



中华人民共和国工业和信息化部  
建材计量技术规范

JJF（建材）259—XXXX

光热、光电器件冰雹冲击试验机  
校准规范

Calibration Specification for Photothermal and Optoelectronic

Device Hail Impact Test Machines

（报批稿）

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

# 光热、光电器件冰雹冲击 试验机校准规范

Calibration Specification for  
Photothermal and Optoelectronic  
Device Hail Impact Test Machines

JJF（建材）259—XXXX

归口单位：中国建筑材料联合会

主要起草单位：国检测试控股集团计量检测有限公司

深圳天溯计量检测股份有限公司

广东省建筑科学研究院集团股份有限公司

深圳市昭俐测量仪器有限公司

东莞市帝恩检测有限公司

参加起草单位：安徽省产品质量监督检验研究院

本规范委托全国建材工业计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

程晓苏（国检测试控股集团计量检测有限公司）  
刘洪华（深圳天溯计量检测股份有限公司）  
谢小芳（广东省建筑科学研究院集团股份有限公司）  
江焕英（深圳市昭俐测量仪器有限公司）  
谢增文（东莞市帝恩检测有限公司）

**参加起草人：**

曾 彪（国检测试控股集团计量检测有限公司）  
郭志强（安徽省产品质量监督检验研究院）  
张红强（国检测试控股集团计量检测有限公司）  
李 浩（国检测试控股集团计量检测有限公司）  
何恺麒（国检测试控股集团计量检测有限公司）

# 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                          | (3)  |
| 5.1 冰球存储容器温度偏差                  | (3)  |
| 5.2 冰球冲击速度示值误差                  | (3)  |
| 5.3 冰球冲击速度重复性                   | (3)  |
| 6 校准条件                          | (3)  |
| 6.1 环境条件                        | (3)  |
| 6.2 测量标准及其他设备                   | (3)  |
| 7 校准项目和校准方法                     | (4)  |
| 7.1 外观检查                        | (4)  |
| 7.2 校准前工作准备                     | (4)  |
| 7.3 校准前检查                       | (4)  |
| 7.4 冰球存储容器温度偏差                  | (5)  |
| 7.5 冰球冲击速度示值误差                  | (6)  |
| 7.7 冰球冲击速度测量重复性                 | (7)  |
| 8 校准结果表达                        | (7)  |
| 8.1 校准记录                        | (7)  |
| 8.2 校准证书                        | (7)  |
| 9 复校时间间隔                        | (8)  |
| 附录 A 冰球规格与冰雹冲击试验机试验速度           | (9)  |
| 附录 B 光热、光电器件冰雹冲击试验机校准记录参考格式     | (10) |
| 附录 C 光热、光电器件冰雹冲击试验机校准证书内页参考格式   | (12) |
| 附录 D 冰球存储容器温度偏差测量不确定度评定示例       | (13) |
| 附录 E 示波器法测量冰球冲击速度误差测量不确定度评定示例   | (16) |
| 附录 F 速度检定仪法测量冰球冲击速度误差测量不确定度评定示例 | (19) |

# 引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》和JJF 1094—2002《测量仪器特性评定》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范主要参考了GB/T 4271—2021《太阳能集热器性能试验方法》、GB/T 9535.2—2025《地面用光伏组件 设计鉴定和定型 第2部分：试验程序》、GB/T 40858—2021《太阳能光热发电站集热管通用要求与测试方法》编制而成。

本规范为首次发布。

# 光热、光电器件冰雹冲击试验机校准规范

## 1 范围

本规范适用于光热、光电器件冰雹冲击试验机的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 4271—2021 太阳能集热器性能试验方法

GB/T 9535.2—2025 地面用光伏组件 设计鉴定和定型 第2部分：试验程序

GB/T 40858—2021 太阳能光热发电站集热管通用要求与测试方法

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

### 3.1 光电测速系统 photoelectric speed measurement system

通常由两个光电传感器组成。通过测量冰球经过两光电传感器的时间及两光电传感器距离，计算出冰球在该位置的平均速度。

### 3.2 冰球冲击速度 puck impact velocity

冰球经过冰雹冲击试验机光电测速系统的平均速度，单位为米每秒（m/s）。

## 4 概述

光热、光电器件冰雹冲击试验机（以下简称冰雹冲击试验机）是用于检测光热发电玻璃反射镜、光伏组件、太阳能集热器等光热、光电器件（组件）经受冰雹冲击能力的仪器。其主要由发射系统、光电测速系统、冰发射管、试样固定支架、冰球、冰球存储容器等组成。按发射角度可分为垂直发射、水平发射和多角度发射等不同型式，垂直发射式冰雹冲击试验机结构如图1所示，水平发射式冰雹冲击试验机结构如图2所示、冰球存储容器结构如图3所示。通过模拟自然环境中的冰雹气候，以评估光热、光电器件的抗冰雹撞击能力。

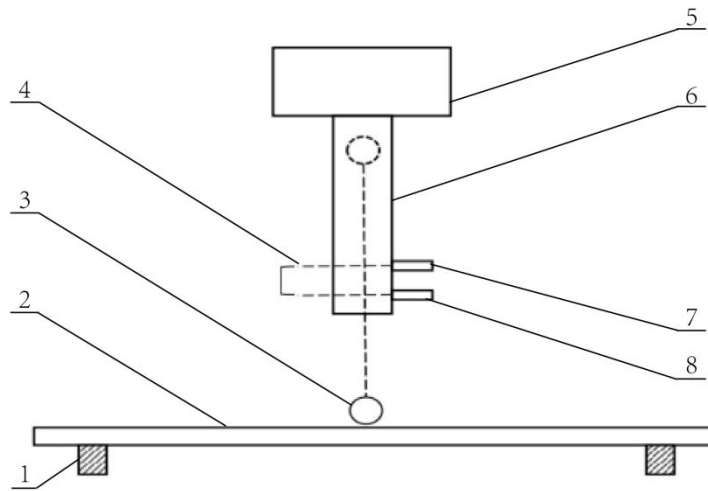


图 1 垂直发射式冰雹冲击试验机结构示意图

1—试样固定支架；2—组件；3—冰球；4—光电测速系统；5—发射系统；6—发射管；7、8—光电传感器

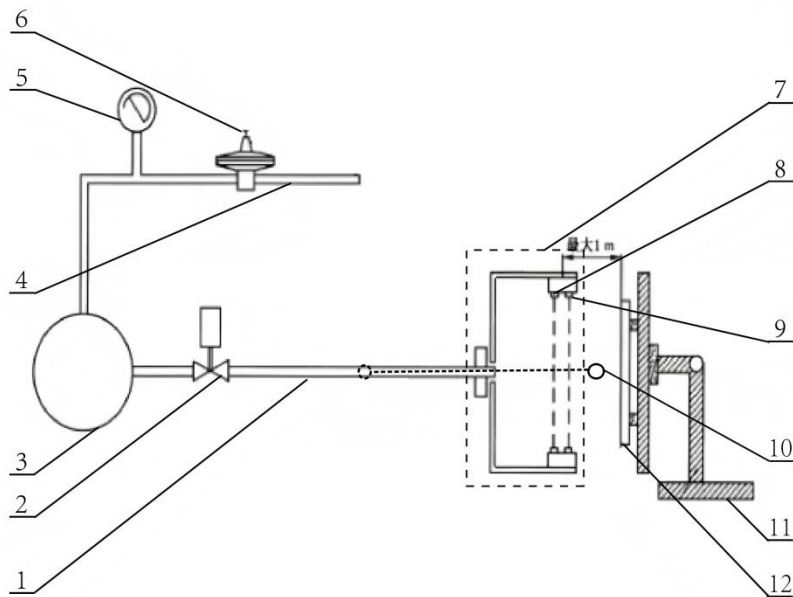


图 2 水平发射式冰雹冲击试验机结构示意图

1—发射管；2—电磁阀；3—储气室；4—进气管；5—气压表；

6—调节器；7—光电测试系统；8、9—光电传感器；10—冰球；11—试样固定支架；12—组件

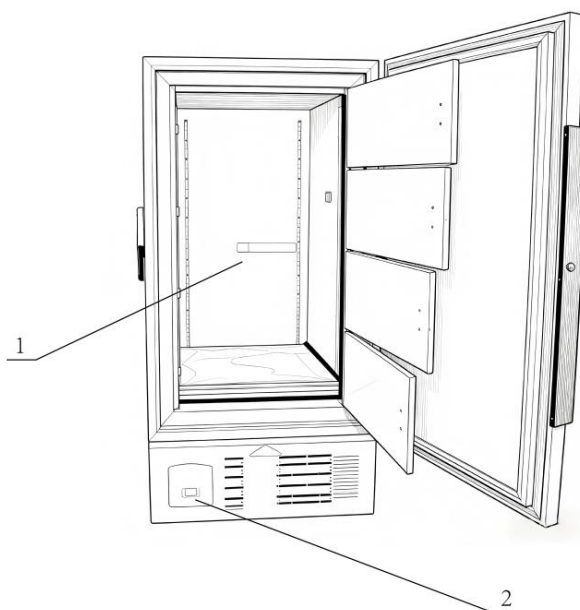


图 3 冰球存储容器结构示意图

1—冷冻室；2—控制面板

## 5 计量特性

5.1 冰球存储容器温度偏差： $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.2 冰球冲击速度示值误差： $\pm 5\%$ 。

5.3 冰球冲击速度重复性： $\leq 5\%$ 。

注：以上所有指标不适用于合格性判别，仅提供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(20 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度：40%~80%。

6.1.3 大气压： $8.60 \times 10^4\text{ Pa} \sim 1.06 \times 10^5\text{ Pa}$ 。

6.1.4 其他条件：周围无腐蚀性气体，无影响测量的振动。

### 6.2 测量标准及其他设备

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                          | 测量标准及其他设备 | 技术指标                                                                                       | 用途         |
|-----------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1                           | 温度测量标准    | 温度测量标准由铂电阻、热电偶等温度传感器与数据采集器组成，通道传感器数量不少于 3 个，并能满足校准工作需求。<br>测量范围：（-10~20）℃<br>最大允许误差：±0.5 ℃ | 冰球存储容器温度偏差 |
| 2                           | 示波器       | 测量范围：（1~10）ms<br>最大允许误差：±0.2%                                                              | 冰球冲击速度     |
| 3                           | 游标卡尺      | 测量范围：（0~150）mm<br>最大允许误差：±0.03 mm                                                          |            |
| 4                           | 光电式速度检定仪  | 测量范围：（10~45）m/s<br>最大允许误差：±1.0%                                                            |            |
| 5                           | 游标卡尺      | 测量范围：（0~150）mm<br>最大允许误差：±0.03 mm                                                          | 冰球直径偏差     |
| 6                           | 电子天平      | 标准器引入的不确定度不大于被校冰球质量最大允许误差的 1/3                                                             | 冰球质量偏差     |
| 注：允许使用其他满足测量不确定度要求的标准器进行校准。 |           |                                                                                            |            |

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 外观检查

冰雹冲击试验机应有铭牌，标明产品名称、规格型号、出厂编号、制造厂、出厂日期等；仪器应用保护装置，防止冰球冲击过程溅射；仪器外观加工平整，各部件齐全完好，运动部件机构合理，仪器各开关、按键功能正常，操作灵活可靠，电气安全性能安全可靠。

### 7.2 校准前工作准备

根据用户使用需求，选择不同规格模具（冰球规格与试验速度见附录 A），使用冷冻箱制备试验所需足够数量的冰球，制备出的冰球应无气泡、无肉眼可见裂纹，测量前，冰球应在存储容器中恒温至少 1 h。

### 7.3 校准前检查

#### 7.3.1 冰球直径

用游标卡尺检查冰球直径，检查结果与标称直径偏差不超过±5%。

### 7.3.2 冰球质量

用电子天平检查冰球质量，检查结果与标称质量偏差不超过±5%。

### 7.4 冰球存储容器温度偏差

当冰球存储容器容积小于或等于  $0.05 \text{ m}^3$  时，温度测量点为 3 个，沿冰球储存容器工作空间中轴线布放，如图 4 所示。温度点 B 位于储存容器工作空间几何中心处，温度点 A、C 与存储容器顶面、底面的距离为冰球存储容器高度的  $1/10$ 。

当冰球存储容器容积大于  $0.05 \text{ m}^3$  时，可根据实际需要或用户需求增加测量点数量并图示说明。

设定冰球存储容器温度为  $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，开启运行，冰球存储容器达到稳定状态后开始记录各测量点温度，记录时间间隔为  $2 \text{ min}$ ， $30 \text{ min}$  内共计记录 16 组数据。根据公式 (1)、(2) 计算冰球存储容器温度偏差。

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_s \quad (1)$$

$$\Delta t_{\min} = t_{\min} - t_s \quad (2)$$

式中：

$\Delta t_{\max}$  ——温度上偏差， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\Delta t_{\min}$  ——温度下偏差， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{\max}$  ——各测量点规定时间内测量的最高温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{\min}$  ——各测量点规定时间内测量的最低温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_s$  ——冰球存储容器设定温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

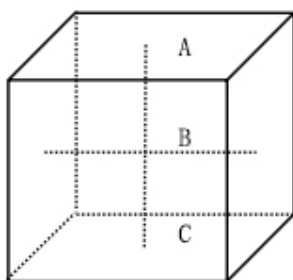


图 4 冰球存储容器容积不大于  $0.05 \text{ m}^3$  布点示意图

## 7.5 冰球冲击速度示值误差

校准时可选择 7.5.1 或 7.5.2 中任一方法进行。

### 7.5.1 示波器法

用游标卡尺测量冰雹冲击试验机两光电传感器中心距离，将示波器两个通道的电笔连接到两光电传感器的信号输出端，设定好自动触发模式。选择相应规格冰球，设定冰雹冲击试验机冲击速度，发射冰球，分别记录示波器测得冰球通过两光电传感器后传感器产生的信号时间差和冰雹冲击试验机光电测速系统速度测量值，根据公式（3）计算冰球标准冲击速度，重复测量 3 次，根据公式（4）计算冰球冲击速度误差，取测量误差最大值作为校准结果。

$$v' = \frac{L}{t} \quad (3)$$

$$\Delta v = \frac{v - v'}{v'} \quad (4)$$

式中：

$v'$ ——冰球冲击速度测量值，m/s；

$L$ ——游标卡尺测量两光电传感器中心距离，mm；

$t$ ——示波器测量冰球通过两光电传感器时间差，ms。

$\Delta v$ ——冰球冲击速度误差，%；

$v$ ——光电测速系统测量冰球冲击速度示值，m/s；

根据用户使用需求，依次测量不同设定值时冰球冲击速度误差。

### 7.5.2 速度检定仪法

将光电式速度检定仪的激光发射器及反射器固定在被测冰雹冲击试验机发射口两端，调整激光发射器及反射器高度，使其上端面距离冰球冲击试验机发射口不超过 5mm，保证激光发射器和反射器之间无遮挡物，发射光束与冰雹冲击轨迹垂直相交。

选择相应规格冰球，设定冰雹冲击试验机冲击速度，发射冰球，重复测量 3 次，分别记录光电式速度检定仪和冰雹冲击试验机光电测速系统速度测量值，根据公式（5）计算冰球冲击速度误差，取测量误差最大值作为校准结果。

$$\Delta v = \frac{v - V}{V} \quad (5)$$

式中:

$\Delta v$  ——冰球冲击速度误差, %;

$v$  ——光电测速系统测量冰球冲击速度示值, m/s;

$V$  ——速度检定仪测量冰球冲击速度示值, m/s。

根据用户使用需求, 依次测量不同设定值时冰球冲击速度误差。

## 7.6 冰球冲击速度重复性

根据 7.5.1 或 7.5.2 测量数据, 按公式 (6) 计算冰球冲击速度重复性。

$$s = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\bar{V}} \quad (6)$$

$s$  ——冰球冲击速度测量重复性, %;

$V_{\max}$  ——冰球冲击速度 3 次测量最大值, m/s;

$V_{\min}$  ——冰球冲击速度 3 次测量最小值, m/s;

$\bar{V}$  ——冰球冲击速度 3 次测量平均值, m/s。

## 8 校准结果表达

### 8.1 校准记录

推荐的校准原始记录格式见附录 B

### 8.2 校准证书

校准证书应包括以下信息:

- (1) 标题: “校准证书”;
- (2) 实验室名称和地址;
- (3) 进行校准的地点 (如果与实验室的地址不同);
- (4) 证书的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- (5) 客户的名称和地址;
- (6) 被校对象的描述和明确标识;
- (7) 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;
- (8) 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;

- (9) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- (10) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- (11) 校准环境的描述;
- (12) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- (13) 对校准规范的偏离的说明;
- (14) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- (15) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- (16) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

推荐的校准证书内页格式见附录 C。

## 9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔, 建议复校时间间隔为 12 个月。

## 附录 A

冰球规格与冰雹冲击试验机试验速度

| 冰球直径/mm | 冰球质量/g | 试验速度/(m/s) | 冰球直径/mm | 冰球质量/g | 试验速度/(m/s) |
|---------|--------|------------|---------|--------|------------|
| 12.5    | 0.94   | 16.0       | 45      | 43.9   | 30.7       |
| 15      | 1.63   | 17.8       | 55      | 80.2   | 33.9       |
| 25      | 7.53   | 23.0       | 65      | 132.0  | 36.7       |
| 35      | 20.7   | 27.2       | 75      | 203.0  | 39.5       |

## 附录 B

## 光热、光电器件冰雹冲击试验机校准记录参考格式

记录编号: \_\_\_\_\_

共 2 页 第 1 页

委托单位: \_\_\_\_\_ 委托单位地址: \_\_\_\_\_ 仪器名称: \_\_\_\_\_

生产厂家: \_\_\_\_\_ 型号规格: \_\_\_\_\_ 出厂编号: \_\_\_\_\_

被校仪器状态(完好“√”): 校 准 前: \_\_\_\_\_ 校 准 后: \_\_\_\_\_

校准依据: \_\_\_\_\_ 外观检查: \_\_\_\_\_

校准条件: 温度: \_\_\_\_\_℃ 相对湿度: \_\_\_\_\_% 校准地点: \_\_\_\_\_

| 标准器名称         | 型号规格  | 出厂编号 | 测量范围       | 准确度等级<br>或最大允许<br>误差 | 有效期至 | 证书编号     |  |  |                          |
|---------------|-------|------|------------|----------------------|------|----------|--|--|--------------------------|
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
| 1. 冰球直径偏差检查   |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      | 技术要求：±5% |  |  |                          |
| 2. 冰球质量偏差检查   |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      | 技术要求：±5% |  |  |                          |
| 2. 冰球存储容器温度偏差 |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      | 温度设定值：-4 ℃ |                      |      |          |  |  |                          |
| 位置            | 测量值/℃ |      |            |                      |      |          |  |  | 温度上偏差/℃                  |
| A             |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  | 温度下偏差/℃                  |
| B             |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  | 测量不确定度<br>( <i>k</i> =2) |
| C             |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |
|               |       |      |            |                      |      |          |  |  |                          |

(续)

## 3. 冰球冲击速度误差与重复性

## 3.1 示波器法

| 设定速度<br>/(m/s) | 冰雹冲击试验机示值/(m/s)    |    |     |     | 示值误差/(%) | 重复性<br>/(%) | 测量不确定度（k=2） |     |
|----------------|--------------------|----|-----|-----|----------|-------------|-------------|-----|
|                | I                  | II | III | 平均值 |          |             |             |     |
|                |                    |    |     |     |          |             |             |     |
|                | 冰雹标准冲击速度/(m/s)     |    |     |     |          |             |             |     |
|                | /                  | I  | II  | III |          |             |             | 平均值 |
|                | 冰球通过两光电传感器信号时间差/ms |    |     |     |          |             |             | /   |
|                | 两光电传感器中心距离/mm      |    |     |     |          |             |             | /   |
|                | 冰雹标准冲击速度/(m/s)     |    |     |     |          |             |             |     |

## 3.2 速度检定仪法

| 设定速度<br>/(m/s) | 冰雹冲击试验机示值/(m/s) |    |     |     | 示值误差/(%) | 重复性<br>/(%) | 测量不确定度（ <i>k</i> =2） |
|----------------|-----------------|----|-----|-----|----------|-------------|----------------------|
|                | I               | II | III | 平均值 |          |             |                      |
|                |                 |    |     |     |          |             |                      |
|                | 速度检定仪示值/(m/s)   |    |     |     |          |             |                      |
|                | I               | II | III | 平均值 |          |             |                      |
|                |                 |    |     |     |          |             |                      |

校准员:\_\_\_\_\_ 核验员:\_\_\_\_\_ 校准日期: \_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日

## 附录 C

## 光热、光电器件冰雹冲击试验机校准证书内页参考格式

| 序号 | 校准项目                            | 技术要求                            | 校准结果 | 测量不确定度<br>( $k=2$ ) |
|----|---------------------------------|---------------------------------|------|---------------------|
| 1  | 冰球直径偏差检查                        | $\pm 5\%$                       |      | —                   |
| 2  | 冰球质量偏差检查                        | $\pm 5\%$                       |      | —                   |
| 3  | 冰球存储容器温度上偏差/ $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ |      |                     |
| 4  | 冰球存储容器温度下偏差/ $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ |      |                     |
| 5  | 冰球冲击速度误差                        | $\pm 5\%$                       |      |                     |
| 6  | 冰球冲击速度重复性                       | $\leq 5\%$                      |      |                     |

以下空白

## 附录 D

## 冰球存储容器温度偏差测量不确定度评定示例

## D.1 概述

参照本规范对冰球存储容器温度偏差计量特性要求和校准方法，在温度 21.3℃，相对湿度 56% 的环境条件下，选择测量范围：（-10~20）℃，最大允许误差：±0.5℃ 的温度测量标准作为标准器具。对型号为 KRD-PV-HT 的冰雹冲击试验机冰球存储容器温度偏差，评定其不确定度。

## D.2 测量模型

冰球存储容器温度偏差测量模型：

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_s \quad (\text{D.1})$$

$$\Delta t_{\min} = t_{\min} - t_s \quad (\text{D.2})$$

式中：

$\Delta t_{\max}$ ——温度上偏差，℃；

$\Delta t_{\min}$ ——温度下偏差，℃；

$t_{\max}$ ——各测量点规定时间内温度巡检仪测量的最高温度，℃；

$t_{\min}$ ——各测量点规定时间内温度巡检仪测量的最低温度，℃；

$t_s$ ——冰球存储容器设定温度，℃。

由于上偏差和下偏差不确定度来源和数值相同，因此以温度上偏差为例进行不确定度评定。

## D.3 方差和灵敏系数

方差：

$$u_c^2(\Delta t_{\max}) = c(t_{\max})^2 u(t_{\max})^2 + c(t_s)^2 u(t_s)^2 \quad (\text{D.3})$$

灵敏系数：

$$c(t_{\max}) = \frac{\partial \Delta t_{\max}}{\partial t_{\max}} = 1$$

## D.4 标准不确定度评定

D.4.1 测量重复性引入的标准不确定度  $u_1$ 

使用 A 类评定方法, 按 7.4 的方法对冰球存储容器温度进行 10 次测量, 重复性试验数据见表 D.1:

表 D.1 冰球存储容器温度重复性试验数据

单位:  $^{\circ}\text{C}$ 

| 次数  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 测量值 | -3.48 | -3.73 | -3.69 | -3.54 | -3.65 | -3.59 | -3.44 | -3.83 | -3.58 | -3.77 |

根据贝塞尔公式计算的试验标准偏差  $s = 0.13^{\circ}\text{C}$ , 则  $u_1 = s = 0.13^{\circ}\text{C}$ 。

D.4.2 标准器引入不确定度分量  $u_2$ D.4.2.1 标准器分辨力引入的不确定度分量  $u_{21}$ 

标准器分辨力为  $0.01^{\circ}\text{C}$ , 其数显量化误差以等概率分布在半宽为  $0.005^{\circ}\text{C}$  区间内, 则

$$u_{21} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029^{\circ}\text{C}。$$

D.4.2.2 标准器最大允许误差引入的标准不确定度  $u_{22}$ 

标准器最大允许误差为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 按均匀分布, 则  $u_{22} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29^{\circ}\text{C}$ 。

标准器分辨力引入的标准不确定度远小于标准器最大允许误差引入的标准不确定度, 可以忽略不计, 因此标准器引入的标准不确定度  $u_2 = 0.29^{\circ}\text{C}$ 。

## D.4.3 各项标准不确定度分量一览表

将上述标准不确定度分量及灵敏系数列入表 D.2。

表 D.2 各项标准不确定度分量一览表

| 标准不确定度符号 | 不确定度来源         | 标准不确定度                 | 灵敏系数 | 不确定度分量                 |
|----------|----------------|------------------------|------|------------------------|
| $u_1$    | 测量重复性引入的不确定度分量 | $0.13^{\circ}\text{C}$ | 1    | $0.13^{\circ}\text{C}$ |
| $u_2$    | 标准器引入的不确定度分量   | $0.29^{\circ}\text{C}$ | 1    | $0.29^{\circ}\text{C}$ |

D.5 合成标准不确定度  $u_c$ 

合成标准不确定度为:  $u_c = \sqrt{0.13^2 + 0.29^2} = 0.32 \text{ } ^\circ\text{C}$

D.6 扩展不确定度  $U$ 

取包含因子  $k = 2$ , 则:  $U = ku_c = 2 \times 0.32 = 0.64 \text{ } ^\circ\text{C}$

## 附录 E

## 示波器法测量冰球冲击速度误差测量不确定度评定示例

## E.1 概述

参照本规范对冰球冲击速度计量特性要求和校准方法,在温度 21.3℃,相对湿度 56% 的环境条件下,选择测量范围:(1~10) ms,最大允许误差:±0.2%的示波器及测量范围:(0~150) mm,最大允许误差:±0.03 mm 的游标卡尺作为测量标准。对型号为 KRD-PV-HT 的冰雹冲击试验机冰球冲击速度误差,评定其不确定度。

## E.2 测量模型

冰球冲击速度误差的测量模型:

$$v' = \frac{L}{t} \quad (\text{E.1})$$

$$\Delta v = \frac{v - v'}{v'} \quad (\text{E.2})$$

式中:

$v'$ ——冰球冲击速度测量值, m/s;

$L$ ——游标卡尺测量两光电传感器中心距离, mm ;

$t$ ——示波器测量冰球通过两光电传感器时间差, ms;

$\Delta v$ ——冰球冲击速度误差, %;

$v$ ——光电测速系统测量冰球冲击速度示值, m/s。

## E.3 方差和灵敏系数

方差:

$$u_c^2 = c(v)^2 u(v)^2 + c(v')^2 u(v')^2 \quad (\text{E.3})$$

灵敏系数:

$$c(v) = \frac{\partial \Delta v}{\partial v} = \frac{1}{v'}; \quad c(v') = \frac{\partial \Delta v}{\partial v'} = -\frac{v}{v'^2}$$

## E.4 冰球标准冲击速度不确定度分量

方差:

$$u_c^2 = c(L)^2 u(L)^2 + c(t)^2 u(t)^2 \quad (\text{E.4})$$

灵敏系数:

$$c(L) = \frac{\partial v}{\partial L} = \frac{1}{t} \quad ; \quad c(t) = \frac{\partial v'}{\partial t} = -\frac{L}{t^2}$$

#### E.5 标准不确定度评定

##### E.5.1 测量重复性引入的不确定度分量 $u_1(\Delta v)$

使用 A 类评定方法, 按 7.5.1 的方法对设定速度为 23.0 m/s 时的冰球冲击速度误差进行 10 次重复测量, 重复性试验数据见表 E.1:

表 E.1 冰球冲击速度重复性试验数据

| 测量次数          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5      | 6     |
|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 冰雹试验机示值/(m/s) | 22.54 | 22.28 | 22.41 | 22.57 | 22.52  | 22.61 |
| 示波器示值/ms      | 4.35  | 4.41  | 4.38  | 4.37  | 4.38   | 4.35  |
| 游标卡尺示值/mm     | 99.88 | 99.84 | 99.88 | 99.86 | 99.88  | 99.82 |
| 冰球冲击速度误差/%    | -1.8  | -1.6  | -1.7  | -1.2  | -1.2   | -1.5  |
| 测量次数          | 7     | 8     | 9     | 10    | 平均值    | 标准偏差  |
| 冰雹试验机示值/(m/s) | 22.69 | 22.48 | 22.53 | 22.55 | 22.518 |       |
| 示波器示值/ms      | 4.36  | 4.39  | 4.38  | 4.35  | 4.372  |       |
| 游标卡尺示值/mm     | 99.88 | 99.82 | 99.88 | 99.88 | 99.862 |       |
| 冰球冲击速度误差/%    | -1.0  | -1.1  | -1.2  | -1.8  | -1.41  | 0.303 |

根据贝塞尔公式可得试验标准偏差  $s = 0.303\%$ , 校准时取测量误差最大值作为校准结果, 则重复性引入的不确定度分量  $u_1(\Delta v) = s = 0.303\%$ 。

##### E.5.2 冰球标准冲击速度引入的不确定度分量 $u(v')$

###### E.5.2.1 游标卡尺最大允许误差引入的不确定度分量 $u(L)$

游标卡尺最大允许误差为  $\pm 0.03\text{ mm}$ , 按均匀分布, 则  $u(L) = \frac{0.03}{\sqrt{3}} = 0.0174\text{ mm}$ 。

E. 5.2.2 示波器最大允许误差引入的不确定度分量 $u(t)$ 

示波器最大允许误差为 $\pm 0.2\%$ ，在 4.699 ms 最大允许误差为 $\pm 0.0094$  ms，按均匀分布，则 $u(t) = \frac{0.0094}{\sqrt{3}} = 0.0055$  ms。

注：由游标卡尺、示波器及冰雹冲击试验机分辨力所引入的不确定度与其他因素引入的不确定度相比贡献量小，故对其引入的不确定度分量忽略不计。

E. 5.2.3 冰球标准冲击速度引入的不确定度分量 $u(v')$ 

冰球标准冲击速度引入的不确定度分量：

$$u(v') = \sqrt{c(L)^2 u(L)^2 + c(t)^2 u(t)^2} = \sqrt{0.00373^2 + 0.025^2} = 0.0253 \text{ m/s}$$

## E. 6 各项标准不确定度分量一览表

将上述标准不确定度分量及灵敏系数列入表 E. 2。

表 E. 2 各项标准不确定度分量一览表

| 标准不确定度符号        | 不确定度来源            | 标准不确定度     | 灵敏系数        | 不确定度分量 |
|-----------------|-------------------|------------|-------------|--------|
| $u_1(\Delta v)$ | 测量重复性引入的不确定度分量    | 0.303%     | 1           | 0.303% |
| $u(v')$         | 冰球标准冲击速度引入的不确定度分量 | 0.0253 m/s | -0.0432 s/m | 0.11%  |

E. 7 合成标准不确定度 $u_c$ 

合成标准不确定度为： $u_c = \sqrt{0.303\%^2 + 0.11\%^2} \approx 0.4\%$

E. 8 相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}$ 

取包含因子 $k = 2$ ，则：冰球冲击速度误差的相对扩展不确定度：

$$U_{\text{rel}} = k u_c = 2 \times 0.4\% = 0.8\%$$

## 附录 F

## 速度检定仪法测量冰球冲击速度误差测量不确定度评定示例

## F.1 概述

参照本规范对冰球冲击速度计量特性要求和校准方法，在温度 21.9℃，相对湿度 52% 的环境条件下，选择测量范围：(10~45) m/s，最大允许误差：±1.0% 的光电式速度检定仪作为测量标准。对型号为 KRD-PV-HT 的冰雹冲击试验机冰球冲击速度误差，评定其不确定度。

## F.2 测量模型

冰球冲击速度误差的测量模型：

$$\Delta v = \frac{v - V}{V} \quad (\text{F.1})$$

式中：

$\Delta v$  ——冰球冲击速度误差，%；

$v$  ——光电测速系统测量冰球冲击速度示值，m/s；

$V$  ——速度检定仪测量冰球冲击速度示值，m/s。

## F.3 方差和灵敏系数

方差：

$$u_c^2 = c(v)^2 u(v)^2 + c(V)^2 u(V)^2 \quad (\text{F.2})$$

灵敏系数：

$$c(v) = \frac{\partial \Delta v}{\partial v} = \frac{1}{V} ; \quad c(V) = \frac{\partial \Delta v}{\partial V} = -\frac{v}{V^2}$$

## F.4 标准不确定度评定

F.4.1 测量重复性引入的不确定度分量  $u_1(\Delta v)$ 

使用 A 类评定方法，按 7.5.2 的方法对设定速度为 23.0 m/s 时的冰球冲击速度进行 10 次重复测量，重复性试验数据见表 F.1：

表 F.1 冰球冲击速度重复性试验数据

| 测量次数          | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 冰雹试验机示值/(m/s) | 22.54  | 22.28  | 22.41  | 22.57  | 22.52  | 22.61  |
| 速度检定仪示值/(m/s) | 22.113 | 22.032 | 22.058 | 22.159 | 22.234 | 22.197 |
| 冰球冲击速度误差/%    | 1.9    | 1.1    | 1.6    | 1.9    | 1.3    | 1.9    |
| 测量次数          | 7      | 8      | 9      | 10     | 平均值    | 标准偏差   |
| 冰雹试验机示值/(m/s) | 22.69  | 22.48  | 22.53  | 22.55  | 22.518 |        |
| 速度检定仪示值/(m/s) | 22.241 | 22.083 | 22.095 | 22.195 | 22.141 |        |
| 冰球冲击速度误差/%    | 2.0    | 1.8    | 2.0    | 1.6    | 1.71   | 0.31   |

根据贝塞尔公式可得试验标准偏差  $s = 0.31\%$ ，校准时取误差最大值作为校准结果，则重复性引入的不确定度分量  $u_1 = s = 0.31\%$ 。

#### F.4.2 速度检定仪最大允许误差引入的不确定度分量 $u_1(V)$

速度检定仪最大允许误差为  $\pm 1.0\%$ ，在 21.6667 m/s 时最大允许误差为  $\pm 0.217$  m/s，

按均匀分布，则  $u_1(V) = \frac{0.217}{\sqrt{3}} = 0.126$  m/s。

#### F.4.3 重力加速度引入的不确定度分量 $u_2(\Delta v)$

重力加速度引入的不确定分量主要通过速度检定仪激光发射器端面与冰雹冲击试验机光电传感器位移量体现。垂直向下发射时，重力加速度对冰球冲击速度影响最大，不超过

0.104 m/s，按均匀分布，则  $u_2(\Delta v) = \frac{0.104}{\sqrt{3}} = 0.060$  m/s。

注：由速度检定仪及冰雹冲击试验机分辨力所引入的不确定度与其他因素引入的不确定度相比贡献量小，故对其引入的不确定度分量忽略不计。

#### F.4.4 各项标准不确定度分量一览表

将上述标准不确定度分量及灵敏系数列入表 F.2。

表 F.2 各项标准不确定度分量一览表

| 标准不确定度符号        | 不确定度来源               | 标准不确定度    | 灵敏系数       | 不确定度分量 |
|-----------------|----------------------|-----------|------------|--------|
| $u_1(\Delta v)$ | 测量重复性引入的不确定度分量       | 0.31%     | 1          | 0.31%  |
| $u_1(V)$        | 速度检定仪最大允许误差引入的不确定度分量 | 0.126 m/s | -0.046 s/m | 0.58%  |
| $u_2(\Delta v)$ | 重力加速度引入的不确定度分量       | 0.060 m/s | 0.0452 s/m | 0.27%  |

F.5 合成标准不确定度  $u_c$ 

合成标准不确定度为:  $u_c = \sqrt{0.31\%^2 + 0.58\%^2 + 0.27\%^2} = 0.71\%$

F.6 相对扩展不确定度  $U_{\text{rel}}$ 

取包含因子  $k = 2$ , 则冰球冲击速度误差的相对扩展不确定度:

$$U_{\text{rel}} = ku_c = 2 \times 0.71 = 1.5\%$$