



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

闭路循环法 铝及铝合金液态测氢仪校准规范

Calibration Specification for Liquid Hydrogen Meters
of Aluminium and Aluminium Alloys by Closed Gas Loop Circulation
(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

闭路循环法铝及 铝合金液态测氢仪校准规范

Calibration Specification for Liquid

Hydrogen Meters of Aluminium and Aluminium

Alloys by Closed Gas Loop Circulation

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：东北轻合金有限责任公司

中铝材料应用研究院有限公司

国标（北京）检验认证有限公司

西安汉唐分析检测有限公司

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：

谭本清（西南铝业(集团)有限责任公司）

张国栋（西南铝业(集团)有限责任公司）

兰胜川（西南铝业(集团)有限责任公司）

马金萍（东北轻合金有限责任公司）

路 通（中铝材料应用研究院有限公司）

侯文茹（国标（北京）检验认证有限公司）

贾梦琳（西安汉唐分析检测有限公司）

王瑞雪（西南铝业(集团)有限责任公司）

目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和计量单位.....	(1)
3.1 术语.....	(1)
3.2 计量单位.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
5.1 气密性.....	(2)
5.2 泵压.....	(2)
5.3 真空度.....	(2)
5.4 循环流量.....	(2)
5.5 氢含量示值误差.....	(2)
5.6 氢含量示值重复性.....	(2)
5.7 温度示值误差.....	(3)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 测量标准及其他设备.....	(3)
6.3 其他条件.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 检查与校准项目.....	(4)
7.2 校准方法.....	(4)
8 校准结果表达.....	(8)
9 复校时间间隔.....	(9)
附录 A 标准气体及其要求	(10)
附录 B 铝及铝合金液态测氢仪校准记录	(11)
附录 C 铝及铝合金液态测氢仪校准证书内页参考格式.....	(12)
附录 D 液态测氢仪氢含量示值误差测量结果的不确定度评定举例	(13)

引 言

本规范是以JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》为基础性系列规范进行编写。

本规范主要参考JJF 1664-2017《温度显示仪校准规范》、YS/T 600-2009《铝及铝合金液态测氢方法闭路循环法》的技术内容。

本规范为首次发布。

闭路循环法铝及铝合金液态测氢仪校准规范

1 范围

本规范适用于采用闭路循环法的铝及铝合金液态测氢仪的校准。

2 引用文件

本规范没有引用文件。

3 术语和计量单位

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 术语

3.1.1 气密性 gas tightness

测氢仪工作循环气路的密闭性能。

3.1.2 泵压 pump pressure

测氢仪循环泵工作时仪器出口的表压。

3.1.3 真空度 vacuum

测氢仪循环泵工作时仪器入口的表压。

3.1.4 吹洗 purge

启动测氢仪内置气源，使气源内的气体充满整个工作气路的过程。

3.2 计量单位

液态测氢仪测量结果为氢含量，氢含量的计量单位为“mL/100g”，表示100克铝液内溶解的氢气体积。

4 概述

铝及铝合金液态测氢仪主要用于测量铝及铝合金熔液内氢气含量，测氢仪与测氢探头、热电偶组成氢含量检测系统。如图1所示，系统工作时，测氢探头与热电偶浸入铝液，测氢仪通过循环系统促使循环气体在测氢探头与测氢仪间循环，循环气体在流经测氢探头时，铝熔液中的氢向循环气体内扩散，直到铝熔液内的氢分压与循环气体内的氢

分压达到平衡，测氢仪根据循环气体热导率的变化检测出铝熔液内的氢分压，再根据Sivert定律计算出铝熔液内的氢含量。

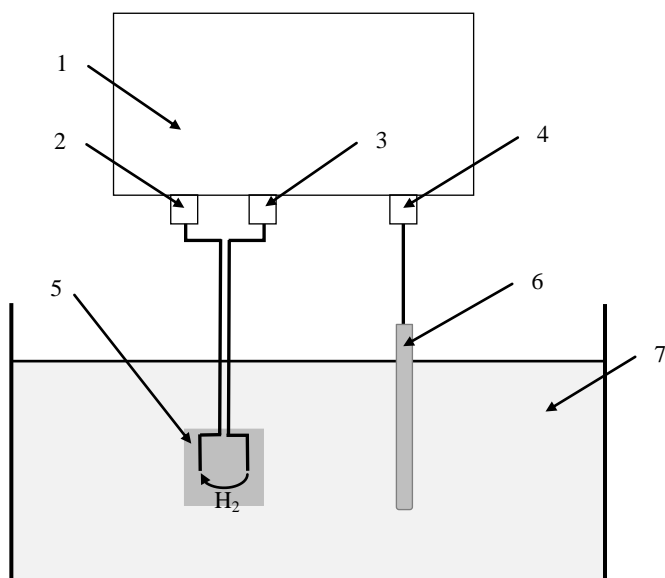


图1 测氢仪工作示意图

1—测氢仪；2—仪器气体入口；3—仪器气体出口；4—仪器热电偶插座；

5—测氢探头；6—热电偶；7—铝熔液

5 计量特性

5.1 气密性

5分钟内最大压降不超过试验压力的1%。

5.2 泵压

不小于10 kPa。

5.3 真空度

不大于-10 kPa。

5.4 循环流量

不小于30 mL/min。

5.5 氢含量示值误差

最大允许误差为 ± 0.01 mL/100g或读数的 $\pm 5\%$ ，取二者中大值。

5.6 氢含量示值重复性

氢含量示值重复性以单次测量的标准偏差 s 来表示， s 不大于0.005mL/100g或读数的2.5%，取二者中大值。

5.7 温度示值误差

(600~800)℃测量范围内，最大允许误差为±3℃。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度为(15~25)℃。

6.1.2 相对湿度≤85%。

6.1.3 电源满足仪器说明书的要求。

6.2 测量标准及其他设备

校准用测量标准及其他设备的技术要求见表1。

表1 测量标准及其他设备技术要求

序号	测量标准	技术要求	用途	备注
1	标准气体	见附录A	用于校准仪器的氢含量示值误差、氢含量示值重复性	—
2	标准直流电压源	不低于0.05级	模拟热电偶的输出，为仪器提供热电偶的输入，用于校准仪器温度示值误差	也可选用温度校准仪
3	数字压力计	(0~100) kPa, 0.05级, 分辨力不低于0.01kPa	用于测量仪器的气密性	也可选用U形压力计, 水位高度须达到4.5m
4	压力表	(-100~100) kPa, 1.6级	用于测量仪器的真空度、泵压等	—
5	流量计	(0~250) mL/min, 4级	用于测量仪器的循环流量	—
6	零度恒温器	恒温器深度应不小于200mm, 工作区域温度变化为(0±0.1)℃	用于校准仪器的温度示值误差	零度恒温器可用冰点槽代替
7	补偿导线	K型热电偶补偿导线, 应有经校准后20℃的修正值	校准具有参考端温度自动补偿功能的测温仪器时用的专用连线	—

6.3 其他条件

测氢仪外形结构完好，外露件等不应损坏或脱落，各开关、按键、显示器等部件不应有影响正常工作的机械碰伤，打印功能正常。

7 校准项目和校准方法

7.1 检查与校准项目

- a) 检查项目：气密性、泵压、真空度、循环流量。
- b) 校准项目：氢含量示值误差、氢含量示值重复性、温度示值误差。

7.2 校准方法

7.2.1 准备工作

7.2.1.1 在测氢仪的内置气瓶内充上足量的载气，载气纯度不低于99.995%。

7.2.1.2 仪器在校准环境静置4小时后，校准前仪表应通电预热，预热时间一般不少于30min。

7.2.2 气密性

将数字压力计连接在仪器的气路入口处，气路出口用堵头堵住。打开仪器电源，打开仪器内置气瓶阀门，启动仪器的“吹洗”功能，使气瓶内的气体充满整个气路，试验气压不低于35kPa。关闭仪器“吹洗”功能，记录数字压力计上的压力读数，5分钟后再次进行读数，计算两次压力读数的差值。

7.2.3 泵压

将压力表连接在仪器气路出口，确保连接处不漏气，气路入口通大气，启动循环泵，此时压力表的指针应向正方向转动，指针在转动的过程中不左右摆动，当指针不再转动时，记录压力表指示的压力值，停止循环泵。

7.2.4 真空度

将压力表连接在仪器气路入口，确保连接处不漏气，气路出口通大气，启动循环泵，此时压力表的指针应向负方向转动，指针在转动的过程中不左右摆动，当指针不再转动时，记录压力表指示的压力值，停止循环泵。

7.2.5 循环流量

用胶管将玻璃转子流量计与仪器串联，流量计入口与仪器气路出口相连，流量计出口与仪器气路入口相连，将转子流量计的调节旋钮调至最大，启动循环泵，观察流量计浮子跳动情况，记录转子流量计的指示流量。

7.2.6 氢含量示值误差

7.2.6.1 开始校准工作前需对仪器进行参数设置，并选择合适的校准点。

1) 仪器设置

仪器合金修正系数设为1.00，仪器显示温度设为700℃，设置仪器为单次测量，测量时间至少为3分钟。

2) 校准点选择

测氢仪的校准点一般不少于4个，建议标准气体氢气组份含量分别为1%、4%、9%、20%，各组份标准气体在700℃时对应的氢含量见附录中表A.1、表A.2。

若使用其他组份的标准气体，其对应的氢含量应按公式（1）计算：

$$C_H = 0.92\sqrt{P_H} \quad (1)$$

式中：

C_H ——标准气体在700℃时对应的氢含量，mL/100g；

P_H ——各标准气体释放到仪器中后，氢组份对应的氢分压，atm；

注：例如H₂含量为2%的氮中氢标准气体降压释放到测氢仪中，其对应的氢分压为0.02atm，计算得其在700℃时对应的氢含量为0.130mL/100g。

7.2.6.2 如图2，连接好标准气体、气体减压器、流量计，打开标准气体瓶上阀门，调节气体减压器的输出压力为（30~35）kPa，调节流量计的流量为（65±5）mL/min。

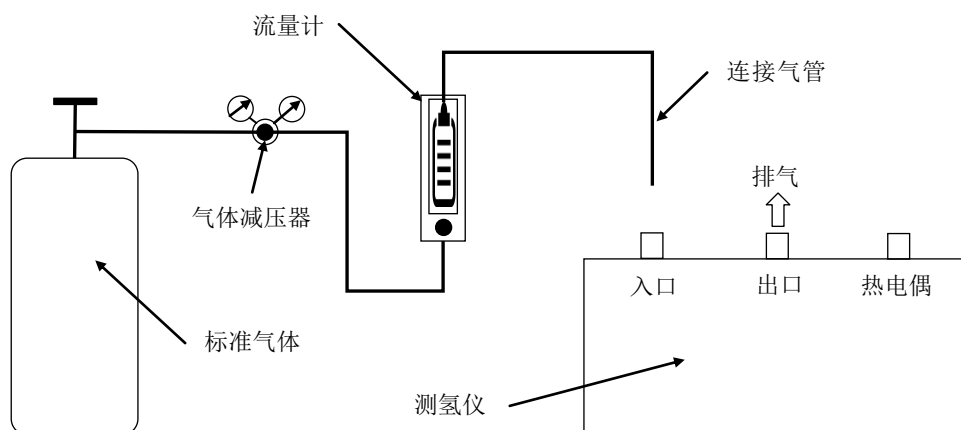


图2 氢含量示值误差校准前装置连接图

7.2.6.3 启动测氢仪自动测量功能，待测氢仪的循环泵启动后，进入采样环节，如图3所示，迅速将流量计出口连接气管连接至测氢仪入口，确保连接处不漏气，测氢仪对标准气体进行采样。

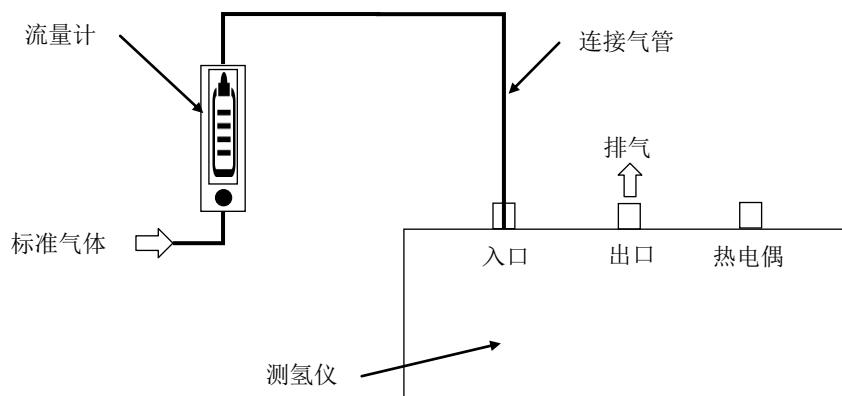


图3 氢含量示值误差校准时装置连接图

7.2.6.4 待测氢仪循环泵停止运转，将流量计出口连接气管从测氢仪入口端拔出，如图2所示，得到测氢仪显示的氢含量，记录该数值。

7.2.6.5 按7.2.6.2~7.2.6.4步骤，重复测量3次，并计算氢含量平均值。

7.2.6.6 关闭标准气体的阀门，将气体减压器取下，安装在下一组需测量的标准气体瓶上，重复7.2.6.2~7.2.6.4，得到测氢仪测量各标准气体的氢含量示值。

注：建议对各标准气体按氢组份含量从低到高进行测量。

7.2.6.7 按公式（2）所示计算氢含量示值误差：

$$\Delta C_H = \overline{C_H} - C_{HS} \quad (2)$$

式中：

ΔC_H ——测氢仪氢含量示值误差，mL/100g；

$\overline{C_H}$ ——测氢仪氢含量示值平均值，mL/100g；

C_{HS} ——标准气体在700℃时对应的氢含量，mL/100g。

7.2.7 氢含量示值重复性

通入标准气体9% H₂ (mol/mol)，按7.2.6.2~7.2.6.4步骤，重复测量6次，重复性以标准偏差s来表示，按公式（3）计算氢含量示值重复性。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^6 (C_{Hj} - \overline{C_H})^2}{6-1}} \quad (3)$$

式中:

C_{Hj} ——第 j 次仪器氢含量示值, mL/100g;

$\overline{C_H}$ ——仪器6次氢含量示值平均值, mL/100g。

7.2.8 温度示值误差

7.2.8.1 校准点选择

选择650℃、700℃、750℃三个温度点进行校准。

7.2.8.2 校准过程

a) 使用温度校准仪作为测量标准

按图4方式接线。在温度校准仪输入最小校准点温度值,读取此时测氢仪温度示值;依次增大输入温度(上行程),分别输入各校准点温度值,并读取测氢仪的温度示值,直至最大校准点;之后依次减小输入温度(下行程),分别输入各校准点温度值,并读取测氢仪的温度示值,直至最小校准点。用同样的方法重复测量一次。

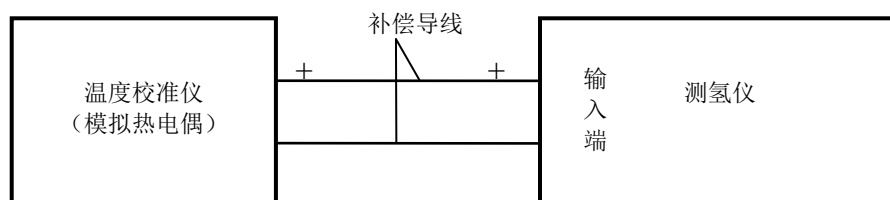


图4 温度校准仪的温度示值误差校准连接图

取两个循环读数的平均值计算示值误差。由于每个校准点有4个仪器示值,因此取4个示值的平均值与校准点温度之差作为该校准点的示值误差,按公式(4)计算示值误差。

$$\Delta_t = \bar{t}_d - t_s \quad (4)$$

式中:

Δ_t ——校准点的示值误差,℃;

\bar{t}_d ——测氢仪温度示值的平均值,℃;

t_s ——校准点温度值，℃。

b) 使用标准直流电压源作为测量标准

按图5方式接线。依据相应的分度表输入校准点温度值对应的电势值。首先输入最小校准点电势值，读取此时测氢仪的温度示值；依次增大输入电势值（上行程），分别输入各校准点电势值，并读取测氢仪的温度示值，直至最大校准点；之后依次减小输入电势值（下行程），分别输入各校准点电势值，并读取测氢仪的温度示值，直至最小校准点。用同样的方法重复测量一次。

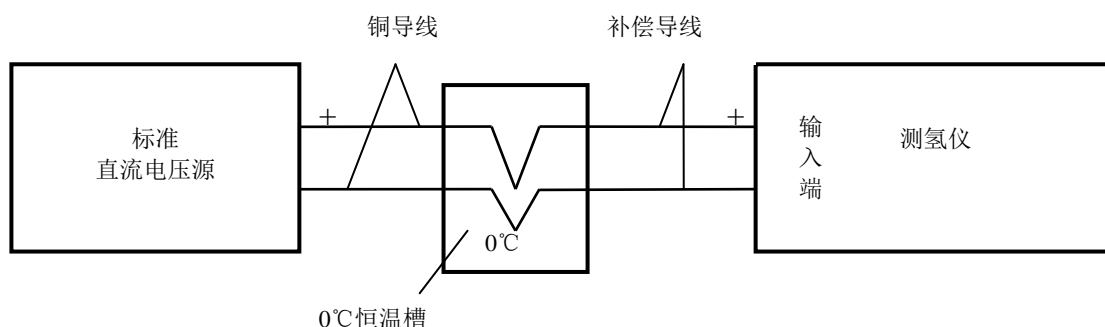


图5 标准直流电压源的温度示值误差校准连接图

取两个循环读数的平均值计算示值误差。由于每个校准点有4个仪器示值，因此取4个示值的平均值与校准点温度之差作为该校准点的示值误差，按公式（5）计算氢含量示值误差。

$$\Delta_t = \bar{t}_d - (t_s + \frac{e}{S_i}) \quad (5)$$

式中：

Δ_t ——校准点的示值误差，℃；

\bar{t}_d ——测氢仪温度示值的平均值，℃；

t_s ——校准点温度值，℃；

e ——补偿导线修正值，mV；

S_i ——校准点温度的微分电势，mV/℃。

由于标准直流电压源的输出电势值为校准点温度值对应的电势值减去补偿导线修正值，从而同样得到公式（4）的示值误差计算公式。

8 校准结果表达

经校准的测氢仪出具校准证书，校准原始记录参考格式见附录B，校准证书（报告）参考格式见附录C。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) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- 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) 校准证书批准人的签名或等效标识；
- 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，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔最长为12个月。测氢仪使用频繁时应适当缩短复校时间间隔，在使用过程中测氢仪经过修理、更换重要部件的需要重新校准。

附录 A

标准气体及其要求

A.1 标准气体应是有证标准物质且在有效期内。

A.2 测氢仪若以 N_2 作为载气，校准所用标准气体应为氮中氢标准气体，标准气体 H_2 组份含量建议为(mol/mol)：1%、4%、9%、20%，标准气体标称值的相对扩展不确定度不能大于2%， $k=2$ ，各组份标准气体在700℃时对应的氢含量如表A.1所示。

表A.1 标准气体氢含量对应表

标准气体 (mol/mol)	1% H_2 ，余量 N_2	4% H_2 ，余量 N_2	9% H_2 ，余量 N_2	20% H_2 ，余量 N_2
氢含量 (mL/100g)	0.092	0.184	0.276	0.411

A.3 测氢仪若以Ar作为载气，校准所用标准气体应为氩中氢标准气体，氩中氢标准气体 H_2 组份含量建议为(mol/mol)：1%，4%，9%，20%，其中 H_2 组份含量为9% (mol/mol) 的氩中氢标准气体，建议使用 N_2 含量不低于99.995% (mol/mol) 的高纯氮气替代，标准气体标称值的相对扩展不确定度不能大于2%， $k=2$ ，各组份标准气体在700℃时对应的氢含量见表A.2。

表A.2 标准气体氢含量对应表

标准气体 (mol/mol)	1% H_2 ，余量Ar	4% H_2 ，余量Ar	9% H_2 ，余量Ar	99.995% N_2	20% H_2 ，余量Ar
氢含量 (mL/100g)	0.092	0.184	0.276	0.284	0.411

附录 B

铝及铝合金液态测氢仪校准记录

记录编号:

证书编号:

送校单位		制 造 厂		仪 器 编 号	
仪器名称		规格型号		环 境 湿 度	%RH
校准地点		环境温度	℃	补 偿 导 线 修 正 值	e= mV
校准依据					

校准用测量标准

名称	型号规格	技术指标	仪器编号	证书编号	有效期

- 1 气密性:
- 2 泵压:
- 3 真空度:
- 4 循环流量:
- 5 氢含量示值误差

校准点		校准结果 (mL/100g)					校准结果的相对扩展 不确定度 $U_{rel}, k=2$
标准气体 (mol/mol)	氢含量 (mL/100g)	1	2	3	平均值	示值误差	

6 氢含量示值重复性

校准点		校准结果 (mL/100g)							标准偏 差 s
标准气体 (mol/mol)	氢含量 (mL/100g)	1	2	3	4	5	6	平均值	

7 温度示值误差

校准点 (℃)	校准结果 (℃)						校准结果的扩展不 确定度 $U(℃), k=2$
	上行程	下行程	上行程	下行程	平均值	示值误差	

附录 C

铝及铝合金液态测氢仪校准证书内页参考格式

校准结果

- 1 气密性:
- 2 泵压:
- 3 真空度:
- 4 循环流量:

5 氢含量示值误差

标准值 (mL/100g)	仪器示值 (mL/100g)	示值误差 (mL/100g)	校准结果的相对扩展 不确定度 U_{rel} , $k=2$

6 氢含量示值重复性:

7 温度示值误差

校准点 (°C)	仪器示值 (°C)	示值误差 (°C)	校准结果的扩展不确 定度 U (°C), $k=2$

附录 D

液态测氢仪氢含量示值误差测量结果的不确定度评定举例

D.1 概述

D.1.1 被测对象

液态测氢仪，测量范围为（0~9.999）mL/100g，分辨力为0.001mL/100g。

D.1.2 测量标准

使用在有效期内的氮中氢标准气体作为测量标准，技术指标见表D.1。

表 D.1 标准气体主要技术指标

标准气体（mol/mol）	相对扩展不确定度
1%H ₂ ，余量 N ₂ 4%H ₂ ，余量 N ₂ 9%H ₂ ，余量 N ₂ 20%H ₂ ，余量 N ₂	$U_{\text{rel}}=2\%$ ， $k=2$

D.1.3 测量方法及校准点

按本规范进行。

根据表A.1可知，采用的标准气体对应的氢含量校准点分别为：0.092 mL/100g，0.184 mL/100g，0.276 mL/100g，0.411 mL/100g。

D.1.4 测量环境

温度为15℃~25℃，相对湿度≤85%。

D.2 测量模型

由于

$$\Delta C_H = \overline{C_H} - C_{HS} \quad (\text{D.1})$$

$$C_{HS} = 0.92\sqrt{P_{HS}} \quad (\text{D.2})$$

因此，氢含量示值误差的测量模型为：

$$\Delta C_H = \overline{C_H} - 0.92\sqrt{P_{HS}} \quad (\text{D.3})$$

式中：

ΔC_H ——测氢仪氢含量示值误差，mL/100g；

$\overline{C_H}$ ——测氢仪氢含量示值平均值，mL/100g；

C_{HS} ——标准气体对应的氢含量，mL/100g；

P_{HS} ——标准气体对应的氢分压，atm。

D.3 输入量的标准不确定度分析

D.3.1 输入量 C_H 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(C_H)$

输入量 C_H 的不确定度来源来自测量重复性和仪表的分辩力。

D.3.1.1 测量重复性导致的标准不确定度 $u(C_{H1\%})$ 、 $u(C_{H4\%})$ 、 $u(C_{H9\%})$ 、 $u(C_{H20\%})$

测量重复性导致的标准不确定度采用A类方法进行评定。通过连续测量得到测量列，用贝塞尔公式计算单次测量的标准偏差 s 得到，测量数据见表D.2。

表 D.2 重复性测量结果

mL/100g

校准点	测量结果										标准偏差 s
0.092	0.092	0.091	0.092	0.091	0.090	0.091	0.092	0.093	0.091	0.091	0.000843
0.184	0.182	0.181	0.182	0.181	0.180	0.181	0.182	0.183	0.181	0.181	0.000843
0.276	0.276	0.275	0.276	0.275	0.274	0.273	0.276	0.277	0.275	0.275	0.001135
0.411	0.412	0.412	0.413	0.412	0.411	0.412	0.413	0.413	0.411	0.411	0.000816

实际测量时，在每个校准点重复测量3次，取其平均值，因此测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u(C_{H1\%}) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.000843 \text{ mL/100g}}{\sqrt{3}} = 0.000487 \text{ mL/100g}$$

$$u(C_{H4\%}) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.000843 \text{ mL/100g}}{\sqrt{3}} = 0.000487 \text{ mL/100g}$$

$$u(C_{H9\%}) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.001135 \text{ mL/100g}}{\sqrt{3}} = 0.000656 \text{ mL/100g}$$

$$u(C_{H20\%}) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.000816 \text{ mL/100g}}{\sqrt{3}} = 0.000472 \text{ mL/100g}$$

D.3.1.2 仪表分辨力导致的标准不确定度 $u(C_{Hf})$

仪表分辨力导致的标准不确定度 $u(C_{Hf})$ 采用B类方法进行评定。由仪表分辨力 b 导致的示值误差区间半宽为 $a=b/2$ ，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。因此：

$$u(C_{Hf}) = \frac{a}{k} = \frac{0.0005}{\sqrt{3}} = 0.00029 \text{ mL/100g}$$

输入量 C_H 的灵敏系数为:

$$c_1 = \frac{\partial \Delta C_H}{\partial C_H} = 1$$

当分辨力导致的不确定度小于重复性导致的标准不确定度时, 只取重复性的影响, 可得输入量 C_H 的各相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(C_H)$ 见下。

$$u_{\text{rel}}(C_{H1\%}) = |c_1| \times \frac{u(C_{H1\%})}{C_{H1\%}} = \frac{0.000487}{0.092} = 0.53\%$$

$$u_{\text{rel}}(C_{H4\%}) = |c_1| \times \frac{u(C_{H4\%})}{C_{H4\%}} = \frac{0.000487}{0.184} = 0.27\%$$

$$u_{\text{rel}}(C_{H9\%}) = |c_1| \times \frac{u(C_{H9\%})}{C_{H9\%}} = \frac{0.000656}{0.276} = 0.24\%$$

$$u_{\text{rel}}(C_{H20\%}) = |c_1| \times \frac{u(C_{H20\%})}{C_{H20\%}} = \frac{0.000472}{0.411} = 0.12\%$$

D.3.2 输入量 P_{HS} 导致的标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P_{HS})$

输入量 P_{HS} 的不确定度主要来源于标定标准气体时的扩展不确定度。由于标准气体标称值的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 2\%$, $k=2$, 所以:

$$u(P_{HS}) = P_{HS} \times 1\% \text{ atm}$$

其灵敏系数为:

$$c_2 = \frac{\partial \Delta C_H}{\partial P_{HS}} = -0.92 \times 0.5 \times \frac{1}{\sqrt{P_{HS}}} \text{ mL/100g} \cdot \text{atm}^{-1}$$

因此:

$$u_{\text{rel}}(P_{HS}) = |c_2| \times \frac{u(P_{HS})}{C_{HS}} = |-0.92 \times 0.5 \times \frac{1}{\sqrt{P_{HS}}}| \times \frac{P_{HS} \times 1\%}{0.92 \sqrt{P_{HS}}} = 0.5\%$$

D.4 合成标准不确定度

D.4.1 标准不确定度汇总

输入量的标准不确定度汇总见表D.3。

表 D.3 标准不确定度汇总表

标准不确定度 $u(X_i)$	不确定度来源 X_i	标准不确定度值		灵敏系数 c_i	相对标准不确定度 $ c_i u(X_i)/C_{HSi}$	
		校准点 C_{HSi}	$u(X_i)$		校准点 C_{HSi}	$u_{rel}(X_i)$
$u(C_H)$	测量重复性及分辨力	0.092 mL/100g	0.000487 mL/100g	1	0.092 mL/100g	0.53%
		0.184 mL/100g	0.000487 mL/100g		0.184 mL/100g	0.27%
		0.276 mL/100g	0.000656 mL/100g		0.276 mL/100g	0.24%
		0.411 mL/100g	0.000472 mL/100g		0.411 mL/100g	0.12%
$u(P_{HS})$	标准气体标称值	$0.92\sqrt{P_{HS}}$ mL/100g	$P_{HS} \times 1\% \text{atm}$	$-0.92 \times 0.5 \times \frac{1}{\sqrt{P_{HS}}}$ mL/100g $\cdot \text{atm}^{-1}$	$0.92\sqrt{P_{HS}}$ mL/100g	0.5%

D.4.2 合成标准不确定度的计算

输入量 C_{Hd} 、 P_{HS} 相互间彼此独立，所以合成标准不确定度可按式 (D.4) 计算。

$$u_c(\Delta C_H) = \sqrt{[u_{rel}(C_H)]^2 + [u_{rel}(P_{HS})]^2} \quad (\text{D.4})$$

各校准点的合成标准不确定度分别为：

$$u_c(\Delta C_{H1\%}) = 0.73\%$$

$$u_c(\Delta C_{H4\%}) = 0.57\%$$

$$u_c(\Delta C_{H9\%}) = 0.56\%$$

$$u_c(\Delta C_{H20\%}) = 0.52\%$$

D.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则各校准点氢含量示值误差的相对扩展不确定度根据公式 (D.5) 计算，最终结果见表 D.4。

$$U_{rel} = k u_c(\Delta C_H) \quad (\text{D.5})$$

表 D.4 各校准点的相对扩展不确定度

校准点 (mL/100g)	0.092	0.184	0.276	0.411
相对扩展不确定度 U_{rel} , $k=2$	1.5%	1.2%	1.2%	1.1%