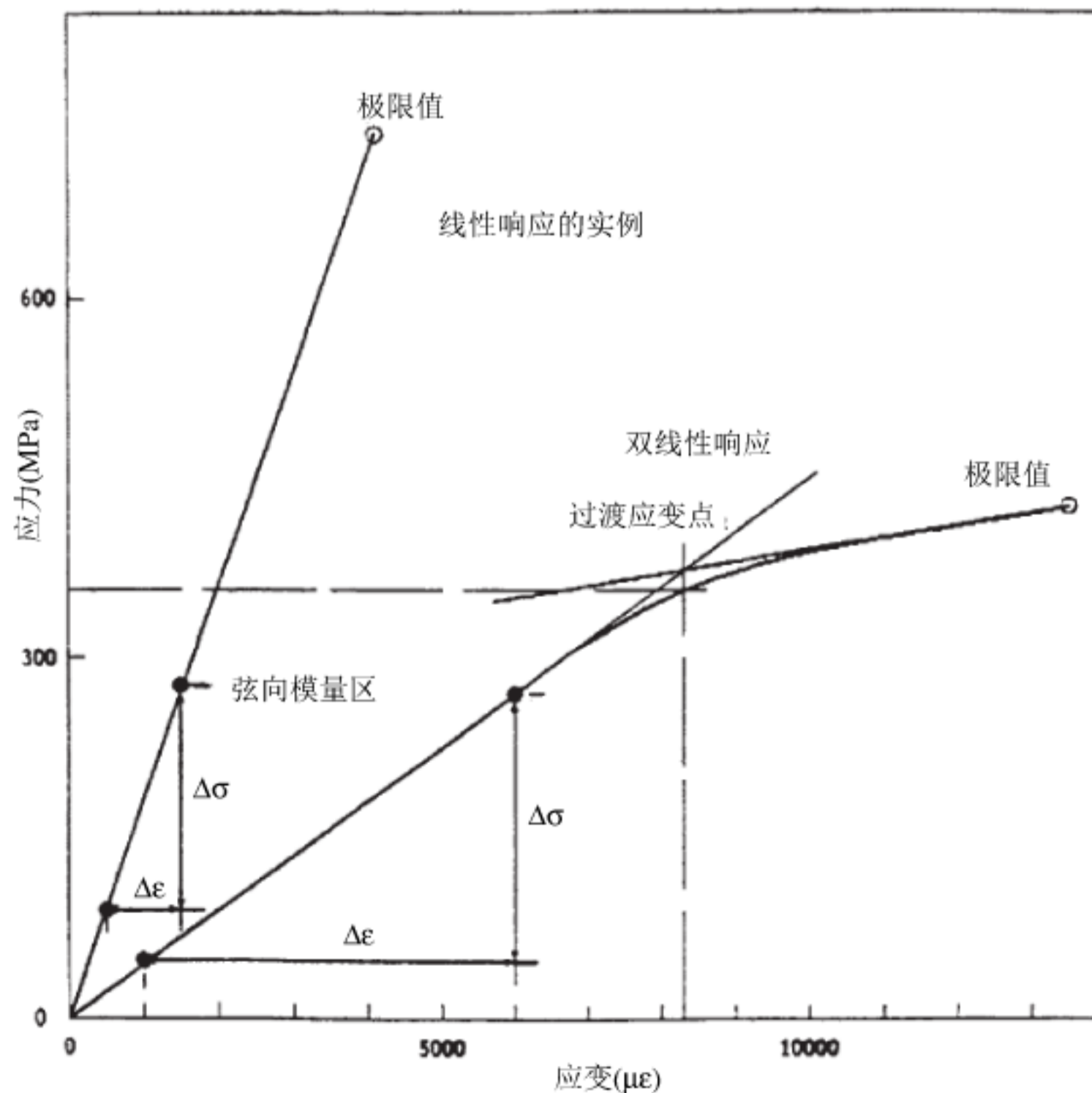


图 10 典型的压缩应力-应变曲线



12.6 统计——对于每批试验，应计算每一个测量性能的平均值、标准差和离散系数（以百分数表示）：

$$\bar{x} = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (9)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)}{(n-1)}} \quad (10)$$

$$CV = 100 \times s_{n-1} / \bar{x} \quad (11)$$

式中：

$\bar{x}$  = 样本的平均值；

$s_{n-1}$  = 样本的标准差；

CV = 样本的离散系数，以百分数表示；

$n$  = 试件数量；

$x_i$  = 测量或导出的性能值。

## 13 报告

13.1 本试验方法记录的信息包括材料鉴定和力学试验数据。这些数据的记录方式应符合指南 E 1309 和 E 1471 的要求。讨论的每一个数据细节可归类在以下类型中：(ET) 有效试验的基本值，(RT) 有效试验的推荐值，(EM) 材料描绘的基本值，或(O)可选择数据。对于记录的数据，下列信息适用于这些文档：

13.1.1 指南 E 1309：计算机化材料性能数据库中复合材料的标识：

13.1.1.1 作为工艺步骤类型的固化方法应记录在 Field E2 中。

13.1.1.2 作为第一套工艺步骤条件，F9-F18 中的名义固化周期应作为有效的材料可溯性。F9-F18 中的实际固化周期推荐用于第二套工艺步骤条件。

13.1.2 指南 E 1434：高模量纤维增强复合材料力学试验数据计算机化的标准数据记录：

13.1.2.1 H 6，试验类型，为“压缩”。

13.1.2.2 M4 和 M6 为测量值。M7-M9 可以是名义值。

13.1.2.3 P15 和 R64 为破坏鉴别代码，P14 和 R63 是可选的破坏位置，因为破坏鉴别代码已经包含了这些信息。

13.1.2.4 P58 和 R60 为表示损伤扩展参数的“过渡应变”。P59，R61 和 R62 对于有效的试验，Field F27、K55 和 K56 为要求的过渡应变值。

13.1.2.5 试件尺寸和弯曲应变的统计参数是可以选择的。这些包括在 R1-R9 和 R33 中。试验总结子项 (sub-block) 也是可选的 (R14-R18)。

## 14 精度与偏差

14.1 精度——精度，在独立测量之间作为相互承认的程度，因为缺乏足够的数据而无法评估。可采用 ASTM STP808 中的 round-robin 数据 (2)。

14.2 偏差——由于没有可接受的参考标准，本试验方法不能确定偏差。

## 15 关键词

15.1 复合材料；弹性压缩模量；压缩性能；压缩强度；泊松比；