



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2156—2024

材料热膨胀仪校准规范

Calibration Specification for Dilatometers



2024-09-18 发布

2024-12-18 实施

国家市场监督管理总局 发布

材料热膨胀仪校准规范
Calibration Specification for Dilatometers

JJF 2156—2024

归口单位：全国新材料与纳米计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

新疆维吾尔自治区计量测试研究院

参与起草单位：河南省计量科学研究院

辽宁省计量科学研究院

本规范委托全国新材料与纳米计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

任国营（中国计量科学研究院）

崔剑秋（中国计量科学研究院）

赵志方（新疆维吾尔自治区计量测试研究院）

参加起草人：

赵宏亮（新疆维吾尔自治区计量测试研究院）

范乃胤（河南省计量科学研究院）

李 峰（新疆维吾尔自治区计量测试研究院）

于佃清（辽宁省计量科学研究院）



目 录

| | |
|------------------------------------|--------|
| 引言 | (II) |
| 1 范围..... | (1) |
| 2 引用文件..... | (1) |
| 3 术语..... | (1) |
| 4 概述..... | (2) |
| 5 计量特性..... | (2) |
| 6 校准条件..... | (3) |
| 7 校准项目和校准方法..... | (4) |
| 8 校准结果表达..... | (6) |
| 9 复校时间间隔..... | (6) |
| 附录 A 热膨胀仪校准原始记录参考格式 | (8) |
| 附录 B 证书内页参考格式 | (11) |
| 附录 C 热膨胀仪示值误差测量结果的测量不确定度评定示例 | (13) |



引 言

本规范依据 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》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》编制。

本规范参考 ASTM E228《基于推杆法热膨胀仪的固体材料线膨胀系数标准测试方法》(*Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials with a Push-Rod Dilatometer*)和 GB/T 4339—2008《金属材料热膨胀特征参数的测定》编制而成。

本规范为首次发布。



材料热膨胀仪校准规范

1 范围

本规范适用于被测对象为固体材料（不含薄膜材料）、实现材料线膨胀系数测量的仪器的校准及使用中检查。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

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

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

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 线性热膨胀系数 coefficient of linear thermal expansion

通常以 20 °C 作为线性热膨胀系数计算的参考温度点。

注：若采用不同于 20 °C 的参考温度点，应在报告中予以注明。

3.2 平均线性热膨胀系数 mean coefficient of linear thermal expansion

某一温度区间，单位长度被测样品在被测方向上的长度变化量与温度变化量之比，单位为每开尔文，符号为 1/K。

平均线性热膨胀系数计算公式：

$$\alpha_t = \frac{1}{L_0} \times \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (1)$$

式中：

α_t ——温度为 t （单位为 °C）时样品的平均热膨胀系数， K^{-1} ；

L_0 ——样品在参考温度 20 °C 时的长度，mm；

ΔT ——温度 t （单位为 °C）与参考温度 20 °C 之间的差值，即 $\Delta T = t - 20$ ，°C；

ΔL ——样品在 t （单位为 °C）时的长度 L_t 与在参考温度 20 °C 时的长度 L_0 之差，即 $\Delta L = L_t - L_0$ ，mm。

除非特别注明，本规范所述热膨胀系数均为平均线性热膨胀系数。

3.3 瞬时线性热膨胀系数 instantaneous coefficient of linear thermal expansion

某一特定温度下，单位长度被测样品在被测方向上的瞬时温度变化时的长度变化量。

注：

1 单位为每开尔文，符号为 K^{-1} 。

2 瞬时线性热膨胀系数计算公式：

$$\alpha_{t-i} = \frac{1}{L_0} \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} = (dL/dt)/L_0 \quad (t_1 < t < t_2) \quad (2)$$

式中：

α_{t-i} ——温度为 t (单位为 $^{\circ}\text{C}$) 时样品的瞬时热膨胀系数, K^{-1} ;

L_0 、 L_1 、 L_2 ——样品分别在温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 t_1 、 t_2 时的长度, mm。

3.4 热膨胀系数传递标准 transfer standard of coefficient of linear thermal expansion
带有国家级法定计量技术机构溯源证书的热膨胀系数实物标准器或国家有证标准物质的统称。

注：热膨胀系数传递标准也可简称为传递标准。

4 概述

材料热膨胀仪（以下简称热膨胀仪）是指在一定的温度程序下，测量样品的尺寸变化随温度或时间变化的关系，从而获得材料热膨胀系数随温度变化关系的仪器。

按照被测样品是横向放置还是纵向放置的不同，热膨胀仪分为卧式热膨胀仪和立式热膨胀仪。按测量原理的不同，热膨胀仪分为：相对法热膨胀仪（如推杆法热膨胀仪）、绝对法热膨胀仪（如激光干涉法热膨胀仪）。热膨胀仪的主要组成部分包括：带温度控制功能的控温炉体、温度测量系统，长度变化测量系统、样品支架、计算机控制系统等。典型的卧式推杆法热膨胀仪如图 1 所示。

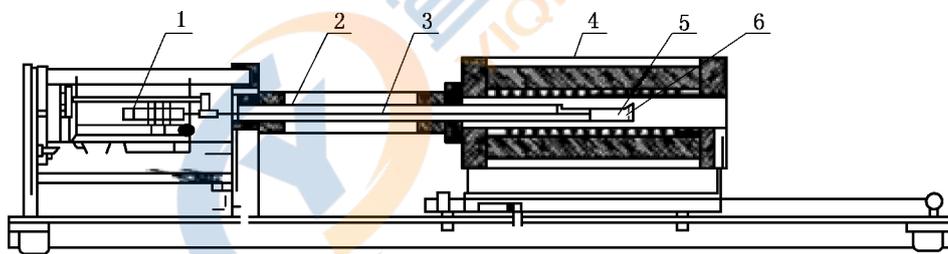


图 1 卧式推杆法热膨胀仪结构示意图

1—长度变化测量系统；2—样品支架；3—推杆；4—控温炉体；5—被测样品；6—温度传感器

5 计量特性

5.1 热膨胀仪示值误差

利用热膨胀系数传递标准对热膨胀仪进行校准时，热膨胀仪测得的某温度点 t (单位为 $^{\circ}\text{C}$) 时的热膨胀系数值与热膨胀系数传递标准在该温度点的热膨胀系数标准值之差。

5.2 热膨胀仪测量重复性

利用热膨胀系数传递标准对热膨胀仪进行校准时，在测量温度范围内，温度点 t (单位为 $^{\circ}\text{C}$) 的多次热膨胀系数测量结果的最大值与最小值之差。

5.3 炉温稳定性

利用热膨胀仪温度控制单元设定炉体保持在某一温度点时，在 30 min 时间内，炉

体实测温度的最大值与最小值之差。

炉温稳定性的校准可用于热膨胀仪温度计量特性失准时的原因分析。

6 校准条件

6.1 环境条件

- 6.1.1 环境温度： $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 。
- 6.1.2 相对湿度：不大于 80%。
- 6.1.3 热膨胀仪周围不得有明显的冷热源影响。
- 6.1.4 热膨胀仪周围不应有明显振动。

6.2 测量标准及其他设备

热膨胀仪校准用测量标准及其他设备见表 1。

表 1 热膨胀仪校准项目与测量标准及其他设备

| 序号 | 校准项目 | 测量标准及其他设备 |
|------------|--------|--------------------------|
| 1 | 示值误差* | 传递标准 |
| 2 | 示值重复性* | 传递标准 |
| 3 | 炉温稳定性 | 满足热膨胀仪中测温系统精度校准需求的温度测量设备 |
| * 为基本校准项目。 | | |

6.2.1 传递标准

常用的传递标准的热膨胀系数量级分为 $1 \times 10^{-8}/\text{K}$ 、 $1 \times 10^{-7}/\text{K}$ 、 $1 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、 $1 \times 10^{-5}/\text{K}$ 等，也可采用其他不同量值、量级的传递标准。

6.2.1.1 选用的传递标准应经过国家级法定计量技术机构校准。

6.2.1.2 传递标准的尺寸：为 $(\phi 6 \times 20)$ mm 或 $(\phi 6 \times 25)$ mm，长度最大允差不超过 10 μm 。

6.2.1.3 传递标准的测量端面的平行度不超过 10 μm 。

6.2.1.4 如有其他特殊长度要求，可在参考本规范的前提下，相关各方另行商定。

6.2.2 传递标准的选择

为更好地反映热膨胀仪的计量特性，应根据热膨胀仪厂家的声称测量不确定度指标，采用至少两种不同量级热膨胀系数的传递标准，对热膨胀仪进行校准，从而准确评价热膨胀仪在测量不同量级热膨胀系数材料时的计量性能。

6.2.3 长度测量设备

所用长度测量设备的测量范围应不小于 50 mm，长度测量最大允许误差不超过 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。

6.2.4 温度测量设备

所用温度测量设备的温度范围 $\leq 500 ^\circ\text{C}$ 时，测量不确定度不超过 $0.1 ^\circ\text{C}$ ， $k=2$ ；温度范围 $> 500 ^\circ\text{C}$ 时，测量不确定度不超过 $0.5 ^\circ\text{C}$ ， $k=2$ 。

6.3 热膨胀仪配套用的基线校准用样品

热膨胀仪配套用的基线校准用样品应经国家级法定计量技术机构校准。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前检查和校准前准备

7.1.1 校准前检查

热膨胀仪应具有清晰、完整、准确的名称、型号、制造厂、出厂编号等标识。

热膨胀仪应各部件齐全且连接良好，各旋钮、按键及相应软件应能正常工作，无影响使用性能的缺陷。

7.1.2 校准前准备

7.1.2.1 开机

开启热膨胀仪主机、循环水浴和计算机电源等各测试用设备。按照操作说明书要求完成预热后开始试验。

若有激光测长系统，还应确保激光器信号稳定并确认信号强度满足测量要求后再进行测量。

7.1.2.2 确认传递标准长度

根据传递标准校准证书，在热膨胀仪测量软件中输入传递标准的长度值。

如有必要，也可将传递标准置于 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 环境下恒温 2 h 后，使用满足测量要求的、经校准的长度计量仪器对传递标准长度 L_0 进行再次测量确认。

7.1.2.3 装载传递标准

将传递标准两端用无水乙醇擦拭干净，同时清洁样品支架端面，用镊子将传递标准安全放置在样品支架上，调节各项设置到最佳测量状态。

7.1.2.4 校准基线

如有必要，在正式校准前应根据实验条件，提前做好仪器的测量基线。

注：对绝对法热膨胀仪没有基线校准的要求。

7.1.2.5 设置温度变化速率

通常升温速率设置为 2 K/min，降温速率设置为 5 K/min。当热膨胀仪长时间搁置后的首次使用，应让其先按校准温度的上下限空载运行一次。

考虑重新装载传递标准后，推杆和传递标准端面会粘有粉尘颗粒，影响测量结果。可让炉体温度从室温升至 300°C ，在 300°C 恒温 20 min，通过高温使端面粉尘颗粒被压实，使传递标准与推杆端面贴合，从而去除对实验结果的影响，然后再进行校准工作。

7.1.2.6 设定控温程序

确认装载好传递标准，按照热膨胀仪有效温度测量区间设置校准过程的温度最低限、最高限、温度采样间隔等，在测量过程中按采样间隔记录各温度采样点时的传递标准长度变化量。

炉体内如需惰性气体进行吹扫保护，应设定氮气等惰性气体的流速为 50 mL/min。

7.2 热膨胀仪热膨胀系数示值误差及测量重复性

完成 7.1 所述校准前检查和校准前准备工作后，即可进行校准工作。其中，热膨胀系数的计算如下。

7.2.1 热膨胀系数计算

利用校准过程中记录的温度为 t （单位为 $^{\circ}\text{C}$ ）时的传递标准长度变化量 ΔL ，根据公式（1）计算各记录温度点 t （单位为 $^{\circ}\text{C}$ ）的材料热膨胀系数。

7.2.2 热膨胀系数示值误差

按照设定好的校准过程，重复进行三次实验。变温速率与测量温度区间等各测量设定参数保持不变，记录测量数据，可计算得到三次热膨胀系数测量结果。

根据三次测量结果，按公式（3）可计算出温度为 t （单位为 $^{\circ}\text{C}$ ）时的所测传递标准的热膨胀系数的算术平均值，按公式（4）计算出热膨胀仪各温度点的热膨胀系数的示值误差 $\Delta\alpha_t$ 。

$$\bar{\alpha}_t = (\alpha_{t1} + \alpha_{t2} + \alpha_{t3}) / 3 \quad (3)$$

$$\Delta\alpha_t = \bar{\alpha}_t - \alpha_{\text{SRM}t} \quad (4)$$

式中：

$\bar{\alpha}_t$ ——温度为 t （单位为 $^{\circ}\text{C}$ ）时，传递标准的三次测量得到的热膨胀系数 α_{t1} 、 α_{t2} 、 α_{t3} 的算术平均值， K^{-1} ；

$\alpha_{\text{SRM}t}$ ——传递标准在温度为 t （单位为 $^{\circ}\text{C}$ ）时的热膨胀系数标准值， K^{-1} 。

7.2.3 热膨胀系数测量重复性

按照设定好的控温程序，重复进行三次实验，变温速率与测量温度区间等各测量设定参数保持不变，记录测量数据，计算得到三次热膨胀系数测量结果。

按公式（5）计算材料热膨胀仪各温度点的测量重复性 δ_t ，即取三次测量结果的最大值与最小值之差。

$$\delta_t = \max(\alpha_{t1}, \alpha_{t2}, \alpha_{t3}) - \min(\alpha_{t1}, \alpha_{t2}, \alpha_{t3}) \quad (5)$$

7.3 采用不同量级热膨胀系数的传递标准进行校准

7.3.1 不同量级热膨胀系数传递标准的测量组合

为全面地、准确地评价热膨胀仪的计量特性，需用不同量级热膨胀系数的传递标准对热膨胀仪进行校准。综合美国、俄罗斯和我国相关标准，推荐石英、 Al_2O_3 、不锈钢或铜等材质制成的标准器在经国家级计量技术机构校准及稳定性确认后可作为传递标准。石英的膨胀系数大约为 $(2\sim 5) \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$ ， Al_2O_3 的膨胀系数大约为 $6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ，不锈钢的膨胀系数大约为 $1.2 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ ，铜的膨胀系数大约为 $1.8 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ 。对至少两种不同材质的传递标准分别重复 7.2 中的校准过程后，再分别得出相应的测量结果。

注：针对 $(500\sim 2\,400) ^{\circ}\text{C}$ 的炉体，受限石英的耐温性能，可用石墨或其他相应的传递标准进行替代。

7.3.2 不同膨胀系数材料的升温速率

材料不同，其热传导性也不同。除非特殊约定，宜采用前述温度变化速率。

在需分析热传导性能对热膨胀系数的影响时，相关各方可约定变温速率，如：石英传递标准升温速率为 $1 \text{K}/\text{min}$ ， Al_2O_3 传递标准升温速率为 $2 \text{K}/\text{min}$ ，不锈钢或铜传递标准升温速率为 $5 \text{K}/\text{min}$ 。

7.4 炉温稳定性

热膨胀仪的温度保持性能将直接反映炉体在 t （单位为 $^{\circ}\text{C}$ ）下测得的热膨胀系数是

否准确。因此，如有必要和可能，可增加对炉体恒温性能的评估以及测温传感器的校准（将校准过的高精度标准测温传感器与被测温度传感器贴合在一起，同步记录两个传感器在不同温度点的温度示值，并进行比较）。以（-180~500）℃炉体为例，宜选择在-150℃、-100℃、-50℃、0℃、20℃、100℃、200℃、300℃、400℃、500℃温度点进行炉温稳定性测量。每个温度点按设定温度保持30 min，记录在此期间的炉体温度变化数据，根据公式（6）计算各温度点的炉温稳定性 $T_{t\text{-HOLD}}$ 。

$$T_{t\text{-HOLD}} = t_{\max} - t_{\min} \quad (6)$$

式中：

t_{\max} ——规定时间内，温度 t （单位为℃）时的炉体温度最大值，℃；

t_{\min} ——规定时间内，温度 t （单位为℃）时的炉体温度最小值，℃。

注：由于软件的设置和热膨胀仪结构限制，部分厂商的设备无法输出炉体温度随时间变化数据及无法进行测温传感器的单独校准，因此炉温稳定性试验可选做。

8 校准结果表达

8.1 校准结果处理

校准结果按照 7.2、7.3 和 7.4 规定计算。校准结果的测量不确定度按照 JJF 1059.1—2012 评定，测量不确定度评定示例见附录 C。

8.2 校准证书

经校准的热膨胀仪出具校准证书。

校准结果应在校准证书或校准报告上反映。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；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- 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，包括名称和代号；
- 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) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- 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，不得部分复制校准证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 12 个月。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，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。



附录 A

热膨胀仪校准原始记录参考格式

| | | | |
|---|--|-------------------|--|
| 校准证书编号： | | 原始记录编号： | |
| 委托单位 | | | |
| 仪器名称 | | 型号 | |
| 制造厂 | | 出厂编号 | |
| 校准地点 | | | |
| 环境温度/℃ | | 校准日期 | |
| 相对湿度/% | | 其他 | |
| 依据技术文件 | | | |
| 校准员 | | 核验员 | |
| 传递标准型号/编号： | | 传递标准长度 L_0 /mm： | |
| 热膨胀系数计算参考温度点/℃ | | | |
| 升温速率/(℃/min) | | | |
| 测试温区下限/℃ | | | |
| 测试温区上限/℃ | | | |
| 温度记录间隔/℃ | | | |
| 传递标准热膨胀系数随温度变化曲线图及传递标准参考曲线 | | | |
| <div style="border: 1px dashed black; height: 150px; width: 100%;"></div> | | | |

1. 传递标准 1

| 传递标准长度 L_0 /mm | | | | | 升/降温速率/(K/min) | | |
|------------------|--------------------|------------------|--------|--------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| 温度/°C | 热膨胀系数标准值/ K^{-1} | 热膨胀仪示值/ K^{-1} | | | 热膨胀仪示值误差/ K^{-1} | 热膨胀仪测量重复性/ K^{-1} | 测量不确定度/ K^{-1} ($k=2$) |
| | | 测量数据 1 | 测量数据 2 | 测量数据 3 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

2. 传递标准 2

| 传递标准长度 L_0 /mm | | | | | 升/降温速率/(K/min) | | |
|------------------|--------------------|------------------|--------|--------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| 温度/°C | 热膨胀系数标准值/ K^{-1} | 热膨胀仪示值/ K^{-1} | | | 热膨胀仪示值误差/ K^{-1} | 热膨胀仪测量重复性/ K^{-1} | 测量不确定度/ K^{-1} ($k=2$) |
| | | 测量数据 1 | 测量数据 2 | 测量数据 3 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

3. 传递标准 3

| 样品 L_0 /mm | | | | | 升/降温速率/(K/min) | | |
|--------------|--------------------|------------------|--------|--------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| 温度/°C | 热膨胀系数标准值/ K^{-1} | 热膨胀仪示值/ K^{-1} | | | 热膨胀仪示值误差/ K^{-1} | 热膨胀仪测量重复性/ K^{-1} | 测量不确定度/ K^{-1} ($k=2$) |
| | | 测量数据 1 | 测量数据 2 | 测量数据 3 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

4. 炉温稳定性测量数据

| 炉温稳定性测量数据（选做） | |
|---------------|------------------------|
| 设定温度/℃ | $T_{t\text{-HOLD}}$ /℃ |
| | |
| | |
| | |



附录 B

证书内页参考格式

校准证书编号：

| | | | |
|------------|--|-------------|--|
| 校准地点 | | 环境温度/℃ | |
| 相对湿度/% | | 依据技术文件 | |
| 标准器 1 证书编号 | | 标准器 1 证书有效期 | |
| 标准器 2 证书编号 | | 标准器 2 证书有效期 | |
| 标准器 3 证书编号 | | 标准器 3 证书有效期 | |

校准结果

| | |
|-----------------|--|
| 标准器长度 L_0 /mm | |
| 热膨胀系数计算参考温度点/℃ | |
| 升温速率/(℃/min) | |
| 测试温区下限/℃ | |
| 测试温区上限/℃ | |

热膨胀仪测得标准器热膨胀系数随温度变化曲线图及标准器参考值曲线

1. 标准器 1 校准结果

| 标准器温度/°C | 标准器热膨胀系数标准值/ K^{-1} | 热膨胀仪示值误差/ K^{-1} | 热膨胀仪测量重复性/ K^{-1} | 测量不确定度/ K^{-1} ($k=2$) |
|----------|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

2. 标准器 2 校准结果

| 标准器温度/°C | 标准器热膨胀系数标准值/ K^{-1} | 热膨胀仪示值误差/ K^{-1} | 热膨胀仪测量重复性/ K^{-1} | 测量不确定度/ K^{-1} ($k=2$) |
|----------|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

3. 标准器 3 校准结果

| 标准器温度/°C | 标准器热膨胀系数标准值/ K^{-1} | 热膨胀仪示值误差/ K^{-1} | 热膨胀仪测量重复性/ K^{-1} | 测量不确定度/ K^{-1} ($k=2$) |
|----------|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

4. 热膨胀仪炉温稳定性测量结果（选测）

| 炉温稳定度数据 | |
|---------|-----------------|
| 设定温度/°C | $T_{t-HOLD}/°C$ |
| | |
| | |
| | |

以下空白

附录 C

热膨胀仪示值误差测量结果的测量不确定度评定示例

C.1 测量方法

将标准器置于材料热膨胀仪中，使用和基线校准时同样的温控程序（激光绝对法测量时不存在基线校准），测得标准器在不同温度下的长度变化量。使用长度测量设备测量标准器在 20 °C 时的长度，根据热膨胀系数计算公式计算标准器在不同温度点的热膨胀系数值，并与标准器的热膨胀系数标准值进行比较。

C.2 测量模型

根据热膨胀仪测量原理、计算方法及校准过程，以平均热膨胀系数计算为例，温度为 t 时其示值误差 $\Delta\alpha_t$ 的测量模型如下：

$$\Delta\alpha_t = \bar{\alpha}_t - \alpha_{\text{SRM}_t} \quad (\text{C.1})$$

式中：

$\bar{\alpha}_t$ ——标准器在温度 t (单位为 °C) 时的热膨胀仪的测量平均值， K^{-1} ；

α_{SRM_t} ——标准器在温度 t (单位为 °C) 时的热膨胀系数标准值， K^{-1} 。

C.3 灵敏系数

根据公式 (C.1)，则灵敏系数： $c_1 = \partial\Delta\alpha_t / \partial\bar{\alpha}_t = 1$ ， $c_2 = \partial\Delta\alpha_t / \partial\alpha_{\text{SRM}_t} = -1$ 。

C.4 测量不确定度来源分析

标准不确定度是由校准误差源的测量不确定度构成的，具体如下。

C.4.1 由热膨胀仪测量重复性引入的测量不确定度 u_1

这里以石英传递标准的三次测量数据作为示例，数据如表 C.1 所示。

表 C.1 石英传递标准的三次试验测量结果

| 样品温度 °C | 第一组 α K^{-1} | 第二组 α K^{-1} | 第三组 α K^{-1} | 重复性 K^{-1} | 平均值 K^{-1} |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| -48.9 | 3.2×10^{-7} | 4.2×10^{-7} | 4.0×10^{-7} | 1.2×10^{-7} | 3.8×10^{-7} |
| 2.5 | 4.4×10^{-7} | 5.2×10^{-7} | 4.7×10^{-7} | 8.0×10^{-8} | 4.8×10^{-7} |
| 20.0 | —— | —— | —— | —— | —— |
| 51.3 | 5.9×10^{-7} | 6.2×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 3.0×10^{-8} | 6.0×10^{-7} |
| 101.3 | 5.8×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 6.2×10^{-7} | 4.0×10^{-8} | 6.0×10^{-7} |
| 151.2 | 6.0×10^{-7} | 5.9×10^{-7} | 5.8×10^{-7} | 2.0×10^{-8} | 5.9×10^{-7} |
| 201.0 | 6.1×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 1.0×10^{-8} | 6.0×10^{-7} |
| 251.5 | 6.1×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 6.1×10^{-7} | 1.0×10^{-8} | 6.0×10^{-7} |
| 302.1 | 6.1×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 1.0×10^{-8} | 6.0×10^{-7} |

C.4.2 由标准器引入的测量不确定度 u_{21}

本次校准用标准器为石英传递标准，由中国计量科学研究院出具校准证书，其扩展不确定度为 $U=3.0 \times 10^{-8} \text{K}^{-1}$ ， $k=2$ ，则 $u_{21}=1.5 \times 10^{-8} \text{K}^{-1}$ 。

C.4.3 由标准器长度 L_0 引入的不确定度 u_{22}

已知石英传递标准的长度由数显卡尺在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 测量得到： $L_0=20.32 \text{ mm}$ 。根据卡尺校准证书，其扩展不确定度为 0.02 mm ， $k=2$ ，则其标准测量不确定度为：

$$u = \frac{0.02 \text{ mm}}{2} = 0.010 \text{ mm}$$

根据 $\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T} \times \frac{1}{L_0}$ ，则样品长度 L_0 引入的测量不确定度 u_{22} 为：

$$u_{22} = \frac{\partial \alpha}{\partial L_0} = |(-1)| \times \frac{\Delta L}{\Delta T} \times \frac{1}{L_0^2} \times u$$

根据 ΔT 的不同， ΔL 也不同。当 $\Delta T=50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，对应 $\Delta L=0.6 \text{ } \mu\text{m}$ ，则 $u_{22}=3.5 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1}$ 。因此本示例中以 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 为温度间隔时，该部分贡献可忽略不计，则 $u_2 = \sqrt{(u_{21})^2 + (u_{22})^2} = 1.5 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ 。

C.5 合成标准不确定度

由各标准不确定度来源引入的标准不确定度分量，如表 C.2 所示。

表 C.2 各标准不确定度分量一览表

| 序号 | 不确定度来源 | 不确定度分量 | 灵敏系数 | 标准不确定度量值 |
|----|----------------------|----------|------|-------------------------------------|
| 1 | 由热膨胀仪测量重复性引入的测量不确定度 | u_1 | 1 | 见表 C.1 |
| 2 | 由标准器引入的测量不确定度 | u_{21} | -1 | $1.5 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ |
| 3 | 由标准器长度 L_0 引入的不确定度 | u_{22} | | 0 |

表 C.2 中各标准不确定度分量独立不相关，根据合成标准不确定度公式：

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

则用石英传递标准对热膨胀仪进行校准的标准不确定度，如表 C.3 所示。

表 C.3 基于石英传递标准的热膨胀仪合成标准测量不确定度

| 样品温度/ $^\circ\text{C}$ | $u(\alpha)/\text{K}^{-1}$ |
|------------------------|---------------------------|
| -48.9 | 1.0×10^{-7} |
| 2.5 | 8.1×10^{-8} |
| 20 | — |
| 51.3 | 3.4×10^{-8} |
| 101.3 | 4.3×10^{-8} |
| 151.2 | 2.5×10^{-8} |
| 201.0 | 1.8×10^{-8} |
| 251.5 | 1.8×10^{-8} |
| 302.1 | 1.8×10^{-8} |

C.6 扩展不确定度

根据扩展不确定度的计算公式： $U=k \cdot u_c$ 。

取 $k=2$ ，则表 C.3 中数据对应扩展不确定度如表 C.4 所示。

表 C.4 基于石英传递标准的热膨胀仪校准的扩展不确定度

| 温度/℃ | $u(\alpha)/\text{K}^{-1}$ | U $k=2$ |
|-------|---------------------------|----------------------|
| -48.9 | 1.0×10^{-7} | 2.0×10^{-7} |
| 2.5 | 8.1×10^{-8} | 1.6×10^{-7} |
| 20 | — | — |
| 51.3 | 3.4×10^{-8} | 6.8×10^{-8} |
| 101.3 | 4.3×10^{-8} | 8.6×10^{-8} |
| 151.2 | 2.5×10^{-8} | 5.0×10^{-8} |
| 201.0 | 1.8×10^{-8} | 3.6×10^{-8} |
| 251.5 | 1.8×10^{-8} | 3.6×10^{-8} |
| 302.1 | 1.8×10^{-8} | 3.6×10^{-8} |