

中华人民共和国工业和信息化部
轻工计量技术规范

JJF(轻工) ×××—××××

塑料管材氧气渗透性能试验机
校准规范

Calibration specification for oxygen permeation performance
testing machines of plastic pipes

(报批稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

塑料管材氧气渗透性能试验机 校准规范

Calibration specification for oxygen permeation
performance testing machines of plastic pipes

JJF(轻工) ×××—××××

归口单位：中国轻工业联合会

起草单位：北京建筑材料检验研究院股份有限公司

承德市金建检测仪器有限公司

河北省计量监督检测研究院

本规范由起草单位负责解释

本规范起草人：

李筱竹（北京建筑材料检验研究院股份有限公司）

刘志广（承德市金建检测仪器有限公司）

苏彩山（河北省计量监督检测研究院）

陈红岩（北京建筑材料检验研究院股份有限公司）

阴铎源（北京建筑材料检验研究院股份有限公司）

目 录

引言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 概述.....	1
4 计量特性.....	2
5 校准条件.....	2
5.1 环境条件.....	2
5.2 测量标准.....	2
6 校准项目和校准方法.....	3
6.1 温度示值误差的校准.....	3
6.2 压力示值误差的校准.....	4
6.3 流量示值误差的校准.....	4
6.4 溶解氧浓度示值误差的校准.....	4
6.5 气压示值误差的校准.....	5
7 校准结果表达.....	6
8 复校时间间隔.....	6
附录 A 原始记录格式 (参考格式)	7
附录 B 校准证书内页格式 (参考格式)	12
附录 C 校准结果测量不确定度评定示例.....	14

引 言

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》共同构成支撑本规范制定工作的基础性文件。

本规范参考 GB/T 34437—2017《多层复合塑料管材氧气渗透性能测试方法》、ISO 17455:2005《塑料管道系统 多层管 阻隔管氧气渗透性的测定》中试验装置的常规使用工况、核心技术要求制定。

本规范为首次发布。

塑料管材氧气渗透性能试验机校准规范

1 范围

本规范适用于塑料管材氧气渗透性能试验机的校准，其测量范围为：温度(室温～80) °C、压力(0～0.4) MPa、流量(0.15～0.5) dm³/min、溶解氧浓度(0～20) g/m³、气压(96.5～103.5) kPa；计量参数包括温度、压力、流量、溶解氧浓度、气压。

2 引用文件

下列文件对于本规范的应用是必不可少的。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。

JJG 291—2018 溶解氧测定仪

3 概述

塑料管材氧气渗透性能试验机（以下简称“试验机”）是用于测试塑料管材阻氧性能的专用设备，通过恒温控制、密闭水循环系统、溶解氧浓度检测系统，在规定的温度、压力、流量条件下，测试塑料管材的氧气渗透量。试验机原理示意图如图1所示。

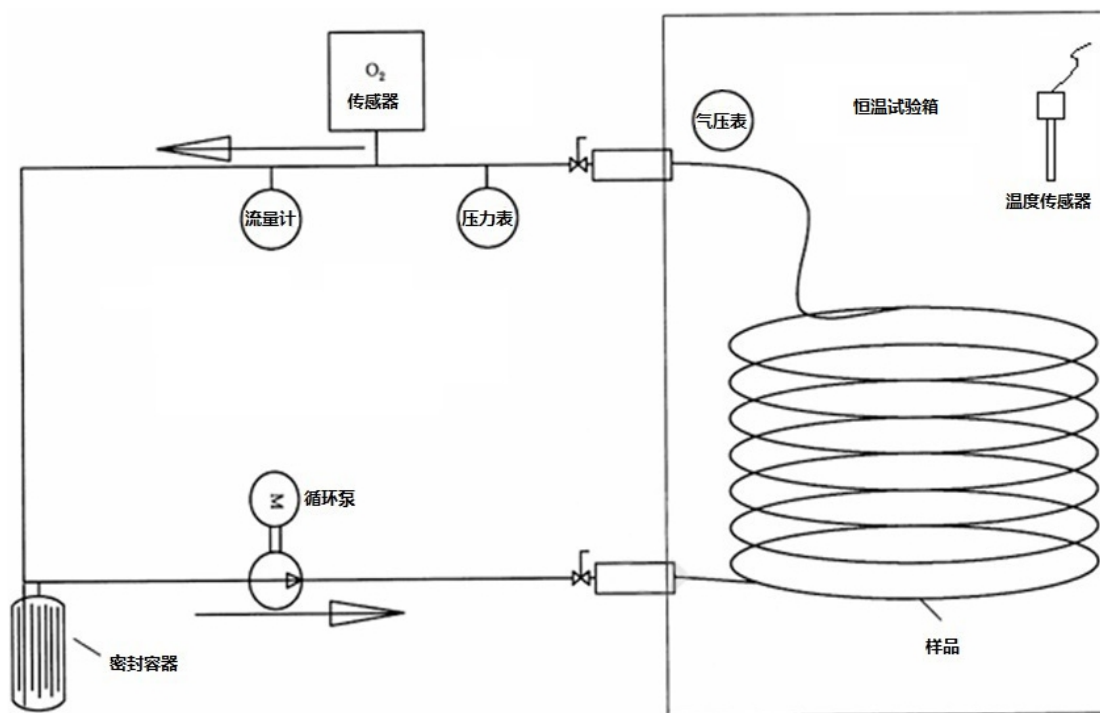


图1 塑料管材氧气渗透性能试验机示意图

4 计量特性

表 1 试验机计量特性要求

序号	项目	最大允许误差
1	温度示值误差	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	压力示值误差	$\pm 0.01\text{ MPa}$
3	流量示值误差	$\pm 0.05\text{ dm}^3/\text{min}$
4	溶解氧浓度示值误差	$\pm 0.3\text{ g/m}^3$
5	气压示值误差	$\pm 0.1\text{ kPa}$
注：所列计量特性为校准参考依据，不作为设备合格判定的法定依据。		

5 校准条件

5.1 环境条件

环境条件如下：

- a) 环境温度：(15~30) $^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $\leq 85\%$ ；
- c) 大气压力：(86~106) kPa；
- d) 校准场所应无振动、电磁干扰、阳光直射及气流扰动，场地平整、无腐蚀性介质。

5.2 测量标准

表 2 测量标准要求

序号	名称	测量范围	分辨力	最大允许误差
1	数字温度计	(0~100) °C	不低于 0.01 °C	±0.1 °C
2	数字压力计	(0~1) MPa	不低于 0.001 MPa	±0.1%(FS)
3	液体涡轮流量计	(0~1) dm³/min	不低于 0.001 dm³/min	±1.0%(FS)
4	溶解氧分析仪	(0~20) g/m³	不低于 0.01 g/m³	±0.1 g/m³
5	数字气压计	(80~110) kPa	不低于 0.01 kPa	±0.02 kPa
6	精密恒温水槽	恒温范围(0~80) °C，温度波动度不大于±0.2 °C，温度均匀性不超过 0.2 °C，搅拌速度稳定，并附有多孔塑料浮盖（材料为轻质塑料薄板，能浮于水面）。精密恒温水槽见图 2、塑料浮盖件图 3。		
注：FS 为满量程，指相应测量标准的测量范围上限值。				

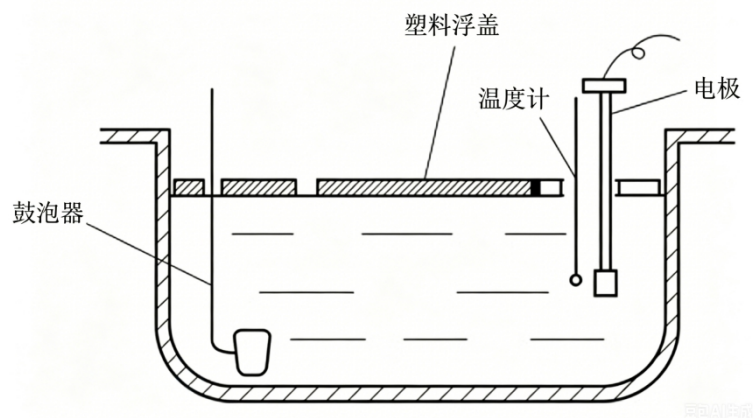


图2 精密恒温水槽示意图

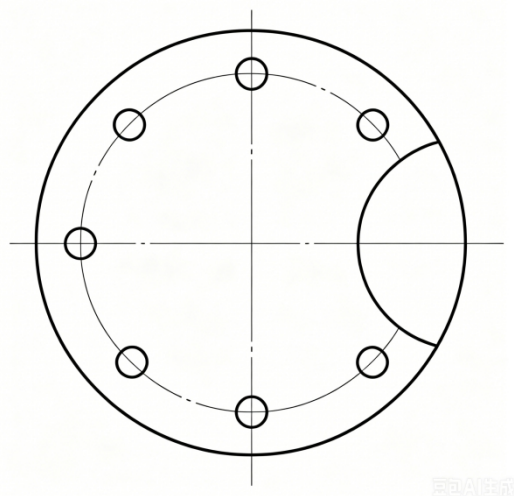


图3 塑料浮盖示意图

6 校准项目和校准方法

6.1 温度示值误差的校准

6.1.1 校准方法

将温度测量标准的传感器探头插入恒温试验箱的温度测试孔中并固定，校准点选择 40 °C和80 °C，设定恒温试验箱温度，在恒温试验箱温度稳定15 min后，每隔2 min记录试验机温度示值和温度测量标准的温度示值，连续记录6次，分别取算术平均值。

6.1.2 数据处理

按式(1)计算被校仪器温度示值误差

$$\Delta t = \bar{t}_d - (\bar{t}_s + \Delta t_s) \tag{1}$$

式中：

Δt —— 温度示值误差，°C；

$\bar{t}_d$ —— 试验机温度示值的算术平均值，°C；

$\bar{t}_s$ —— 温度测量标准示值的算术平均值，°C；

Δt_s —— 温度测量标准修正值, °C。

6.2 压力示值误差的校准

6.2.1 校准方法

将压力测量标准安装至试验机循环管路的压力计量接口上, 设定试验机压力为 0.2 MPa, 启动循环, 待压力稳定 1 min 后, 每隔 2 min 记录试验机压力示值和压力测量标准的压力示值, 连续记录 3 次, 分别取算术平均值。

6.2.2 数据处理

按式(2)计算被校仪器压力示值误差

$$\Delta p = \bar{p}_d - \bar{p}_s \quad (2)$$

式中:

Δp —— 压力示值误差, MPa;

$\bar{p}_d$ —— 试验机压力示值的算术平均值, MPa;

$\bar{p}_s$ —— 压力测量标准示值的算术平均值, MPa。

6.3 流量示值误差的校准

6.3.1 校准方法

将流量测量标准串联至循环管路之上, 管路自由长度应符合流量测量标准要求。设定试验机流量为 0.5 dm³/min, 启动循环, 在流量稳定 1 min 后, 每隔 2 min 记录试验机流量示值和流量测量标准的流量示值, 连续记录 3 次, 分别取算术平均值。

6.3.2 数据处理

按式(3)计算被校仪器流量示值误差

$$\Delta Q = \bar{Q}_d - \bar{Q}_s \quad (3)$$

式中:

ΔQ —— 流量示值误差, dm³/min;

$\bar{Q}_d$ —— 试验机流量示值的算术平均值, dm³/min;

$\bar{Q}_s$ —— 流量测量标准示值的算术平均值, dm³/min。

6.4 溶解氧浓度示值误差的校准

6.4.1 通用要求

将被校氧传感器从试验机上拆卸 (保持与试验主机的线路连接, 确保示值可正常读取), 与溶解氧浓度测量标准的测量探头置于精密恒温水槽内的同一校准介质中, 确保二者探头浸没于液面下同一深度、无气泡附着、测量面无遮挡, 全程避免环境气流扰动、阳光直射, 隔绝空气与校准介质的接触。零点核查与饱和氧校准在试验机常用测试温度 40 °C 或 80 °C 下进行, 同一选定温度下先完成零点核查, 再进行饱和氧校准。精密恒温水槽的温度波动度不大于 0.2 °C, 并采用温度测量标准实时监控介质温度。待溶解氧浓

度稳定15 min后, 每隔2 min记录1次试验机溶解氧浓度示值和溶解氧浓度测量标准的溶解氧浓度示值, 连续记录3次, 分别取算术平均值。

6.4.2 零点核查

零点核查用无氧水按 JJG 291—2018 附录 A.1 的规定制备, 将制备完成的无氧水转移至精密恒温水槽中, 恒温至选定的校准温度(40 °C或 80 °C)。用溶解氧浓度测量标准核验介质溶解氧浓度小于 0.01 g/m³后, 按 6.4.1 要求完成示值记录。零点仅作稳定性核查, 确认示值稳定小于 0.01 g/m³, 不进行示值误差计算及不确定度评定。

6.4.3 饱和氧校准

6.4.3.1 校准方法

饱和氧校准用饱和溶氧水按 JJG 291—2018 附录 A.2 的规定制备, 制备过程中水温恒定至与零点核查完全一致的校准温度(40 °C或 80 °C), 严格遵循规定的曝气时长、静止要求, 按 6.4.1 要求完成示值记录。

6.4.3.2 数据处理

按式(4)计算被校仪器溶解氧浓度示值误差

$$\Delta c = \bar{c}_d - \bar{c}_s \quad (4)$$

式中:

Δc —— 溶解氧浓度示值误差, g/m³;

$\bar{c}_d$ —— 试验机溶解氧浓度示值的算术平均值, g/m³;

$\bar{c}_s$ —— 溶解氧浓度测量标准示值的算术平均值, g/m³。

6.5 气压示值误差的校准

6.5.1 校准方法

将气压测量标准与被校试验机的数字气压计置于同一试验环境(无气流、同一高度), 以当前环境大气压为校准点, 待气压稳定 5 min 后, 每隔 2 min 记录 1 次试验机气压示值和气压测量标准的气压示值, 连续记录 3 次, 分别取算术平均值。

6.5.2 数据处理

按式(5)计算被校仪器气压示值误差

$$\Delta P = \bar{P}_d - \bar{P}_s \quad (5)$$

式中:

ΔP —— 气压示值误差, kPa;

$\bar{P}_d$ —— 试验机气压示值的算术平均值, kPa;

$\bar{P}_s$ —— 气压测量标准示值的算术平均值, kPa。

7 校准结果表达

校准结束后应出具校准证书,校准证书内页格式见附录 B。校准证书应准确、客观地报告校准结果。校准结果用校准数据的形式给出,并给出测量不确定度评定,不确定度评定示例见附录 C。校准证书至少包含以下信息:

- a) 标题,如“校准证书”或“校准报告”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点(如果不在实验室内进行校准);
- d) 证书或报告的唯一性标识(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) 如果与校准结果的有效性和应用有关时,应对抽样程序进行说明;
- i) 对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) 校准证书或校准报告测试人、审核人和签发人的签名,以及签发日期;
- 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,不得部分复制证书或报告的声明。

8 复校时间间隔

复校时间间隔根据仪器的具体情况确定,建议复校间隔为 1 年。若仪器经过重大维修、更换核心计量部件或对仪器性能有怀疑时,应及时校准。

附录 A

原始记录格式（参考格式）

委托单位		证书编号	
单位地址		仪器名称	
仪器型号		出厂编号	
测量范围			
制造单位		校准依据	
环境温度	℃	湿度	%RH
校准人员		核验人员	
校准日期			
校准地点			

A.1 校准用测量标准

名称	型号规格	不确定度/准确度等级/ 最大允许误差	出厂编号	证书编号	有效期至

委托单位		证书编号	
校准人员		核验人员	
校准日期			

A.2 温度示值误差的校准

校准点/°C	测量次数	试验机温度示值/°C	温度测量标准示值/°C
40	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
平均值			
测量标准修正值/°C			
温度示值误差		_____°C $U=$ _____°C, $k=2$	
80	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
平均值			
测量标准修正值/°C			
温度示值误差		_____°C $U=$ _____°C, $k=2$	

委托单位		证书编号	
校准人员		核验人员	
校准日期			

A.3 压力示值误差的校准

校准点/MPa	测量次数	试验机压力示值/MPa	压力测量标准示值/MPa
0.2	1		
	2		
	3		
平均值			
压力示值误差		_____MPa $U=$ _____MPa, $k=2$	

A.4 流量示值误差的校准

校准点/(dm ³ /min)	测量次数	试验机流量示值/(dm ³ /min)	流量测量标准示值/(dm ³ /min)
0.5	1		
	2		
	3		
平均值			
流量示值误差		_____dm ³ /min $U=$ _____dm ³ /min, $k=2$	

委托单位		证书编号	
校准人员		核验人员	
校准日期			

A.5 溶解氧浓度示值误差的校准

核查点或校准点	测量次数	试验机溶解氧浓度示值/(g/m ³)	溶解氧浓度测量标准示值/(g/m ³)
40 °C下零点	1		
	2		
	3		
平均值			
核查结果		☐ 符合 (稳定<0.01 g/m ³) ☐ 不符合	
40 °C下饱和氧	1		
	2		
	3		
平均值			
饱和氧示值误差		_____ g/m ³ $U=$ _____ g/m ³ , $k=2$	
80 °C下零点	1		
	2		
	3		
平均值			
核查结果		☐ 符合 (稳定<0.01 g/m ³) ☐ 不符合	
80 °C下饱和氧	1		
	2		
	3		
平均值			
饱和氧示值误差		_____ g/m ³ $U=$ _____ g/m ³ , $k=2$	

A.6 气压示值误差的校准

校准点	测量次数	试验机气压示值/kPa	气压测量标准示值/kPa
环境大气压	1		
	2		
	3		
平均值			
气压示值误差		_____kPa $U=$ _____kPa, $k=2$	

以下空白

附录 B

校准证书内页格式（参考格式）

委托单位		证书编号	
单位地址		仪器名称	
仪器型号		出厂编号	
测量范围			
制造单位		校准依据	
环境温度	℃	湿度	%RH
校准人员		核验人员	
校准日期			
校准地点			

B.1 温度示值误差

校准点/℃	40	80
温度示值误差/℃		
温度示值误差测量不确定度	$U = \text{_____}^{\circ}\text{C}, k=2$	$U = \text{_____}^{\circ}\text{C}, k=2$

B.2 压力示值误差

校准点/MPa	0.2
压力示值误差/MPa	
压力示值误差测量不确定度	$U = \text{_____} \text{MPa}, k=2$

B.3 流量示值误差

校准点/(dm ³ /min)	0.5
流量示值误差/(dm ³ /min)	
流量示值误差测量不确定度	$U = \text{_____} \text{dm}^3/\text{min}, k=2$

委托单位		证书编号	
校准人员		核验人员	
校准日期			

B.4 溶解氧浓度示值误差

测试温度/°C	40	80
校准点	饱和氧	
溶解氧浓度示值误差/(g/m ³)		
溶解氧浓度示值误差测量不确定度	$U = \text{_____ g/m}^3, k=2$	$U = \text{_____ g/m}^3, k=2$

B.5 气压示值误差

校准点/kPa	环境大气压: _____
气压示值误差/kPa	
气压示值误差测量不确定度	$U = \text{_____ kPa}, k=2$

以下空白

附录 C

校准结果测量不确定度评定示例

C.1 温度示值误差的测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$\Delta t = \bar{t}_d - (\bar{t}_s + \Delta t_s) \quad (C.1)$$

式中:

Δt —— 试验机的温度示值误差, °C;

$\bar{t}_d$ —— 试验机温度示值的算术平均值, °C;

$\bar{t}_s$ —— 数字温度计示值的算术平均值, °C;

Δt_s —— 数字温度计的修正值, °C。

C.1.2 灵敏系数与合成公式

合成标准不确定度公式为:

$$u_c^2(\Delta t) = \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{t}_d} \right]^2 u^2(\bar{t}_d) + \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{t}_s} \right]^2 u^2(\bar{t}_s) + \left[\frac{\partial f}{\partial \Delta t_s} \right]^2 u^2(\Delta t_s)$$

对测量模型求偏导,

得到各输入量的灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial \bar{t}_d} = +1, c_2 = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial \bar{t}_s} = -1, c_3 = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial \Delta t_s} = -1$$

因此合成标准不确定度可简化为:

$$u_c^2(\Delta t) = u^2(\bar{t}_d) + u^2(\bar{t}_s) + u^2(\Delta t_s)$$

C.1.3 不确定度分量评定

C.1.3.1 试验机温度示值重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\bar{t}_d)$

在重复性条件下, 对试验机 80 °C 校准点连续测量 10 次, 测量结果见下表:

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 $\bar{t}_d$
示值 (°C)	80.0	80.1	80.0	79.9	80.0	80.1	80.0	79.9	80.0	80.1	80.01

按贝塞尔公式计算单次测量实验标准差:

$$s(t_d) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_{di} - \bar{t}_d)^2} \approx 0.074 \text{ °C}$$

实际校准采用 6 次测量结果的平均值作为最终示值, 因此重复性引入的标准不确定度分量:

$$u_1(\bar{t}_d) = \frac{s(t_d)}{\sqrt{6}} \approx 0.030 \text{ °C}$$

C.1.3.2 试验机温度显示分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(\bar{t}_d)$

试验机温度显示分辨力为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，示值最大误差区间半宽为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，按均匀分布考虑，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2(\bar{t}_d) = \frac{0.05\text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.029\text{ }^{\circ}\text{C}$$

因 $u_2(\bar{t}_d) < u_1(\bar{t}_d)$ ，二者同属试验机示值引入的不确定度分量，故不重复计入合成，取较大值 $u_1(\bar{t}_d)$ 作为示值引入的标准不确定度 $u(\bar{t}_d)$ 。

C.1.3.3 数字温度计示值误差引入的标准不确定度分量 $u(\bar{t}_s)$

数字温度计最大允许误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，区间半宽为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，按均匀分布考虑，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u(\bar{t}_s) = \frac{0.1\text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.058\text{ }^{\circ}\text{C}$$

C.1.3.4 数字温度计修正值引入的标准不确定度分量 $u(\Delta t_s)$

数字温度计校准证书给出修正值的扩展不确定度 $U = 0.02\text{ }^{\circ}\text{C} (k = 2)$ ，则：

$$u(\Delta t_s) = \frac{U}{k} = 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$$

C.1.4 合成标准不确定度

C.1.4.1 标准不确定度分量汇总表

各标准不确定度分量汇总见表 C.1。

表 C.1 温度示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_i)$
$u(\bar{t}_d)$	试验机示值重复性	$0.030\text{ }^{\circ}\text{C}$	+1	$0.030\text{ }^{\circ}\text{C}$
$u(\bar{t}_s)$	数字温度计示值误差	$0.058\text{ }^{\circ}\text{C}$	-1	$0.058\text{ }^{\circ}\text{C}$
$u(\Delta t_s)$	数字温度计修正值	$0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$	-1	$0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$

C.1.4.2 合成标准不确定度计算

各分量相互独立、互不相关，因此合成标准不确定度：

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{u^2(\bar{t}_d) + u^2(\bar{t}_s) + u^2(\Delta t_s)} \approx 0.066\text{ }^{\circ}\text{C}$$

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度：

$$U = k \cdot u_c(\Delta t) \approx 0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度校准点采用相同方法评定。

C.2 压力示值误差的测量不确定度评定

C.2.1 测量模型

$$\Delta p = \bar{p}_d - \bar{p}_s \quad (C.2)$$

式中:

Δp —— 试验机的压力示值误差, MPa;

$\bar{p}_d$ —— 试验机压力示值的算术平均值, MPa;

$\bar{p}_s$ —— 数字压力计示值的算术平均值, MPa。

C.2.2 灵敏系数与合成公式

合成标准不确定度公式为:

$$u_c^2(\Delta p) = \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{p}_d} \right]^2 u^2(\bar{p}_d) + \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{p}_s} \right]^2 u^2(\bar{p}_s)$$

对测量模型求偏导, 得到灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta p)}{\partial \bar{p}_d} = +1, c_2 = \frac{\partial(\Delta p)}{\partial \bar{p}_s} = -1$$

因此合成标准不确定度可简化为:

$$u_c^2(\Delta p) = u^2(\bar{p}_d) + u^2(\bar{p}_s)$$

C.2.3 不确定度分量评定

C.2.3.1 试验机压力示值重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\bar{p}_d)$

在重复性条件下, 对试验机 0.2 MPa 校准点连续测量 10 次, 测量结果见下表:

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 $\bar{p}_d$
示值 (MPa)	0.200	0.201	0.199	0.200	0.201	0.200	0.199	0.200	0.201	0.200	0.2001

按贝塞尔公式计算单次测量实验标准差:

$$s(p_d) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_{di} - \bar{p}_d)^2} \approx 0.00074 \text{ MPa}$$

实际校准采用 3 次测量结果的平均值作为最终示值, 因此重复性引入的标准不确定度分量:

$$u_1(\bar{p}_d) = \frac{s(p_d)}{\sqrt{3}} \approx 0.00043 \text{ MPa}$$

C.2.3.2 试验机压力显示分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(\bar{p}_d)$

试验机压力显示分辨力为 0.001 MPa, 示值最大误差区间半宽为 0.0005 MPa, 按均匀分布考虑, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2(\bar{p}_d) = \frac{0.0005 \text{ MPa}}{\sqrt{3}} \approx 0.00029 \text{ MPa}$$

因 $u_2(\bar{p}_d) < u_1(\bar{p}_d)$ ，二者同属试验机示值引入的不确定度分量，故不重复计入合成，取较大值 $u_1(\bar{p}_d)$ 作为示值引入的标准不确定度 $u(\bar{p}_d)$ 。

C.2.3.3 数字压力计示值误差引入的标准不确定度分量 $u(\bar{p}_s)$

数字压力计最大允许误差为 $\pm 0.1\% \times FS$ ，满量程 $FS = 1 \text{ MPa}$ ，因此最大允许误差为 $\pm 0.001 \text{ MPa}$ ，区间半宽为 0.001 MPa ，按均匀分布考虑，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u(\bar{p}_s) = \frac{0.001 \text{ MPa}}{\sqrt{3}} \approx 0.00058 \text{ MPa}$$

C.2.4 合成标准不确定度

C.2.4.1 标准不确定度分量汇总表

各标准不确定度分量汇总见表 C.2。

表 C.2 压力示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_i)$
$u(\bar{p}_d)$	试验机示值重复性	0.00043 MPa	+1	0.00043 MPa
$u(\bar{p}_s)$	数字压力计示值误差	0.00058 MPa	-1	0.00058 MPa

C.2.4.2 合成标准不确定度计算

各分量相互独立、互不相关，因此合成标准不确定度：

$$u_c(\Delta p) = \sqrt{u^2(\bar{p}_d) + u^2(\bar{p}_s)} \approx 0.00072 \text{ MPa}$$

C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度：

$$U = k \cdot u_c(\Delta p) \approx 0.0014 \text{ MPa}$$

C.3 流量示值误差的测量不确定度评定

C.3.1 测量模型

$$\Delta Q = \bar{Q}_d - \bar{Q}_s \quad (\text{C.3})$$

式中：

ΔQ —— 试验机的流量示值误差， dm^3/min ；

$\bar{Q}_d$ —— 试验机流量示值的算术平均值， dm^3/min ；

$\bar{Q}_s$ —— 液体涡轮流量计示值的算术平均值， dm^3/min 。

C.3.2 灵敏系数与合成公式

合成标准不确定度公式为：

$$u_c^2(\Delta Q) = \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{Q}_d} \right]^2 u^2(\bar{Q}_d) + \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{Q}_s} \right]^2 u^2(\bar{Q}_s)$$

对测量模型求偏导，得到灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \bar{Q}_d} = +1, c_2 = \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \bar{Q}_s} = -1$$

因此合成标准不确定度可简化为：

$$u_c^2(\Delta Q) = u^2(\bar{Q}_d) + u^2(\bar{Q}_s)$$

C.3.3 不确定度分量评定

C.3.3.1 试验机流量示值重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\bar{Q}_d)$

在重复性条件下，对试验机 0.5 dm³/min 校准点连续测量 10 次，测量结果见下表：

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 $\bar{Q}_d$
示值 (dm ³ /min)	0.50	0.51	0.49	0.50	0.51	0.50	0.49	0.50	0.51	0.50	0.501

按贝塞尔公式计算单次测量实验标准差：

$$s(Q_d) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{di} - \bar{Q}_d)^2} \approx 0.0105 \text{ dm}^3/\text{min}$$

实际校准采用 3 次测量结果的平均值作为最终示值，因此重复性引入的标准不确定度分量：

$$u_1(\bar{Q}_d) = \frac{s(Q_d)}{\sqrt{3}} \approx 0.0061 \text{ dm}^3/\text{min}$$

C.3.3.2 试验机流量显示分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(\bar{Q}_d)$

试验机流量显示分辨力为 0.01 dm³/min，示值最大误差区间半宽为 0.005 dm³/min，按均匀分布考虑，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2(\bar{Q}_d) = \frac{0.005 \text{ dm}^3/\text{min}}{\sqrt{3}} \approx 0.0029 \text{ dm}^3/\text{min}$$

因 $u_2(\bar{Q}_d) < u_1(\bar{Q}_d)$ ，二者同属试验机示值引入的不确定度分量，故不重复计入合成，

取较大值 $u_1(\bar{Q}_d)$ 作为示值引入的标准不确定度 $u(\bar{Q}_d)$ 。

C.3.3.3 液体涡轮流量计示值误差引入的标准不确定度分量 $u(\bar{Q}_s)$

液体涡轮流量计最大允许误差为 $\pm 1.0\%$ ，液体涡轮流量计在 $0.5 \text{ dm}^3/\text{min}$ 校准点的最大允许误差为 $\pm 1.0\% \times 0.5 = \pm 0.005 \text{ dm}^3/\text{min}$ ，区间半宽为 $0.005 \text{ dm}^3/\text{min}$ ，按均匀分布考虑，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u(\bar{Q}_s) = \frac{0.005 \text{ dm}^3/\text{min}}{\sqrt{3}} \approx 0.0029 \text{ dm}^3/\text{min}$$

C.3.4 合成标准不确定度

C.3.4.1 标准不确定度分量汇总表

各标准不确定度分量汇总见表 C.3。

表 C.3 流量示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_i)$
$u(\bar{Q}_d)$	试验机示值重复性	$0.0061 \text{ dm}^3/\text{min}$	+1	$0.0061 \text{ dm}^3/\text{min}$
$u(\bar{Q}_s)$	液体涡轮流量计示值误差	$0.0029 \text{ dm}^3/\text{min}$	-1	$0.0029 \text{ dm}^3/\text{min}$

C.3.4.2 合成标准不确定度计算

各分量相互独立、互不相关，因此合成标准不确定度：

$$u_c(\Delta Q) = \sqrt{u^2(\bar{Q}_d) + u^2(\bar{Q}_s)} \approx 0.0068 \text{ dm}^3/\text{min}$$

C.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度：

$$U = k \cdot u_c(\Delta Q) \approx 0.014 \text{ dm}^3/\text{min}$$

C.4 溶解氧浓度示值误差的测量不确定度评定

C.4.1 测量模型

$$\Delta c = \bar{c}_d - \bar{c}_s \quad (\text{C.4})$$

式中：

Δc —— 试验机溶解氧浓度示值误差， g/m^3 ；

$\bar{c}_d$ —— 试验机溶解氧浓度示值的算术平均值， g/m^3 ；

$\bar{c}_s$ —— 溶解氧分析仪示值的算术平均值， g/m^3 。

C.4.2 灵敏系数与合成公式

合成标准不确定度公式为：

$$u_c^2(\Delta c) = \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{c}_d} \right]^2 u^2(\bar{c}_d) + \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{c}_s} \right]^2 u^2(\bar{c}_s)$$

对测量模型求偏导，得到灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta c)}{\partial \bar{c}_d} = +1, c_2 = \frac{\partial(\Delta c)}{\partial \bar{c}_s} = -1$$

因此合成标准不确定度可简化为:

$$u_c^2(\Delta c) = u^2(\bar{c}_d) + u^2(\bar{c}_s)$$

C.4.3 不确定度分量评定

C.4.3.1 试验机溶解氧浓度示值重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\bar{c}_d)$

在重复性条件下,对试验机测试温度 40 °C 下饱和氧校准点连续测量 10 次,测量结果见下表:

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 $\bar{c}_d$
示值 (g/m ³)	6.3993	6.4007	6.4012	6.3988	6.4001	6.4009	6.3994	6.4002	6.4013	6.3991	6.4001

按贝塞尔公式计算单次测量实验标准差:

$$s(c_d) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_{di} - \bar{c}_d)^2} \approx 0.000911 \text{ g/m}^3$$

实际校准采用 3 次测量结果的平均值作为最终示值,因此重复性引入的标准不确定度分量:

$$u_1(\bar{c}_d) = \frac{s(c_d)}{\sqrt{3}} \approx 0.000526 \text{ g/m}^3$$

C.4.3.2 试验机溶解氧浓度显示分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(\bar{c}_d)$

试验机溶解氧浓度显示分辨力为 0.0001 g/m³, 示值最大误差区间半宽为 0.00005 g/m³, 按均匀分布考虑, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2(\bar{c}_d) = \frac{0.00005 \text{ g/m}^3}{\sqrt{3}} \approx 0.0000029 \text{ g/m}^3$$

因 $u_2(\bar{c}_d) < u_1(\bar{c}_d)$, 二者同属试验机示值引入的不确定度分量, 故不重复计入合成,

取较大值 $u_1(\bar{c}_d)$ 作为示值引入的标准不确定度 $u(\bar{c}_d)$ 。

C.4.3.3 溶解氧分析仪示值误差引入的标准不确定度分量 $u(\bar{c}_s)$

溶解氧分析仪最大允许误差为 $\pm 0.1 \text{ g/m}^3$, 区间半宽为 0.1 g/m³, 按均匀分布考虑, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u(\bar{c}_s) = \frac{0.1 \text{ g/m}^3}{\sqrt{3}} \approx 0.0577 \text{ g/m}^3$$

C.4.4 合成标准不确定度

C.4.4.1 标准不确定度分量汇总表

各标准不确定度分量汇总见表 C.4。

表 C.4 溶解氧浓度示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_i)$
----------	--------	------------------	------------	----------------------

$u(\bar{c}_d)$	试验机示值重复性	0.000526 g/m ³	+1	0.000526 g/m ³
$u(\bar{c}_s)$	溶解氧分析仪示值误差	0.0577 g/m ³	-1	0.0577 g/m ³

C.4.4.2 合成标准不确定度计算

各分量相互独立、互不相关，因此合成标准不确定度：

$$u_c(\Delta_c) = \sqrt{u^2(\bar{c}_d) + u^2(\bar{c}_s)} \approx 0.0577 \text{ g/m}^3$$

C.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度：

$$U = k \cdot u_c(\Delta_c) \approx 0.12 \text{ g/m}^3$$

温度 80 °C 下饱和氧校准点采用相同方法评定。

C.5 气压示值误差的测量不确定度评定

C.5.1 测量模型

$$\Delta P = \bar{P}_d - \bar{P}_s \quad (\text{C.5})$$

式中：

ΔP —— 试验机的气压示值误差，kPa；

$\bar{P}_d$ —— 试验机气压示值的算术平均值，kPa；

$\bar{P}_s$ —— 数字气压计示值的算术平均值，kPa。

C.5.2 灵敏系数与合成公式

合成标准不确定度公式为：

$$u_c^2(\Delta P) = \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{P}_d} \right]^2 u^2(\bar{P}_d) + \left[\frac{\partial f}{\partial \bar{P}_s} \right]^2 u^2(\bar{P}_s)$$

对测量模型求偏导，得到灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \bar{P}_d} = +1, c_2 = \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \bar{P}_s} = -1$$

因此合成标准不确定度可简化为：

$$u_c^2(\Delta P) = u^2(\bar{P}_d) + u^2(\bar{P}_s)$$

C.5.3 不确定度分量评定

C.5.3.1 试验机气压示值重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\bar{P}_d)$

在重复性条件下，对试验机 100kPa 校准点连续测量 10 次，测量结果见下表：

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 $\bar{P}_d$
示值 (kPa)	100.00	100.01	100.00	99.99	100.00	100.00	100.01	99.99	100.00	100.00	100.00

按贝塞尔公式计算单次测量实验标准差：

$$s(P_d) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{di} - \bar{P}_d)^2} \approx 0.00667 \text{ kPa}$$

实际校准采用 3 次测量结果的平均值作为最终示值，因此重复性引入的标准不确定度分量：

$$u_1(\bar{P}_d) = \frac{s(P_d)}{\sqrt{3}} \approx 0.00385 \text{ kPa}$$

C.5.3.2 试验机气压显示分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(\bar{P}_d)$

试验机气压显示分辨力为 0.01 kPa，示值最大误差区间半宽为 0.005 kPa，按均匀分布考虑，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2(\bar{P}_d) = \frac{0.005 \text{ kPa}}{\sqrt{3}} \approx 0.0029 \text{ kPa}$$

因 $u_2(\bar{P}_d) < u_1(\bar{P}_d)$ ，二者同属试验机示值引入的不确定度分量，故不重复计入合成，

取较大值 $u_1(\bar{P}_d)$ 作为示值引入的标准不确定度 $u(\bar{P}_d)$ 。

C.5.3.3 数字气压计示值误差引入的标准不确定度分量 $u(\bar{P}_s)$

数字气压计最大允许误差为 $\pm 0.02 \text{ kPa}$ ，区间半宽为 0.02 kPa，按均匀分布考虑，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u(\bar{P}_s) = \frac{0.02 \text{ kPa}}{\sqrt{3}} \approx 0.012 \text{ kPa}$$

C.5.4 合成标准不确定度

C.5.4.1 标准不确定度分量汇总表

各标准不确定度分量汇总见表 C.5。

表 C.5 气压示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_i)$
$u(\bar{P}_d)$	试验机示值重复性	0.00385 kPa	+1	0.00385 kPa
$u(\bar{P}_s)$	数字气压计示值误差	0.012 kPa	-1	0.012 kPa

C.5.4.2 合成标准不确定度计算

各分量相互独立、互不相关，因此合成标准不确定度：

$$u_c(\Delta P) = \sqrt{u^2(\bar{P}_d) + u^2(\bar{P}_s)} \approx 0.0126 \text{ kPa}$$

C.5.5 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度：

$$U = k \cdot u_c(\Delta P) \approx 0.03 \text{ kPa}$$