

李氏瓶容量测量不确定度评定

□王红艳

渭南市检验检测研究院

【摘要】李氏瓶作为一种用于水泥密度测量的计量器具，随着测量技术的不断进步，对其容量测量的准确度要求日益提高。本文深入分析了影响李氏瓶容量测量准确度的各类因素，并对其不确定度进行了全面的评定，可供计量人员、企业计量管理人员参考使用，以助力提升测量结果的可靠性和准确性。

【关键词】李氏瓶；不确定度评定；测量结果

文献标识码：A 文章编号：1003-1870(2025)11-0038-04

Evaluation of Volume Measurement Uncertainty of Le Chatelier Flask

【Abstract】As a measuring instrument used for cement density measurement, Le Chatelier flask is subject to increasingly stringent volume measurement accuracy requirements with the continuous advancement of measurement technologies. This paper deeply analyzes various factors affecting the volume measurement accuracy of Le Chatelier flask and conducts a comprehensive evaluation of its uncertainty, which can be used as a reference for metrology personnel and enterprise metrology management personnel to help improve the reliability and accuracy of measurement results.

【Keywords】Le Chatelier flask; evaluation of uncertainty; measurement result

引言

李氏瓶由优质材料制成，具有透明无条纹、抗化学侵蚀性以及足够的厚度，以确保良好耐裂性等特点，是水泥密度试验和其他粉体物料密度测定的专用玻璃量器。在试验过程中，将一定质量的水泥或其他粉体物料倒入装有足够量液体介质的李氏瓶内，液体的体积应足以充分浸润水泥颗粒。根据阿基米德定律可知，粉体颗粒的体积等于它所排开的液体体积，从而计算出单位体积物料质量即为密度。在李氏瓶的使用过程中，其不确定度是确保测量结果可靠性和准确性的核心环节。对不确定度来源的进行全面分析，有助于识别误差产生的根源，优化仪器使用条件，最终达到提升测量质量的目的。

的。以下是李氏瓶测量结果的不确定度评定示例：

1 基本信息

1.1 被测对象

仪器名称	规程/型号	生产厂家	校准点	材质
李氏瓶	24 mL	天马	1 mL、24 mL	钠钙

1.2 测量标准

电子天平：最大称量1000g，分度值0.001g，准确度等级Ⅱ级。

温度计：测量范围(0~50)℃，分辨率0.1℃。

1.3 环境条件

室温：(20±5)℃，且室温变化不得大于1℃/h。

具体测量时的环境温度：20.5℃

介质温度：20.1 °C

1.4 测量方法

对李氏瓶的容量示值误差进行校准，校准点设定为1mL和24mL。

2 数学模型

测量的数学模型：

$$V_{20} = m \cdot K(t)$$

式中： V_{20} ——被校准李氏瓶20°C时的实际容量/
mL；

m ——被校准李氏瓶内纯水的质量值/g；

$K(t)$ ——测量温度下的修正值，mL/g，查附录A。

$$c_m = \frac{\partial(V)}{\partial(m)} = K(t) \quad c_K = \frac{\partial(V)}{\partial(K)} = m$$

$$u_c = \sqrt{c_m^2 u(m)^2 + c_K^2 u(K)^2}$$

3 输入量的标准不确定度来源

3.1 不确定度的来源

测量结果的标准不确定度主要来源有：

3.1.1 输入量 m 的标准不确定度 $u(m)$ ，其由以下
3个标准不确定度分量构成：

a. 电子天平引入的标准不确定度 $u(m_1)$ ；

b. 纯水质量值的重复性测量引入的标准不确定度
 $u(m_2)$ ；

c. 被测量容器液面观察与调定引入的标准不确定
度 $u(m_3)$ 。

3.1.2 输入量 K 的标准不确定度 $u(K(t))$ 的评定，
其由2个不确定度分量构成：

a. 温度变化引入的标准不确定度 $u(K(t)_1)$ ；

b. 空气密度引入的标准不确定度 $u(K(t)_2)$ 。

3.2 不确定度的评定

输入量 m 的标准不确定度 $u(m)$ 的评定：

3.2.1 称量时电子天平示值误差引入的标准不
确定度 $u(m_1)$

李氏瓶所用1000 g分度值为0.001 g电子天平的
最大允许误差为： ± 15 mg，按均匀分布进行估计，取
包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

$$u(m_1) = 0.015 / \sqrt{3} = 0.0087 \text{ g}$$

3.2.2 被测量器内纯水质量值的测量重复性引
入的标准不确定度 $u(m_2)$

A类标准不确定度采用贝塞尔公式进行计算。以
下是表1李氏瓶校准点1mL和24mL的6次测量数据：

表1 李氏瓶校准测量数据

单位：g

次数	1	2	3	4	5	6	平均值
1mL 校准点纯水质量值/g	1.005	1.006	1.011	1.009	1.006	1.008	1.008
对应纯水温度/°C	20.1	20.0	19.9	20.0	20.0	20.1	/
对应 $K(t)$ 值	1.00287	1.00285	1.00283	1.00285	1.00285	1.00287	/
换算的容量示值/mL	1.008	1.009	1.014	1.012	1.009	1.011	1.010
24mL 校准点纯水质量值/g	23.998	23.999	24.011	24.008	24.006	24.008	24.005
对应纯水温度/°C	20.2	20.3	20.2	20.1	20.0	20.0	/
对应 $K(t)$ 值	1.00289	1.00291	1.00289	1.00287	1.00285	1.00285	/
换算的容量示值/mL	24.067	24.069	24.080	24.077	24.074	24.076	24.074

$$s_{1\text{mL}}(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.002 \text{ g}$$

$$s_{24\text{mL}}(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.005 \text{ g}$$

实际测量是以单次测量值作为测量结果，故：

$$u_{1\text{mL}}(m_2) = s_{1\text{mL}}(\bar{x}) = 0.002 \text{ g}$$

$$u_{24\text{mL}}(m_2) = s_{24\text{mL}}(\bar{x}) = 0.005 \text{ g}$$

3.2.3 被测量器液面观察与调定引入的标准不
确定度 $u(m_3)$

被测李氏瓶的标线处瓶颈内径为 $D=12\text{mm}$ ，人员读数视差约 $h=0.2\text{mm}$ ， 20°C 时纯水的密度 $\rho=0.998\text{g/mL}$ 。按均匀分布估计，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，由此引入的标准不确定度分量为：

$$u(m_3) = \frac{1}{4 \times \sqrt{3}} \delta D^2 h \rho \approx 0.013\text{g}$$

3.2.4 输入量 m 的标准不确定度 $u(m)$ 的评定：

测量李氏瓶纯水质量过程中，纯水测量引入的不确定度主要与重复测量和液面观察测定值有关，这里取其大者，即 $u(m_3)$ 。且 $u(m_1)$ 与 $u(m_3)$ 相互独立，则：

$$u_{1\text{mL}}(m) = \sqrt{u(m_1)^2 + u(m_3)^2} = 0.013\text{g}$$

$$u_{24\text{mL}}(m) = \sqrt{u(m_1)^2 + u(m_3)^2} = 0.014\text{g}$$

3.2.5 输入量 K 的标准不确定度 $u(K(t))$ 的评定：

3.2.6 测温设备读数引入的不确定度分量 $u(K(t)_i)$

测温设备为测量范围 $(0 \sim 50)^\circ\text{C}/0.1^\circ\text{C}$ 的温度计，最大允许误差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，按服从均匀分布估计，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u(t) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12^\circ\text{C}$$

$$K(t) = \frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B(\rho_w - \rho_A)} [1 + \beta(20 - t)]$$

式中： ρ_B ——砝码密度，取 8.00g/cm^3 ；

ρ_A ——测定时实验室内的空气密度，取 0.0012g/cm^3 ；

ρ_w ——蒸馏水 $t^\circ\text{C}$ 的密度， g/cm^3 ；

β ——被检李氏瓶的体胀系数， $^\circ\text{C}^{-1}$ ；

t ——校准时蒸馏水的温度， $^\circ\text{C}$ ；

m ——被校玻璃量器内所能容纳水的表观质量，

g。

灵敏系数：

$$c = \frac{\partial K}{\partial t} = -\beta \frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B(\rho_w - \rho_A)} = 2.5 \times 10^{-5} \text{cm}^3 / (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$u(K_1) = c \cdot u(t) = 3 \times 10^{-6} \text{cm}^3 / \text{g}$$

3.2.7 空气密度引入的标准不确定度分量 $u(K(t)_2)$

空气密度采用 0.0012g/cm^3 ，而实际密度偏离标准密度最大范围： $\pm 10\%$ ，服从均匀分布，包含因子

$k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u(\rho_A) = \frac{a}{k} = \frac{0.0012\text{g/cm}^3 \times 10\%}{\sqrt{3}} = 0.00007\text{g/cm}^3$$

灵敏系数

$$c = \frac{\partial K}{\partial \rho_A} = \frac{\rho_B - \rho_w}{\rho_B(\rho_w - \rho_A)^2} [1 + \beta(20 - t)] = 0.8818\text{cm}^3 / \text{g}$$

$$u(K_2) = c \cdot u(\rho_A) = 6.2 \times 10^{-5} \text{cm}^3 / \text{g}$$

3.2.8 输入量 K 的标准不确定度 $u(K(t))$ 的评定：

$u(K_1)$ 与 $u(K_2)$ 相互独立，则：

$$u(K(t)) = \sqrt{u^2(K(t)_1) + u^2(K(t)_2)} = 6.2 \times 10^{-5} \text{mL/g}$$

表2 不确定度来源分析

符号	不确定度来源	不确定度分量		灵敏度系数
$u(m)$	电子天平引入的不确定度	1mL	0.013 g	1.00285 mL/g
		24mL	0.014 g	1.00285 mL/g
$u(K(t))$	温度变化引入的不确定度	1mL	6.2×10^{-5} mL/g	1.008 g
		24mL	6.2×10^{-5} mL/g	24.005 g

4 合成标准不确定度的评定

合成标准不确定度计算：

其测量结果的不确定度分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c(V) = \sqrt{c_m^2 u(m)^2 + c_K^2 u(m_K)^2}$$

经计算，得到： $u_c(1\text{mL}) \approx 0.013\text{mL}$

$$u_c(24\text{mL}) \approx 0.014\text{mL}$$

5 扩展不确定度的评定

取 $k=2$ ，得到扩展不确定度为：

$$U(1\text{mL}) = k \times u_c = 2 \times 0.013\text{mL} = 0.03\text{mL}$$

$$U(24\text{mL}) = k \times u_c = 2 \times 0.014\text{mL} = 0.03\text{mL}$$

测量结果扩展不确定度报告：

李氏瓶容量在校准点1mL、24mL测量结果的扩展不确定度为： $U=0.03\text{mL}$ ， $k=2$

6 结语

本文以李氏瓶为例，系统且详细地阐述了其不确定度评定方法，从多个方面深入分析了不确定度

的来源，并对每个来源进行了严谨的评定和计算。这一过程不仅有助于精准识别测量过程中的误差，还能为技术人员和企业质量管理人员在实际工作中优化仪器使用条件、提升测量质量提供具有重要参

考价值的依据，从而确保测量结果的可靠性和准确性得以有效提升，为相关领域的测量工作提供坚实的保障。

附录A

A.1

衡量法 $K(t)$ 值表

(硼硅玻璃体胀系数 $10 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ ，空气密度 0.0012g/cm^3)

表A.1

水温/°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
15	1.00200	1.00201	1.00203	1.00204	1.00206	1.00207	1.00209	1.00210	1.00212	1.00213
16	1.00215	1.00216	1.00218	1.00219	1.00221	1.00222	1.00224	1.00225	1.00227	1.00229
17	1.00230	1.00232	1.00234	1.00235	1.00237	1.00239	1.00240	1.00242	1.00244	1.00246
18	1.00247	1.00249	1.00251	1.00253	1.00254	1.00256	1.00258	1.00260	1.00262	1.00264
19	1.00266	1.00267	1.00269	1.00271	1.00273	1.00275	1.00277	1.00279	1.00281	1.00283
20	1.00285	1.00286	1.00288	1.00290	1.00292	1.00294	1.00296	1.00298	1.00300	1.00303
21	1.00305	1.00307	1.00309	1.00311	1.00313	1.00315	1.00317	1.00319	1.00322	1.00324
22	1.00327	1.00329	1.00331	1.00333	1.00335	1.00337	1.00339	1.00341	1.00343	1.00346
23	1.00349	1.00351	1.00353	1.00355	1.00357	1.00359	1.00362	1.00364	1.00366	1.00369
24	1.00372	1.00374	1.00376	1.00378	1.00381	1.00383	1.00386	1.00388	1.00391	1.00394
25	1.00397	1.00399	1.00401	1.00403	1.00405	1.00408	1.00410	1.00413	1.00416	1.00419

A.2

衡量法 $K(t)$ 值表

(钠钙玻璃体胀系数 $25 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ ，空气密度 0.0012g/cm^3)

表A.2

水温/°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
15	1.00208	1.00209	1.00210	1.00211	1.00213	1.00214	1.00215	1.00217	1.00218	1.00219
16	1.00221	1.00222	1.00223	1.00225	1.00226	1.00228	1.00229	1.00230	1.00232	1.00233
17	1.00235	1.00236	1.00238	1.00239	1.00241	1.00242	1.00244	1.00246	1.00247	1.00249
18	1.00251	1.00252	1.00254	1.00255	1.00257	1.00258	1.00260	1.00262	1.00263	1.00265
19	1.00267	1.00268	1.00270	1.00272	1.00274	1.00276	1.00277	1.00279	1.00281	1.00283
20	1.00285	1.00287	1.00289	1.00291	1.00292	1.00294	1.00296	1.00298	1.00300	1.00302
21	1.00304	1.00306	1.00308	1.00310	1.00312	1.00314	1.00315	1.00317	1.00319	1.00321
22	1.00323	1.00325	1.00327	1.00329	1.00331	1.00333	1.00335	1.00337	1.00339	1.00341
23	1.00344	1.00346	1.00348	1.00350	1.00352	1.00354	1.00356	1.00359	1.00361	1.00363
24	1.00366	1.00368	1.00370	1.00372	1.00374	1.00376	1.00379	1.00381	1.00383	1.00386
25	1.00389	1.00391	1.00393	1.00395	1.00397	1.00400	1.00402	1.00404	1.00407	1.00409

作者简介

王红艳，女，高级工程师。现供职陕西省渭南市检验检测研究院。