



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) 247—XXXX

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统
校准规范

Calibration Specification for Ultra-High Temperature Ceramic Matrix
Material Mechanical Property Testing System

(报批稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

超高温陶瓷基材料力学性能 测试系统校准规范

Calibration Specification for Ultra-High
Temperature Ceramic Matrix Material
Mechanical Property Testing System

JJF(建材)247—XXXX

归口单位：中国建筑材料联合会

主要起草单位：中国国检测试控股集团山东有限公司

参加起草单位：中国国检测试控股集团股份有限公司

中机试验装备股份有限公司

枣庄市标准计量研究中心

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：

杨 磊 （中国国检测试控股集团山东有限公司）

菅长梅 （中国国检测试控股集团山东有限公司）

孙与康 （中国国检测试控股集团股份有限公司）

马双伟 （中机试验装备股份有限公司）

牛之寅 （枣庄市标准计量研究中心）

参加起草人：

田远 （中国国检测试控股集团股份有限公司）

王慧 （中机试验装备股份有限公司）

目 录

引 言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
4 概述	(3)
5 计量特性	(3)
5.1 测力系统	(3)
5.2 同轴度	(3)
5.3 横梁位移	(3)
5.4 温度控制系统	(4)
5.5 变形测量系统	(4)
6 校准条件	(5)
6.1 环境要求	(5)
6.2 校准用标准器具及其它设备	(5)
7 校准项目和校准方法	(6)
7.1 校准前准备及检查	(6)
7.2 试验力示值校准	(6)
7.3 同轴度的校准	(8)
7.4 横梁位移的校准	(8)
7.5 温度控制系统的校准	(9)
7.6 引伸计示值误差的校准	(10)
8 校准结果表达	(10)
9 复校时间间隔	(10)
附录 A 超高温陶瓷基材料力学性能测试系统校准原始记录参考格式	(11)
附录 B 超高温陶瓷基材料力学性能测试系统校准证书内页参考格式	(13)
附录 C 力值示值误差校准结果的不确定度评定示例	(14)
附录 D 横梁位移速度示值误差校准结果的不确定度评定示例	(16)
附录 E 横梁位移示值误差校准结果的不确定度评定示例	(18)
附录 F 同轴度示值误差校准结果的不确定度评定示例	(20)
附录 G 温度偏差校准结果的不确定度评定示例	(22)

引 言

本规范依据 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》进行编写，根据 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的要求评定不确定度。

本规范参考了 JJG 276-2009《高温蠕变、持久强度试验机检定规程》、JJG 475-2008《电子式万能试验机检定规程》、JJG 762-2007《引伸计检定规程》、JJG 856-2015《工作用辐射温度计检定规程》、JJG 1063-2010《电液伺服万能试验机检定规程》、GB/T 2611-2022《试验机通用技术要求》中相关定义和技术内容。

本规范为首次发布。

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统校准规范

1 范围

本规范适用于温度不大于 1700℃超高温陶瓷基材料力学性能测试系统的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 762-2007 引伸计检定规程

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用本规范；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 术语和计量单位

本规范使用的符号、单位与定义见表 1

表 1 符号、单位与定义

符号	单位	定义
F_i	N	被校测力系统的力指示装置的进程示值
F'_i	N	被校测力系统的力指示装置的回程示值
F	N	标准测力仪力的进程真值
F'	N	标准测力仪力的回程真值
$\overline{F_i}$	N	在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的算术平均值
$\overline{F}$	N	在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的算术平均值
F_{imax}	N	在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的最大值
F_{imin}	N	在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的最小值
F_{max}	N	在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的最大值
F_{min}	N	在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的最小值
b	%	试验力的示值重复性相对误差
q	%	试验力的示值相对误差

u	%	试验力的示值回程相对误差
ΔL_{max}	mm	在同一测量点，同一次测量中，检验试样变形最大一侧的变形量
$\overline{\Delta L}$	mm	在同一测量点，同一次测量中，检验试样四侧变形的算术平均值
v_i	mm/min	横梁位移速度设定值
$\bar{v}$	mm/min	标准器 3 次测量的平均值（实测值）
$\overline{D_i}$	mm	同一位置的 3 次测量中，位移示值的算术平均值
D	mm	对应所测量的横梁位移，位移速度检定仪测量的位移真值
e	%	测力系统的同轴度
Δv	%	横梁位移速度示值误差
ΔD	%	横梁位移示值误差
δ_t	℃	温度偏差
ΔT	℃	温度梯度
T	℃	温度控制系统显示的温度
$\bar{T}$	℃	热电偶测得的相应温度算术平均值
T_{max}	℃	热电偶测得的相应温度的最大值
T_{min}	℃	热电偶测得的相应温度的最小值

4 概述

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统是在高温、超高温，真空及气氛环境下力学性能的测试评价装备，主要应用在国防军工、航空航天及现代化工业先进材料的研发过程中。

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统包括测力系统、温度控制系统、变形测量系统、抽真空系统等基本结构。

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统工作原理：关闭真空腔，启动测试系统，通过充入惰性气体或对腔体内部进行抽真空处理，随后升温到设定温度，待温度稳定后，施加相应的载荷，进行变形测量。

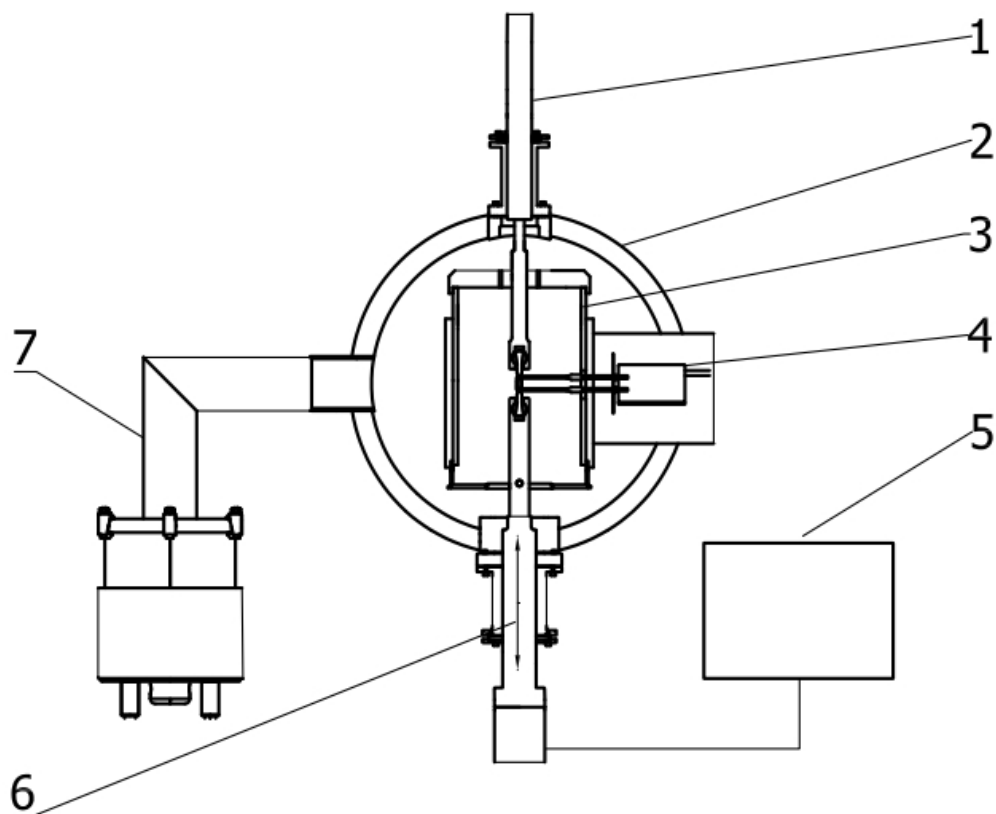


图1 超高温陶瓷基材料力学性能测试系统的结构示意图

- 1—测力系统； 2—真空腔； 3—高温炉； 4—变形测量系统；
5—控制系统； 6—横梁位移； 7—抽真空装置；

5 计量特性

5.1 测力系统

测力系统的分级与试验力计量特性见表2。

5.2 同轴度

试验夹持装置在任意位置上和施加力的过程中，其上、下夹头和试样钳口的中心线与加力轴线应同轴。其同轴度计量特性表2。

5.3 横梁位移

在零试验力条件下，横梁位移速度与选定速度标称值相对误差、位移示值相对误差计量特性见表2。

表 2 力学性能测试系统级别和各项技术指标

校准项目	校准参数	力学性能测试系统级别及最大允许值	
		%	
		0.5 级	1 级
试验力	试验力示值相对误差	± 0.5	± 1.0
	试验力示值重复性相对误差	0.5	1.0
	试验力示值进回程相对误差	± 0.75	± 1.5
同轴度	同轴度	12	15
横梁位移	横梁位移速度示值误差	$\pm 0.05\text{mm/min}$	$\pm 0.10\text{mm/min}$
	横梁位移示值误差	$\pm 0.10\text{mm}$	

注：以上指标不用于合格性判定，仅提供参考。

5.4 温度控制系统

5.4.1 高温炉的均热带一般不应小于试样计算长度的 1.5 倍。

5.4.2 温度控制及加热装置应保证试验期间内的温度稳定。均热带的试验温度计量特性见表 3。

表 3 试验温度的偏差与梯度

试验温度/℃	温度偏差/℃	温度梯度/℃
300~800	± 4	4
800~1200	± 6	6
1200~1700	± 8	8

注：

- 1 温度梯度是指试验中任一瞬间试样所有被测点温度的最高值与最低值之差。
- 2 试验温度应该包括对热电偶及测量仪器误差的修正。
- 3 以上指标不用于合格性判定，仅提供参考。

5.5 变形测量系统

变形测量系统，由不同准确度的变形传感器和变形测量单元所组成的引伸计系统(以下简称引伸计)。示值误差的最大允许值见表 4。

表 4 引伸计的示值误差

引伸计级别	示值误差的最大允许值	
	绝对误差 (μm)	相对误差 (%)
0.5 级	± 1.5	± 0.5
1 级	± 3.0	± 1.0
注：以上指标不用于合格性判定，仅提供参考。		

6 校准条件

6.1 环境要求

6.1.1 力学性能测试系统应在 (10~35) °C，相对湿度不大于 80%条件下校准，校准过程中环境温度变化不大于 2°C/h。

6.1.2 校准时周围应无影响校准结果的振动、电磁场或其它干扰源。

6.1.3 工作电源的电压波动范围不超过额定电压 $\pm 10\%$ 。

6.2 校准用标准器具及其它设备见表 5：

表 5 校准用标准器具及其它设备

序号	标准器	技术要求	用途
1	标准测力仪	0.1 级	测量试验力示值相对误差、示值重复性相对误差、示值进回程相对误差
		0.3 级	测量试验力示值相对误差、示值重复性相对误差、示值进回程相对误差
2	位移速度检定仪	量程小于 5mm 时：最大允许误差 $\pm 0.5\%$ ； 量程大于等于 5mm 时：最大允许误差 $\pm 0.1\%$ ；	测量横梁位移速度示值误差、横梁位移示值误差
3	同轴度测试仪	最大允许误差： $\pm 2\%$	测量同轴度
4	热电偶和多通道测温仪	II 级铂铑 30-铂铑 6 热电偶、不低于 0.02 级	测量温度偏差、梯度
5	引伸计标定器	量程小于等于 0.5mm 时：最大允许误差 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ； 量程大于 0.5mm 时：最大允许误差 $\pm 0.1\%$	测量引伸计示值误差

注：

1 校准 0.5 级力学性能测试系统时应采用 0.1 级标准测力仪；

2 校准横梁位移速度示值误差、横梁位移示值误差、温度偏差、温度梯度时,也可使用准确度或扩展不确定度不大于技术要求的其他测量仪器;

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前的准备及检查

7.1.1 力学性能测试系统应有铭牌,铭牌上应有:名称、型号、规格、准确度等级、测量范围、制造厂名、出厂编号等信息。

7.1.2 力学性能测试系统开关、按钮应操作灵活,各部分的连接应牢固、可靠、无松动,数字显示清晰。

7.1.3 检查真空腔内充入的惰性气体无漏气现象或观察管道上压力表抽真空状态下腔体内压力值读数不低于 -0.1MPa 。

7.2 试验力示值校准

7.2.1 在测力系统夹持试样的位置上安装标准测力仪时,应对力学性能测试系统的测力系统进行平衡并调节标准测力仪的零点。

在满量程的 10%~100%范围内选择不少于 5 个校准点,各点尽量均匀分布。

7.2.2 试验力示值相对误差和示值重复性相对误差

每个校准点应进行 3 次测量,并由下式计算示值相对误差和示值重复性相对误差。

a) 由测力系统施加指定力值 F_i ,记录标准测力仪指示的真值时,示值相对误差 q 和示值重复性相对误差 b 按以下公式(1)和(2)计算:

$$q = \frac{\overline{F_i} - \overline{F}}{\overline{F}} \times 100 \quad (1)$$

式中:

q ——试验力的示值相对误差, %;

$\overline{F_i}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的算术平均值, N;

$\overline{F}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的算术平均值, N。

$$b = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\overline{F}} \times 100 \quad (2)$$

式中:

b ——试验力的示值重复性相对误差, %;

$F_{\max}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的最大值, N;

$F_{\min}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的最小值, N;

$\bar{F}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的算术平均值, N。

b) 测力系统施加到由标准测力仪指示的真值, 记录被校系统指示装置的示值时, 示值相对误差 q 和示值重复性误差 b 按以下公式(3)和(4)计算:

$$q = \frac{\bar{F}_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times 100 \quad (3)$$

式中:

q ——试验力的示值相对误差, %;

$\bar{F}_i$ ——在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的算术平均值, N;

$\bar{F}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的算术平均值, N。

$$b = \frac{F_{\text{imax}} - F_{\text{imin}}}{\bar{F}} \times 100 \quad (4)$$

式中:

b ——试验力的示值重复性相对误差, %;

F_{imax} ——在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的最大值, N;

F_{imin} ——在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的最小值, N;

$\bar{F}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的算术平均值, N。

其结果应满足表 2 的要求。

7.2.2 试验力示值进回程相对误差

在力学性能测试系统最大和最小量程上, 在同一校准点先以递增力再以递减力来校准示值进回程相对误差, 按以下公式(5)或(6)计算:

a) 由测力系统施加指定力值 F_i , 记录标准测力仪指示的真值时:

$$u = \frac{F' - F}{\bar{F}} \times 100 \quad (5)$$

式中:

u ——试验力的示值进回程相对误差, %;

F ——标准测力仪力的进程真值, N;

F' ——标准测力仪力的回程真值, N。

$\bar{F}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的算术平均值, N。

b) 测力系统施加到由标准测力仪指示的真值，记录被校测力系统指示装置的示值时：

$$u = \frac{F'_i - F_i}{F_i} \times 100 \quad (6)$$

式中：

u ——试验力的示值回程相对误差，%；

F'_i ——被校测力系统的力指示装置的回程示值，N；

F_i ——被校测力系统的力指示装置的进程示值，N。

$\overline{F_i}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程示值 F_i 的算术平均值，N。

其结果应满足表 2 的要求。

7.3 同轴度的校准

使用同轴度测试仪(或其他相应准确度的测量装置) 进行校准。校准时，先将检验试样夹持在夹头上并施测力系统最大试验力 1%的初始力，调整同轴度测量仪的零点，一般再施加试验力至最大试验力的 4%，校准中使用的最大力不应使检验试样产生塑性变形，测量试样相对两侧的弹性变形，在相互垂直的方向上各测 3 次。同轴度按公式 (7) 计算：

$$e = \frac{\Delta L_{\max} - \overline{\Delta L}}{\overline{\Delta L}} \times 100 \quad (7)$$

式中：

e ——测力系统的同轴度，%；

$\Delta L_{\max}$ ——在同一测量点，同一测量中，检验试样变形最大一侧的变形量，mm；

$\overline{\Delta L}$ ——在同一测量点，同一测量中，检验试样四侧变形的算术平均值，mm。

其结果应满足表 2 的要求。

7.4 横梁位移的校准

7.4.1 横梁位移速度示值误差

在横梁位移速度范围内，选择不少于 3 个测量点(一般要包含标称速度范围的下限点、中间点、上限点，建议校准点 0.5mm/min、1mm/min、2mm/min)，使用位移速度检定仪测量，连续读取 3 次测量值，取平均值。横梁位移速度示值误差 Δv 按公式 (8) 计算：

$$\Delta v = v_i - \overline{v} \quad (8)$$

式中：

- Δv ——横梁位移速度示值误差, mm/min;
- v_i ——横梁位移速度设定值, mm/min;
- $\bar{v}$ ——标准器 3 次测量的平均值 (实测值), mm/min。

7.4.2 横梁位移示值误差

在移动横梁的工作范围内任意位置选择最大位移的 1% 和 50% 两个测量范围进行校准, 每个测量范围校准 3 次, 横梁位移示值误差 ΔD 按公式 (9) 计算:

$$\Delta D = D - \bar{D}_i \quad (9)$$

式中:

- ΔD ——横梁位移示值误差, mm;
- D ——对应所测量的横梁位移, 位移速度检定仪测量的位移真值, mm;
- $\bar{D}_i$ ——同一位置的 3 次测量中, 位移示值的算术平均值, mm。

7.5 温度控制系统的校准

7.5.1 选择加热炉标称温度范围内 3 个校准点, 建议校准点为 800℃、1200℃、1700℃, 如有需要可增加校准点。

7.5.2 高温炉加热至校准温度后, 至少恒温 30min 后方可进行校准。

7.5.3 在均热带范围内, 在试样两端及中间各固定一支热电偶。热电偶工作端应被紧密固定于试样表面, 以免受炉壁热辐射的影响。

7.5.4 每个温度校准点校准时间应不少于 30min, 每隔 10min 记录一次, 至少记录 3 次。

7.6.5 在均热带范围内, 热电偶测得的温度偏差 δ_t 、温度梯度 ΔT 按式 (10)、式 (11) 计算:

$$\delta_t = \bar{T} - T \quad (10)$$

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (11)$$

式中:

- δ_t ——温度偏差, °C;
- ΔT ——温度梯度, °C;
- T ——温度控制系统显示的温度, °C;
- $\bar{T}$ ——热电偶测得的相应温度算术平均值, °C;

$T_{\max}$, $T_{\min}$ ——热电偶测得的相应温度的最大值和最小值, °C。

7.6.6 计算 3 次测量的温度偏差, 取其最大值为温度控制系统的温度偏差测量结果。

7.6.7 计算每支热电偶测得的温度梯度, 取其最大值为温度控制系统的温度梯度测量结果。

力学性能测试系统温度测控系统的温度偏差和温度梯度应符合表 3 的要求。

7.7 引伸计示值误差的校准

按照 JJG 762《引伸计检定规程》进行校准。

8 校准结果表达

经校准的超高温陶瓷基材料力学性能测试系统发给校准证书。证书中至少应包括以下信息:

- a) 标题: “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同);
- d) 证书的唯一性标识(如编号)、每页及总页数的标识;
- e) 委托单位名称和地址;
- f) 设备的名称、制造商、型号规格、编号;
- g) 进行校准的日期;
- 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期说明;
- j) 校准环境的描述;
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- l) 校准证书或校准报告签发人签名或等效标识;
- m) 校准人和核验人签名;
- n) 校准结果仅对该被校对象有效的声明;
- o) 未经校准实验室书面批准, 不得部分复制校准证书。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的, 因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。建议复校时间间隔不超过 1 年。

附录 A

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统校准原始记录参考格式

第 页 共 页

记录编号		环境温度 (°C)		湿度 (%RH)						
委托单位			委托地址							
仪器名称		型号规格		制造单位						
校准日期		校准地点		出厂编号						
标准器名称	测量范围	测量不确定度/ 准确度等级/ 最大允许误差	证书编号	有效期至	溯源机构名称					
校准依据										
1、力值 (最大试验力:)										
试验力()		进程值 ()				标准值 ()	回程值 ()	示值相 对误差 (%)	示值重 复性误 差(%)	进回程 相对误 差(%)
		1	2	3	平均值					
	被校									
	标准									
	被校									
	标准									
	被校									
	标准									
	被校									
	标准									
	被校									
	标准									
校准结果的相对扩展不确定度: $U_{rel} =$ % ($k=2$)										
2、横梁位移速度										
校准点 (mm/min)		实测值 (mm/min)				示值误差(mm/min)				
		1	2	3	平均值					
校准结果的扩展不确定度: $U =$ mm/min ($k=2$)										

3、横梁位移

校准点 (mm)	实测值 (mm)				示值误差(mm)
	1	2	3	平均值	

校准结果的扩展不确定度： $U =$ mm ($k=2$)

4、同轴度

试验力 (N)	位置	1	2	3	同轴度(%)
	前(mm)				
	后(mm)				
	同轴度(%)				
	左(mm)				
	右(mm)				
	同轴度(%)				

校准结果的相对扩展不确定度： $U_{rel} =$ % ($k=2$)

5、温度

试验温度 (°C)	时间间隔 /min	校准点(°C)			平均值(°C)		温度偏差(°C)	
		下	中	上				
					T ₁		T ₁	
					T ₂		T ₂	
					T ₃		T ₃	
	温度梯度(°C)				/	/	/	/

校准结果的扩展不确定度： $U =$ °C ($k=2$)

校准员：

核验员：

附录B

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统校准证书内页参考格式

最大试验力 ()	试验力()	示值相对误差(%)	示值重复性误差(%)	进回程相对误差(%)
校准结果的相对扩展不确定度 $U_{rel} =$ % ($k=2$)				
横梁位移速度 (mm/min)		横梁位移速度示值误差 (mm/min)		
校准结果的扩展不确定度 $U =$ mm/min ($k=2$)				
横梁位移 (mm)		横梁位移示值误差 (mm)		
校准结果的扩展不确定度 $U =$ mm ($k=2$)				
试验力 ()		同轴度/%		
校准结果的相对扩展不确定度 $U_{rel} =$ % ($k=2$)				
试验温度 (°C)	温度偏差 (°C)		温度梯度 (°C)	
校准结果的扩展不确定度 $U =$ °C ($k=2$)				

以下空白

附录C

力值示值误差校准结果的不确定度评定示例

C.1 测量概述

在温度 23.5℃，相对湿度 48% 的环境条件下，使用 0.1 级量程 20kN 标准测力仪测量型号为 UZDL-2000 的超高温力学性能测试系统 20kN 校准点的示值误差。

C.2 测量模型

$$\Delta F = F_i - \bar{F} \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔF ——测力系统的示值误差，N；

F_i ——被校测力系统的力指示装置的进程示值，N；

$\bar{F}$ ——在同一测量点测量的一组力的进程真值 F 的算术平均值，N；

C.3 合成标准不确定度计算公式

由公式 (C.1) 可见，力值校准结果的不确定度的来源主要有：试验机测量重复性引入的标准不确定度分量，此项可以由A类评定；试验机分辨力引入的标准不确定度分量、标准器引入的标准不确定度分量，此两项可以由B类评定。

因各输入量之间互不相关，所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2(F_i) + c_2^2 u_2^2(F_i) + c_3^2 u_2^2(\bar{F})} \quad (\text{C.2})$$

式中：

$$c_1 = c_2 = \frac{\partial \Delta F}{\partial F_i} = 1 \quad c_3 = \frac{\partial \Delta F}{\partial \bar{F}} = -1$$

C.4 系统的不确定度评定

C.4.1 测力系统测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(F_1)$

对一台20kN的测力系统测量点重复试验10次测得数据如下：

C.1 重复性试验数据

标称值 (kN)	试验机示值/kN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	20.062	20.023	20.094	20.051	20.050	20.051	20.043	20.022	20.004	20.083

平均值

$$\bar{F} = \frac{\sum F_i}{n} = 20.048 \text{ kN}$$

单次测量的实验标准差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n-1}} = 0.028 \text{ kN}$$

实际测量情况为在重复性条件下测量3次, 以3次测量算术平均值为测量结果, 则得到:

$$u_1(F_i) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.016 \text{ kN}$$

C.4.2 测力系统分辨力引起的标准不确定度分量 $u_2(F_i)$

该测力系统实际分辨力 $d=0.01\text{kN}$, 取其区间的半宽度 $a=0.005\text{kN}$, 且服从均匀分布, 则:

$$u_2(F_i) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.0029 \text{ kN}$$

由于重复性带来的不确定度分量大于分辨力带来的不确定度分量, 所以只考虑重复性带来的影响。

C.4.3 由标准测力仪最大允许误差引入的标准不确定度分量 $u_3(\bar{F})$

0.1级标准测力仪最大允许误差 $\pm 0.1\%$, 取其半宽, 按均匀分布, 则:

$$u_3(\bar{F}) = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} \times 20 = 0.012 \text{ kN}$$

C.4.4 合成标准不确定度

C.2 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)/\text{kN}$	c_i	$ c u(x_i)/\text{kN}$
$u_1(F_i)$	测量重复性	0.016	1	0.016
$u_3(\bar{F})$	标准测力仪最大允许误差	0.012	-1	0.012

$$u_c = \sqrt{u_1^2(F_i) + u_3^2(\bar{F})} = \sqrt{0.013^2 + 0.012^2} = 0.020 \text{ kN}$$

C.4.5 扩展不确定度及表示

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 0.040 \text{ kN}$$

相对扩展不确定度: $U_{rel} = 0.20\%$ ($k = 2$)

附录D

横梁位移速度校准结果的不确定度的评定示例

D.1 测量概述

在温度23.5℃，相对湿度48%的环境条件下，使用最大允许误差为±0.5%位移速度检定仪测量型号为UZDL-2000的超高温力学性能测试系统2mm/min校准点的示值误差。

D.2 测量模型

$$\Delta v = v_i - \bar{v} \quad (D.1)$$

式中：

Δv ——横梁位移速度示值误差，mm/min；

v_i ——横梁位移速度设定值，mm/min；

$\bar{v}$ ——标准器3次测量的平均值（实测值），mm/min。

D.3 合成标准不确定度计算公式

由公式（D.1）可见，横梁位移速度校准结果的不确定度的来源主要有：测量分辨力引入的标准不确定度分量，此项可以由B类评定；标准器引入的标准不确定度分量，此项可以由B类评定。

因各输入量之间互不相关，所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} \quad (D.2)$$

式中：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta v}{\partial v_i} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial \Delta v}{\partial \bar{v}} = -1$$

D.4 不确定度来源评定

D.4.1 标准器引入的标准不确定度分量 $u(\bar{v})$ D.4.1.1 位移速度测定仪最大允许误差引入的不确定度分量 u_1

位移速度测定仪最大允许误差±0.010mm/min，取其半宽0.010mm/min，按均匀分布，则

$$u_1 = \frac{0.010}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ mm}$$

D.4.1.2 位移速度测定仪测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2

位移速度测定仪重复测量10次，测得数据如下：

D.1 重复性试验数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
数据 (mm/min)	2.018	2.011	2.007	2.028	2.012	2.006	2.021	2.011	2.027	2.013

平均值： $\bar{v}=2.015\text{mm/min}$

试验标准偏差

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{(n-1)}} = 0.0078\text{mm/min}$$

故测量重复性引入的标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = s = 0.0078\text{mm/min}$$

D.4.3 合成标准不确定度

D.2 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$
u_1	0.0058mm/min	-1	0.0058mm/min
u_2	0.0078mm/min	-1	0.0078mm/min

$$u_c = \sqrt{c^2 u_1^2 + c^2 u_2^2} = 0.0097\text{mm/min}$$

D.4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$,则扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 0.020\text{mm/min}$$

附录 E

横梁位移示值误差校准结果的不确定度的评定示例

E.1 测量概述

在温度 23.5℃，相对湿度 48% 的环境条件下，使用最大允许误差为 ±0.1% 位移速度检定仪测量型号为 UZDL-2000 的超高温力学性能测试系统 5mm 校准点的示值误差。

E.2 测量模型

$$\Delta D = D_i - \bar{D} \quad (\text{E.1})$$

式中：

ΔD ——横梁位移示值误差，mm；

D ——对应所测量的横梁位移，位移速度检定仪测量的位移真值，mm；

$\bar{D}_i$ ——同一位置的 3 次测量中，横梁位移示值的算术平均值，mm。

E.3 合成标准不确定度计算公式

由公式 (E.1) 可见，横梁位移校准结果的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，此项可以由 A 类评定；标准器引入的标准不确定度分量，此项可以由 B 类评定。

因各输入量之间互不相关，所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(D) + c_2^2 u^2(\bar{D})} \quad (\text{E.2})$$

式中：

$$c_1 = c_2 = \frac{\partial \Delta D}{\partial D_i} = 1 \quad c_3 = \frac{\partial \Delta D}{\partial \bar{D}} = -1$$

E.4 不确定度来源评定

E.4.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(D)$

重复测量位移 10 次，测得数据如下：

E.1 重复性试验数据

实测值 (mm)										
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
结果 (s)	4.984	4.990	4.970	4.991	4.979	4.996	4.987	4.981	4.997	4.986

试验标准偏差

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n-1)}} = 0.0081\text{mm}$$

故测量重复性引入的标准不确定度 $u(D)$ 为:

$$u(D) = s = 0.0081\text{mm}$$

E.4.2 位移速度测定仪最大允许误差引入的不确定度分量 $u(\bar{D})$

位移速度测定仪最大允许误差 $\pm 0.005\text{mm}$, 取其半宽 0.005mm , 按均匀分布, 则

$$u(\bar{D}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029\text{mm}$$

E.4.3 合成标准不确定度

E. 2 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	标准不确定度值 $u(x_i)/\text{mm}$	c_i	$ c_i u(x_i)/\text{mm}$
$u(D)$	0.0081	1	0.0081
$u(\bar{D})$	0.0029	-1	0.0029

$$u_c = \sqrt{u^2(D) + u^2(\bar{D})} \approx 0.0086\text{mm}$$

E.4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$,则扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 0.018\text{mm}$$

附录F

同轴度示值误差校准结果的不确定度评定示例

F.1 测量概述

在温度 23.5℃，相对湿度 48% 的环境条件下，使用最大允许误差为 ±0.2% 同轴度测试仪测量型号为 UZDL-2000 的超高温力学性能测试系统 0.05mm 校准点的示值误差。

F.2 测量模型

$$\Delta L = \Delta L_{\max} - \overline{\Delta L} \quad (\text{F.1})$$

式中：

ΔL ——测力系统的同轴度，%；

$\Delta L_{\max}$ ——在同一试验力测量点，四侧 3 次测量中，检验试样变形最大一侧的变形量，mm；

$\overline{\Delta L}$ ——在同一测量点，同一次测量中，检验试样四侧变形的算术平均值，mm。

F.3 合成标准不确定度计算公式

由公式 (F.1) 可见，同轴度校准结果的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，此项可以由 A 类评定；标准器引入的标准不确定度分量，此项可以由 B 类评定。

因各输入量之间互不相关，所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(\Delta L_{\max}) + c_2^2 u^2(\overline{\Delta L})} \quad (\text{F.2})$$

式中：

$$c_1 = c_2 = \frac{\partial \Delta L}{\partial \Delta L_{\max}} = 1 \quad c_3 = \frac{\partial \Delta L}{\partial \overline{\Delta L}} = -1$$

F.4 不确定度来源评定

F.4.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(\Delta L_{\max})$

重复测量位移 10 次，测得数据如下：

F.1 重复性试验数据

同轴度	示值/mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔL_m	0.0542	0.0546	0.0540	0.0534	0.0532	0.0549	0.0550	0.0541	0.0553	0.0547

平均值

$$\overline{\Delta L} = 0.0543\text{mm}$$

单次测量的实验标准差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_{imax} - \overline{\Delta L_{max}})^2}{(n-1)}} = 0.0007\text{mm}$$

实际测量情况为在重复性条件下测量3次, 以3次测量算术平均值为测量结果, 则得到:

$$u(\Delta L_{max}) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.0004\text{mm}$$

F.4.2 同轴度测试仪最大允许误差引入的不确定度分量 $u(\overline{\Delta L})$

同轴度测试仪最大允许误差 $\pm 2\%$, 取其半宽, 按均匀分布, 则:

$$u(\overline{\Delta L}) = \frac{2\% \times 0.0543}{\sqrt{3}} = 0.0006\text{mm}$$

F.4.3 合成标准不确定度

F.2 标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)/\text{mm}$	c_i	$ c_i u(x_i)/\text{mm}$
$u(\Delta L_{max})$	测量重复性	0.0004	1	0.0004
$u(\overline{\Delta L})$	同轴度测试仪最大允许误差	0.0006	-1	0.0006

$$u_c = \sqrt{u_1^2(\Delta L_{max}) + u^2(\overline{\Delta L})} = \sqrt{0.0004^2 + 0.0006^2} = 0.0007\text{mm}$$

F.4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 0.0014\text{mm}$$

相对扩展不确定度为: $U_{rel} = 2.6\%(k=2)$

附录G

温度偏差校准结果的不确定度评定示例

G.1 测量概述

在温度 23.5℃，相对湿度 48% 的环境条件下，使用最大允许误差为 $\pm 0.25\%tB$ 型标准热电偶测量型号为 UZDL-2000 的超高温力学性能测试系统 1700℃ 校准点的温度偏差。

G.2 测量模型

$$\delta_t = \bar{T} - T \quad (G.1)$$

式中：

δ_t ——热电偶测得的温度偏差，℃；

T ——温度控制系统显示的温度，℃；

$\bar{T}$ ——热电偶测得的相应温度算术平均值，℃。

G.3 合成标准不确定度计算公式

由公式 (G.1) 可见，温度校准结果的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，此项可以由 A 类评定；显示仪表分辨力引入的标准不确定度分量、标准器引入的标准不确定度分量，此项可以由 B 类评定。

因各输入量之间互不相关，所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2(T) + c_2^2 u_2^2(T) + c_3^2 u^2(\bar{T})} \quad (G.2)$$

式中：

$$c_1 = c_2 = \frac{\partial \delta_t}{\partial T} = -1 \quad c_3 = \frac{\partial \delta_t}{\partial \bar{T}} = 1$$

G.4 不确定度来源评定

G.4.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(T)$

将热电偶捆绑好后放入加热炉内，并将加热炉加热至 1700℃，保温至少 30min 后，用多功能温度校验仪进行连续 10 次测量，记录数据如下：

温度/℃									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1698.05	1698.13	1698.32	1698.47	1698.61	1698.22	1698.54	1698.71	1698.40	1698.02

平均值

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{n} = 1698.35^{\circ}\text{C}$$

单次测量的实验标准差:

$$s(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{(n-1)}} = 0.239^{\circ}\text{C}$$

其测量重复性引入标准不确定度分量:

$$u_1(T) = s(T) = 0.239^{\circ}\text{C}$$

G.4.2 显示仪表分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(T)$

分辨力为 0.1°C , 其半宽为 0.05°C , 按均匀分布 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029^{\circ}\text{C}$$

由于重复性带来的不确定度分量大于分辨力带来的不确定度分量, 所以只考虑重复性带来的影响。

G.4.3 标准器引入的标准不确定度分量 $u_3(\bar{T})$

G.4.3.1 由多功能温度校验仪误差引入不确定度 u_{31}

依据多功能温度校验仪校准证书得, 在温度 1700°C 时, 扩展不确定度为 $U = 0.12^{\circ}\text{C}$, 包含因子 $k=2$ 。则:

$$u_{31} = \frac{U}{k} = \frac{0.12}{2} = 0.06^{\circ}\text{C}$$

G.4.3.2 由标准热电偶误差引入不确定度 u_{32}

选择 II 级 B 型标准热电偶, 查 JJG 141-2013 检定规程可知: 最大允许误差为 $\pm 0.25\%$, 在 1700°C 时, 最大允许误差为 $\pm 4.25^{\circ}\text{C}$, 按均匀分布 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_{32} = \frac{U}{k} = \frac{4.25}{\sqrt{3}} = 2.45^{\circ}\text{C}$$

即:

$$u_3(\bar{T}) = \sqrt{u_{31}^2 + u_{32}^2} = \sqrt{0.06^2 + 2.45} = 2.45^\circ\text{C}$$

G.4.4 合成标准不确定度

G. 2 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)/^\circ\text{C}$	c_i	$ c_i u(x_i)/^\circ\text{C}$
$u_1(T)$	测量重复性	0.239	-1	0.239
$u_3(\bar{T})$	标准器引入的标准不确定度	2.45	1	2.45

$$u_c = \sqrt{u_1^2(T) + u_3^2(\bar{T})} = \sqrt{0.239^2 + 2.45} = 2.46^\circ\text{C}$$

G.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 4.9^\circ\text{C}$$