



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) 001—2024

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)001—2024

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：单位

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：

姓名 [中国国检测试控股集团山东有限公司]

姓名 [中国国检测试控股集团山东有限公司]

参加起草人：

姓名 [中国国检测试控股集团山东有限公司]

姓名 （单位）

目 录

引 言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 分辨力	(1)
3.2 符号、单位与定义	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 力学性能测试系统	(2)
5.2 同轴度	(3)
5.3 位移测量系统	(3)
5.4 温度测控系统	(3)
5.5 变形测量系统	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境要求	(3)
6.2 校准用标准器具及其他设备	(4)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 试验力示值相对误差和示值重复性相对误差	(4)
7.2 相对分辨力	(5)
7.3 同轴度的校准	(5)
7.4 横梁位移相对示值误差	(6)
7.5 温度测控系统的校准	(6)
7.6 引伸计示值误差的校准	(7)
8 校准结果表达	(7)
9 复校时间间隔	(8)
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	(9)
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	(10)
附录 C 超高温陶瓷基材料力学性能测试系统力值测量结果不确定度评定示例	(11)
附录 D 超高温陶瓷基材料力学性能测试系统位移参数测量结果不确定度评定示例	(13)
附录 E 超高温陶瓷基材料力学性能测试系统同轴度测量不确定度评定示例	(15)
附录 F 超高温陶瓷基材料力学性能测试系统温度示值偏差测量不确定度评定示例	(17)

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，参考了 GB/T 2611-2022《试验机通用技术要求》、JJG 475-2008《电子式万能试验机检定规程》、JJG 276-2009《高温蠕变、持久强度试验机检定规程》、JJG 1063-2010《电液伺服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》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

本规范适用于超高温陶瓷基材料力学性能测试系统的校准。

2 引用文献

本规范引用了下列文件：

GB/T 2611-2022 试验机通用技术要求

JJG 475-2008 电子式万能试验机检定规程

JJG 276-2009 高温蠕变、持久强度试验机检定规程

JJG 1063-2010 电液伺服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

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

3.1 分辨力

指示装置可有意义地辨别被指示量两相邻值的能力。

3.2 本规程使用的符号、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	被校试验机力指示装置的进程示值
F	N	标准测力仪进程指示的力的真值
$\overline{F_i}$	N	几次测量中力的同一测量点示值 F_i 的算术平均值
\overline{F}	N	几次测量中力的同一测量点力的真值 F 的算术平均值
F_{imax}	N	同一测量点示值 F_{imax} 的最大值
F_{imin}	N	同一测量点示值 F_{imin} 的最小值
F_{max}	N	同一测量点力的真值 F 的最大值
F_{min}	N	同一测量点力的真值 F 的最小值
r	N	试验机指示装置的分辨力
a	%	试验机指示装置的相对分辨力
b	%	试验机测力系统的示值重复性相对误差
q	%	试验机测力系统的示值相对误差
ΔL_{min}	mm	在同一测量点，同一次检测中，检验试样变形较大一侧的变形量

$\overline{\Delta L}$	mm	在同一测量点，同一次检测中，检验试样两侧变形的算术平均值
F_r	N	测量下限的试验力
\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，检验的百(或千)分表或钢直尺指示的位移真值
e	%	试验机加力系统的同轴度
q_D	%	横梁位移示值相对误差
T	℃	温度控制系统显示的温度
\overline{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我国自主研制的测试材料在高温、超高温，真空及气氛环境下力学性能的高端测试评价装备，被大量应用在航空航天先进复合材料的研发过程中。在航空航天领域中，高温结构陶瓷、超高温陶瓷、纤维复合材料、陶瓷基复合材料等新型材料具有极高的研究价值。先进复合材料被应用于航空航天飞行器发动机热端部件等关键部位，对飞行器的运行能力起到至关重要的作用。

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统基本结构包括加力系统、温度测控系统、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：使腔体处于关闭状态，利用抽真空系统将腔体内抽真空，然后升温到设定温度，等温度稳定，施加一定力值，利用变形测量系统测量位移量值。

5 计量特性

5.1 力学性能测试系统

力学测试系统级别和各项技术指标见表 2

表 2 力学性能测试系统级别和各项技术指标

试验机级别	示值相对误差 $q/\%$	示值重复性相对误差 $b/\%$	相对分辨力 $a/\%$
0.5	± 0.5	0.5	0.25
1	± 1.0	1.0	0.5

注 1：以上指标不适用于合格性判定，仅提供参考。

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。同轴度：

当力学性能测试系统最大力值不大于 5kN 时，不应超过 $\varnothing 2\text{mm}/500\text{mm}$ ；

当力学性能测试系统最大力值大于 5kN 时，自动调心夹头同轴度和非自动调心夹头同轴度应符合表 3 规定

表 3 力学性能测试系统的同轴度技术要求

力学测试系统级别	自动调心夹头同轴度/%	非自动调心夹头同轴度/%
0.5	10	15
1	12	20

注 1：以上指标不用于合格性判定，仅提供参考。

5.3 位移测量系统

移动横梁位移示值相对误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。

5.4 温度测控系统

5.4.1 温度测量仪器的分辨力不大于 0.5°C 。

5.4.2 加热炉的均热带一般不应小于试样计算长度的 1.5 倍。

5.4.3 温度控制及加热装置应保证试验期间内的温度稳定。均热带的试验温度应符合 表 4 规定。

表 4 试验温度的偏差与梯度

试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度偏差/ $^{\circ}\text{C}$	温度梯度/ $^{\circ}\text{C}$
<1000	± 4	4
1000~1600	± 7	7

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。

注 2：试验温度应该包括对热电偶及测量仪器误差的修正。

注 3：对于超过 1600°C 的试验温度，根用户及试验方法标准的要求校准温度偏差和温度梯度。

5.5 变形测量系统

应符合 JJG 762-2007《引伸计检定规程》的规定。

6 校准条件

6.1 环境要求

校准温度范围应为 $(20\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于 80%。

6.1.1 试验机在室温 $(10\sim 35)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于 80%，校准规程中环境温度变化不大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

6.1.2 校准时周围应无影响校准结果的振动、电磁场或其他干扰源。

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他设备

表 5 校准用标准器及其他设备

序号	标准器	技术要求	校准项目	备注
1	标准测力仪	0.1 级	试验力示值相对误差、示值重复性相对误差	校准 0.5 级及以下级别试验机
2	位移速度检定仪	300mm 以上, 分度值: 0.02mm	横梁位移相对示值误差	可用满足要求的其他设备
3	同轴度测试仪	最大允许误差: $\pm 2\%$	同轴度	仅限 0.5 级试验机校准项目
4	热电偶及测温仪表	温度: $\leq 1600^{\circ}\text{C}$: 3 支二等 B 型热电偶, $> 1600^{\circ}\text{C}$, 黑体辐射源	温度偏差	
5	引伸计标定器	优于被校引伸计级别误差的 1/3	引伸计示值误差	

7 校准项目和校准方法

7.1 试验力示值相对误差和示值重复性相对误差

计算每个校准点 3 次测量的算术平均值。并由下式计算示值相对误差和示值重复性相对误差。

7.1.1 以试验机的指示装置为准在测力仪上读数时, 示值相对误差 q 和示值重复性相对误差 b 按以下公式计算:

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

式中:

q ——力学性能测试系统的示值相对误差, %;

F_i ——被校试验机力指示装置的进程示值, N;

\bar{F} ——对同一力点, 3 次测量的算术平均值, N。

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

式中:

b ——力学性能测试系统的示值重复性相对误差, %;

F_{\max} ——对同一力点 F 的最大值, N;

F_{\min} ——对同一力点 F 的最小值, N;

\bar{F} ——对同一力点, 3 次测量的算术平均值, N。

7.1.2 以测力仪为准在试验机的指示装置上读数时, 示值相对误差 q 和示值重复性误差 b 按以下公式计算:

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

式中:

q ——力学性能测试系统的示值相对误差, %;

\bar{F}_i ——对同一力点, 3 次测量的算术平均值, N;

F ——递增力时, 标准测力仪的示值, N。

$$b = \frac{F_{i\max} - F_{i\min}}{\bar{F}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

b ——力学性能测试系统的示值重复性相对误差, %;

$F_{i\max}$ ——对同一力点 F_i 的最大值, N;

$F_{i\min}$ ——对同一力点 F_i 的最小值, N;

F ——递增力时, 标准测力仪的示值, N。

其结果应满足表 1 的要求。

7.2 相对分辨力

力的指示装置的相对分辨力 a 按以下公式计算:

$$a = \frac{r}{F_L} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

a ——试验机力指示装置的示值相对分辨力, %;

r ——力指示装置的分辨力, N;

F_L ——力指示装置各档测量范围的下限值, N。

其结果应满足表 1 的要求。

7.3 同轴度的校准

同轴度应分别采用下述两种方法校准:

7.3.1 对于不大于 5 kN 的试验机使用重锤法校准。校准时拉伸空间应不小于 500 mm, 在上受力中心吊一重锤, 重锤的中心应处在以下受力中心为圆心的直径 2mm 的圆内。

7.3.2 对大于 5 kN 的试验机,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加试验机最大试验力 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(6) 计算:

$$e = \frac{\Delta L_{\max} - \overline{\Delta L}}{\overline{\Delta L}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

e ——试验机加力系统的同轴度, %;

ΔL_{\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;

$\overline{\Delta L}$ ——在同一试验力测量点,四测 3 次测量中,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 横梁位移相对示值误差

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,横梁位移示值相对误差 q_D 按公式(7) 计算:

$$q_D = \frac{D - \overline{D}_i}{\overline{D}_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

q_D ——横梁位移示值相对误差, %;

D ——对应所测量的横梁位移的测量值, mm;

\overline{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 温度测控系统的校准

设定搅拌机的工作时间为 120s,也可选择用户要求的其他校准点。在启动搅拌机的同时用电子秒表开始计时,在搅拌机停止时停止计时,重复测量 3 次,以 3 次测量值的平均值作为校准结果,按公式(4) 计算工作时间误差,结果修约至 0.1s。

7.5.1 一般选择加热炉标称温度范围的起始温度、中间温度和最高温度 3 个校准点。

7.5.2 加热炉加热至校准温度后,保温 2h 方可进行校准。

7.5.3 在均热带范围内,热电偶的支数可根据试样标距长度确定:

试样标距不大于 50mm 时,在标距两端各固定一支热电偶。

试样标距大于 50mm 时, 在标距两端及中间各固定一支热电偶, 对于缺口试样, 应有一支热电偶固定在缺口处。

7.5.4 热电偶工作端应被紧密包扎贴于试样表面, 以免受炉壁热辐射的影响。

7.5.5 在每个温度校准点校准时间应不少于 2h, 每隔(10~30)min 记录一次。

7.5.6 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(8)、式(9)计算:

$$\delta_t = \bar{T} - T \quad (8)$$

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (9)$$

式中:

T ——温度控制系统显示的温度, $^{\circ}\text{C}$;

\bar{T} ——热电偶测得的相应温度算术平均值, $^{\circ}\text{C}$;

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

试验机温度测控系统的温度偏差和温度梯度应符合表 4 的要求。

校准温度大于 1600 $^{\circ}\text{C}$ 参考 JJG 856-2015《工作用辐射温度计检定规程》校准。

7.6 引伸计示值误差的校准

参考 JJG 762-2007《引伸计检定规程》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						
型号规格		出厂编号		制造单位				
校准日期		校准地点		校准日期				
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								
最大试验力 (kN)	试验力 (kN)	进程 (加荷) 读数 (kN)				示值相对误差 (%)	示值重复性 (%)	
		1	2	3	平均			
测量结果的相对扩展不确定度: $U_{rel} = \quad \% \quad (k=2)$								
校准点/mm		实测值 (mm)				相对误差/%		
		1	2	3	平均值			
测量结果的相对扩展不确定度: $U_{rel} = \quad \% \quad (k=2)$								
试验力 (kN)	前	后	左	右	平均值	同轴度/%		
测量结果的相对扩展不确定度: $U_{rel} = \quad \% \quad (k=2)$								
试验温度 (°C)	时间间隔 /min	校准点 (°C)			平均值 (°C)	温度偏差 (°C)		温度梯度 (°C)
		下	中	上				
					T_1	T_1		
					T_2	T_2		
					T_3	T_3		
测量结果的相对扩展不确定度: $U_{rel} = \quad ^\circ\text{C} \quad (k=2)$								

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（kN）	试验力(kN)	示值相对误差(%)	示值重复性误差(%)
测量结果的相对扩展不确定度 U_{rel} = % ($k=2$)			
位移（mm）		位移示值误差（%）	
测量结果的相对扩展不确定度 U_{rel} = % ($k=2$)			
试验力（kN）		同轴度/%	
测量结果的相对扩展不确定度 U_{rel} = % ($k=2$)			
试验温度（℃）	时间间隔/min	温度偏差（℃）	温度梯度（℃）
测量结果的相对扩展不确定度 U_{rel} = % ($k=2$)			

以下空白

附录C

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统力值测量结果的不确定度评定示例

C.1 测量方法

在测量范围内合理地选取 5 个校准点，对力学性能测量系统和标准测力仪施加负荷至测量点，可得到与标准力值相对应的力学性能测量系统示值，此过程共进行 3 次，以 3 次示值的算术平均值减去标准力值，即得到该测量点力学性能测量系统的示值误差。

C.2 测量模型

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

式中：

q ——力学性能测试系统的示值相对误差，%；

F_i ——被校试验机力指示装置的进程示值，N；

\bar{F} ——对同一力点，3 次测量的算术平均值，N；

C.3 不确定度来源分析

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。

C.4 系统的不确定度评定

C.4.1 试验机测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(F_1)$

对一台20kN的试验机测量点重复试验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	20.06	20.02	20.09	20.05	20.05	20.05	20.04	20.02	20.00	20.08

平均值

$$\bar{F} = \frac{\sum F_i}{n} = 20.046 \text{ kN}$$

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，则可得
到：

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

C.4.2 试验机分辨力引起的标准不确定度分量 $u_2(F_i)$

该试验机实际分辨力 $d=0.01\text{kN}$ ，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 $u_1(\bar{F})$

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：

$$u_1(F) = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} \times 20 = 0.012\text{KN}$$

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
$u_1(\bar{F})$	标准测力仪最大允许误差	0.012	-1	0.012

$$u_c = \sqrt{u_1^2(F_i) + u_2^2(\bar{F})} = \sqrt{0.016^2 + 0.012^2} = 0.02\text{kN}$$

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：

$$U = ku_c = 0.04\text{kN}$$

换算成相对扩展不确定度

$$U_{rel} \approx 0.20\% \quad (k = 2)$$

附录D

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统位移参数测量结果不确定度的评定

示例

D.1 测量方法

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%两个测量范围用标准器进行校准, 每个测量范围校准 3 次, 横梁位移示值相对误差 q_D 。

D.2 测量模型

$$q_D = \frac{D - \overline{D}_i}{\overline{D}_i} \times 100\% \quad (\text{D.1})$$

式中:

q_D ——横梁位移示值相对误差, %;

D ——对应所测量的横梁位移的测量值, mm;

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

D.3 不确定度来源分析

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。

D.4 不确定度来源评定

D.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:

D.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)	1002.5	1002.0	1002.5	1002.0	1002.5	1003.0	1002.5	1002.5	1002.5	1002.5

试验标准偏差

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \overline{D})^2}{(n-1)}} = 0.284\text{mm}$$

因校准时3次测量取平均值, 故测量重复性引入的标准不确定度 $u(D)$ 为:

$$u(D) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.164\text{mm}$$

D.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 $\pm 0.5\text{mm}$ ，取其半宽，按均匀分布，则

$$u(\bar{D}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29\text{mm}$$

人本身的反应估计为 0.1s ，区间半宽 $a=0.05\text{s}$ ，按均匀分布，在秒表启动和停止时均会引入不确定度，则因人的反应引起的电子秒表测量误差引入的不确定度为

$$u(\bar{t})_2 = \frac{\sqrt{2} \times 0.05}{\sqrt{3}} = 0.041\text{s}$$

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 $u(x_i)/\text{mm}$	c_i	$ c_i u(x_i)/\text{kN}$
$u(D)$	0.164	1	0.164
$u(\bar{D})$	0.29	-1	0.29

$$u_c = \sqrt{u^2(D) + u^2(\bar{D})} \approx 0.33\text{mm}$$

D.4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.66\text{mm}$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{rel} = 0.7\%(k=2)$$

附录E

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统同轴度测量不确定度评定示例

E.1 测量方法

选择合适的检验试样，使用同轴度测试仪进行校准。将检验试样夹持在夹头上并施加试验机最大试验力约 1% 的初始力，调整同轴度测量仪的零点，再施加试验力至最大试验力的 4%，同时注意检验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。

E.2 测量模型

$$e = \frac{\Delta L_{\max} - \overline{\Delta L}}{\overline{\Delta L}} \times 100\% \quad (\text{E.1})$$

式中：

e ——试验机加力系统的同轴度，%；

ΔL_{\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；

$\overline{\Delta L}$ ——在同一试验力测量点，四测 3 次测量中，检验试样四侧变形的算术平均值，mm。

E.3 不确定度来源分析

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；同轴度测试仪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。

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 $u_1(\Delta L_{\max})$

重复测量位移10次，测得数据如下：

E.1 重复性试验数据

同轴度	示值/%									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔL_{\max}	4.2	4.8	4.3	4.7	5.1	5.1	4.4	5.1	5.1	4.2

平均值

$$\Delta L_{\max} = \frac{\sum \Delta L_{imax}}{n} = 3.58\%$$

单次测量的实验标准差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_{imax} - \overline{\Delta L_{max}})^2}{(n-1)}} = 0.39\%$$

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：

$$u_1(\Delta L_{max}) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.23\%$$

E.4.2 同轴度测试仪分辨力引起的不确定度分量 $u_2(\Delta L_{max})$

该同轴度测试仪分辨力 $d=0.01\%$ ，取其区间的半宽度 $a=0.005\%$ ，且服从均匀分布，则：

$$u_2(\Delta L_{max}) = \frac{0.005\%}{\sqrt{3}} = 0.0029\%$$

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。

E.4.3 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：

$$u(\overline{\Delta L}) = \frac{2\%}{\sqrt{3}} = 1.2\%$$

E.4.4 合成标准不确定度

E.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 $u(x_i)/\%$	c_i	$ c_i u(x_i)/\%$
$u(\Delta L_{max})$	测量重复性	0.23	1	0.23
$u(\overline{\Delta L})$	同轴度测试仪最大允许误差	1.2	1	1.2

$$u_c = \sqrt{u_1^2(\Delta L_{max}) + u^2(\overline{\Delta L})} = \sqrt{0.23\%^2 + 1.2\%^2} = 1.22\%$$

E.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2.5\%$$

附录F

超高温陶瓷基材料力学性能测试系统温度示值偏差的测量不确定度评定

示例

F.1 测量方法

在均热带范围内，一般选择加热炉标称温度范围的起始温度、中间温度和最高温度 3 个校准点（热电偶的支数可根据试样的标距长度确定），热电偶的工作端应被紧密包扎贴于试样表面，以免受热辐射的影响。加热炉加热至校准温度点后，保温 2h 方可进行校准。

F.2 测量模型

$$\delta_t = \bar{T} - T \times 100\% \quad (\text{F.1})$$

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，mm；

\bar{T} ——热电偶测得的相应温度算术平均值，mm。

F.3 不确定度来源分析

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。

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_1

将热电偶捆绑好后放入加热炉内，并将加热炉加热至1000℃，保温至少1h后，用多功能温度校验仪进行连续10次测量，记录数据如下：

F.1 重复性试验数据

温度/℃									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
999.85	999.20	999.58	999.48	999.29	999.66	999.58	999.75	999.48	999.36

平均值

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{n} = 999.53^\circ\text{C}$$

单次测量的实验标准差：

$$s(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{(n-1)}} = 0.213^{\circ}\text{C}$$

其测量重复性引入标准不确定度分量:

$$u_1 = s(T) = 0.213^{\circ}\text{C}$$

F.4.2 显示仪表分辨力引入的标准不确定度分量 u_2

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。

F.4.3 标准器引入的标准不确定度分量 u_3

F.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 1000°C 时, 扩展不确定度为 $U = 0.12^{\circ}\text{C}$, 包含因子 $k=2$ 。则:

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

F.4.3.2 由标准热电偶误差引入不确定度 u_{32}

选择二等B型标准热电偶, 查JJG 141-2013检定规程可知: 最大允许误差为 $\pm 0.25\text{m}^{\circ}\text{C}$, 在 1000°C 时, 最大允许误差为 2.5°C , 按均匀分布 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_{32} = \frac{U}{k} = \frac{2.5}{2} = 1.25^{\circ}\text{C}$$

即:

$$u_c = \sqrt{u_{31}^2 + u_{32}^2} = \sqrt{0.06^2 + 1.25^2} = 1.57^{\circ}\text{C}$$

F.4.4 合成标准不确定度

F.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	测量重复性	0.213	-1	0.213
u_2	标准器引入的标准不确定度	1.57	1	1.57

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_3^2} = \sqrt{0.213^2 + 1.57^2} = 1.58^\circ\text{C}$$

F.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 3.2^\circ\text{C}$$
