

轨道交通缓冲器用弹性胶泥物理性能测试结果不确定度的 评定

1. 测量方法与数学模型

采用密度瓶法，参比介质为蒸馏水。

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)} \times \rho_0$$

ρ : 弹性胶泥密度, g/cm³

m_1 : 空密度瓶质量, g

m_2 : 密度瓶+弹性胶泥, g

m_3 : 密度瓶+水, g

m_4 : 密度瓶+胶泥+水, g

ρ_0 : 20℃蒸馏水密度, $\rho_0 = 0.99820 \text{ g/cm}^3$

2、不确定度来源识别

序号	不确定度来源	分量符号	说明
1	测量重复性	u_1	A 类重复测试引入
2	天平最大允许误差	u_2	B 类 检定证书给出
3	密度瓶溶剂/校准误差	u_3	密度瓶检定允许
4	温度波动对水密度的影响	u_4	水密度随温度变化
5	温度波动对试样体积影响	u_5	弹性胶泥热膨胀

3、各标准不确定度分量评定

3.1 测量重复性

对同一样品重复测量 6 次，密度结果为 1.4321、1.4315、1.4327、1.4319、1.4324、1.4312，单位：g / cm³

$$\bar{\rho} = 1.4320 \text{ g / cm}^3$$

$$s(\rho) = 0.00056 \text{ g/cm}^3$$

$$u_1 = s(\rho) = 0.00056 \text{ g/cm}^3$$

$$u_{1(r)} = \frac{u_1}{\sqrt{6}} = 0.00039$$

3. 2 电子天平称量引入的不确定度

天平分辨力 0.1mg, 最大允许误差 $MPEV = \pm 0.2\text{mg}$, 矩形分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$

$$u_2 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} \approx 0.1155\text{mg} \approx 0.0001155\text{g}$$

试验共进行 4 次独立称量 m_1, m_2, m_3, m_4 合成称量绝对不确定度

$$\begin{aligned} u_m &= \sqrt{u(m)^2 + u(m)^2 + u(m)^2 + u(m)^2} = \sqrt{4 \cdot u(m)^2} = 2u_2 \\ &= 2 \times 0.0001155 \approx 0.000231\text{g} \end{aligned}$$

$$u_{2(r)} = \frac{u_m}{m} = \frac{0.000231}{35.8} \approx 0.00000645$$

3. 3 密度瓶体积引入的不确定度

密度瓶校准允许误差 $\pm 0.0002\text{g/cm}^3$, 矩形分布

$$u_3 = \frac{0.0002}{\sqrt{3}} \approx 0.0115\text{g/cm}^3$$

$$u_{3(r)} = \frac{u_3}{25} \approx 0.00046$$

3. 4 水密度温度波动引起的不确定度

水密度受试验温度波动影响, 温度波动引起水密度变化的半区间为 0.0004g/cm^3 , 按矩形分布评定, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则

$$u_4 = \frac{0.0004}{\sqrt{3}} \approx 0.000023\text{g/cm}^3$$

$$u_{4(r)} = \frac{u_4}{\rho_1} = \frac{0.000023}{0.99820} \approx 0.000023$$

3. 5 温度对胶泥体积影响引入的不确定度

弹性胶泥体积膨胀系数

$$\alpha = 6.5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}, \Delta T = 0.2^\circ\text{C}$$

$$u_{5(r)} = \alpha \cdot \Delta T = 6.5 \times 10^{-4} \times 0.2 \approx 0.00013$$

3、合成相对标准不确定度

$$\begin{aligned} u_r &= \sqrt{u_{1(r)}^2 + u_{2(r)}^2 + u_{3(r)}^2 + u_{4(r)}^2 + u_{5(r)}^2} \\ &= \sqrt{0.0039^2 + 0.00000645^2 + 0.00046^2 + 0.00023^2 + 0.00013^2} \\ &\approx 0.0039 \end{aligned}$$

5、合成标准不确定度

$$u_c = u_r \times \bar{\rho} = 0.0039 \times 1.4320 = 0.0056\text{g/cm}^3$$

6、扩展不确定度

$$U = 2u_c = 2 \times 0.0056 = 0.0112 \text{ g/cm}^3$$

7、报告

$$\bar{x} \pm U = 1.4320 \text{ g/cm}^3 \pm 0.0112 \text{ g/cm}^3$$

二、DSC 法测试玻璃化转变温度不确定度评定

1、测量模型

DSC 测得玻璃化转变中点温度：

$T_g = f(\text{温度校准、升温速率、基线、试样、重复测量})$ 。 T_g 为温度量，单位：℃

2、不确定度来源识别

序号	不确定度来源	分量符号	说明
1	测量重复性	u_1	A 类重复测试引入
2	DSC 温度校准引入	u_2	B 类 检定证书给出
3	升温速率偏差引入	u_3	程序升温实际速率与设定值之差
4	基线/拐点/中点取值判断误差	u_4	人工和软件自动取值的差异
5	试样因素、环境、设备因素	/	试样均一性、试样接触差异、环境温度波动、炉体热漂移等归入 A 类

3、各标准不确定度分量评定

3.1 测量重复性

对同一样品重复测量 6 次，玻璃化转变温度结果为 117.2℃、118.4℃、117.2℃、116.3℃、115.8℃、115.6℃。

$$\overline{T_g} = 116.77^\circ\text{C} \quad s(T_g) \approx 1.06^\circ\text{C}$$

$$u_1 = \frac{s(T_g)}{\sqrt{n}} = \frac{1.06}{\sqrt{6}} \approx 0.43^\circ\text{C}$$

3.2 DSC 温度校准引入的不确定度

用金属标准物质校准温度，证书给出温度允许偏差±0.2℃，矩形分布 $k = \sqrt{3}$ 。

$$u_2 = \frac{2.0}{\sqrt{3}} \approx 1.15^\circ\text{C}$$

3.3 升温速率偏差引入的不确定度

DSC 实际升温速率与设定速率存在偏差，该偏差带来玻璃化转变温度偏移区

间 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，矩形分布 $k = \sqrt{3}$ 。

$$u_3 = \frac{1.0}{\sqrt{3}} \approx 0.577^{\circ}\text{C}$$

3.4 曲线取值（中点判读）引入的不确定度

同一 DSC 曲线，人工/软件选取玻璃化转变中点的读数波动区间 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，矩形分布 $k = \sqrt{3}$ 。

$$u_4 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \approx 0.289^{\circ}\text{C}$$

4、合成标准不确定度

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{0.43^2 + 1.15^2 + 0.577^2 + 0.289^2} \approx 2.17^{\circ}\text{C}$$

5、扩展不确定度

$$U = 2u = 2 \times 2.17 \approx 4.3^{\circ}\text{C}$$

6、报告

$$\bar{x} \pm U = 116.8^{\circ}\text{C} \pm 4.3^{\circ}\text{C}$$

三、旋转黏度计法测试黏度不确定度评定

1、测量方法与数学模型

弹性胶泥动力黏度采用旋转黏度计测定，测量模型为：

$$\eta = K \cdot T / \omega$$

η ：动力黏度，单位 $\text{p}_a \cdot \text{s}$

K ：转子/系统常数

T ：扭矩

ω ：角速度（转速）

2、不确定度来源识别

序号	不确定度来源	分量符号	说明
1	测量重复性	u_1	A 类重复测试引入
2	黏度计扭矩/示值误差	u_2	B 类 校准证书给出
3	转速引入误差	u_3	/
4	转子常数/校准因子 k 的不确定度	u_4	校准证书取值
5	温度波动引起的不确定度	u_5	/

3、各标准不确定度分量评定

3.1 测量重复性

对同一样品在常温下 $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ，转速为 6，重复测量 6 次，黏度结果为 $467\text{p}_a \cdot \text{s}$ 、 $463\text{p}_a \cdot \text{s}$ 、 $450\text{p}_a \cdot \text{s}$ 、 $456\text{p}_a \cdot \text{s}$ 、 $473\text{p}_a \cdot \text{s}$ 、 $481\text{p}_a \cdot \text{s}$ 。

$$\bar{\eta} = 465\text{p}_a \cdot \text{s} \qquad s(\eta) \approx 1.26$$

$$u_1 = \frac{s(\eta)}{\sqrt{n}} = \frac{1.26}{\sqrt{6}} \approx 0.51$$

$$u_{1(r)} = \frac{u_1}{\bar{\eta}} = \frac{0.51}{465} \approx 0.0011$$

3.2 仪器示值误差引入的不确定度

设仪器最大允许误差 MPEV ，半区间 $a = |\text{MPEV}|$ ，矩形分布 $k = \sqrt{3}$ 。

$$\begin{aligned} \text{MPEV} &= \text{TIC} \times \text{SMC} \times 10000 / \text{转速} \times 1\% \\ &= 8 \times 100 \times 10000 / 6 \times 1\% \end{aligned}$$

$$= 13.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$u_2 = \frac{MPEV}{\sqrt{3}} = \frac{13.3}{\sqrt{3}} \approx 7.68 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$u_{2(r)} = \frac{u_2}{\bar{\eta}} = \frac{7.68}{456} \approx 0.0165$$

3.3 转速引入的不确定度

校准证书给出转速允许的相对偏差 $\pm 1.0\%$ ，矩形分布 $k = \sqrt{3}$

$$u_{3(r)} = \frac{0.010}{\sqrt{3}} \approx 0.00577$$

3.4 转子常数引入的不确定度

校准证书给出转子常数给出的相对标准不确定度为：

$$u_{4(r)} \approx 0.010$$

3.5 温度波动引入的不确定度

弹性胶泥为非牛顿高分子材料，黏度对温度变化较敏感，在本次试验的小温度波动范围内，黏度随温度变化采用线性近似，黏温系数定义为：

$$a_{\eta} = \frac{1}{\bar{\eta}} \cdot \frac{d\eta}{dT}$$

a_{η} ——黏度温度系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$

$\bar{\eta}$ ——黏度测量平均值， $\text{Pa} \cdot \text{s}$

$\frac{d\eta}{dT}$ ——黏度随温度变化的斜率。

由控温波动半区间 ΔT ，得到温度效应引起黏度变化的半区间：

$$a = \bar{\eta} \cdot |a_{\eta}| \cdot \Delta T$$

温度波动引入的不确定度按矩形分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$

$$u_5 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{\bar{\eta} \cdot |a_{\eta}| \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$$

$$u_{5(r)} = \frac{u_5}{\bar{\eta}} = \frac{|a_{\eta}| \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$$

$$a_{\eta} = 0.3^{\circ}\text{C}^{-1}, \Delta T = 0.5^{\circ}\text{C}$$

$$u_{5(r)} = \frac{0.3 \times 0.5}{\sqrt{3}} \approx 0.058$$

注：此黏度温度系数在试验固定转子转速的条件下，通过不同温度点的黏度实测结果计算得到，该系数只适用本次测试条件及小温度波动区间。

1、合成相对标准不确定度

$$\begin{aligned} u_r &= \sqrt{u_{1(r)}^2 + u_{2(r)}^2 + u_{3(r)}^2 + u_{4(r)}^2 + u_{5(r)}^2} \\ &= \sqrt{0.0099^2 + 0.0165^2 + 0.00577^2 + 0.010^2 + 0.058^2} \\ &\approx 0.062 \end{aligned}$$

5、合成标准不确定度

$$u = u_r \times \bar{\eta} = 0.062 \times 465 = 28.9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

6、扩展不确定度

$$U = 2u = 2 \times 28.9 = 57.8$$

7、报告

$$\bar{x} \pm U = 465 \text{ Pa} \cdot \text{s} \pm 57.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$