

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) XXXX—202X

多通道气体腐蚀试验装置校准规范

Calibration Specification for Multi-Channel Gas
Corrosion Test Apparatus

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

多通道气体腐蚀试验装置 校准规范

Calibration Specification for
Multi-Channel Gas Corrosion
Test Apparatus

JJF (建材) XXXX—202X

归口单位：中国建筑材料联合会

主要起草单位：XXXXXXXXXX

参加起草单位：XXXXXXXXXX

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：

参加起草人：

目 录

引 言	II
多通道气体腐蚀试验装置	3
校准规范	3
1 范围	3
2 引用文件	3
3 术语	3
4 概述	3
5 计量特性	4
6 校准条件	5
6.1 环境条件	5
6.2 测量标准及其他设备	5
7 校准项目和校准方法	5
7.1 校准项目	5
7.2 校准方法	6
8 校准结果表达	9
9 复校时间间隔	9
附录 A 校准证书内页格式	11
附录 B 校准数据原始记录	12
附录 C 试验装置氯化氢浓度示值误差的不确定度评定示例	14

引 言

本规范是以 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》为基础性系列规范进行起草的。

本规范为首次发布。

多通道气体腐蚀试验装置

校准规范

1 范围

本规范适用于氯化氢浓度范围(0~5) $\mu\text{mol/mol}$ 、氨气浓度范围(0~550) $\mu\text{mol/mol}$ 的多通道气体腐蚀试验装置(以下简称:试验装置)的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

GB/T 4706.53 家用和类似用途电器的安全 第53部分:坐便器的特殊要求

IEC 60335-2-84 家用和类似用途电器的安全 第2-84部分:坐便器的特殊要求

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 稳定状态 steady state of testing equipment

试验装置工作空间内任意点的气体浓度达到设备本身性能指标要求时的状态。

3.2 浓度示值误差 concentration indication error

试验装置稳定状态下,气体浓度显示值的平均值与工作空间所有测量点实测气体浓度平均值的差值。

3.3 浓度位置偏差 deviation of concentration position

试验装置稳定状态下,工作空间中任意两个测试点气体浓度平均值之间的差值。

3.4 浓度波动度 concentration fluctuation

试验装置稳定状态下,在规定的时间内,工作空间任意一点气体浓度随时间的变化量。

4 概述

试验装置是根据家用和类似用途电器的安全 第53部分:坐便器的特殊要求(GB/T 4706.53)、家用和类似用途电器的安全 第2-84部分:坐便器的特殊要求(IEC 60335-2-84)中防锈等测试项目设计的能够用于检测智能坐便器等卫浴产品及其关键零部件的耐气体腐蚀试验装置的设备,试验涉及氨气和氯化氢两种气体。

试验装置主体由试验舱、操作控制面板、控制系统、气瓶、循环风机等部分构成，装置示意图见图 1。

试验装置的工作原理如下：首先，将智能坐便器样品置于试验舱内。通过操作控制面板设定所需气体种类、目标浓度及试验时间。试验开始前，打开对应的气体瓶，向舱内通入气体，并启动循环风机以初步混匀气体。内置气体传感器实时监测气体浓度：若浓度低于设定值，设备将持续进气；一旦达到预设浓度，进气阀门自动关闭，同时循环风机持续运行，确保舱内气体分布均匀，从而使样品在稳定可控的环境中进行腐蚀测试。试验结束后，将试验舱内气体排入废气桶。

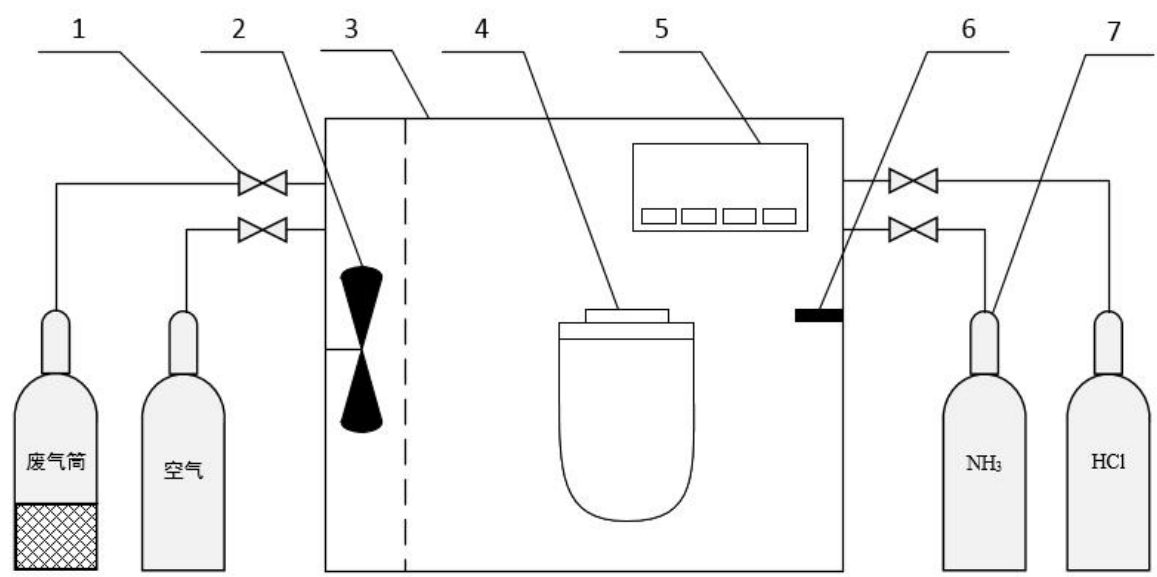


图 1 多通道气体腐蚀试验装置示意图

1—进气阀门；2—循环风机；3—试验舱；4—智能坐便器；5—操作控制面板；6—气体传感器；7—气体瓶。

5 计量特性

多通道气体腐蚀试验装置的计量特性如表 1 所示：

表 1 计量特性及技术要求

序号	项目	测量范围	最大允许误差
1	氯化氢浓度示值误差	(0~5) $\mu\text{mol/mol}$	$\pm 40\%$
2	氯化氢浓度位置偏差	(0~5) $\mu\text{mol/mol}$	40%
3	氯化氢浓度波动度	(0~5) $\mu\text{mol/mol}$	$\pm 20\%$

4	氨气浓度示值误差	(0~550) $\mu\text{mol/mol}$	$\pm 9\%$
5	氨气浓度位置偏差	(0~550) $\mu\text{mol/mol}$	9%
6	氨气浓度波动度	(0~550) $\mu\text{mol/mol}$	$\pm 4.5\%$
7	时间示值误差	(0~3600) s	$\pm 1\text{s}$
注：以上技术要求不用于合格判定，仅供参考。			

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(15~35) $^{\circ}\text{C}$ ；

6.1.2 相对湿度： $\leq 85\%$ ；

6.2 测量标准及其他设备

推荐选择以下标准器具，如表2所示。

表2 测量标准及其他设备

序号	名称	技术要求
1	氯化氢气体检测仪	量程：(0~10) $\mu\text{mol/mol}$ 最大允许误差： $\pm 10\%$
2	氨气气体检测仪	量程：(0~600) $\mu\text{mol/mol}$ 最大允许误差： $\pm 3\%$
3	电子秒表	量程：(0~7200) s 最大允许误差： $\pm 0.1\text{s}$

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3。

表3 校准项目

序号	校准项目	校准方法对应条款
1	氯化氢浓度示值相对误差	7.2.4
2	氯化氢浓度位置偏差	7.2.5
3	氯化氢浓度波动度	7.2.6

4	氨气浓度示值相对误差	7.2.7
5	氨气浓度位置偏差	7.2.8
6	氨气浓度波动度	7.2.9
7	时间示值误差	7.2.10
注：可根据实际应用需要，选择要校准的计量特性项目。		

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

校准前，首先需确认气瓶气压是否处于正常范围，并检查气体管路及试验装置是否存在泄漏，各项功能是否正常工作。

由于氯化氢的校准浓度通常低于氨气的校准浓度，建议优先检测氯化氢气体浓度。校准前，应先取下氨气传感器，安装氯化氢传感器。该操作既能有效减少气体反应造成的原料消耗，也有助于降低传感器之间发生交叉污染的风险。

完成氯化氢气体校准后，需将试验装置内的残余气体完全排空，随后更换为氨气传感器，方可开始氨气的校准操作。

7.2.2 校准点的选择

将气体检测仪探头应布放在试验装置工作空间内的 3 个校准层面上，称为上、中、下 3 层，中层为通过工作空间几何中心的平行于底面的校准工作面。各布点位置与工作空间内壁的距离为各边长的 1/10。布点位置也可根据用户实际工作进行布置。

试验装置工作空间容积小于等于 2 m³时，测试点位为 3 个，测试点位用 α、β、γ 表示，测试点 β 位于位于设备工作空间中层几何中心处，测试点位图如图 2 所示。当试验装置工作空间容积大于 2 m³时，可根据实际需要协商增加布点数量并图示说明。

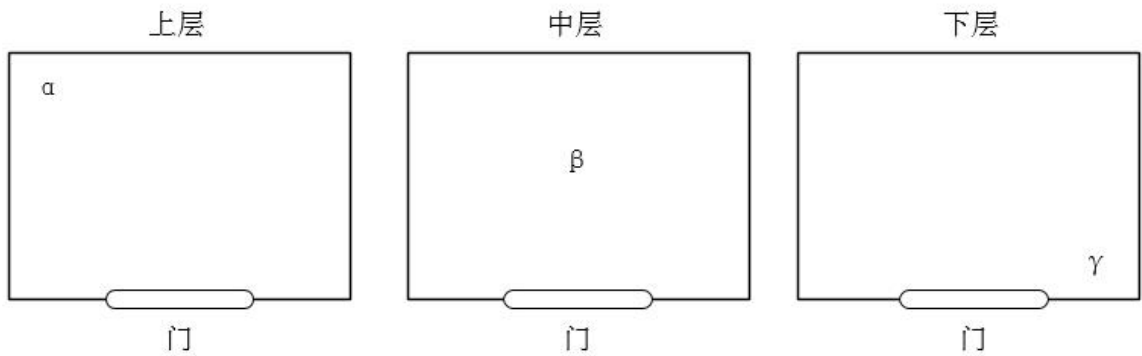


图 2 布点图（设备容积小于等于 2 m³）

7.2.3 气体浓度的校准

按照 6.2.2 规定摆放探头,将试验装置设定到校准浓度,开启运行。试验装置稳定后,使用气体检测仪依次测量各测试点气体浓度。对于每个测试点,待试验装置达到稳定后记录初始数据,之后每隔 5min 记录一次数据,连续记录 6 个数据,3 个测试点共形成 18 个数据,分别记录气体检测仪浓度实测值的 18 个数据和被校试验装置气体浓度显示值的 18 个数据。

7.2.4 氯化氢浓度示值相对误差

氯化氢浓度校准推荐包含 $5\ \mu\text{mol/mol}$,其余校准点根据需求可自行设定。试验装置稳定状态下,试验装置显示值的平均值($\overline{C_x}$)与工作空间所有测量点实测气体浓度平均值($\overline{C_z}$)分别由式(1)、式(2)计算,按式(3)计算氯化氢浓度示值误差。

$$\overline{C_x} = \frac{\sum_{i=1}^{18} C_{xi}}{18} \quad (1)$$

$$\overline{C_z} = \frac{\sum_{i=1}^{18} C_{zi}}{18} \quad (2)$$

$$\Delta C = \frac{\overline{C_x} - \overline{C_z}}{\overline{C_z}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

C_{xi} ——第 i 次氯化氢浓度显示值, $\mu\text{mol/mol}$;

C_{zi} ——第 i 次氯化氢浓度实测值, $\mu\text{mol/mol}$;

ΔC ——氯化氢浓度示值误差, %;

$\overline{C_x}$ ——18 个氯化氢浓度显示值的平均值, $\mu\text{mol/mol}$;

$\overline{C_z}$ ——氯化氢浓度所有测量点 18 个测量数据的平均值, $\mu\text{mol/mol}$ 。

7.2.5 氯化氢浓度位置偏差

氯化氢浓度校准推荐包含 $5\ \mu\text{mol/mol}$,其余校准点根据需求可自行设定。试验装置稳定状态下,氯化氢浓度位置偏差用式(4)计算。

$$\Delta C_u = \frac{\overline{C_{\max}} - \overline{C_{\min}}}{\overline{C_z}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

ΔC_u ——氯化氢浓度位置偏差, %;

$\overline{C_{\max}}$ ——各测量点氯化氢浓度平均值的最大值, $\mu\text{mol/mol}$;

$\overline{C_{\min}}$ ——各测量点氯化氢浓度平均值的最小值, $\mu\text{mol/mol}$ 。

7.2.6 氯化氢浓度波动度

氯化氢浓度校准推荐包含 $5\mu\text{mol/mol}$, 其余校准点根据需求可自行设定。试验装置各测量点实测最高浓度与最低浓度之差的一半, 冠以“±”号, 按公式 (5) 进行计算, 取全部测量点中变化量的最大值作为氯化氢浓度波动度校准结果。

$$\Delta C_f = \pm \max \left\{ \frac{C_{j\max} - C_{j\min}}{2\overline{C_z}} \right\} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

ΔC_f ——氯化氢浓度波动度, %;

$C_{j\max}$ ——测试点 j 在 6 次测量中的最高浓度, $\mu\text{mol/mol}$;

$C_{j\min}$ ——测试点 j 在 6 次测量中的最低浓度, $\mu\text{mol/mol}$ 。

7.2.7 氨气浓度示值相对误差

氨气浓度校准推荐包含 $550\mu\text{mol/mol}$, 其余校准点根据需求可自行设定。校准方法参考 6.2.4。

7.2.8 氨气浓度位置偏差

氨气浓度校准推荐包含 $550\mu\text{mol/mol}$, 其余校准点根据需求可自行设定。校准方法参考 6.2.5。

7.2.9 氨气浓度波动度

氨气浓度校准推荐包含 $550\mu\text{mol/mol}$, 其余校准点根据需求可自行设定。校准方法参考 6.2.6。

7.2.10 时间示值误差

时间校准点推荐包含 60s、3600s, 其余校准点根据需求可自行设定, 各校准点需测量 3 次, 大于 60s 时测量可只测量 1 次。在试验装置开始计时的同时, 启动电子秒表同步计时。按公式 (6) 计算各校准点的时间示值误差 ΔT_i 。最后以各校准点中 ΔT_i 的绝对值最大者作为该校准点的时间示值误差 ΔT 。

$$\Delta T_i = T - T_i \quad (6)$$

式中:

ΔT_i ——各校准点第 i 次时间示值误差, s;

T ——按照各校准点检测设备上设定的时间, s;

T_i ——各校准点第 i 次时电子秒表上的时间示值, s;

ΔT ——各校准点时间示值误差, s。

8 校准结果表达

校准后的检测设备应出具校准证书, 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) 客户的名称和地址;
- f) 被校准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, 应说明被校准对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时, 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) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象的有效性的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书或报告的声明。

校准证书内页格式见附录 A。

9 复校时间间隔

建议复校间隔时间为 1 年, 使用特别频繁时应适当缩短。在使用过程中经过修理、更

换重要器件等的一般需要重新校准。

附录 A

校准证书内页格式

设备名称		设备编号	
使用地点		校准日期	
校准依据的技术文件	多通道气体腐蚀试验装置校准规范		
环境条件	温度 (°C) : 湿度 (%RH) :		
校准地点			
校准所用计量器具			
名称/型号	准确度等级/最大允许误差	证书编号	证书有效期
氯化氢浓度	校准点/ $\mu\text{mol/mol}$	示值相对误差/%	测量不确定度
			$U_{\text{rel}} = \quad, k = 2$
	校准点/ $\mu\text{mol/mol}$	位置偏差/%	测量不确定度
			$U = \quad, k = 2$
	校准点/ $\mu\text{mol/mol}$	波动度/%	测量不确定度
			$U = \quad, k = 2$
氯化氢浓度	校准点/ $\mu\text{mol/mol}$	示值相对误差/%	测量不确定度
			$U_{\text{rel}} = \quad, k = 2$
	校准点/ $\mu\text{mol/mol}$	位置偏差/%	测量不确定度
			$U = \quad, k = 2$
	校准点/ $\mu\text{mol/mol}$	波动度/%	测量不确定度
			$U = \quad, k = 2$
时间	校准点/s	示值误差/%	测量不确定度
			$U = \quad, k = 2$

附录 B

校准数据原始记录

记录编号：

设备名称		设备编号				
生产厂家		规格型号				
使用地点						
校准依据	JJF	校准间隔	___个月			
温 度	℃	湿 度	%RH			
标 准 器 参 数						
标准器名称	规格型号	准确度等级/ 最大允许误差	测试范围或标 称值	分辨力	溯源单位及证 书号	有效期

氯化氢浓度参数校准记录							
次数	氯化氢浓度（单位： μ mol/mol）						
	设定值	α	显示值	β	显示值	γ	显示值
1							
2							
3							
4							
5							
6							
平均值	-		-		-		-
最大值	-		-		-		-
最小值	-		-		-		-
氯化氢浓度示值相对误差： %；氯化氢浓度位置偏差： %；氯化氢浓度波动度： %。							

氨气浓度参数校准记录							
次数	氯化氢浓度 (单位: $\mu\text{mol/mol}$)						
	设定值	α	显示值	β	显示值	γ	显示值
1							
2							
3							
4							
5							
6							
平均值	—		—		—		—
最大值	—		—		—		—
最小值	—		—		—		—
氨气浓度示值相对误差: %; 氨气浓度位置偏差: %; 氨气浓度波动度: %。							

时间参数校准记录			
次数	时间（单位：s）		
	设定值 T	校准值 T_i	校准点第 i 次时间示值误差 ΔT_i
1			
2			
3			
各校准点时间示值误差 ΔT ：s。			
校准人		审核人	
校准日期			

附录 C

试验装置氯化氢浓度示值误差的不确定度评定示例

C.1 测量方法

选择氯化氢浓度 $5\mu\text{mol/mol}$ 校准点评定不确定度。开启多通道气体腐蚀试验装置并运行，试验装置稳定后，使用氯化氢气体检测仪依次测量各测试点气体浓度。对于每个测试点，待试验装置达到稳定后记录初始数据，之后每隔 5min 记录一次数据，连续记录 6 个数据，3 个测试点共形成 18 个数据。记录氯化氢气体检测仪浓度实测值的同时记录被校试验装置气体浓度的显示值。根据公式（C.1）计算氯化氢浓度示值误差。

C.2 测量模型

$$\Delta C = \overline{C_x} - \overline{C_z} \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔC ——氯化氢浓度示值误差， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\overline{C_x}$ ——18 个氯化氢浓度显示值的平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\overline{C_z}$ ——氯化氢浓度所有测量点 18 个测量数据的平均值， $\mu\text{mol/mol}$ 。

根据公式 C.1，计算灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_x}} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_z}} = -1$$

C.3 不确定度来源分析

a) 测量随机误差引入的不确定度 $u(\overline{C_x})$ ，由测量重复性引起；

b) 测量系统误差引入的不确定度 $u(\overline{C_z})$ ，主要由氯化氢浓度位置偏差、氯化氢浓度波动度以及气体检测仪引起。

C.4 各不确定度分量评定

C.4.1 测量随机误差引入的不确定度 $u(\overline{C_x})$

选择一台常规水平的多通道气体腐蚀试验装置。设定氯化氢浓度校准点并开启运行，用氯化氢气体检测仪测量被测点实际氯化氢浓度，待氯化氢浓度的显示值和实测值均稳定后记录读数，显示值读数记

为 C_x ，实测值读数记为 C_z 。关闭多通道气体腐蚀试验装置的氯化氢进气阀门，使得试验装置工作空间内不再通入氯化氢气体。待氯化氢浓度显示值明显降低后，开启氯化氢进气阀门，工作空间内通入氯化氢气体。重复上述测量步骤，记录显示值和实测值，重复测量 10 次。在 $5\mu\text{mol/mol}$ 的浓度条件下分别对 7.2.1 中的 3 个氯化氢浓度测量点 α 、 β 、 γ 进行重复测量。数据见表 C.1。

表 C.1 $5\mu\text{mol/mol}$ 校准点氯化氢浓度示值误差校准数据表

测量 点位	测量次数 (第 k 次)	氯化氢浓度显示值 C_{xk} $\mu\text{mol/mol}$	氯化氢浓度实测值 C_{zk} $\mu\text{mol/mol}$	$\Delta C_k = C_{xk} - C_{zk}$ $\mu\text{mol/mol}$
α	1	5.04	4.99	0.05
	2	4.97	5.02	-0.05
	3	5.03	5.03	0.00
	4	4.98	5.05	-0.07
	5	4.96	5.01	-0.05
	6	4.97	5.02	-0.05
	7	5.01	4.99	0.02
	8	4.95	4.99	-0.04
	9	4.96	5.05	-0.09
	10	5.03	5.00	0.03
β	1	5.01	5.01	0.00
	2	5.03	4.98	0.05
	3	5.05	4.95	0.10
	4	5.02	5.01	0.01
	5	5.01	4.96	0.05
	6	4.98	4.98	0.00
	7	5.03	5.01	0.02
	8	5.04	4.98	0.06
	9	5.01	5.01	0.00
	10	5.05	5.03	0.02
γ	1	5.00	5.00	0.00
	2	5.03	4.95	0.08

	3	5.02	5.02	0.00
	4	4.95	4.99	-0.04
	5	5.00	5.05	-0.05
	6	5.04	5.04	0.00
	7	4.98	4.96	0.02
	8	4.99	4.96	0.03
	9	5.01	4.96	0.05
	10	4.96	4.99	-0.03

测量重复性引入的不确定度通过以下方式计算：

对于测量点 α ：

$$\overline{\Delta C_{\alpha}} = \frac{\sum_{k=1}^{10} \Delta C_k}{10} = -0.025(\mu\text{mol/mol})$$

$$s_{\alpha}(\Delta C) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\Delta C_k - \overline{\Delta C_{\alpha}})^2}{10-1}} = 0.048(\mu\text{mol/mol})$$

同理， $s_{\beta}(\Delta C) = 0.033(\mu\text{mol/mol})$ ， $s_{\gamma}(\Delta C) = 0.041(\mu\text{mol/mol})$ 。

$$s_x(\Delta C) = \sqrt{\frac{s_{\alpha}^2(\Delta C) + s_{\beta}^2(\Delta C) + s_{\gamma}^2(\Delta C)}{3}} = 0.041(\mu\text{mol/mol})$$

$$u(\overline{C_x}) = s_x(\Delta C) = 0.041(\mu\text{mol/mol})$$

C.4.2 测量系统误差引入的不确定度 $u(\overline{C_z})$

首先计算氯化氢浓度位置偏差引入的不确定度 $u_1(\overline{C_z})$ 。

对于该台多通道气体腐蚀试验装置，按照 7.2.4 方法进行校准，得到 $5\mu\text{mol/mol}$ 浓度条件下 3 个不同测量点的数据见表 C.2。

表 C.2 $5\mu\text{mol/mol}$ 校准点氯化氢浓度示值误差校准数据表

测量次数	α 点氯化氢浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	β 点氯化氢浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	γ 点氯化氢浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$
1	5.02	5.05	5.04
2	4.97	4.96	4.96

3	5.03	5.03	5.01
4	5.01	5.03	5.00
5	4.97	5.02	5.05
6	5.00	4.98	5.03

α 点平均值为 $5.00\mu\text{mol/mol}$ ， β 点平均值为 $5.01\mu\text{mol/mol}$ ， γ 点平均值为 $5.02\mu\text{mol/mol}$ ，则

$$u_1(\overline{C_z}) = \frac{5.02 - 5.00}{2\sqrt{3}} = 0.004(\mu\text{mol/mol})$$

其次，计算氯化氢浓度波动度引入的不确定度 $u_2(\overline{C_z})$ 。

$$\max_{j=\alpha,\beta,\gamma} \{C_{j\max} - C_{j\min}\} = 0.09(\mu\text{mol/mol})$$

$$u_2(\overline{C_z}) = \frac{0.09}{2\sqrt{3}} = 0.026(\mu\text{mol/mol})$$

最后计算氯化氢气体检测仪引入的不确定度 $u_3(\overline{C_z})$ 。

根据表 C.2，18 个测量点的氯化氢浓度平均值为 $5.01\mu\text{mol/mol}$ 。氯化氢气体检测仪的最大允许误差
不超过 $\pm 10\%$ ，假设服从均匀分布。则

$$u_3(\overline{C_z}) = \frac{10\% \times 5.01}{\sqrt{3}} = 0.289(\mu\text{mol/mol})$$

于是可以得到：

校准点为 $5\mu\text{mol/mol}$ 时，

$$u(\overline{C_z}) = \sqrt{u_1^2(\overline{C_z}) + u_2^2(\overline{C_z}) + u_3^2(\overline{C_z})} = 0.290(\mu\text{mol/mol})$$

C.5 合成标准不确定度

标准不确定度汇总如表 C.3 所示。

表 C.3 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度符号	不确定度来源	标准不确定度 $\mu\text{mol/mol}$	灵敏系数
$u(\overline{C_x})$	测量随机误差引入的不确定度	0.041	1
$u(\overline{C_z})$	测量系统误差引入的不确定度	0.290	-1

计算合成标准不确定度

$$u_c(\Delta C) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_x}}\right)^2 u^2(\overline{C_x}) + \left(\frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_z}}\right)^2 u^2(\overline{C_z})} = \sqrt{u^2(\overline{C_x}) + u^2(\overline{C_z})}$$

代入表 C.3 各数值, 得:

$$u_c(\Delta C) = 0.293 \text{ } \mu\text{mol/mol}$$

C.6 扩展不确定度

扩展不确定度: $U = k \times u_c(\Delta C)$, 取 $k = 2$, 得:

校准点为 $5 \mu\text{mol/mol}$ 时, $U = 0.586 \text{ } \mu\text{mol/mol}$, $k = 2$ 。