

# 中华人民共和国黑色冶金行业标准

## 金属弯曲力学性能试验方法

YB/T 5349—2006

(GB/T 14452—1993 调整)

### Metallic materials—Determination of bending mechanical properties

#### 1 主题内容与适用范围

本标准规定了金属弯曲力学性能试验方法的原理、术语、符号、试样、试样尺寸测量、试验设备、试验条件、性能测定、测试数值的修约和试验报告。

本标准适用于测定脆性断裂和低塑性断裂的金属材料一项或多项弯曲力学性能。

#### 2 引用标准

- GB 2975 钢材力学及工艺性能试验取样规定
- GB 8170 数值修约规则
- GB 10623 金属力学性能试验术语
- JJG 139 拉力、压力和万能材料试验机检定规程
- JJG 157 小负荷材料试验机检定规程
- JJG 475 电子万能试验机检定规程
- JJG 762 引伸计检定规程

#### 3 原理

采用三点弯曲或四点弯曲方式对圆形或矩形横截面试样施加弯曲力，一般直至断裂，测定其弯曲力学性能。

#### 4 术语

- 4.1 跨距( $L_c$ ): 弯曲试验装置上试样两支承点间的距离。
- 4.2 挠度计跨距( $L_s$ ): 用挠度计测量试样挠度时，在试样上两测点间的距离。
- 4.3 力臂( $l$ ): 四点弯曲试验中弯曲力作用平面或作用线与最近支承点间的距离。
- 4.4 弯曲力( $F$  或  $F/2$ ): 垂直于试样两支承点间连线的横向集中力。
- 4.5 最大弯曲应力: 弯曲力在试样弯曲外表面产生的最大正应力。
- 4.6 最大弯曲应变: 弯曲力在试样弯曲外表面产生的最大拉应变。
- 4.7 弯曲弹性模量( $E_b$ ): 弯曲应力与弯曲应变呈线性比例关系范围内的弯曲应力与弯曲应变之比。
- 4.8 规定非比例弯曲应力( $\sigma_{pb}$ ): 弯曲试验中，试样弯曲外表面上的非比例弯曲应变达到规定值时，按弹性弯曲应力公式计算的最大弯曲应力。

注: 表示此应力的符号应附以角注说明，例如  $\sigma_{pb,0.01}$ 、 $\sigma_{pb,0.05}$  和  $\sigma_{pb,0.2}$  等分别表示规定非比例弯曲应变达到 0.01%、0.05% 和 0.2% 时的最大弯曲应力。

- 4.9 规定残余弯曲应力( $\sigma_{rb}$ ): 对试样施加弯曲力和卸除此力后，试样弯曲外表面上的残余弯曲应变达到

规定值时,按弹性弯曲应力公式计算的最大弯曲应力。

注:表示此应力的符号应附以角注说明,例如 $\sigma_{r10.01}$ 、 $\sigma_{r10.05}$ 和 $\sigma_{r10.2}$ 等分别表示规定残余弯曲应变达到0.01%、0.05%和0.2%时的最大弯曲应力。

4.10 抗弯强度( $\sigma_b$ ):试样弯曲至断裂,断裂前所达到的最大弯曲力,按弹性弯曲应力公式计算的最大弯曲应力。

4.11 挠度( $f$ ):试样弯曲时,其中性线偏离原始位置的最大距离。

4.11.1 断裂挠度( $f_{bb}$ ):试样弯曲断裂时的挠度。

4.12 弯曲断裂能量( $U$ ):试样弯曲至断裂所需的能量。

4.13 其他相关术语按照 GB 10623 的规定。

## 5 符号、名称和单位

本标准所采用的符号、名称和单位列于表1。

表 1

| 符 号        | 名 称                 | 单 位 |
|------------|---------------------|-----|
| $d$        | 试样直径                | mm  |
| $D_1$      | 支承滚柱直径              |     |
| $D_0$      | 施力滚柱直径              |     |
| $R$        | 刀刃半径                |     |
| $b$        | 试样宽度                |     |
| $h$        | 试样高度                |     |
| $L$        | 试样长度                |     |
| $l$        | 矩形横截面试样 45°角倒棱的宽度   |     |
| $L_1$      | 跨距                  |     |
| $L_2$      | 挠度计跨距               |     |
| $l$        | 力臂                  |     |
| $l_1$      | 实际力臂                |     |
| $f$        | 挠度                  |     |
| $\Delta f$ | 挠度增量                |     |
| $f_{bb}$   | 断裂挠度                |     |
| $f_n$      | 最后一次施力并将其卸除后的残余挠度   |     |
| $f_{n-1}$  | 最后前一次施力并将其卸除后的残余挠度  |     |
| $f_{r0}$   | 达到规定残余弯曲应变时的残余挠度    |     |
| $y$        | 试样弯曲时中性面至弯曲外表面的最大距离 |     |

续表 1

| 符 号             | 名 称          | 单 位             |
|-----------------|--------------|-----------------|
| $F$             | 弯曲力          | N               |
| $\Delta F$      | 弯曲力增量        |                 |
| $F_0$           | 预弯曲力         |                 |
| $F_{pb}$        | 规定非比例弯曲力     |                 |
| $F_{rb}$        | 规定残余弯曲力      |                 |
| $F_{bb}$        | 最大弯曲力        |                 |
| $F_n$           | 最后一次施加的弯曲力   |                 |
| $F_{n-1}$       | 最后前一次施加的弯曲力  |                 |
| $Z$             | 力轴每毫米代表的力值   | N/mm            |
| $S$             | 弯曲试验曲线下包围的面积 | mm <sup>2</sup> |
| $W$             | 试样截面系数       | mm <sup>3</sup> |
| $I$             | 试样截面惯性矩      | mm <sup>4</sup> |
| $E_b$           | 弯曲弹性模量       | MPa             |
| $\sigma_{pb}$   | 规定非比例弯曲应力    |                 |
| $\sigma_{rb}$   | 规定残余弯曲应力     |                 |
| $\sigma_{bb}$   | 抗弯强度         |                 |
| $U$             | 弯曲断裂能量       | J               |
| $\epsilon_{pb}$ | 规定非比例弯曲应变    | %               |
| $\epsilon_{rb}$ | 规定残余弯曲应变     |                 |
| $m$             | 弯曲力、挠度数据对的数目 |                 |
| $n$             | 挠度放大倍数       |                 |
| $\pi$           | 圆周率(取四位有效数字) |                 |
| $\alpha$        | 倒棱修正系数       |                 |

## 6 试样

### 6.1 试样形状和尺寸

6.1.1 采用圆形横截面试样和矩形横截面试样。试样的形状、尺寸、公差及表面要求应按有关标准或协议的规定。如无规定,可根据材料和产品尺寸从表 2 或 3 中选用合适的试样尺寸。

表 2

mm

| 试样              | $d$ | $h \times b$ | 三点弯曲       |            | 四点弯曲       |            | $D_1, D_2$ |         |
|-----------------|-----|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|
|                 |     |              | $L_1$      | $L$        | $L_1$      | $L$        |            |         |
| 圆形横截面           | 5   |              | $\geq 16d$ |            |            |            | 10         |         |
|                 | 10  |              |            |            |            |            |            |         |
|                 | 13  |              |            |            |            |            |            |         |
|                 | 20  |              |            |            |            |            |            | 20 或 30 |
|                 | 30  |              |            |            |            |            |            | 30      |
|                 | 45  |              |            | $L_1 + d$  |            |            |            |         |
| 矩形横截面<br>(硬金属用) |     | 5×5          | 30         | 35         | $\geq 16h$ | $L_1 + 20$ | 5          |         |
|                 |     | 5.25×6.5     | 14.5       | 20         |            |            |            |         |
|                 |     | 5×5          |            |            |            |            |            |         |
|                 |     | 5×7.5        |            | $L_1 + 20$ |            |            | 10         |         |
|                 |     | 10×10        |            |            |            |            |            |         |
|                 |     | 10×15        |            |            |            |            |            |         |
|                 |     | 13×13        |            |            |            |            |            |         |
|                 |     | 13×19.5      |            |            |            |            |            |         |
|                 |     | 20×20        |            |            |            |            | 20 或 30    |         |
|                 |     | 20×30        |            | $L_1 + h$  |            |            | $L_1 + h$  | 30      |
| 30×30           |     |              |            |            |            |            |            |         |
| 30×40           |     |              |            |            |            |            |            |         |

表 3

mm

| 薄板试样横截面尺寸    |               | $h$      | $L_1$     | $L$     | $R$       |
|--------------|---------------|----------|-----------|---------|-----------|
| 产品宽度         |               |          |           |         |           |
| $\leq 10$    | $> 10$        |          |           |         |           |
| $b \times h$ | $10 \times h$ | 0.25~0.5 | 100h~150h | 250h    | 0.10~0.15 |
|              |               | >0.5~1.5 | 50h~100h  | 160h    |           |
|              |               | >1.5~<5  | 80~120    | 110~150 | 2.5       |

6.1.2 进行对比试验时,试样横截面形状、尺寸和跨距应相同。

## 6.2 样坯的切取与试样的制备

6.2.1 样坯切取的方向和部位应按有关标准或 GB 2975 规定执行。切取样坯和机加工试样的方法不应改变材料的弯曲力学性能。

6.2.2 有关标准或协议如无规定时,机加工试样的尺寸公差和形状公差按表 4 的规定。形状公差为跨距范围内同一横截面尺寸的最大值与最小值之差。

表 4

mm

| 试样横截面<br>尺寸范围 | 非机加工试样 |          | 机加工试样 |      |
|---------------|--------|----------|-------|------|
|               | 尺寸公差   | 形状公差     | 尺寸公差  | 形状公差 |
| >3~5          | ±0.5   | 标称尺寸的 3% | ±0.05 | 0.03 |
| >5~10         | ±1.0   |          | ±0.10 | 0.05 |
| >10~20        | ±1.5   |          | ±0.15 | 0.08 |
| >20~45        | ±2.0   |          | ±0.20 | 0.10 |

6.2.3 铸造试样需要机加工与否应由有关标准或协议规定。如需要机加工,其表面粗糙度  $R_a$  值应不大于  $3.2\mu\text{m}$ 。

6.2.4 硬金属试样的四个相邻侧面的表面粗糙度  $R_a$  值应不大于  $0.4\mu\text{m}$ 。四条长棱应进行  $45^\circ$  角倒棱,倒棱宽度不应超过  $0.5\text{mm}$ 。倒棱磨削机加工方向与试样长度方向相同。

6.2.5 薄板试样的两个宽面应保留原表面,两窄面的机加工表面粗糙度  $R_a$  值一般不大于  $6.3\mu\text{m}$ 。应去除试样棱边的毛刺。

6.2.6 其他类型试样在其长度范围内的机加工表面粗糙度  $R_a$  值应不大于  $0.8\mu\text{m}$ ,除非有关标准或协议另作规定。

6.2.7 试样应平直。从盘卷切取的薄板试样允许稍有弯曲,但曲率半径与厚度之比应大于 500。不允许对试样进行矫直或矫平。

## 6.3 试样数量

6.3.1 薄板试样:至少试验 6 个试样,试验时,拱面向上和向下各试验 3 个试样。圆形、矩形横截面试样:一般每个试验点需试验 3 个试样。

## 7 试样尺寸测量

7.1 圆形横截面试样应在跨距两端和中间处两个相互垂直的方向测量其直径。计算弯曲弹性模量时,取用三处直径测量值的算术平均值;计算弯曲应力时,取用中间处直径测量值的算术平均值。

7.2 矩形横截面试样应在跨距的两端和中间处分别测量其高度和宽度。计算弯曲弹性模量时,取用三处高度测量值的算术平均值和三处宽度测量值的算术平均值。计算弯曲应力时,取用中间处测量的高度和宽度。对于薄板试样,高度测量值超过其平均值 2% 的试样不应用于试验。

7.3 按表 5 要求选用测量工具。测量尺寸时,应估读到最小分度的半个分度值。

表 5

mm

| 尺寸范围     | 测量工具最小分度值不大于 |
|----------|--------------|
| 0.25~1.0 | 0.002        |
| >1.0~20  | 0.01         |
| >20      | 0.02         |

## 8 试验设备

### 8.1 试验机

- 8.1.1 各类万能试验机和压力试验机均可使用。试验机精确度为一级或优于一级。
- 8.1.2 试验机应能在本标准规定的速度范围内控制试验速度,加卸力应平稳、无振动、无冲击。
- 8.1.3 试验机应有三点弯曲和四点弯曲试验装置。施力时弯曲试验装置不应发生相对移动和转动。
- 8.1.4 试验机应配备记录弯曲力-挠度曲线的装置。
- 8.1.5 试验机应定期按 JJG 139、JJG 157 或 JJG 475 检定规程进行校验。

### 8.2 弯曲试验装置

#### 8.2.1 三点弯曲试验装置

- 8.2.1.1 两支承滚柱的直径应相同,施力滚柱的直径一般与支承滚柱的直径相同,按表 2 选用。滚柱的长度应大于试样直径或宽度。
- 8.2.1.2 两支承滚柱的轴线应平行,施力滚柱的轴线应与支承滚柱的轴线平行。
- 8.2.1.3 施力滚柱的轴线至两支承滚柱的轴线的距离应相等,偏差不大于 $\pm 0.5\%$ ,见图 1(a)。试验时,力的作用方向应垂直于两支承滚柱的轴线所在平面。
- 8.2.1.4 试验时,滚柱应能绕其轴线转动(有关标准另作规定除外),但不发生相对位移。两支承滚柱间的距离应可调节。应带有指示距离的标记。跨距应精确到 $\pm 0.5\%$ 。

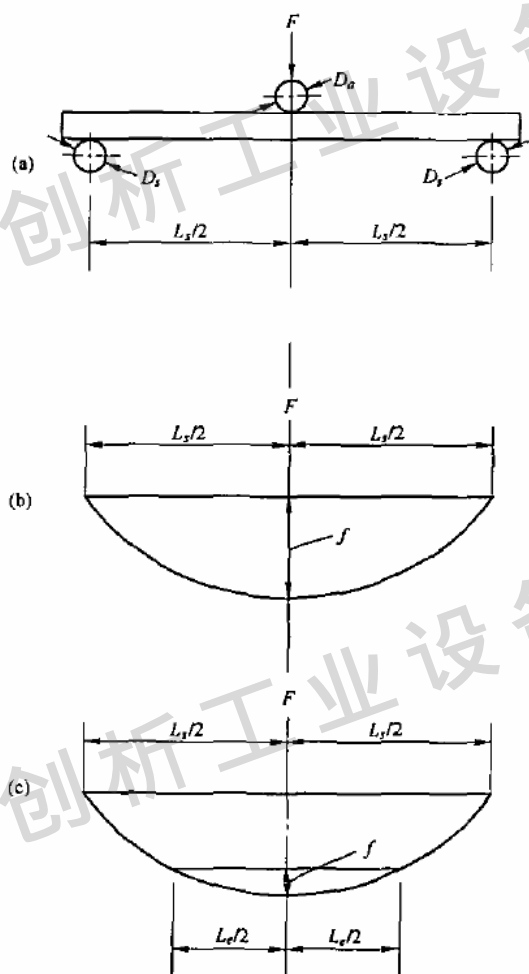


图 1 三点弯曲试验示意图

8.2.1.5 滚柱的硬度应不低于试样的硬度,其表面粗糙度  $R_a$  值应不大于  $0.8\mu\text{m}$ 。

### 8.2.2 四点弯曲试验装置

8.2.2.1 两支承滚柱和两施力滚柱的直径应分别相同,前者与后者的直径一般相同,按表 2 选用。滚柱的长度应大于试样的直径或宽度。

8.2.2.2 两支承滚柱的轴线和两施力滚柱的轴线应相互平行,前两者所在平面应与后两者所在平面平行。

8.2.2.3 两力臂应相等,且一般不小于跨距的  $1/4$ 。力臂应精确到  $\pm 0.5\%$ ,试验时,施力滚柱的力作用方向应垂直于支承滚柱的轴线所在平面。

8.2.2.4 试验时,滚柱应能绕其轴线转动,但不应发生相对位移。两支承滚柱间和两施力滚柱间的距离应分别可调节。应带有指示距离的标记。跨距应精确到  $\pm 0.5\%$ 。

8.2.2.5 滚柱的硬度和表面粗糙度要求同 8.2.1.5。

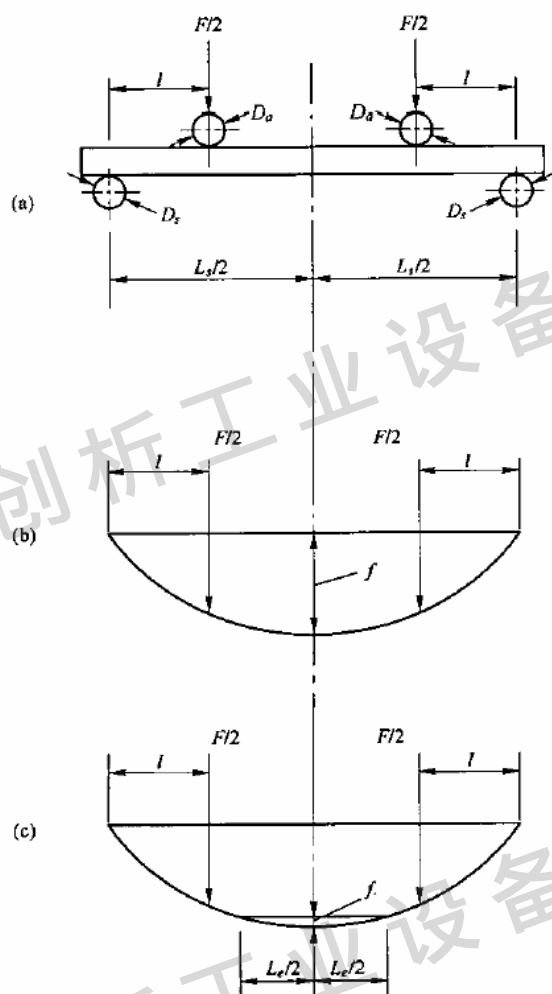


图 2 四点弯曲试验示意图

### 8.2.3 薄板试样用三点弯曲试验装置

8.2.3.1 支承刀和施力刀的刀刃半径应在  $0.10\sim 0.15\text{mm}$  范围内,刀刃角度为  $60^\circ\pm 2^\circ$ 。其中一个支承刀刃和施力刀刃均为平直刀刃,刀刃长度应大于试样宽度。另一支承刀刃呈圆拱形,其半径为  $13\pm 1\text{mm}$ 。见图 3。

8.2.3.2 施力刀的刃线应平行于支承刀的刃线及支承刀的刃线与另一支承点所在平面。施力刀刃的力

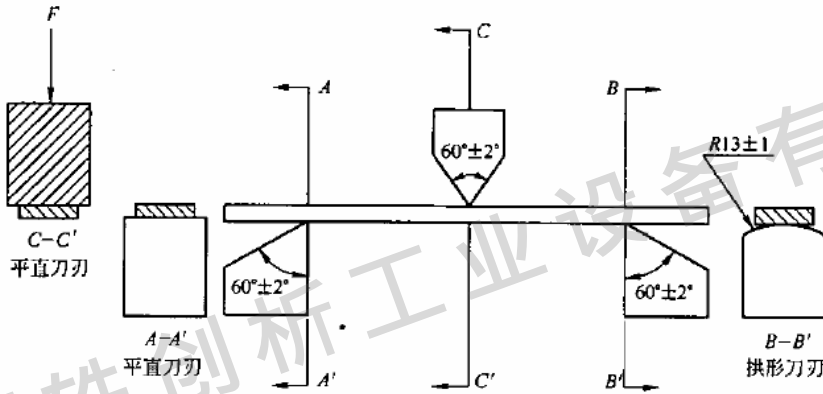


图3 薄板三点弯曲试验示意图

作用方向应垂直于支承刀的刃线与另一支承点所在平面。

8.2.3.3 施力刀刃应位于两支承刀刃间的中点,偏差不大于 $\pm 0.5\%$ 。两支承刀刃之间的距离应可调节,应带有指示距离的标记。跨距应精确到 $\pm 0.5\%$ 。

8.2.3.4 支承刀和施力刀的硬度应不低于试样的硬度。刀刃表面应光滑。

#### 8.2.4 薄板试样用四点弯曲试验装置

8.2.4.1 两支承刀和两施力刀的刀刃半径应在 $0.10\sim 0.15\text{mm}$ 范围内,刀刃角度为 $60^\circ\pm 2^\circ$ 。其中一施力刀刃呈圆拱形,其半径应为 $13\pm 1\text{mm}$ ,其余刀刃均为平直刀刃,其刃线的长度应大于试样宽度。见图4。

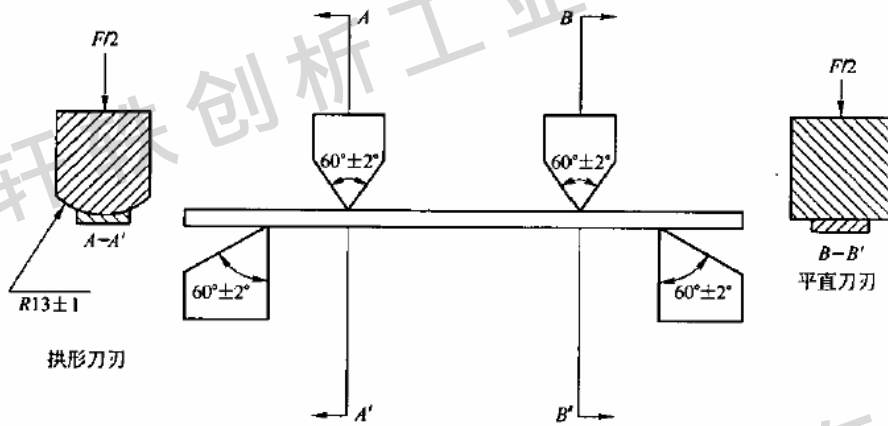


图4 薄板四点弯曲试验示意图

8.2.4.2 两支承刀的刃线和平直施力刀的刃线应相互平行。平直施力刀的刃线和拱形刀刃的施力点所在平面应平行于两支承刀的刃线所在平面。两力臂应相等,且一般不小于跨距的 $1/6$ 。力臂应精确到 $\pm 0.5\%$ 。试验时,施力刀刃的力作用方向应垂直于两支承刀的刃线所在平面。

8.2.4.3 两施力刀刃间和两支承刀刃间的距离均应可调节。应带有指示距离的标记。跨距应精确到 $\pm 0.5\%$ 。

8.2.4.4 支承刀和施力刀的硬度应不低于试样的硬度。刀刃表面应光滑。

#### 8.3 挠度计

8.3.1 应根据所测性能按表6选用挠度计。

8.3.2 挠度计跨距与其标称值之差应不大于 $\pm 0.5\%$ 。



表 6

| 性能                         | 规定非比例弯曲应变, % | 允许挠度计位移示值相对误差, % |
|----------------------------|--------------|------------------|
| $E_b$                      |              | ±0.3             |
| $\sigma_{pb}, \sigma_{rb}$ | <0.05        | ±0.3             |
|                            | ≥0.05~0.2    | ±0.5             |
|                            | >0.2         | ±1.0             |
| $U, f_{b0}$                |              | ±1.0             |

8.3.3 挠度计应定期参照 JJG 762 进行检定, 检定时的工作状态应尽可能与试验时的工作状态相同。

8.3.4 采用挠度计测量试样挠度时, 挠度计对试样产生的附加弯曲力应尽可能小, 一般不大于试验中所施加弯曲力的 0.05%。

#### 8.4 安全防护罩

试验时应在弯曲试验装置周围装设安全防护罩, 以防试样断裂碎片飞出伤害试验人员。

### 9 试验条件

9.1 试验应在室温 10~35℃ 下进行。

9.2 试验时, 弯曲应力增加速率应控制在 3~30MPa/s 范围内某个尽量恒定的值。

### 10 性能测定

#### 10.1 弯曲弹性模量的测定

##### 10.1.1 人工记录方法

10.1.1.1 将挠度计装于测量位置上, 试样对称地安放于弯曲试验装置, 对试样施加相当于  $\sigma_{pb0.01}$  (或  $\sigma_{rb0.01}$ ) 10% 以下的预弯曲力  $F_0$ , 并记录此力和跨距中点处的挠度, 然后对试样连续施加弯曲力, 直至相应于  $\sigma_{pb0.01}$  (或  $\sigma_{rb0.01}$ ) 的 50%。记录弯曲力的增量和相应挠度的增量。按式(1)或(2)计算弯曲弹性模量:

三点弯曲试验, 采用图 1(b) 的测量方式时:

$$E_b = \frac{L_s^3}{48I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

四点弯曲试验, 采用图 2(b) 的测量方式时:

$$E_b = \frac{I(3L_s^2 - 4l^2)}{48I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中的  $I$  按式(3)或(4)计算:

圆形横截面试样

$$I = \frac{1}{64} \pi d^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

矩形横截面试样

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

10.1.1.2 分级施加弯曲力(包括使用砝码施力)时, 按 10.1.1.1 施加预弯曲力  $F_0$ , 从  $F_0$  至相应于  $\sigma_{pb0.01}$  (或  $\sigma_{rb0.01}$ ) 的 50% 的弯曲力范围内测定  $m(m \geq 5)$  对力和挠度的数据, 且测点应尽量均匀分布。如使用砝码施力, 操作时应避免瞬时过载。用最小二乘法将弯曲力和相应的挠度数据拟合直线。按式(5)计算该直线的斜率  $\Delta F/\Delta f$ , 将其代入式(1)或(2)计算弯曲弹性模量:

$$\frac{\Delta F}{\Delta f} = \frac{\sum_1^m (\Delta F) \sum_1^m (\overline{\Delta f}) - m \sum_1^m (\Delta F) (\overline{\Delta f})}{[\sum_1^m (\Delta F)]^2 - m \sum_1^m (\Delta f)^2} \dots\dots\dots (5)$$

10.1.2 图解法

10.1.2.1 将挠度计装于测量位置上,挠度计跨距的端点与最邻近支承点或施力点的距离应不小于试样的高度或直径。试样对称地安放于弯曲试验装置上,对试样连续施加弯曲力,同时采用自动方法连续记录弯曲力-挠度曲线,直至超过相应于 $\sigma_{pb0.01}$ (或 $\sigma_{rb0.01}$ )的弯曲力。记录时,建议力轴比例和挠度轴放大倍数的选择,宜使曲线弹性直线段与力轴的夹角不小于 $40^\circ$ ,弹性直线段的高度应超过力轴量程的 $3/5$ 。在记录的曲线图上,借助于直尺的直边确定最佳弹性直线段。读取该直线段的弯曲力增量和相应的挠度增量,见图5。按式(6)或(7)计算弯曲弹性模量:

三点弯曲试验,采用图1(c)的测量方式时:

$$E_b = \frac{L_s^2(3L_s - L_c)}{96I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \dots\dots\dots (6)$$

四点弯曲试验,采用图2(c)的测量方式时:

$$E_b = \frac{4L_s^2}{16I} \left( \frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \dots\dots\dots (7)$$

注:可以延长最佳弹性直线段,在较大增量范围内,读取弯曲力增量和相应的挠度增量。

10.1.2.2 采用图1(b)或图2(b)的测量方式,自动记录弯曲力-挠度曲线。在曲线上读取弹性直线段的弯曲力增量和相应的挠度增量,分别按式(1)和(2)计算弯曲弹性模量。

注:也可以用应变计方法测定弯曲弹性模量。

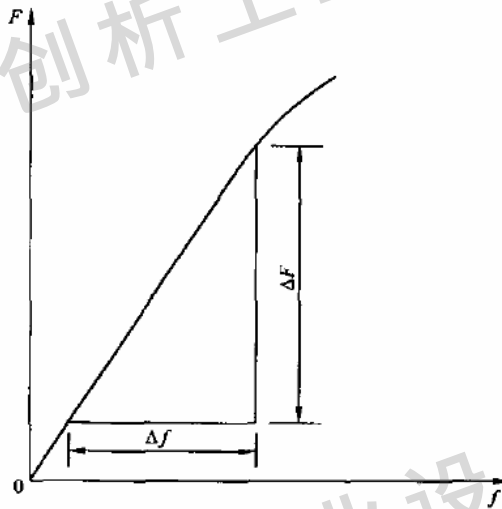


图5 图解法测定弯曲弹性模量

$$\overline{\sigma} = \frac{nL_s^2}{12Y} \epsilon_{pb} \dots\dots\dots (8)$$

采用图1(c)的测量方式时

$$\overline{\sigma} = \frac{nL_s^2(3L_s - L_c)}{24L_s Y} \epsilon_{pb} \dots\dots\dots (9)$$

$$\sigma_{pb} = \frac{F_{pb} L_s}{4W} \dots\dots\dots (10)$$

四点弯曲试验:

采用图 2(b)的测量方式时

$$\overline{OC} = \frac{n(3L_i^2 - 4l^2)}{24Y} \epsilon_{pb} \dots\dots\dots (11)$$

采用图 2(c)的测量方式时

$$\overline{OC} = \frac{nL_c^2}{8Y} \epsilon_{pb} \dots\dots\dots (12)$$

10.2 规定非比例弯曲应力的测定

10.2.1 图解法

10.2.1.1 按 10.1.2.1 的要求安装挠度计,将试样对称地安放于弯曲试验装置上。对试样连续施加弯曲力,采用自动方法连续记录弯曲力-挠度曲线。记录时,力轴每毫米所代表的应力应不大于 15MPa,并使曲线上所测  $F_{pb}$  处于力轴量程的 1/2 以上为宜。挠度放大倍数的选择应使图 6 曲线图上的  $\overline{OC}$  段长度不小于 15mm。在记录的曲线图上,自弹性直线段与挠度轴的交点  $O$  起,截取相应于规定非比例弯曲应变的  $\overline{OC}$  段。根据所采用的测量方式,  $\overline{OC}$  段长度按式(8)、(9)、(11)或(12)计算。过  $C$  点作弹性直线段的平行线  $CA$  交曲线于  $A$  点,  $A$  点所对应的力为所测规定非比例弯曲力  $F_{pb}$ , 见图 6。规定非比例弯曲应力按式(10)或(13)计算:

三点弯曲试验:

采用图 1(b)的测量方式时

$$\sigma_{pb} = \frac{F_{pb}l}{2W} \dots\dots\dots (13)$$

式(8)~(13)中的  $Y$  和  $W$ :

对于圆形横截面试样

$$Y = \frac{1}{2}d \dots\dots\dots (14)$$

$$W = \frac{1}{32}\pi d^3 \dots\dots\dots (15)$$

对于矩形横截面试样

$$Y = \frac{1}{2}h \dots\dots\dots (16)$$

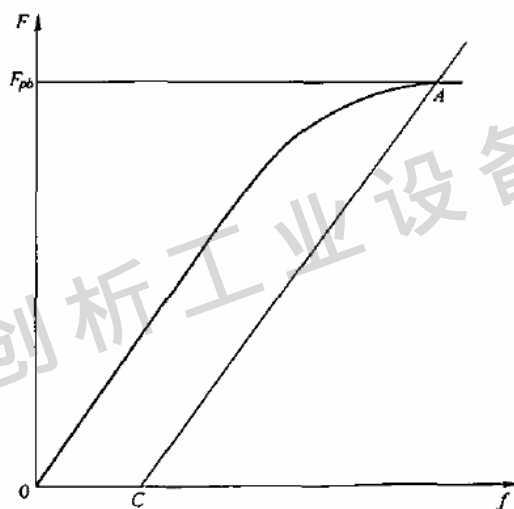


图 6 图解法测定规定非比例弯曲应力

$$W = \frac{1}{6}bh^2 \dots\dots\dots (17)$$

注：(1)用此法测定的规定非比例弯曲应力值与用拉伸试验方法测定的规定非比例伸长应力值不一定相等。

(2)如需要测定真实规定非比例弯曲应力可按附录 A 进行。

### 10.3 规定残余弯曲应力的测定

10.3.1 将试样对称地安放于弯曲试验装置上,并对其施加相应于预期  $\sigma_{rb,0.1}$  的 10% 的预弯曲力  $F_0$ ,测量跨距中点的挠度,记取此时挠度计的读数作为零点。对试样连续或分级施加弯曲力,并将其卸除至预弯曲力  $F_0$ ,测量残余挠度。反复递增施力和卸力,直至测量的残余挠度达到或稍超过规定残余弯曲应变相应的挠度。用线性内插法按式(18)求出相应于规定残余弯曲应变的弯曲力  $F_{rb}$ 。

$$F_{rb} = F_{n-1} + \left( \frac{F_n - F_{n-1}}{f_n - f_{n-1}} \right) (f_{rb} - f_{n-1}) \dots\dots\dots (18)$$

式中的残余挠度  $f_{rb}$  按式(19)或(20)计算:

三点弯曲试验,采用图 1(b)的测量方式时

$$f_{rb} = \frac{L^2}{12Y} \epsilon_{rb} \dots\dots\dots (19)$$

四点弯曲试验,采用图 2(b)的测量方式时

$$f_{rb} = \frac{(3L^2 - 4l^2)}{24Y} \epsilon_{rb} \dots\dots\dots (20)$$

规定残余弯曲应力按式(21)或(22)计算:

三点弯曲试验

$$\sigma_{rb} = \frac{F_{rb}L_1}{4W} \dots\dots\dots (21)$$

四点弯曲试验

$$\sigma_{rb} = \frac{F_{rb}l}{2W} \dots\dots\dots (22)$$

注:用此方法测定的规定残余弯曲应力值与用拉伸试验方法测定的规定残余伸长应力值不一定相等。

### 10.4 抗弯强度的测定

10.4.1 将试样对称地安放于弯曲试验装置上,对试样连续施加弯曲力,直至试样断裂。从试验机测力度盘上或从记录的弯曲力-挠度曲线上读取最大弯曲力  $F_{bb}$ ,按式(23)或(24)计算抗弯强度:

三点弯曲试验

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb}L_1}{4W} \dots\dots\dots (23)$$

四点弯曲试验

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb}l}{2W} \dots\dots\dots (24)$$

注:如需要测定真实抗弯强度可按附录 A 进行。

### 10.5 断裂挠度的测定

10.5.1 将试样对称地安放于弯曲试验装置上,按图 1(b)或图 2(b)方式,对试样连续施加弯曲力,直至试样断裂,测量试样断裂瞬间跨距中点的挠度,此挠度即为断裂挠度  $f_{bb}$ 。此方法用于仲裁试验。

注:对比试验时应采用同一试验方式。

10.5.2 测定断裂挠度一般可与测定抗弯强度在同一试验中进行。可以利用试验机横梁位移来测定断裂挠度,但应修正试验机柔性等因素的影响。

### 10.6 弯曲断裂能量的测定

10.6.1 将试样对称地安放于弯曲试验装置上,按图 1(b)方式对试样连续施加弯曲力,测量试样在跨距中点的挠度,用自动方法连续记录弯曲力-挠度曲线,直至试样断裂。见图 7。

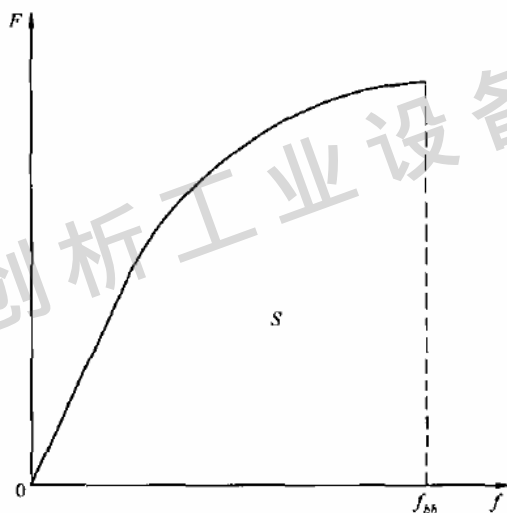


图 7 图解法测定弯曲断裂能量

10.6.2 在记录的曲线图上,用面积仪或其他方法求得弯曲力-挠度曲线下的面积 S,精确到±2%。按式(25)计算弯曲断裂能量:

$$U = \frac{ZS}{n} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (25)$$

10.7 倒棱的修正

硬金属试样按 6.2.4 倒棱后,测定的弯曲弹性模量和抗弯强度应按附录 B 进行修正。

10.8 弯曲力学性能自动测定装置的使用

可以使用自动装置,例如微处理机等自动测定标准中所规定的一项或几项弯曲力学性能而无需绘出弯曲力-挠度曲线。

11 测试结果数值的修约

测试结果的数值应按表 7 进行修约,修约的方法按 GB 8170 执行。

表 7

| 性能                                      | 范围                              | 修约到       |
|---|---------------------------------|-----------|
| $E_t$                                   | $\leq 150\ 000\ \text{MPa}$     | 500 MPa   |
|   | $> 150\ 000\ \text{MPa}$        | 1 000 MPa |
| $\sigma_{pb}, \sigma_{rb}, \sigma_{bk}$ | $\leq 200\ \text{MPa}$          | 1 MPa     |
|   | $> 200 \sim 1\ 000\ \text{MPa}$ | 5 MPa     |
|   | $> 1\ 000\ \text{MPa}$          | 10MPa     |
| $f_{hb}$                                |                                 | 0.1mm     |
| U                                       | $< 10\ \text{J}$                | 0.05 J    |
|   | $\geq 10\ \text{J}$             | 0.1 J     |

## 12 试验报告

试验报告应包括以下内容：

- a. 标准号；
- b. 材料牌号；
- c. 试样类型；
- d. 试样状态；
- e. 弯曲试验方式；
- f. 跨距；
- g. 弯曲力学性能。

上海轩轶创析工业设备有限公司

**附录 A**  
**真实规定非比例弯曲应力**  
**和真实抗弯强度的测定**  
(补充件)

本附录在有关标准或协议提出要求时才执行。

#### A1 适用范围

本附录的方法仅适用于脆性断裂和低塑性断裂金属材料矩形横截面试样,在四点弯曲试验中测定真实规定非比例弯曲应力和真实抗弯强度。

#### A2 术语及符号

**A2.1 真实规定非比例弯曲应力  $\sigma_{spb}$ :**四点弯曲试验中,矩形横截面试样在跨距中间段弯曲外表面上的非比例弯曲应变达到规定数值时按纳达依(Nádai)表达式计算的最大弯曲应力。

注:表示此应力的符号应附以角注说明,例如  $\sigma_{sp0.01}$ 、 $\sigma_{sp0.05}$  和  $\sigma_{sp0.2}$  等分别表示规定非比例弯曲应变达到 0.01%、0.05% 和 0.2% 时的真实弯曲应力。

**A2.2 真实抗弯强度  $\sigma_{db}$ :**四点弯曲试验中,矩形横截面试样断裂时,按纳达依表达式计算的抗弯强度。

#### A3 试样、试样尺寸测量、试验设备和试验条件

试样、试样尺寸测量、试验设备和试验条件的要求分别同 6、7、8 和 9 中的相应规定。

#### A4 测定方法

##### A4.1 图解法测定真实规定非比例弯曲应力

试验时,采用图 2(b)或(c)的测量方式,自动记录弯曲力-挠度曲线。在曲线图上截取相应于规定非比例弯曲应变的  $\overline{OC}$  段,其长度按式(11)或(12)计算。过 C 点作曲线的弹性直线段的平行线 CA 交曲线

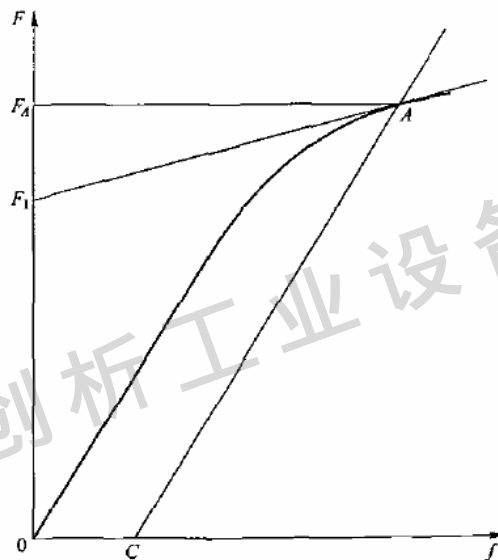


图 A1 图解法测定真实规定非比例弯曲应力

于 A 点,以 A 点为切点,过 A 点作曲线的切线  $AF_1$  并将其延长交力轴于  $F_1$  见图 A1。读取弯曲力  $F_1$  和 A 点对应的弯曲力  $F_A$ ,按式(A1)计算真实规定非比例弯曲应力:

$$\sigma_{pb} = \frac{l}{bh^2}(3F_A - F_1) \dots\dots\dots (A1)$$

**A4.2 图解法测定真实抗弯强度**

试验时,采用图 2(b)或(c)的测量方式,自动记录弯曲力-挠度曲线,直至试样断裂。在曲线图上,以断裂前的最高点 K 为切点作曲线的切线  $KF_B$  并将其延长交力轴于  $F_B$ ,见图 A2。读取弯曲力  $F_B$  和 K 点对应的弯曲力  $F_K$ ,按式(A2)计算真实抗弯强度:

$$\sigma_{bb} = \frac{l}{bh^2}(3F_K - F_B) \dots\dots\dots (A2)$$

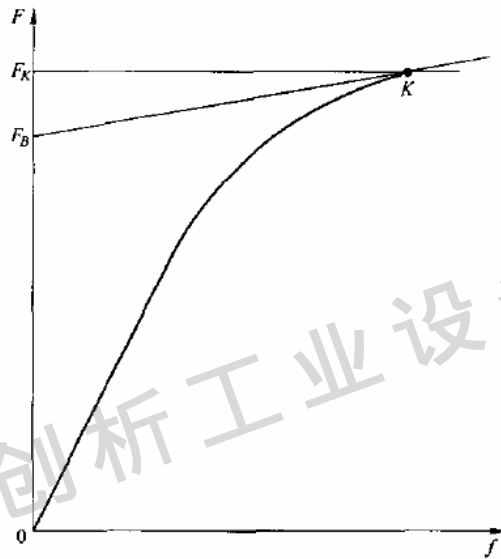


图 A2 图解法测定真实抗弯强度

**A4.3 力臂的修正**

如需要更精确计算真实规定非比例弯曲应力和真实抗弯强度时,按附录 C 进行力臂的修正。

**A4.4 真实规定非比例弯曲应力和真实抗弯强度的自动测定装置的使用。**

可以使用自动装置,例如微处理机等自动测定真实规定非比例弯曲应力和真实抗弯强度,而无需绘出弯曲力-挠度曲线。

**A5 测试结果数值的修约**

测试结果数值的修约要求与 11 中表 7 对规定非比例弯曲应力和抗弯强度的修约规定相同。



附录 B  
倒棱修正系数  
(补充件)

矩形横截面试样的四条长棱经 45°角倒棱后,用试样倒棱前标称横截面尺寸计算弯曲弹性模量和弯曲应力(包括抗弯强度)等性能时,其值偏小,应进行修正。修正的方法是将式(B1)计算得的修正系数乘以用标称横截面尺寸计算的性能值。

$$\alpha = \frac{1}{1 - \left\{ \frac{3}{4} \left( \frac{h}{b} \right) - \left[ \left( \frac{h}{b} \right) - \sqrt{2} \left( \frac{t}{b} \right) \right] + \frac{1}{4} \left( \frac{h}{b} \right) \left[ 1 - \sqrt{2} \left( \frac{t}{h} \right) \right]^4 \right\}} \quad \text{..... (B1)}$$

附录 C  
四点弯曲试验中力臂修正的计算  
(补充件)

四点弯曲试验中实际力臂可按式(C1)进行计算:

$$l_t = l - \left\{ \frac{\frac{1}{2}D_s}{\sqrt{1 + \left[ \frac{4E_b I}{Fl(L_s - l)} \right]^2}} + \frac{\frac{1}{2}D_a}{\sqrt{1 + \left[ \frac{4E_b I}{Fl(L_s - 2l)} \right]^2}} \right\} \quad \text{..... (C1)}$$

附加说明:

本标准由中华人民共和国冶金工业部提出。

本标准由冶金工业部钢铁研究总院起草。

本标准主要起草人梁新邦、高舜之。