



# 中华人民共和国工业和信息化部 有色金属计量技术规范

JJF（有色金属）XXX—XXXX

## 支辊式弯曲试验机校准规范

Calibration Specification for Support Roller Bending Tester  
(报批稿)

2024-xx-xx 发布

2024-xx-xx 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

# 支辊式弯曲试验机校准规范

Calibration Specification for Support

Roller Bending Tester

JJF（有色金属）xxx—XXXX

归口单位：中国有色金属工业协会

主要起草单位：西南铝业（集团）有限责任公司

参加起草单位：西安汉唐分析检测有限公司

东北轻合金有限责任公司

国标(北京)检验认证有限公司

广东省科学院工业分析检测中心

山东南山铝业股份有限公司

新疆湘润新材料科技有限公司

本规范委托有色金属行业计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

瞿楷东（西南铝业(集团)有限责任公司）

兰胜川（西南铝业(集团)有限责任公司）

张国栋（西南铝业(集团)有限责任公司）

余泽利（西安汉唐分析检测有限公司）

刘艳霞（东北轻合金有限责任公司）

谭本清（西南铝业(集团)有限责任公司）

李 成（国标（北京）检验认证有限公司）

张小琴（广东省科学院工业分析检测中心）

高 毅（山东南山铝业股份有限公司）

杨再江（新疆湘润新材料科技有限公司）

# 目 录

引言 .....	(II)
1 范围 .....	(1)
2 引用文件 .....	(1)
3 术语 .....	(1)
4 概述 .....	(1)
5 计量特性 .....	(2)
5.1 支辊间距离示值误差 .....	(2)
5.2 弯曲压头对中偏差 .....	(2)
5.3 弯曲压头位移示值误差 .....	(2)
6 校准条件 .....	(2)
6.1 环境条件 .....	(2)
6.2 测量标准及其他设备 .....	(2)
6.3 其他条件 .....	(3)
7 校准项目和校准方法 .....	(3)
7.1 校准项目 .....	(3)
7.2 校准方法 .....	(3)
8 校准结果表达 .....	(6)
9 复校时间间隔 .....	(6)
附录 A 支辊式弯曲试验机校准原始记录参考格式 .....	(7)
附录 B 支辊式弯曲试验机校准证书内页参考格式 .....	(9)
附录 C 支辊式弯曲试验机支辊间距离示值误差测量不确定度评定示例 .....	(10)
附录 D 支辊式弯曲试验机压头位移示值误差测量不确定度评定示例 .....	(15)

# 引 言

JJF 1071 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001 《通用计量术语及定义》和JJF 1059.1 《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制修订工作的基础性系列规范。

本规范参考了GB/T 232 《金属材料 弯曲试验方法》、GB/T 15825.2 《金属薄板成形性能与试验方法 第2部分：通用试验规程》、GB/T 15825.5 《金属薄板成形性能与试验方法 第5部分：弯曲试验》的相关内容。

本规范为首次发布。

# 支辊式弯曲试验机校准规范

## 1 范围

本规范适用于支辊式弯曲试验机的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 146—2011 量块

JJG 34—2022 指示表

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3 术语

下列术语和定义适用于本规范。

### 3.1 弯曲压头对中偏差（centering deviation of bending pressure head）

弯曲压头与两支辊间距 $l_1$ 与 $l_2$ 差值的绝对值，见图1所示。

## 4 概述

支辊式弯曲试验机（以下简称试验机）是指采用电液伺服、液压、机械等加力方式，通过配置合适的控制系统和支承装置，在一定加载速度下，对试样施加弯曲力的试验机。根据试验机结构的不同，试验机可分为立式弯曲试验机和卧式弯曲试验机。

试验机通常包括加力系统、控制系统、数据处理系统和显示系统。此外，根据试样厚度，可选配各种不同半径的压头。试验机主要用于对金属板材、带材试样不同角度的弯曲试验，试验示意图见图1。

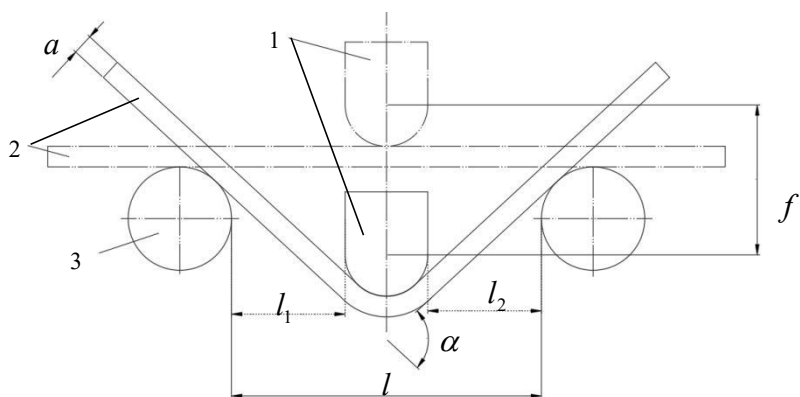


图1 弯曲试验示意图

1—弯曲压头；2—试样；3—支辊； $a$ —试样厚度； $f$ —弯曲压头位移； $\alpha$ —试样弯曲角度；

$l$ —支辊间距离； $l_1$ —左支辊与压头间距； $l_2$ —右支辊与压头间距

## 5 计量特性

### 5.1 支辊间距离示值误差

支辊间距离示值误差不大于 $\pm 0.3$  mm。

### 5.2 弯曲压头对中偏差

弯曲压头对中偏差不大于0.1 mm。

### 5.3 弯曲压头位移示值误差

弯曲压头位移示值误差不大于 $\pm 0.1$  mm。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

环境温度： $(20 \pm 5)$  °C，相对湿度不大于80%。

### 6.2 测量标准及其他设备

试验机校准所需的测量标准及其他设备见表1。

表1 测量标准及其他设备

序号	仪器设备名称	技术要求	用途
1	块规	规格：10 mm、100 mm、200 mm	校准弯曲压头对中偏差
2	塞尺	测量范围：(0.02~1) mm 最大允许误差： $\pm (0.005 \sim 0.016)$ mm	
3	量块	测量范围：(0.5~100) mm (10~191.8) mm 准确度等级：5 等	校准支辊间距离示值误差
4	数显百分表（以下简称百分表）	测量范围：(0~100) mm 最大允许误差： $\pm 0.03$ mm	校准弯曲压头位移示值误差

### 6.3 其他条件

6.3.1 试验机应有铭牌，铭牌上应有：名称、型号/规格、制造厂、出厂编号及日期。

6.3.2 试验机支辊安装水平度应不超过 0.2/1000，弯曲压头与支辊安装垂直度应不大于 0.2/100。

6.3.3 试验机弯曲压头半径最大允许误差为 $\pm 0.01$  mm，弯曲压头表面粗糙度  $R_a$  不大于 0.8  $\mu\text{m}$ 。

6.3.4 试验机周围应留有不小于 0.7 m 的空间，其工作环境应清洁，周围无振动、无腐蚀性介质和较强电磁场干扰，电源电压变化在规定电压的 $\pm 10\%$ 以内。

6.3.5 试验机限位、急停等电器控制应安全、可靠、灵活。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

支辊间距离、弯曲压头对中偏差、弯曲压头位移。

### 7.2 校准方法

#### 7.2.1 支辊间距离

##### 7.2.1.1 校准点选取

将试验机支辊间距离工作行程作为校准范围，在其校准范围内校准点不得少于5个，校准点应包含支辊间最小、最大距离，其余校准点尽可能均匀分布。

试验机支辊间距离校准范围按式（1）、式（2）计算。

$$l_{\min} = 2R_{\min} + 2a_{\min} \quad (\alpha = 180^\circ) \quad (1)$$

$$l_{\max} = 2R_{\max} + 3a_{\max} \quad (\alpha \neq 180^\circ) \quad (2)$$

式中：

$l_{\min}$  ——支辊最小间距离，mm；

$R_{\min}$  ——压头最小半径，mm；

$a_{\min}$  ——试样最小厚度，mm；

$\alpha$  ——试样弯曲角度，°；

$l_{\max}$  ——支辊最大间距离，mm；

$R_{\max}$  ——压头最大半径，mm；

$a_{\max}$  ——试样最大厚度，mm。

### 7.2.1.2 示值误差

试验机支辊间距离校准示意图见图2。

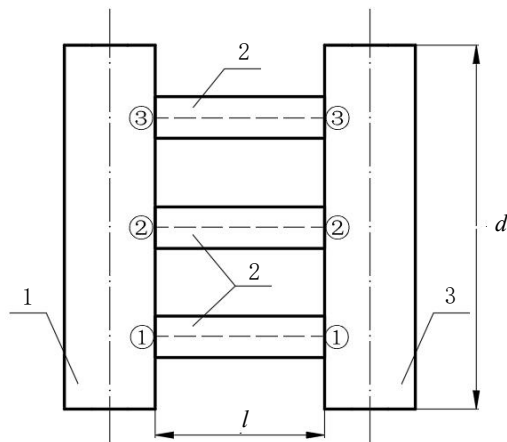


图2 支辊间距离校准示意图

1—左支辊；2—量块；3—右支辊； $d$ —支辊长度； $l$ —支辊间距离；

①—①—校准位置；②—②—校准位置；③—③—校准位置

如图2所示，在每个校准点，将量块分别放在左、右两支辊长度方向的1/4、1/2、3/4处，如图①—①、②—②、③—③ 3个位置，操作试验机支辊间距离调节装置，使两支辊与量块测量面垂直接触，读取试验机支辊间距离显示值，计算其与量块长度之差。3个位置计算结果的最大值即为该校准点支辊间距离示值误差。

试验机支辊间距离示值误差按式（3）计算。

$$\Delta l = \max(l_j - L_l) \quad (3)$$

式中：

$\Delta l$  ——支辊间距离示值误差，mm；

$l_j$  ——支辊间距离示值，mm；

$L_l$  ——量块长度，mm。

### 7.2.2 弯曲压头对中偏差

7.2.2.1 根据式（1）、式（2）确定的试验机支辊间距离工作行程，均匀选取校准点，校准点一般不少于3个。

7.2.2.2 将直径为20 mm的弯曲压头牢固安装在试验机上，使之与支辊平行。操作试验机移动弯曲压头，目力观察压头位置，当弯曲压头工作端中心轴移动至与支辊中心轴基本平齐时，停止压头移动。

7.2.2.3 调整支辊间距离到校准点，在每个校准点使用块规与塞尺测量出左、右支辊在长度方向中间位置与弯曲压头左右两侧之间的间隙差，所有校准点的间隙差最大值即为弯曲压头对中偏差。

### 7.2.3 弯曲压头位移

#### 7.2.3.1 校准点选取

立式弯曲试验机压头位移校准示意图见图3，卧式弯曲试验机压头位移校准也可参照此方法。

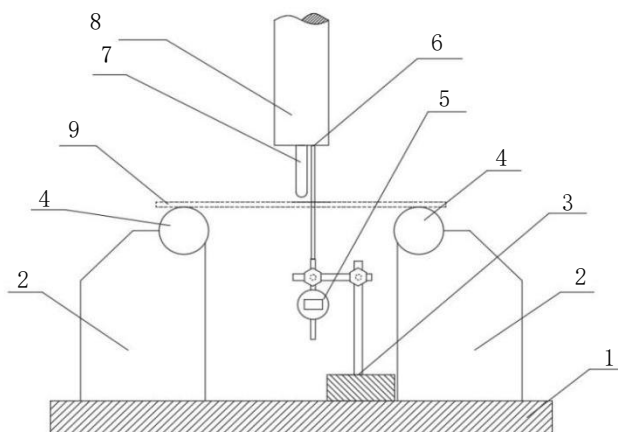


图3 立式弯曲试验机压头位移校准示意图

1—试验机底座；2—支辊间距离调节装置；3—磁力底座；

4—支辊；5—百分表；6—百分表测头；7—弯曲压头；8—移动横梁；9—试样

弯曲压头位移最大校准值按式（4）计算。

$$f = L_{\max} / 2 + 25 \quad (4)$$

式中：

$f$  ——弯曲压头位移最大校准值，mm；

$L_{\max}$  ——试样最大长度，mm。

注：

1、试样最大长度一般为150 mm±2.0 mm；

2、式（4）中的“25”为设置的压头位移校准冗余量。

弯曲压头位移的校准点一般不得少于5个，按最大校准值的20%、40%、60%、80%、100%均匀分布。

#### 7.2.3.2 示值误差

7.2.3.2.1 根据百分表磁力底座、百分表夹持连接杆等调整支辊间距离，安装好百分表使其测杆测量方向与弯曲压头位移方向一致；

7.2.3.2.2 将弯曲压头牢固安装在试验机上，操作试验机下降弯曲压头，使压头与支辊垂直间距为试样最大厚度，读取弯曲压头位移示值，作为校准起始点；

7.2.3.2.3 调整百分表高度，使百分表测头刚好与移动横梁底部接触，见图3所示，对百分表进行清零操作。

7.2.3.2.4 操作试验机下降弯曲压头，推动百分表测头移动至各校准点，读取百分表和试验机弯曲压头位移示值。

7.2.3.2.5 试验机弯曲压头位移示值误差按式（5）计算。

$$\delta_f = f_b - f_0 - f_c \quad (5)$$

式中：

$\delta_f$ ——弯曲压头位移示值误差，mm；

$f_b$ ——各校准点弯曲压头位移示值，mm；

$f_0$ ——弯曲压头位移校准起始点示值，mm；

$f_c$ ——百分表在每个校准点的读数，mm。

## 8 校准结果表达

经校准的试验机出具校准证书，校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题，“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识，每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；

- k) 校准结果及测量不确定度的说明;
- l) 对校准规范的偏离的说明;
- m) 校准证书批准人的签名或等效标识;
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- o) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

校准原始记录参考格式见附录A, 校准证书(报告)参考格式见附录B。

## 9 复校时间间隔

复校时间间隔可根据试验机的使用情况决定, 建议复校时间间隔不超过1年。

## 附录 A

## 支辊式弯曲试验机校准原始记录参考格式

测量设备使用单位		测量设备名称		测量设备编号	
制 造 厂		出 厂 编 号		型 号 / 规 格	
测量标准					
名 称	测量设备编号	测量范围/规格	技术特性	校准机构/证书 编号	有效期至
校 准 依 据					
校 准 地 点					
校 准 环 境 条 件		温度	℃	湿度	%RH 其他
校准项目					
1、支辊间距离：					
校准位置	校准点（量块长度） mm	仪器示值 mm	示值误差 mm	扩展不确定度 $U(k=2)$ mm	
①-①					
②-②					
③-③					
①-①					
②-②					
③-③					
①-①					
②-②					
③-③					
①-①					
②-②					
③-③					
①-①					
②-②					
③-③					
2、弯曲压头对中偏差					
校准点（塞尺或块规 长度） mm	支辊与弯曲压头间隙差 mm	弯曲压头对中偏差 mm	扩展不确定度 $U(k=2)$ mm		
3、弯曲压头位移：					

测量标准示值 mm	仪器示值 mm		示值误差 mm	扩展不确定度 $U(k=2)$ mm
	起始点	校准点		

## 附录 B

## 支辊式弯曲试验机校准证书内页参考格式

## 校准结果

## 1 支辊间距离

校准点 (量块长度) mm	仪器示值 mm	示值误差 mm	扩展不确定度 $U(k=2)$ mm

## 2 弯曲压头对中偏差

校准点 mm	支辊与弯曲压头间隙差 mm	弯曲压头对中偏差 mm	扩展不确定度 $U(k=2)$ mm

## 3 弯曲压头位移

测量标准示值 mm	仪器示值 mm	示值误差 mm	扩展不确定度 $U(k=2)$ mm

## 附录 C

### 支辊式弯曲试验机支辊间距离示值误差测量不确定度评定示例

#### C.1 概述

##### C.1.1 校准依据

支辊式弯曲试验机校准规范。

##### C.1.2 环境条件

温度：（20±5）℃，相对湿度≤80%。

##### C.1.3 测量标准

5等量块，测量范围：（0.5~100）mm、（10~191.8）mm。

##### C.1.4 被校对象

支辊式弯曲试验机（以下简称试验机）支辊间距离。

##### C.1.5 测量方法

直接测量法。

##### C.1.6 测量过程

选取测量范围为（0.5~100）mm、（10~191.8）mm、准确度等级为5等量块，对试验机支辊式弯曲装置间距离进行测量。

#### C.2 测量模型

试验机支辊间距离示值误差测量模型见式（C.1）。

$$\Delta l = l_j - L_l \quad (\text{C.1})$$

式中：

$\Delta l$  ——支辊间距离示值误差，mm；

$l_j$  ——支辊间距离示值，mm；

$L_l$  ——量块长度，mm。

考虑到温度偏离20℃时，线膨胀系数及温度差的影响，上式化为式（C.2）。

$$\Delta l = l_j - L_l + l_j \cdot \alpha_j \cdot \Delta t_j - L_l \cdot \alpha_l \cdot \Delta t_l \quad (\text{C.2})$$

式中：

$\Delta l$  ——支辊间距离示值误差，mm；

$l_j$  ——支辊间距离示值（20 °C条件下），mm；

$L_l$  ——量块长度（20 °C条件下），mm；

$a_j$  ——支辊的线膨胀系数，°C<sup>-1</sup>；

$\Delta t_j$  ——支辊偏离标准温度20°C的值，°C；

$a_l$  ——量块的线膨胀系数，°C<sup>-1</sup>；

$\Delta t_l$  ——量块偏离标准温度20°C的值，°C。

### C.3 方差和灵敏系数

由于  $\Delta t_j$  和  $\Delta t_l$  是采用同一只温度计测量而具有相关性，其数学处理过程比较复杂，为了简化数学处理过程，需要通过如下方法将相关转化为不相关。

令

$$\delta a = a_j - a_l$$

$$\delta t = \Delta t_j - \Delta t_l$$

取

$$L = l_j \approx L_l$$

$$a = a_j - a_l$$

$$\Delta t = \Delta t_j - \Delta t_l$$

可得到如下示值误差计算公式：

$$\Delta l = l_j - L_l + L \cdot \Delta t \cdot \delta a + L \cdot a \cdot \delta t$$

从上式可以看出，各变量之间彼此不相关，因此：

$$u_c^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \times u^2(x_i)$$

可得方差：

$$u_c^2 = u^2(\Delta L) = c_1^2 \cdot u_1^2 + c_2^2 \cdot u_2^2 + c_3^2 \cdot u_3^2 + c_4^2 \cdot u_4^2$$

灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta l}{\partial l_j} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta l}{\partial L_l} = -1$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta l}{\partial \delta a} = L \cdot \Delta t$$

$$c_4 = \frac{\partial \Delta l}{\partial \delta t} = L \cdot a$$

#### C.4 测量不确定度的来源分析

测量不确定度的来源主要有：测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(x_1)$ ，量块长度测量不确定度引入的标准不确定度 $u(x_2)$ ，支辊与量块热膨胀系数差引入的标准不确定度 $u(x_3)$ ，支辊和量块间的温度差引入的标准不确定度 $u(x_4)$ 。

#### C.5 标准不确定度评定

##### C.5.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(x_1)$ 的评定

在测量范围（0.5~100）mm、（10~191.8）mm内，分别选取1.1 mm、191.8 mm两块量块，在相同测量条件下，分别对试验机支辊间距离2个位置进行10次重复测量，其测量结果见表C.1。

表 C.1 支辊间距离重复测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	1.1	1.07	1.07	1.05	1.05	1.06	1.07	1.06	1.06	1.06
(mm)	191.8	191.72	191.70	191.72	191.74	191.74	191.75	191.73	191.73	191.74

按贝塞尔法计算单次测量结果标准偏差。

a)当量块长度 $L_l = 1.1$  mm时，其标准偏差为：

$$s(x_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 7.38 \mu\text{m}$$

因在实际校准过程中，采用1次校准作为最后的校准结果，因此，标准不确定度为：

$$u(x_1) = s(x_1) = 7.38 \mu\text{m}$$

b)当量块长度 $L_l = 191.8$  mm时，其标准偏差为：

$$s(x_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 14.14 \mu\text{m}$$

因在实际校准过程中，采用1次校准作为最后的校准结果，因此，标准不确定度为：

$$u(x_1) = s(x_1) = 14.14 \mu\text{m}$$

#### C.5.2 量块长度测量不确定度引入的标准不确定度 $u(x_2)$ 的评定

根据JJG 146-2011附录A中表A.2，5等量块长度测量不确定度为  $0.5 \mu\text{m} + 5 \times 10^{-6} \times L$ （ $L$ ：量块长度，单位：mm），测量不确定度置信概率为0.99，即  $k=2.58$ 。

a)当量块长度  $L_l=1.1 \text{ mm}$  时：

经计算，其长度测量不确定度  $a=0.51 \mu\text{m}$ ， $k=2.58$ ，标准不确定度为：

$$u(x_2) = \frac{a}{k} = \frac{0.51}{2.58} = 0.20 \mu\text{m}$$

b)当量块长度  $L_l=191.8 \text{ mm}$  时：

经计算，其长度测量不确定度  $a=1.46 \mu\text{m}$ ， $k=2.58$ ，标准不确定度为：

$$u(x_2) = \frac{a}{k} = \frac{1.46}{2.58} = 0.57 \mu\text{m}$$

#### C.5.3 支辊与量块热膨胀系数差引入的标准不确定度 $u(x_3)$ 的评定

因支辊与量块同为钢质材料，两者的线膨胀系数均为  $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，则区间半宽  $a=1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，服从均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$ ，测量尺寸为  $L$ ，偏离标准温度的范围是  $\pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，标准不确定度按式（C.3）计算。

$$u(x_3) = (L \times \Delta t \times a) / k \quad (\text{C.3})$$

a)当量块长度  $L_l=1.1 \text{ mm}$  时：

$$u(x_3) = (1.1 \times 5 \times 1 \times 10^{-6}) / \sqrt{3} = 0.01 \mu\text{m}$$

b)当量块长度  $L_l=191.8 \text{ mm}$  时：

$$u(x_3) = (191.8 \times 5 \times 1 \times 10^{-6}) / \sqrt{3} = 0.56 \mu\text{m}$$

#### C.5.4 支辊和量块间的温度差引入的标准不确定度 $u(x_4)$ 的评定

将量块放置在试验室内恒温，使支辊和量块在校准前温度保持一致。因此，两者之间的温差可以忽略不计，则取  $u(x_4)=0$ 。

### C.6 标准不确定度汇总

标准不确定度汇总见表 C.2。

表 C.2 不确定度分量汇总

标准不确定度分量 $u(x_i)$	标准不确定度来源		标准不确定度/ $\mu\text{m}$
$u(x_1)$	测量重复性	量块长度 $L=1.1 \text{ mm}$	7.38
		量块长度 $L=191.8 \text{ mm}$	14.14
$u(x_2)$	量块长度测量不确定度	量块长度 $L=1.1 \text{ mm}$	0.20
		量块长度 $L=191.8 \text{ mm}$	0.57
$u(x_3)$	支辊和量块热膨胀系数差	量块长度 $L=1.1 \text{ mm}$	0.01
		量块长度 $L=191.8 \text{ mm}$	0.56
$u(x_4)$	支辊和量块温度差		0

### C.7 合成标准不确定度

由于各标准不确定度分量互不相关，彼此独立，因此，合成标准不确定度按下式计算：

$$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2 + u(x_4)^2}$$

a) 当量块长度  $L_l=1.1 \text{ mm}$  时，

$$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2 + u(x_4)^2} = \sqrt{7.38^2 + 0.2^2 + 0.01^2 + 0^2} = 7.4 \mu\text{m}$$

b) 当量块长度  $L_l=191.8 \text{ mm}$  时，

$$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(x_3)^2 + u(x_4)^2} = \sqrt{14.14^2 + 0.57^2 + 0.56^2 + 0^2} = 14.2 \mu\text{m}$$

### C.8 扩展不确定度 $U$

取包含因子  $k=2$ ，扩展不确定度按式 (C.4) 计算。

$$U = ku_c \quad (\text{C.4})$$

a) 当量块长度  $L_l=1.1 \text{ mm}$  时，

$$U = ku_c = 2 \times 7.4 \mu\text{m} \approx 20 \mu\text{m} = 0.02 \text{ mm}$$

b) 当量块长度  $L_l=191.8 \text{ mm}$  时，

$$U = ku_c = 2 \times 14.2 \mu\text{m} \approx 30 \mu\text{m} = 0.03 \text{ mm}$$

## 附录 D

## 支辊式弯曲试验机压头位移示值误差测量不确定度评定示例

## D.1 概述

## D.1.1 校准依据

支辊式弯曲试验机校准规范。

## D.1.2 环境条件

温度：（20±5）℃，相对湿度≤80%。

## D.1.3 测量标准

数显大量程百分表（以下简称百分表），测量范围：（0～100）mm，钢直尺，测量范围：（0～300）mm。

## D.1.4 被测对象

支辊式弯曲试验机（以下简称试验机）弯曲压头位移。

## D.1.5 测量方法

比较测量法。

## D.1.6 测量过程

选用测量范围为（0～100）mm、分度值为0.01 mm百分表，对试验机压头在加载条件下的位移进行测量。

## D.2 测量模型

试验机压头位移示值误差测量模型见式（D.1），取弯曲压头位移校准起始点为0。

$$\delta_f = f_b - f_c \quad (\text{D.1})$$

式中：

$\delta_f$ ——弯曲压头位移示值误差，mm；

$f_b$ ——弯曲压头位移示值，mm；

$f_c$ ——百分表在每个校准点的读数，mm。

## D.3 方差和灵敏系数

$$u_c^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \times u^2(x_i) \quad (\text{D.2})$$

由式（D.2）可得方差：

$$u_c^2 = u^2(\delta_f) = c_1^2 \cdot u^2(f_b) + c_2^2 \cdot u^2(f_c)$$

灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial \delta_f}{\partial f_b} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \delta_f}{\partial f_c} = -1$$

#### D.4 测量不确定度的来源分析

测量不确定度的来源主要有: 测量重复性引入的标准不确定度分量  $u(x_1)$ , 百分表分辨力引入的标准不确定度  $u(x_2)$ , 百分表示值误差引入的标准不确定度  $u(x_3)$ 。

#### D.5 标准不确定度评定

##### D.5.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(x_1)$ 的评定

选取测量范围为 (0~100) mm、分度值为 0.01 mm 数显大量程百分表, 在相同测量条件下, 对弯曲压头位移 20 mm、100 mm 分别进行 10 次重复测量, 其测量结果如下:

表 D.1 弯曲压头位移重复测量数据

测量次数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
测量值 (mm)	20	19.98	19.99	19.98	19.96	19.97	19.98	19.98	19.96	19.98	19.98	19.97
	100	99.94	99.95	99.95	99.96	99.96	99.95	99.95	99.96	99.95	99.95	99.95

按贝塞尔法计算单次测量结果标准偏差。

a) 当压头位移  $f_c = 20$  mm 时, 其标准偏差为:

$$s(x_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 9.66 \mu\text{m}$$

因在实际校准过程中, 采用 1 次校准作为最后的校准结果, 因此, 标准不确定度为:

$$u(x_1) = s(x_1) = 9.66 \mu\text{m}$$

b) 当压头位移  $f_c = 100$  mm 时, 其标准偏差为:

$$s(x_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 6.32 \mu\text{m}$$

因在实际校准过程中，采用1次校准作为最后的校准结果，因此，标准不确定度为：

$$u(x_1) = s(x_1) = 6.32 \mu\text{m}$$

#### D.5.2 百分表分辨力引入的标准不确定度 $u(x_2)$ 的评定

由于卡尺分辨力  $b = 0.01 \text{ mm}$ ，其示值误差区间半宽为  $a = b/2 = 0.005 \text{ mm}$ ，估计为均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，因此，标准不确定度为：

$$u(x_2) = \frac{a}{k} = \frac{0.005 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0.00289 \text{ mm} = 2.89 \mu\text{m}$$

#### D.5.3 百分表示值误差引入的标准不确定度 $u(x_3)$ 的评定

根据JJG 34-2022中表7规定，100 mm百分表全量程最大允许误差为  $\pm 0.03 \text{ mm}$ ，即半宽  $a = 0.03 \text{ mm}$ ，估计为均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，标准不确定度为：

$$u(x_3) = \frac{a}{k} = \frac{0.03 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0.01732 \text{ mm} = 17.32 \mu\text{m}$$

### D.6 标准不确定度汇总

标准不确定度汇总见表 D.2。

表 D.2 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	标准不确定度来源	标准不确定度/ $\mu\text{m}$
$u(x_1)$	测量重复性/压头位移 $f = 20 \text{ mm}$	9.66
	测量重复性/压头位移 $f = 100 \text{ mm}$	6.32
$u(x_2)$	百分表分辨力	2.89
$u(x_3)$	百分表示值误差	17.32

### D.7 合成标准不确定度

由于各标准不确定度分量互不相关，彼此独立；同时，测量重复性与分辨力有一定关系。当测量重复性引入不确定度大于分辨力引入不确定度时，只取测量重复性的影响合成。因此，合成标准不确定度按下式计算：

$$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_3)^2}$$

a) 当压头位移 $f_c=20$  mm 时,

$$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_3)^2} = \sqrt{9.66^2 + 17.32^2} = 19.9 \mu\text{m}$$

b) 当压头位移 $f_c=100$  mm 时,

$$u_c = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_3)^2} = \sqrt{6.32^2 + 17.32^2} = 18.5 \mu\text{m}$$

#### D.8 扩展不确定度 $U$

取包含因子 $k=2$ , 扩展不确定度按式 (D.3) 进行计算:

$$U = ku_c \quad (\text{D.3})$$

当压头位移 $f_c=20$  mm时,

$$U = ku_c = 2 \times 19.9 \mu\text{m} = 39.8 \mu\text{m} \approx 0.04 \text{ mm}$$

当压头位移 $f_c=100$  mm时,

$$U = ku_c = 2 \times 18.5 \mu\text{m} = 37 \mu\text{m} \approx 0.04 \text{ mm}$$

即试验机压头位移示值误差测量不确定度为:

$$U = 0.04\text{mm}, \quad k = 2$$

---