

ICS 77.150.10  
CCS Y 80



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 41049—2021

---

## 纤维金属层板弯曲性能试验方法

Test method for flexural properties of fibre metal laminates

2021-12-31 发布

2022-07-01 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 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。

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。

本文件由全国工程材料标准化工作组(SAC/SWG 3)提出并归口。

本文件起草单位：南京航空航天大学、南京工程学院、江苏省产品质量监督检验研究院、南京玻璃纤维研究设计院有限公司、江苏省复合材料学会、江阴协统汽车附件有限公司。

本文件主要起草人：陶杰、李华冠、匡宁、徐翌伟、王燕、钱德洪、赵谦、李红丽、项俊贤、林艳艳、陈焱、王琼、崔益华、华小歌、王永红。



# 纤维金属层板弯曲性能试验方法

## 1 范围

本文件规定了纤维金属层板弯曲性能试验方法的试验原理、试验设备、试样、状态调节、试验过程、计算及结果显示、试验报告。

本文件适用于测定发生弯曲破坏的纤维金属层板三点弯曲强度及弯曲弹性模量、弯曲应力以及载荷挠度曲线。

## 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。

- GB/T 1446—2005 纤维增强塑料性能试验方法总则
- GB/T 2918 塑料 试样状态调节和试验的标准环境
- GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- JJG 139 拉力、压力和万能试验机

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**纤维金属层板** fibre metal laminates; FMLs

由金属薄板（铝合金、钛合金等）和纤维（玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等）复合材料交替铺设后，在一定温度和压力下固化而成的一种层间混杂复合材料。

### 3.2

**弯曲应力** flexural stress

正则化弯曲力矩。

注1：假设弯曲变形引起的应力为线性分布时试样外表面的应力。

注2：单位为兆帕(MPa)。

### 3.3

**弯曲强度** flexural strength

试样在弯曲破坏下，破坏载荷或最大载荷时的弯曲应力。

注：单位为兆帕(MPa)。

### 3.4

**跨距** span

试验机上两个支座中心轴间的距离。

注：单位为毫米(mm)。

3.5

**挠度 deflection**

试样表面在弯曲过程中变形处的法线与初始位置的最大高差。

注：单位为毫米(mm)。

3.6

**弯曲应变 flexural strain**

跨距中点试样外表面层的长度变化率,用百分数表示。

3.7

**弯曲弹性模量 flexural modulus**

在弯曲应力-弯曲应变曲线或弯曲载荷-挠度曲线上,根据初始部分斜率求出的值。

注：单位为兆帕(MPa)。

4 试验原理

采用无约束支撑,通过三点弯曲,以恒定的加载速率使试样破坏。在整个过程中,测量施加在试样上的载荷和试样的挠度或弯曲应变,确定弯曲强度、弯曲弹性模量以及弯曲应力与弯曲应变的关系。

5 试验设备

5.1 试验机

试验机应满足 GB/T 1446—2005 第 5 章的规定,并按照 JJG 139 的规定定期检定,其测力系统准确度应为 1.0 级或优于 1.0 级。

5.2 测量仪器

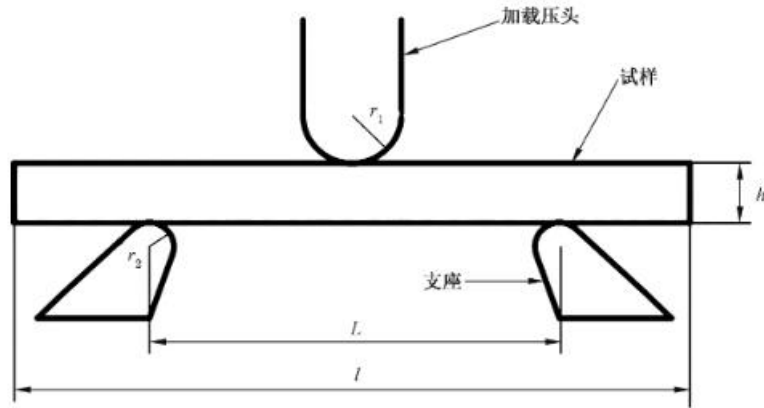
采用精度不低于 0.01 mm 的测量仪器,用于测量试样的宽度  $b$  及厚度  $h$ 。采用应变片或挠度计测量弯曲应变或挠度。

5.3 试验装置

弯曲试验装置示意图见图 1,加载压头和支座的宽度应大于试样的宽度,加载压头应将压力作用于两支座中心,跨距应可调节。

试验装置调节应满足如下要求:

- a) 支座的圆角半径:  $r_2$  为 2 mm;
- b) 加载压头的圆角半径: 试样厚度  $h \leq 1$  mm 时,  $r_1 = 2$  mm; 试样厚度  $h > 1$  mm 时,  $r_1 = 5$  mm;
- c) 加载压头和支座的硬度不小于 55HRC,接触面无划痕和毛刺。



标引符号说明：

$L$  —— 跨距；

$l$  —— 试样长度；

$h$  —— 试样厚度；

$r_1$  —— 加载压头的圆角半径；

$r_2$  —— 支座的圆角半径。

图 1 试验装置

## 6 试样

### 6.1 形状与尺寸

试样的形状与尺寸见图 2，试样的形状与尺寸建议满足如下关系：

a) 试样的跨距取： $14h \sim 24h$ ，试样的长度需至少比支座跨距超出 20%；

b) 推荐试样的宽度取： $b = 10 \text{ mm} \sim 15 \text{ mm}$ ，推荐试样的长度取： $l = 60 \text{ mm} \sim 100 \text{ mm}$ ，并在报告中注明。

纤维铺层按  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  等方向排列。

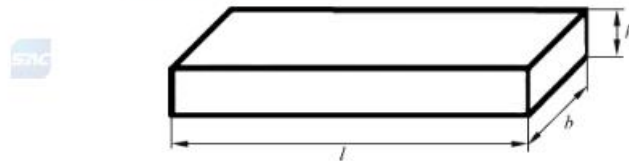


图 2 试样形状与尺寸

### 6.2 试样切割加工

试样经机械加工制得，所加工试样的主轴应平行或垂直于材料的主要方向轴。

### 6.3 试样检查

试样应平整无扭曲，无分层，表面清洁，边缘光滑。长度方向厚度均匀，且任一点的厚度不超过平均厚度的  $\pm 5\%$ 。在每个试样的中心及两边，取 3 个点测量试样的宽度，每个试样宽度的允许偏差为  $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。

### 6.4 试样数量

每组有效试样数量应不小于 5 个。

## 7 状态调节

除另有规定外,状态调节应按 GB/T 2918 执行。

## 8 试验过程

### 8.1 试验环境

应符合 GB/T 1446—2005 中第 3 章的规定。

### 8.2 试样尺寸的测量

测量试样取点位置见图 3,在每个试样的中心及两边,取 3 个点分别测量试样的宽度和厚度,精确至 0.01 mm,测量结果取 3 点的平均值。

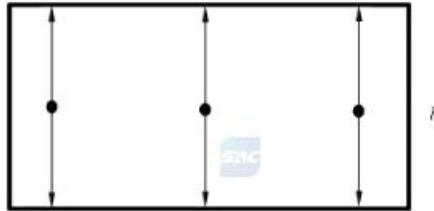


图 3 测量试样取点位置

### 8.3 跨距

跨距选取:对标准试样,即试样厚度  $1\text{ mm} \leq h \leq 3\text{ mm}$  时,跨距取  $14h \sim 24h$ ,采用精度不低于 0.01 mm 的测量仪器测量跨距  $L$ 。

注 1:对厚度  $h > 3\text{ mm}$  的试样,为避免层间剪切破坏,跨距在  $14h \sim 24h$  范围内适当选取偏大值。

注 2:对厚度  $h < 1\text{ mm}$  的试样,为使其载荷落在试验机许可的载荷容量范围内,跨距在  $14h \sim 24h$  范围内适当选取偏小值。

注 3:在不同跨距与厚度比例下进行试验所获得的数据不能进行比较。

### 8.4 试样安装

标记试样受拉面,将试样对称地放在两支座上。必要时,在试样上表面与加载压头间放置薄片或薄垫块,防止试样受压失效。

使用应变片时,在试样下方跨距中央位置沿平行长度方向贴应变片;使用挠度计时,挠度计安置在跨距的中央位置并与试样平面垂直。

### 8.5 试验速度

加载速率在  $1\text{ mm/min} \sim 2\text{ mm/min}$  之间,并保持恒定。

### 8.6 试验

通过位于跨距中点处的加载压头在试样宽度上均匀地施加载荷,直到试样破坏或载荷下降 30%。记录破坏载荷以测定弯曲强度,记录载荷-挠度曲线或载荷-弯曲应变曲线以测定弯曲弹性模量。

## 8.7 数据采集

记录整个试验过程的载荷值,以发生纤维破坏或者外层金属破坏等有效弯曲破坏为数据采集原则。试样呈层间剪切破坏,有明显内部缺陷或在试样中间三分之一以外破坏的应予以作废。同批有效试验结果不足 5 个时,应增加开展试验的样本数,使有效结果达到 5 个。

## 8.8 失效模式

纤维金属层板在该方法测试下,将会发生如下失效模式。

- a) 可接受的弯曲失效模式:
  - 1) 纤维破坏,见图 4 a);
  - 2) 外层金属破坏,见图 4 b)。
- b) 不可接受的失效模式:
  - 1) 层间剪切失效,见图 4 c);
  - 2) 混合失效(包含层间剪切失效),见图 4 d)。

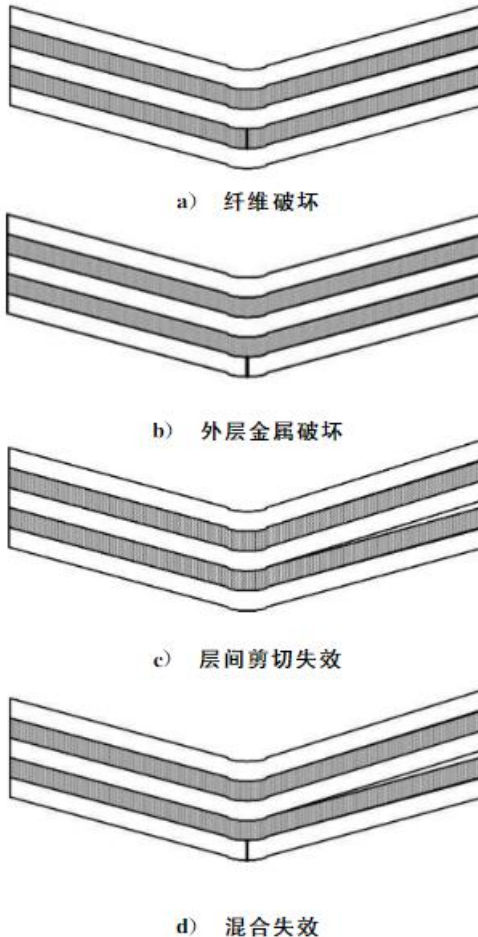


图 4 失效模式

## 9 计算及结果表示

### 9.1 载荷 挠度曲线

纤维金属层板在该方法测试下,典型的载荷 挠度曲线如图 5 所示。弯曲过程主要包括四个阶段,

并在各个阶段有不同的曲线特征和失效行为。I 为弹性段,该阶段基体纤维及金属均处于弹性阶段,弯曲载荷与挠度呈近似的线性关系。II 为塑性段,纤维层开始出现单丝断裂。III 为纤维破坏段,基体呈现明显开裂。IV 为分层破坏段,纤维层完全破坏,金属层与纤维层发生分层,层板完全失效。

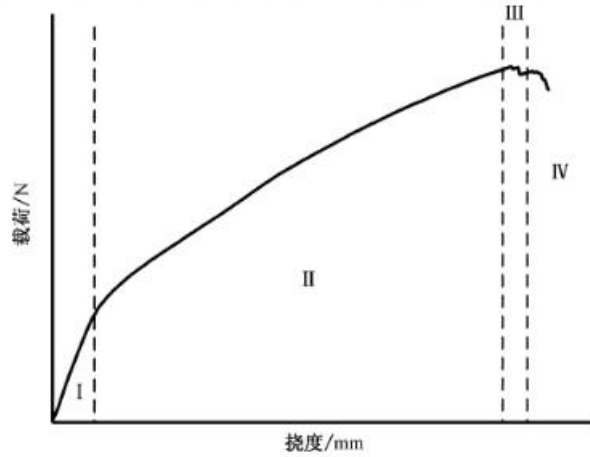


图 5 弯曲失效的典型载荷-挠度曲线

### 9.2 弯曲强度 $\sigma_f$ 的计算

当  $\frac{\delta_M}{L} \leq 0.1$  时,弯曲强度按式(1)计算:

$$\sigma_f = \frac{3P_M L}{2bh^2} \dots\dots\dots (1)$$

当  $\frac{\delta_M}{L} > 0.1$  时,弯曲强度按式(2)计算:

$$\sigma_f = \frac{3P_M L}{2bh^2} \left[ 1 + 4 \left( \frac{\delta_M}{L} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- $\sigma_f$  —— 弯曲强度,单位为兆帕(MPa);
- $P_M$  —— 最大载荷或破坏载荷,单位为牛顿(N);
- $L$  —— 跨距,单位为毫米(mm);
- $b$  —— 试样宽度,单位为毫米(mm);
- $h$  —— 试样厚度,单位为毫米(mm);
- $\delta_M$  —— 最大挠度,单位为毫米(mm)。

### 9.3 弯曲弹性模量 $E_f$ 的计算

按照载荷-弯曲应变曲线计算时,弯曲弹性模量按式(3)计算:

$$E_f = \frac{3PL}{2bh^2\varepsilon} \dots\dots\dots (3)$$

按照载荷-挠度曲线计算时,弯曲弹性模量按式(4)计算:

$$E_f = \frac{PL^3}{4bh^3\delta} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- $E_f$  —— 弯曲弹性模量,单位为兆帕(MPa);



- $P$  —— 载荷-弯曲应变曲线初始直线段的载荷增量,单位为牛顿(N);  
 $\epsilon$  —— 与载荷增量  $P$  对应的弯曲应变量;  
 $\delta$  —— 与载荷增量  $P$  对应的挠度增量,单位为毫米(mm)。

#### 9.4 每组试样的算术平均值、标准差计算

每组试样的算术平均值按式(5)计算,保留三位有效数字:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \dots\dots\dots(5)$$

每组试样的标准差按式(6)计算,保留两位有效数字:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

- $\bar{X}$  —— 试样弯曲强度或弯曲弹性模量的算术平均值,单位为兆帕(MPa);  
 $X_i$  —— 试样的弯曲强度或弯曲弹性模量,单位为兆帕(MPa);  
 $n$  —— 试样数;  
 $s$  —— 标准差,单位为兆帕(MPa)。

#### 9.5 数值修约

数值修约按照 GB/T 8170 进行,弯曲强度修约到四位有效数字,标准差修约到三位有效数字,弯曲弹性模量修约到三位有效数字。

### 10 试验报告



除非双方另有协议,试验报告应至少包括以下信息:

- a) 试样的材料类别信息,包括试样纤维铺层取向和具体结构;
- b) 试验条件信息;
- c) 所采用的文件编号;
- d) 使用仪器的型号及编号;
- e) 加载压头及支座的圆角半径;
- f) 试样来源信息;
- g) 试样的唯一性标识;
- h) 试样制备的所有信息;
- i) 跨距;
- j) 对于发生弯曲失效的试样,给出具体失效模式,每个试样的弯曲强度值、弯曲弹性模量值及算术平均值,应给出标准差;
- k) 对于未发生弯曲失效的试样,给出失效模式,每个试样的计算值及算术平均值,也可给出标准差;
- l) 报告日期及报告编号;
- m) 试验人员与审核人员签字。