



# 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

## 叉式热电偶校准规范

Calibration Specification for Fork-type Thermocouples

（报批稿）

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

# 叉式热电偶校准规范

Calibration Specification  
For Fork-type Thermocouples

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：泰安磐然测控科技有限公司

东北轻合金有限责任公司

西安汉唐分析检测有限公司

国标（北京）检验认证有限公司

山东南山铝业股份有限公司

中国船舶集团有限公司第七二五研究所

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：**

张国栋（西南铝业（集团）有限责任公司）

王瑞雪（西南铝业（集团）有限责任公司）

罗启明（西南铝业（集团）有限责任公司）

何保军（泰安磐然测控科技有限公司）

周桂平（东北轻合金有限责任公司）

房永强（西安汉唐分析检测有限公司）

樊志罡（国标（北京）检验认证有限公司）

谭本清（西南铝业（集团）有限责任公司）

栾业升（山东南山铝业股份有限公司）

刘晓青（中国船舶集团有限公司第七二五研究所）

# 目 录

引言 .....	(II)
1 范围 .....	(1)
2 引用文件 .....	(1)
3 概述 .....	(1)
4 计量特性 .....	(1)
4.1 热电动势 .....	(1)
4.2 温度示值偏差 .....	(2)
5 校准条件 .....	(2)
5.1 环境条件 .....	(2)
5.2 测量标准及其他设备 .....	(2)
6 校准项目和校准方法 .....	(3)
6.1 校准项目 .....	(3)
6.2 校准方法 .....	(3)
6.3 数据处理 .....	(5)
7 校准结果表达 .....	(7)
8 复校时间间隔 .....	(8)
附录 A 热电偶校准记录参考格式 .....	(9)
附录 B 热电偶校准证书内页参考格式 .....	(11)
附录 C 热电偶热电动势和温度示值偏差测量不确定度评定示例 .....	(12)

# 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。本规范为首次发布。

## 叉式热电偶校准规范

### 1 范围

本规范适用于测量范围（-40~+1000）℃、长度不小于300 mm的镍铬-镍硅（K型）、镍铬硅-镍硅镁（N型）、镍铬-铜镍（E型）及铁-铜镍（J型）廉金属叉式热电偶（以下简称热电偶）的校准。其他类型的叉式热电偶也可参照本规范进行校准。

### 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1637-2017 廉金属热电偶校准规范

GB/T 4989-2013 热电偶用补偿导线

GB/T 16839.1 热电偶 第1部分：电动势规范和允差

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 概述

热电偶是两种不同材料的导体基于塞贝克效应及中间导体定律制成的温度计，主要用于测量金属的表面温度。两种不同材料的导体称为热电偶的两个电极，这两个电极的一端与被测金属表面紧密接触在一起形成测量端，另一端为参考端，测量时与测温仪相连，其工作示意图见图1。

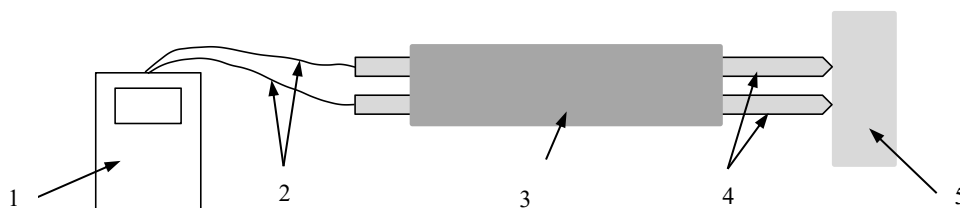


图1 热电偶工作示意图

1—测温仪；2—补偿导线；3—热电偶；4—热电偶电极；5—被测金属

### 4 计量特性

#### 4.1 热电动势

热电偶的热电动势表征其热电特性。当热电偶参考端为0℃时，热电动势与温度的关系应符合GB/T 16839.1的要求。

## 4.2 温度示值偏差

热电偶的温度示值偏差应符合表1的要求。

表 1 热电偶温度示值偏差

序号	名称	分度号	适用温度范围及允许偏差
1	镍铬-镍硅热电偶	K	$(-40\sim+333)^{\circ}\text{C}, \pm 3^{\circ}\text{C};$ $(333\sim1000)^{\circ}\text{C}, \pm (0.0075 \cdot t + 0.5^{\circ}\text{C})$
2	镍铬硅-镍硅镁热电偶	N	
3	镍铬-铜镍热电偶	E	$(-40\sim+333)^{\circ}\text{C}, \pm 3^{\circ}\text{C};$ $(333\sim900)^{\circ}\text{C}, \pm (0.0075 \cdot t + 0.5^{\circ}\text{C})$
4	铁-铜镍热电偶	J	$(-40\sim+333)^{\circ}\text{C}, \pm 3^{\circ}\text{C};$ $(333\sim750)^{\circ}\text{C}, \pm (0.0075 \cdot t + 0.5^{\circ}\text{C})$
注：表中 $t$ 为实际温度。			

## 5 校准条件

### 5.1 环境条件

电测设备工作的环境温度和相对湿度应符合相关要求，恒温设备工作的环境应无影响校准的气流扰动和外电磁场的干扰。

### 5.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备的技术要求见表2。

表 2 测量标准及其他设备技术要求

序号	测量标准或其他设备	技术要求	用途	备注
1	标准铂铑10-铂热电偶（以下简称标准热电偶）	测量范围：300℃以上， 准确度等级：二等	温度测量标准	--
2	标准铂电阻温度计	测量范围：(-189.3442~+419.527)℃， 准确度等级：二等		--
3	电测设备	准确度等级不低于0.02级、分辨力不低于1μV	测量被校热电偶的热电动势	可选用数字多用表或其他满足技术要求的电测设备
		准确度等级不低于0.02级、分辨力不低于0.1mΩ	测量二等标准铂电阻温度计的电阻值	
4	多点转换开关	各路寄生电势及各路寄生电势之差均不大于0.5μV	切换各路热电动势	--

表 2 (续)

序号	测量标准或设备	技术要求	用途	备注
5	恒温设备	(-40~+300)℃时,在有效工作区域内任意两点温差不大于0.1℃;300℃以上时,导电均温块表面任意两点的温差不大于0.5℃,有效工作区域轴向30 mm内任意两点温差绝对值不大于1℃	提供恒定的均匀温场	根据不同的校准温度范围,可选择对应的满足该技术要求的恒温设备,如管式炉、干体炉、盐浴槽、干粉槽等
6	参考端恒温器	恒温器深度应不小于200 mm,工作区域温度变化范围为(0±0.1)℃	为参考端提供0℃恒温场	可用满足要求的其他设备
7	补偿导线	应符合GB/T 4989-2013中5.1规定的热电特性及允差要求	将热电偶信号输出端引至参考端恒温器	--
8	导电均温块	表面应平整、未氧化,在校准温度下不发生形变,导热性能好	与叉式热电偶两电极工作端接触,形成电路回路,保持两电极工作端温度均匀	--

## 6 校准项目和校准方法

### 6.1 校准项目

热电动势和温度示值偏差。

### 6.2 校准方法

#### 6.2.1 准备工作

在校准前需检查导电均温块的表面状况,均温块表面应平整、无污染物、未氧化。将被校热电偶安装到热电偶固定装置上,使被校热电偶测量端与均温块表面紧密接触,如图2。若采用管式炉作为恒温设备,可参照图3安装被校热电偶。

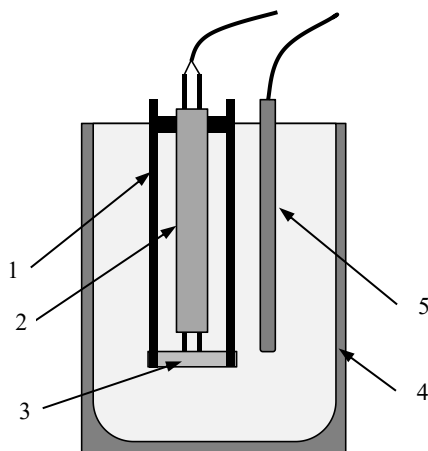


图2 叉式热电偶安装示意图

1—热电偶固定装置; 2—热电偶; 3—导电均温块; 4—恒温设备; 5—标准铂电阻温度计

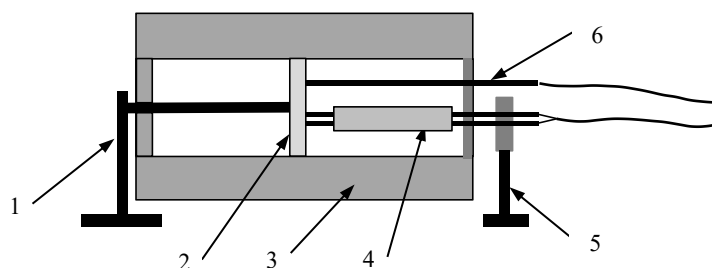


图3 管式炉叉式热电偶安装示意图

1—导电均温块固定装置；2—导电均温块；3—管式炉；4—热电偶；  
5—热电偶固定装置；6—标准热电偶

### 6.2.2 校准温度点

在被校热电偶使用范围内应至少校准三个温度点，通常选取被校热电偶使用范围的最高、最低和中间温度点，也可根据用户要求选择校准点。

### 6.2.3 参考端的连接方法

将剥去绝缘层的铜导线一端与被校热电偶参考端连接，置入装有酒精或变压器油的玻璃试管内，再均匀地插入参考端恒温器内。如果被校热电偶电极信号输出端无法插入参考端恒温器中，可用补偿导线的一端与其连接，另一端与铜导线连接后，置入装有酒精或变压器油的玻璃试管内，再均匀地插入参考端恒温器中。标准热电偶参考端与铜导线的一端连接后，也插入参考端恒温器。插入深度均不小于150 mm。铜导线的另一端通过转换开关与电测仪器连接。

注：连接用导线应使用同一卷铜导线。

### 6.2.4 300 ℃及以下温区热电偶的校准

采用比较法，将被校热电偶与温度测量标准进行比较。

将被校热电偶与温度测量标准置于恒温设备中，如图2，温度测量标准感温点与被校热电偶测量端置于有效工作区域的同一水平位置，插入深度应不小于200 mm。按6.2.3连接被校热电偶参考端。当温度测量标准温度偏离校准温度点 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内，温度变化每分钟不超过 $0.1^\circ\text{C}$ 时开始读数，读数顺序为：

温度测量标准→被校热电偶1→被校热电偶2→被校热电偶3→ … →被校热电偶 $n$   
↓

温度测量标准←被校热电偶1←被校热电偶2←被校热电偶3← … ←被校热电偶 $n$

每支热电偶的读数不少于4次，在每一校准温度点的整个读数过程，温度的变化应不大于 $0.2^\circ\text{C}$ 。

### 6.2.5 300 ℃以上温区热电偶的校准

采用比较法，将被校热电偶与温度测量标准进行比较。

将标准热电偶套上保护管，插入恒温设备内与导电均温块表面接触，使其测量端与被校热电偶的测量端处于同一个径向截面上。炉口处用绝缘耐火材料封堵。按6.2.3连接被校热电偶参考端。

校准应由低温向高温逐点升温进行，当温度测量标准温度偏离校准温度点±5℃以内，温度变化每分钟不超过0.2℃时开始读数，读数顺序按6.2.4进行，每支热电偶的读数不少于4次，在每一校准温度点的整个读数过程，温度的变化应不大于0.5℃。

## 6.3 数据处理

### 6.3.1 被校热电偶热电动势计算见公式（1）、（2）。

$$e_{\text{被}}(t) = \bar{e}_{\text{被}} + \Delta t_{\text{校}} \cdot S_{\text{被}} + e_{\text{补}} \quad (1)$$

其中：

$$\Delta t_{\text{校}} = t_{\text{校}} - t_{\text{实}} \quad (2)$$

$$t_{\text{实}} = \bar{t}_{\text{标}} + t_{\text{修}}$$

式中：

$e_{\text{被}}(t)$ ——被校热电偶在校准温度点的热电动势，mV；

$\bar{e}_{\text{被}}$ ——被校热电偶在校准温度点附近，测得的热电动势算术平均值，mV；

$\Delta t_{\text{校}}$ ——校准温度点与实际温度的差值，℃；

$S_{\text{被}}$ ——被校热电偶在校准温度点的微分热电动势，mV/℃；

$e_{\text{补}}$ ——补偿导线修正值，mV；

$t_{\text{校}}$ ——校准温度点，℃；

$t_{\text{实}}$ ——温度测量标准测得的实际温度，℃；

$\bar{t}_{\text{标}}$ ——温度测量标准读数平均值，℃；

$t_{\text{修}}$ ——温度测量标准在校准温度点的修正值，℃。

### 6.3.2 当温度测量标准为标准热电偶时，被校热电偶热电动势计算见公式（3）：

$$e_{\text{被}}(t) = \bar{e}_{\text{被}} + \frac{\bar{e}_{\text{标证}} - \bar{e}_{\text{标}}}{S_{\text{标}}} \cdot S_{\text{被}} + e_{\text{补}} \quad (3)$$

式中:

$e_{\text{被}}(t)$ ——被校热电偶在校准温度点的热电动势, mV;

$\bar{e}_{\text{被}}$ ——被校热电偶在校准温度点附近, 测得的热电动势算术平均值, mV;

$e_{\text{标证}}$ ——标准热电偶证书上校准温度点的热电动势, mV;

$\bar{e}_{\text{标}}$ ——标准热电偶在校准温度点附近, 测得的热电动势算术平均值, mV;

$S_{\text{标}}$ ——标准热电偶在校准温度点的微分热电动势, mV/°C;

$S_{\text{被}}$ ——被校热电偶在校准温度点的微分热电动势, mV/°C;

$e_{\text{补}}$ ——补偿导线修正值, mV。

6.3.3 当温度测量标准为标准铂电阻温度计时, 被校热电偶热电动势计算见公式(4)、(5)。

$$e_{\text{被}}(t) = \bar{e}_{\text{被}} + \frac{W_{t_n} - W_t}{\left(\frac{dW_t}{dt}\right)_{t_n}} \cdot S_{\text{被}} + e_{\text{补}} \quad (4)$$

其中:

$$W_t = \frac{\bar{R}_t}{R_{tp}} \quad (5)$$

式中:

$e_{\text{被}}(t)$ ——被校热电偶在校准温度点的热电动势, mV;

$\bar{e}_{\text{被}}$ ——被校热电偶在校准温度点附近, 测得的热电动势算术平均值, mV;

$W_{t_n}$ ——由标准铂电阻温度计分度表给出校准温度 $t_n$ 对应的电阻比;

$W_t$ ——温度 $t$ 时的电阻比;

$\left(\frac{dW_t}{dt}\right)_{t_n}$ ——由标准铂电阻温度计分度表给出校准温度 $t_n$ 对应的电阻比随温度的变化率, °C<sup>-1</sup>;

$S_{\text{被}}$ ——被校热电偶在校准温度点的微分热电动势, mV/°C;

$e_{\text{补}}$ ——补偿导线修正值, mV;

$\bar{R}_t$ ——标准铂电阻温度计在温度 $t$ 时, 测得电阻的算术平均值, Ω;

$R_{tp}$ ——标准铂电阻温度计在水三相点的电阻值, Ω。

6.3.4 被校热电偶热电动势偏差计算见公式（5）：

$$\Delta e_{\text{被}} = e_{\text{被}}(t) - e_{\text{分}} \quad (5)$$

式中：

$\Delta e_{\text{被}}$  ——被校热电偶热电动势偏差，mV；

$e_{\text{被}}(t)$  ——被校热电偶在校准温度点的热电动势，mV；

$e_{\text{分}}$  ——被校热电偶分度表上查得的校准温度点的热电动势值，mV。

6.3.5 被校热电偶温度示值偏差  $\Delta t_{\text{被}}$  计算见公式（6）：

$$\Delta t_{\text{被}} = \frac{\Delta e_{\text{被}}}{S_{\text{被}}} \quad (6)$$

式中：

$\Delta t_{\text{被}}$  ——校准温度点的温度示值偏差，℃；

用不同温度测量标准进行校准时，计算示例见JJF 1637-2017附录B。

## 7 校准结果表达

经校准的热电偶应出具校准证书，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（如编号），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) 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；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；

- l) 校准结果及测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书签发人的签名或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- p) 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。

## 8 复校时间间隔

建议复校时间间隔一般不超过6个月。送校单位可根据使用情况自主决定复校时间间隔。

## 附录 A

## 热电偶校准记录参考格式

记录编号：

测量标准及主要配套设备	仪器名称	型号规格	出厂编号	不确定度/准确度等级	证书号	有效日期	
校准依据：							
校准地点：				室温      °C ， 相对湿度      %			
被校热电偶		电偶 1	电偶 2	电偶 3	电偶 4	电偶 5	
委托单位							
型号							
制造单位							
出厂编号							
证书编号							
校准记录							
校准温度点 1	读数顺序	温度测量标准读数/mV	被校热电偶热电动势/mV (温度测量标准证书值 $e_{\text{标证}} =$ mV 校准温度点：      °C)				
			电偶 1	电偶 2	电偶 3	电偶 4	电偶 5
	1						
	2						
	3						
	4						
	平均值						
	$\Delta t_{\text{校}} / ^\circ\text{C}$						
	$S_{\text{被}} \cdot \Delta t_{\text{校}}$						
	$e_{\text{被}} (t)$						
	$\Delta e_{\text{被}}$						
	$\Delta t_{\text{被}} / ^\circ\text{C}$						
	扩展不确定度 $U / ^\circ\text{C}$ , $k=2$						
...	...	...	...	...	...	...	
校准温度点 n	读数顺序	温度测量标准读数/mV	被校热电偶热电动势/mV (温度测量标准证书值 $e_{\text{标证}} =$ mV 校准温度点：      °C)				
			电偶 1	电偶 2	电偶 3	电偶 4	电偶 5
	1						
	2						
	3						
	4						

	平均值						
	$\Delta t_{\text{校}} / ^\circ\text{C}$						
	$S_{\text{被}} \cdot \Delta t_{\text{校}}$						
	$e_{\text{被}} (\text{t})$						
	$\Delta e_{\text{被}}$						
	$\Delta t_{\text{被}} / ^\circ\text{C}$						
	扩展不确定度 $U/^\circ\text{C}$ , $k=2$						

## 附录 B

## 热电偶校准证书内页参考格式

## 校准结果

校准温度点 °C	热电动势 mV	温度示值偏差 °C	扩展不确定度 $U/^{\circ}\text{C}$ , $k=2$
注：热电偶参考端温度为 0°C 。			

## 附录 C

## 热电偶热电动势和温度示值偏差测量不确定度评定示例

## C.1 概述

## C.1.1 被校对象

K型热电偶。

## C.1.2 测量标准

测量标准或设备的技术指标如表C.1所示。

表 C.1 测量标准或设备的技术指标

序号	测量标准或设备	主要技术指标
1	标准铂铑 10-铂热电偶	300 °C以上：二等
2	数字多用表	最大允许误差：±(40×10 <sup>-6</sup> ×读数+4×10 <sup>-6</sup> ×量程)

## C.1.3 校准方法

采用比较法，将被校热电偶安装在热电偶固定装置上，使被校热电偶测量端与导电均温块紧密接触，放入管式炉内，将二等标准铂铑10-铂热电偶套上保护管，插入管式炉内至导电均温块表面进行比较，测量标准热电偶和被校热电偶的热电动势。

## C.2 测量模型和灵敏系数

## C.2.1 测量模型

被校热电偶在校准温度点上（参考端为0℃时）的测量模型见公式（C.1）：

$$e_{\text{被}}(t) = \bar{e}_{\text{被}} + \frac{e_{\text{标证}} - \bar{e}_{\text{标}}}{S_{\text{标}}} \cdot S_{\text{被}} + e_{\text{补}} \quad (\text{C.1})$$

式中：

$e_{\text{被}}(t)$  ——被校热电偶在校准温度点的热电动势值，mV；

$\bar{e}_{\text{被}}$  ——被校热电偶在校准温度点附近，测得的热电动势算术平均值，mV；

$e_{\text{标证}}$  ——标准热电偶证书上校准温度点的热电动势值，mV；

$\bar{e}_{\text{标}}$  ——标准热电偶在校准温度点附近，测得的热电动势算术平均值，mV；

$S_{\text{标}}$  ——标准热电偶在校准温度点的微分热电动势，mV/℃；

$S_{\text{被}}$  ——被校热电偶在校准温度点的微分热电动势, mV/°C;

$e_{\text{补}}$  ——补偿导线修正值, mV。

### C.2.2 灵敏系数

测量模型中各个输入量的不确定度相互独立, 合成标准不确定度见公式 (C.2) :

$$u_c^2 = [c_1 u(\bar{e}_{\text{被}})]^2 + [c_2 u(e_{\text{标证}})]^2 + [c_3 u(\bar{e}_{\text{标}})]^2 + [c_4 u(e_{\text{补}})]^2 \quad (\text{C.2})$$

式中:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\partial e_{\text{被}}(t)}{\partial e_{\text{被}}} = 1 \\ c_2 &= \frac{\partial e_{\text{被}}(t)}{\partial e_{\text{标证}}} = \frac{S_{\text{被}}}{S_{\text{标}}} = 4.41 \\ c_3 &= \frac{\partial e_{\text{被}}(t)}{\partial e_{\text{标}}} = -\frac{S_{\text{被}}}{S_{\text{标}}} = -4.41 \\ c_4 &= \frac{\partial e_{\text{被}}(t)}{\partial e_{\text{补}}} = 1 \end{aligned}$$

### C.3 测量不确定度的来源分析

被校热电偶输入量  $\bar{e}_{\text{被}}$  引入的标准不确定度  $u(\bar{e}_{\text{被}})$ , 其来源有重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ 、数字多用表引入的标准不确定度  $u_2$ 、导电均温块径向温场不均匀引入的标准不确定度  $u_3$ 、炉温波动引入的标准不确定度  $u_4$ 、转换开关寄生电势引入的标准不确定度  $u_5$ 、参考端恒温器引入的标准不确定度  $u_6$ 、补偿导线引入的标准不确定度  $u(e_{\text{补}})$ 。

标准热电偶引入的不确定度, 其来源有标准热电偶整百摄氏度  $e_{\text{标证}}$  引入的标准不确定度  $u(e_{\text{标证}})$ 、标准热电偶输入量  $\bar{e}_{\text{标}}$  引入的标准不确定度  $u(\bar{e}_{\text{标}})$ 。

### C.4 测量不确定度评定

#### C.4.1 重复测量引入的标准不确定度 $u_1$

对被校热电偶在校准温度点 400°C 重复测量, 测得 5 组每组 10 个重复性测量数据见表 C.2:

表 C.2 被校热电偶重复性测量数据

组名	测量数据 (mV)									
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
第 1 组	16.3712	16.3740	16.3718	16.3731	16.3741	16.3738	16.3738	16.3702	16.3722	16.3719
第 2 组	16.3701	16.3713	16.3727	16.3735	16.3746	16.3741	16.3737	16.3733	16.3724	16.3715
第 3 组	16.3704	16.3706	16.3695	16.3701	16.3713	16.3719	16.3726	16.3715	16.3728	16.3733
第 4 组	16.3854	16.3849	16.3841	16.3838	16.3834	16.3845	16.3849	16.3859	16.3866	16.3872
第 5 组	16.3778	16.3789	16.3798	16.3808	16.3809	16.3799	16.3794	16.3785	16.3779	16.3771

用A类方法进行评定，合并样本标准偏差  $s_{p1}$  为:

$$s_{p1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 s_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 s_i^2}{5}} = 1.31 \mu\text{V}$$

实际测量以4次测量值的平均值作为测量结果，故

$$u_1 = s_{p1} / \sqrt{4} = 0.66 \mu\text{V}$$

#### C.4.2 数字多用表引入的标准不确定度 $u_2$

数字多用表的测量值最大允许误差按一年内的准确度  $\pm (40 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 4 \times 10^{-6} \times \text{量程})$  计算，量程为100 mV，根据JJF 1637-2017附录G，可得400℃校准点K型热电偶热电动势标准值为16.397 mV，经计算其误差为  $\pm 1.06 \mu\text{V}$ ，区间半宽  $a = 1.06 \mu\text{V}$ 。按均匀分布考虑，取  $k = \sqrt{3}$ 。则标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{1.06}{\sqrt{3}} = 0.62 \mu\text{V}$$

#### C.4.3 导电均温块径向温场不均匀引入的标准不确定度 $u_3$

校准时，由于炉内放置的金属均温块径向温场不均匀，会导致叉式热电偶两个电极环境温度不一致，其引入的标准不确定度为  $u_{31}$ ，并导致被校热电偶与标准热电偶环境温度不一致，其引入的标准不确定度  $u_{32}$ 。经测试，炉内最大差值为  $0.20^\circ\text{C}$ ，以微分电势  $42.24 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  计算得热电势值为  $8.45 \mu\text{V}$ ，其区间半宽  $a = 4.22 \mu\text{V}$ ，按均匀分布考虑，取  $k = \sqrt{3}$ 。则标准不确定度为:

$$u_3 = \sqrt{u_{31}^2 + u_{32}^2} = \sqrt{\left(\frac{a}{k}\right)^2 + \left(\frac{a}{k}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}a}{k} = \frac{\sqrt{2} \times 4.22 \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 3.45 \mu\text{V}$$

#### C.4.4 炉温波动引入的标准不确定度 $u_4$

测量时，标准热电偶测得炉温波动实际变化不超过 $1.0\mu\text{V}$ ，以微分电势 $9.567\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 计算（相当于 $0.10^\circ\text{C}$ ），再以被校热电偶微分电势 $42.24\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 计算，带来的误差为 $4.22\mu\text{V}$ 。按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ ，区间半宽 $a=2.11\mu\text{V}$ ，则标准不确定度为：

$$u_4 = \frac{a}{k} = \frac{2.11}{\sqrt{3}} = 1.22\mu\text{V}$$

#### C.4.5 转换开关寄生电势引入的标准不确定度 $u_5$

转换开关各路之间最大寄生电势之差不大于 $\pm 0.5\mu\text{V}$ ，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ ，区间半宽 $a=0.5\mu\text{V}$ ，则标准不确定度为：

$$u_5 = \frac{a}{k} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29\mu\text{V}$$

#### C.4.6 参考端恒温器引入的标准不确定度 $u_6$

由于参考端恒温器最大允许误差为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ，以微分电势 $39.45\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 计算，换算成热电势值为 $\pm 1.97\mu\text{V}$ ，区间半宽为 $a=1.97\mu\text{V}$ 。按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ ，则标准不确定度为：

$$u_6 = \frac{a}{k} = \frac{1.97\mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 1.14\mu\text{V}$$

由于输入量  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$ 、 $u_5$ 、 $u_6$  彼此之间相互独立，则：

$$u(\bar{e}_{\text{被}}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 3.95\mu\text{V}$$

#### C.4.7 标准热电偶整百摄氏度 $e_{\text{标证}}$ 引入的标准不确定度 $u(e_{\text{标证}})$

由证书可知，标准热电偶在 $400^\circ\text{C}$ 校准温度点标准不确定度  $u(e_{\text{标证}})$  为：

$$u(e_{\text{标证}}) = 3.63\mu\text{V}$$

#### C.4.8 标准热电偶输入量 $\bar{e}_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u(\bar{e}_{\text{标}})$

输入量  $\bar{e}_{\text{标}}$  的标准不确定度  $u(\bar{e}_{\text{标}})$  用A类方法进行评定，标准热电偶测得5组每组10个重复性测量数据，见表C.3：

表C.3 标准热电偶重复性测量数据

组名	测量数据 (mV)									
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
第 1 组	3.2592	3.2598	3.2588	3.2599	3.2593	3.2581	3.2578	3.2581	3.2575	3.2579
第 2 组	3.2581	3.2583	3.2579	3.2588	3.2591	3.2584	3.2578	3.2576	3.2571	3.2565
第 3 组	3.2568	3.2576	3.2581	3.2588	3.2578	3.2572	3.2576	3.2571	3.2572	3.2566
第 4 组	3.2611	3.2621	3.2611	3.2614	3.2619	3.2627	3.2616	3.2609	3.2602	3.2609
第 5 组	3.2588	3.2595	3.2597	3.2605	3.2614	3.2609	3.2594	3.2585	3.2591	3.2586

合并样本标准偏差  $s_{p2}$  为:

$$s_{p2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 s_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 s_i^2}{5}} = 0.81 \mu V$$

实际测量以4次测量值的平均值作为测量结果, 故:

$$u(\bar{e}_{\text{标}}) = s_{p2} / \sqrt{4} = 0.41 \mu V$$

#### C.4.9 补偿导线引入的标准不确定度 $u(e_{\text{补}})$

经测量, K型补偿导线在30°C时, 误差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$  (换算成热电势值为 $\pm 8.45 \mu V$ ), 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$ , 区间半宽为 $a=8.45 \mu V$ , 则标准不确定度为

$$u(e_{\text{补}}) = \frac{a}{k} = \frac{8.45}{\sqrt{3}} = 4.88 \mu V$$

#### C.4.10 标准不确定度分量汇总

400°C时, K型热电偶标准不确定度分量汇总见表C.4所示。

表 C.4 标准不确定度分量汇总

序号	不确定度来源		标准不确定度/ $\mu V$	灵敏系数 $C_i$
1	$u(\bar{e}_{\text{被}})$	输入量 $\bar{e}_{\text{被}}$ 带来的不确定度	3.95	1
1.1	$u_1$	重复测量	0.66	
1.2	$u_2$	数字多用表	0.62	
1.3	$u_3$	导电均温块径向温场不均匀	3.45	1
1.4	$u_4$	炉温波动	1.22	
1.5	$u_5$	转换开关寄生电势	0.29	

表 C.4 (续)

序号	不确定度来源		标准不确定度/ $\mu\text{V}$	灵敏系数 $c_i$
1.6	$u_6$	参考端恒温器	1.14	1
2	$u(e_{\text{标证}})$	标准热电偶整百摄氏度 $e_{\text{标证}}$	3.63	4.41
3	$u(\bar{e}_{\text{标}})$	标准热电偶输入量 $\bar{e}_{\text{标}}$	0.41	-4.41
4	$u(e_{\text{补}})$	补偿导线	4.88	1

## C.5 合成标准不确定度

输入量  $u(\bar{e}_{\text{被}})$ 、 $u(e_{\text{标证}})$ 、 $u(\bar{e}_{\text{标}})$  和  $u(e_{\text{补}})$  之间相互独立，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{[c_1 u(\bar{e}_{\text{被}})]^2 + [c_2 u(e_{\text{标证}})]^2 + [c_3 u(\bar{e}_{\text{标}})]^2 + [c_4 u(e_{\text{补}})]^2} = 17.29 \mu\text{V}$$

## C.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 17.29 = 34 \mu\text{V}$$

在  $400^\circ\text{C}$  时，K 型热电偶的微分热电势值  $S_{\text{被}}=42.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，因此热电动势偏差扩展不确定度的等效温度值为：

$$U = \frac{34}{42.2} ^\circ\text{C} = 0.8^\circ\text{C}$$