



中华人民共和国国家计量技术规范

JJFXXXX-20XX

空气热老化试验设备 技术性能测试规范

Measurement and Test Norm of Metrological Characteristics
for Hot Air Aging Test Equipments
(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

空气热老化试验设备技术 性能测试规范

JJF XXXX- 20XX

Measurement and Test Norm of Metrological
Characteristics for Hot Air Aging Test Equipments

归口单位：全国温度计量技术委员会

主要起草单位：江苏省计量科学研究院（江苏省能源计量数据中心）

云南省计量测试技术研究院

参加起草单位：浙江省质量科学研究院

中国计量大学

泰安磐然测控科技有限公司

本规范委托全国温度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

栾海峰 [江苏省计量科学研究院（江苏省能源计量数据中心）]

刘虎生 [江苏省计量科学研究院（江苏省能源计量数据中心）]

钟衍程（云南省计量测试技术研究院）

本规范参与起草人：

崔超（浙江省质量科学研究院）

潘江（中国计量大学）

徐震震（泰安磐然测控科技有限公司）

目录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(2)
5 计量性能	(3)
6 测试条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 负载条件	(3)
6.3 测量标准及其他设备	(3)
7 测试项目和测试方法	(4)
7.1 测试项目	(4)
7.2 测试方法	(4)
7.3 数据处理	(7)
8 测试结果表达	(8)
9 复测时间间隔	(9)
附录 A 空气热老化试验设备测试记录参考格式	(10)
附录 B 空气热老化试验设备测试证书内页格式	12)
附录 C 空气热老化试验设备温度偏差测试结果不确定度评定示例	13)
附录 D 空气热老化试验设备换气率测试结果不确定度评定示例	166)
附录 E 干空气密度表	(21)

引言

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》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修订工作的基础性系列规范。

本规范参考了 JJF 1101—2019《环境试验设备温度、湿度参数校准规范》、GB/T 2951.12—2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 12 部分：通用试验方法——热老化试验方法》、GB/T 5170.1—2016《电工电子产品环境试验设备检验方法 第 1 部分：总则》和 JB/T 7444—2018《空气热老化试验箱》中的相关定义和技术内容。

本规范为首次发布。

空气热老化试验设备技术性能测试规范

1 范围

本规范适用于温度范围为（室温~500）℃、换气率范围（0~200）次/h，工作空间容积不大于 10m³ 的空气热老化试验设备的温度、换气率性能的测试，其他范围的热老化设备也可参照本规范进行测试。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1101—2019 环境试验设备温度、湿度参数校准规范

GB/T 2951.12—2008 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 12 部分：通用试验方法——热老化试验方法

GB/T 5170.1—2016 电工电子产品环境试验设备检验方法第 1 部分：总则

JB/T 7444—2018 空气热老化试验箱

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

JJF 1101—2019、GB/T 2951.12—2008、GB/T 5170.1—2016 和 JB/T 7444—2018 界定的以及下列定义和术语适用于本规范。

3.1 空气热老化试验设备 hot air aging test equipment

空气热老化试验设备是具有规定的温度和新风换气率的环境模拟试验设备。

[来源：JB/T 7444—2018，3.1，有修改]

3.2 换气率 ventilation rate

试验设备在给定温度和时间内的新风换气次数。

[来源：JB/T 7444—2018，3.2，有修改]

3.3 工作空间 working space

空气热老化试验设备中能将规定的温度、相对湿度性能保持在规定偏差范围内的那部分空间。

[来源：JJF 1101—2019，3.2，有修改]

3.4 稳定状态 steady state

试验设备工作空间内任意点的温度变化量达到设备本身性能指标要求时的状态。

[来源：JJF 1101—2019，3.3，有修改]

3.5 温度偏差 temperature deviation

试验设备稳定状态下，工作空间各测量点在规定时间内实测最高温度和最低温度与设定温度的上、下偏差。

[来源：GB/T 5170.1—2016，3.2.4]

3.6 温度波动度 temperature fluctuation

试验设备稳定状态下，在规定的时间内，工作空间内任意一点温度随时间的变化量。

[来源：JJF 1101—2019，3.6]

3.7 温度均匀度 temperature uniformity

试验设备稳定状态下，工作空间在某一瞬时任意两点温度之间的最大差值。

[来源：JJF 1101—2019，3.8]

3.8 表面温度 surface temperature

试验设备在最高工作温度或客户指定的工作温度运行时，其箱体外壳表面各测量位置的最大温度。

3.9 加热电能 heating electric energy

试验设备稳定状态下，用于加热进入试验设备箱体内部空气所消耗的电能。

4 概述

空气热老化试验设备（以下简称试验设备）是以空气为介质，控制温度和换气率的试验设备，主要用于电气绝缘材料的耐热性试验，电子零配件、塑料产品及橡胶制品的换气老化性能的检测，考核和判断试验样品在高温环境条件下贮存和使用的适应性。空气热老化试验设备主要由试验箱体、电气系统、热风循环（自然对流或强制对流）系统等部分组成。

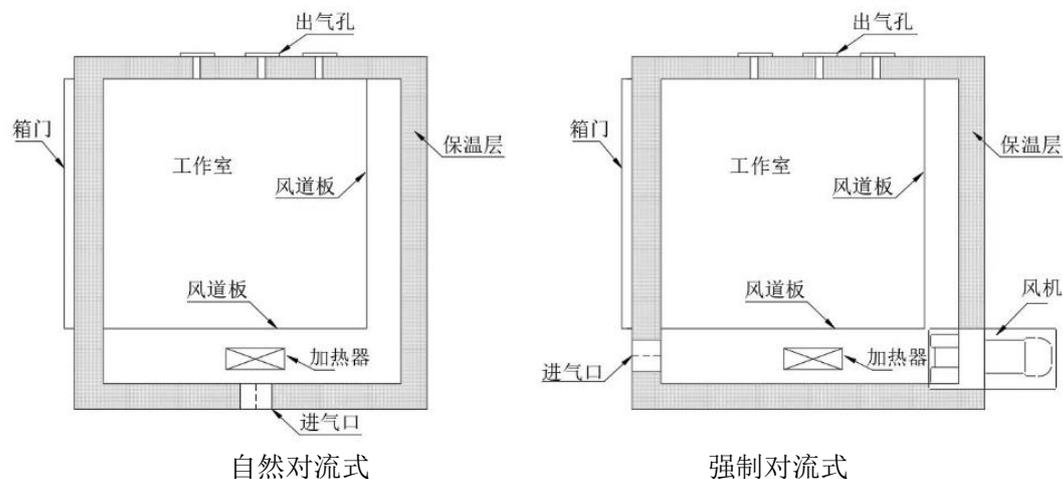


图 1 空气热老化试验设备结构示意图

5 计量性能

试验设备的温度偏差、温度波动度、温度均匀度、表面温度、换气率等常用技术要求见表1。

表1 试验设备技术要求

计量性能	技术要求 (°C)		
温度范围	(室温~200)	(200~300)	(300~500)
温度偏差	±2	±3	±5
温度波动度	±2	±2	±3
温度均匀度	4	7	10
表面温度	≤(室温+35)	≤(室温+35+ (T _{max} -200) /10)	
换气率	符合用户实际使用要求		
注：1. T _{max} 为试验设备标称最高工作温度； 2. 以上技术指标不用于合格性判断，仅供参考。			

6 测试条件

6.1 环境条件

温度：(15~35) °C；

相对湿度：不大于 85%。

设备周围应无强烈振动及腐蚀性气体存在，应避免其他冷、热源以及较强空气对流等影响。环境条件还应满足被校仪器、所用标准仪器和其它配套设备正常使用的其它要求。

6.2 负载条件

一般在空载条件下测试，或根据用户要求在负载条件下进行测试，但应注明负载的情况。

6.3 测量标准及其他设备

测量标准及其他配套设备可从表2中参考选择。

表2 测量标准及配套设备的技术指标

序号	设备名称	测量范围 ¹	技术要求 ²	用途
1	温度巡检仪	(0~500) °C	最大允许误差：铂电阻 (0.15+0.002 t)，热电偶±0.004 t 分辨力：不低于 0.1°C，扩展不确定度 不大于被校设备温度偏差绝对值的 1/3	标准器

2	表面温度计	(0~200) °C	最大允许误差: $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	测表面温度
3	电能测量装置	(0.1~380) V (0.1~100) A (45~65) Hz	准确度等级: 0.2 级及以上	换气率测量
4	计时器	(0~3600) s	最大允许误差: $\pm 0.5\text{s/d}$	换气率测量
5	钢卷尺	(0~3) m	准确度等级: 1 级	——
<p>注: 1、标准器的测量范围为一般要求, 使用中应能覆盖被校设备的实际测量范围; 2、也可选用技术指标满足上述要求的其他测量设备。</p>				

7 测试项目和测试方法

7.1 测试项目

空气热老化试验设备测试项目为温度偏差、温度波动度、温度均匀度、表面温度和换气率。

7.2 测试方法

7.2.1 测试前的准备

测试前依据设备说明书中要求进行, 如无说明根据以下方法进行: 当温度达到设定值后, 强制对流式试验设备继续稳定 30min, 自然对流式试验设备继续稳定 60min 后开始测试。温度的测试在测量试验设备气门开启状态下加热电能的同时段内进行, 试验设备换气孔大小应固定在换气率测试时的位置。

7.2.2 温度的测试

温度偏差、温度均匀度、温度波动度的测试同时进行。

7.2.2.1 测试温度点的选择

测试温度点一般根据用户的要求选择, 或者选择设备使用范围的上限、下限和中间温度点。

7.2.2.2 测量点位置

传感器的布放位置为设备测试时的测量点, 应布置在设备工作空间内的三个不同层面上, 称为上、中、下三层, 中层为通过工作空间几何中心的平行于底面的测试工作面, 测试点与工作室内壁的距离不小于各边长的 1/10, 遇风道时, 此距离可加大, 但不应超过 500mm。如果设备带有样品架或样品车时, 下层测试点可布放在样品架或样品车上方 10mm 处。

测量点位置也可根据用户实际工作进行布置。

7.2.2.3 测量点数量

温度测量点的数量用 1、2、3……数字表示。

a) 设备容积小于 2m^3 时, 测量点为 9 个, 5 点位于设备工作空间中层几何中心处, 如图 2 所示。

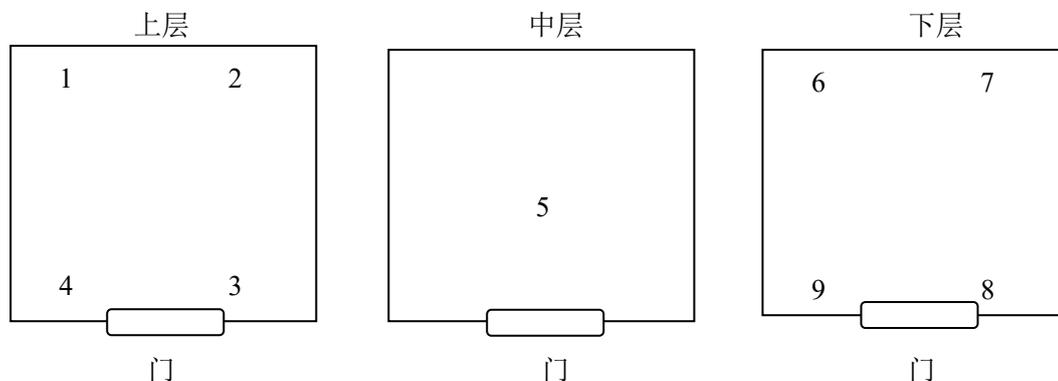


图 2 测试点布置 (9 点)

b) 设备容积大于 2m^3 时, 测量点为 15 个, 15 点位于设备工作空间中层几何中心处, 如图 3 所示。

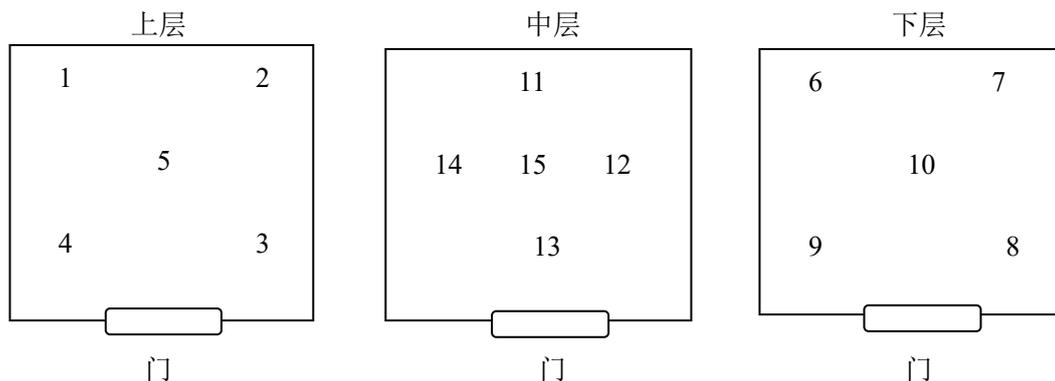


图 3 测试点布置 (15 点)

c) 根据用户要求或实际需要增加或减少测量点时, 应图示说明。

7.2.2.4 测试时间及间隔

试验设备达到设定温度并稳定后, 开始记录各测量点温度值。测量时间 30min, 测量间隔为 2min, 记录 16 组数据。测量时间和测量间隔可根据设备实际运行状态和用户需求确定, 并在原始记录和测试证书中注明。

7.2.3 表面温度的测试

一般选择试验设备处于最高工作温度时进行表面温度测试, 也可根据用户的要求选择其他温度。在试验设备显示温度第一次达到设定温度并稳定 2h 后, 使用表面温度计测量箱体表面, 如图 4 所示一般选择在距门缝、观察窗、出气孔等不少于三个位

置的周围 80mm 区域内进行测量，测量时表面温度传感器与所测箱体表面应紧密贴合，记录各位置 2min 内所测温度的最大值。

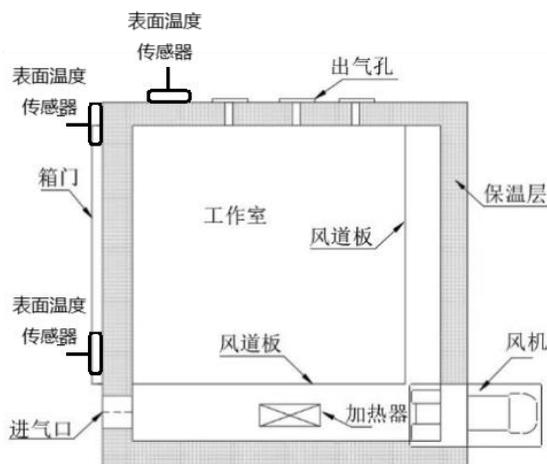


图 4 表面温度测量位置示意图

7.2.4 换气率的测试

7.2.4.1 气门关闭试验设备的平均功率

关闭试验设备的所有通风口，密封进出气孔、测试孔及有可能进行箱体内外空气流通交换的部位。将电能表接入被测设备加热系统，开启试验设备，在显示温度达到设定值并进入稳定状态后，测量气门关闭后 0.5h 或更长时间内的加热电能（耗电量） W_1 ，并换算成平均功率 P_1 。

7.2.4.2 气门开启试验设备的平均功率

拆去全部密封，按要求调节进出气孔的位置，在显示温度重新达到设定值并进入稳定状态后，以同样方法测量试验设备气门开启时的加热电能（耗电量） W_2 （与温度参数的测量在同时进行），并换算成平均功率 P_2 。

7.2.4.3 环境温度的测量

与气门开启试验同时进行。试验设备气门开启状态下，环境温度测试距离设备进风口约 2m，且与进风口在同一水平面上，并距其他物体至少 1m，测量时间 30min，测量间隔 2min，取平均值作为环境温度的测量结果。

7.3 数据处理

7.3.1 温度偏差

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_N \quad (1)$$

$$\Delta t_{\min} = t_{\min} - t_N \quad (2)$$

式中： Δt_{\max} ——温度上偏差，℃；

Δt_{\min} —— 温度下偏差, °C;

t_{\max} —— 规定时间内实测最高温度, °C;

t_{\min} —— 规定时间内实测最低温度, °C;

t_N —— 设定温度, °C。

7.3.2 温度均匀度

试验设备在稳定状态下, 工作空间各测试点每次测量中实测最高温度与最低温度之差的算术平均值。

$$\Delta t_u = \sum_{i=1}^m (t_{i\max} - t_{i\min}) / m \quad (3)$$

式中: Δt_u —— 温度均匀度, °C;

$t_{i\max}$ —— 各测试点在第 i 次测得的最高温度, °C;

$t_{i\min}$ —— 各测试点在第 i 次测得的最低温度, °C;

m —— 测量次数。

7.3.3 温度波动度

在稳定状态下, 各测量点温度波动度为实际工作区域内测量点在规定时间内测量的温度最大值与最小值之差的一半, 并冠以“±”号, 取全部测量点中变化量的最大值作为温度波动度测试结果。

$$\Delta t_{jj} = \pm \max[(t_{j\max} - t_{j\min}) / 2] \quad (4)$$

式中: Δt_{jj} —— 测量点 j 的温度波动度, °C;

$t_{j\max}$ —— 测量点 j 在 m 次测量中的最高温度, °C;

$t_{j\min}$ —— 测量点 j 在 m 次测量中的最低温度, °C。

7.3.4 表面温度计算

取各位置测量结果 t_k 中的最高温度作为试验设备表面温度的测量结果 t_b 。

$$t_b = \max(t_k) \quad (5)$$

式中: t_k —— 不同位置的表面温度测量结果, °C。

7.3.5 换气率计算

按公式 (6) 计算试验设备的换气率 (每小时换气次数) N 。

$$N = \frac{h_s(P_2 - P_1)}{c_p V \rho (t_2 - t_1)} \quad (6)$$

$$P_1 = \frac{W_1}{\tau_1} \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{W_2}{\tau_2} \quad (8)$$

式中： N ——换气率，次/h；

h_s ——系数（ $h_s=3600$ ）；

W_1 ——气门关闭时测得的加热电能，W h；

W_2 ——气门开启时测得的加热电能，W h；

c_p ——常压下空气的比热容，J/(g·°C)， c_p 通常取 1.005 J/(g·°C)；

t_1 ——环境温度测量点实测温度的平均值，°C；

t_2 ——工作空间内各测量点实测温度的平均值，°C；

V ——试验设备箱内（含风道）容积，L；

ρ ——试验时的环境空气密度，g/L，见附录 E；

P_1 ——气门关闭时的平均功率，W；

P_2 ——气门开启时的平均功率，W；

τ_1 ——气门关闭时的电能测量时间，h；

τ_2 ——气门开启时的电能测量时间，h。

8 测试结果表达

经测试的设备出具测试证书或测试报告，测试证书或测试报告至少应包括以下信息：

- a) 标题“测试证书”或“测试报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行测试的地点(如果与实验室的地址不同)；
- 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) 客户的名称和地址；
- f) 被测对象的描述和明确标识；
- g) 进行测试的日期；
- h) 测试所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次测试所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 测试环境的描述；
- k) 测试结果及相应不确定度的说明；

- 1) 对测试规范的偏离的说明；
- m) 测试证书或测试报告签发人的签名、职务或等效标识；
- n) 测试人和核验人签名；
- o) 测试结果仅对被测对象有效性的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制测试证书或测试报告的声明。

9 复测时间间隔

建议复测时间间隔为 1 年，使用特别频繁时应适当缩短时间间隔。在使用过程中经过修理、更换重要元器件等的一般需重新测试。

复测时间间隔是由仪器的使用情况、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送测单位可根据实际使用情况自主决定复测时间间隔。

附录 A

空气热老化试验设备测试记录参考格式

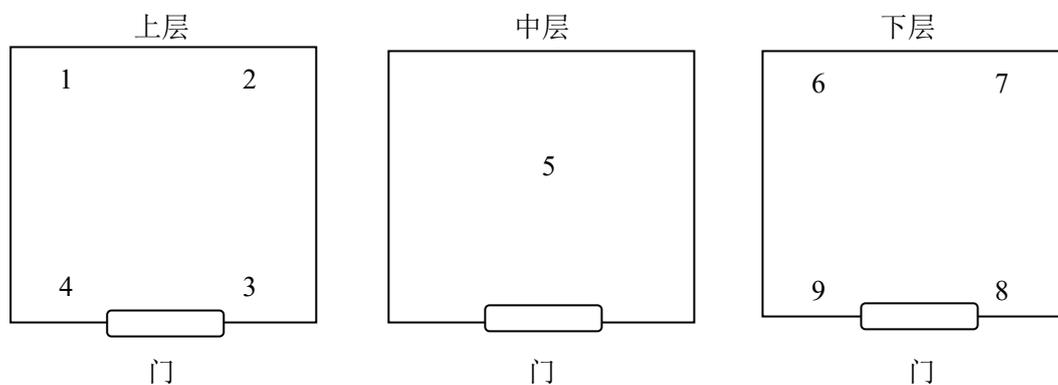
委托单位				记录编号:			证书编号:		
计量器具名称				规格型号					
制造厂				出厂编号					
计量标准考核证书有效期	年 月 日			依据的技术文件					
标准器名称				出厂编号					
标准器检定证书有效期	年 月 日			不确定度/最大允许误差/准确度等级					
环境条件	温度℃	相对湿度 %		负载条件					
测试员			核验员			测试日期			
外观检查				设定温度			℃		
温度参数计量单位℃									
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2									
.....									
16									
最大值									
最小值									
平均值									
表面温度	位置						最大值	不确定度	
	温度								
温度上偏差				不确定度					
温度波动度				不确定度					
温度下偏差				不确定度					
温度均匀度				不确定度					

换气率参数计量单位℃								
试验设备箱内（含风道）容积								
1.试验设备状态：气门关闭								
加热电能 W_1 (W h)								
2.试验设备状态：气门开启								
设定温度	次数	1	2	3	4	5	平均值
	箱内							
	环境							
加热电能 W_2 (W h)								
3.换气率计算：								
设定温度 (℃)	箱内温度 (℃)	环境温度 (℃)	换气孔 开度%	测量时间 (min)	气门关闭 时平均功 率 (W)	气门开启 时平均功 率 (W)	换气率 (次/h)	
不确定度：								

附录 B

空气热老化试验设备测试证书内页格式

1.布点位置



注：1.试验设备箱内（含风道）容积：

2.负载条件：

2.测试结果表达

设定温度（℃）	测试结果				
	换气率 （次/h）	表面温度 （℃）/位置	温度偏差 （℃）	温度波动度 （℃）	温度均匀度 （℃）
不确定度：					

附录 C

空气热老化试验设备温度偏差测试结果不确定度评定示例

C.1 测试方法

按照本规范对温度偏差的测试要求，温度测量点按规范要求布置。将热老化试验设备调节到设定温度开启运行。稳定后开始记录温度示值及各测量点的温度值，记录时间间隔为 2min，30min 内共记录 16 组数据。

计算 16 组数据中各测量点实测最高温度与设备设定温度的差值，即为温度上偏差；16 组数据中各测量点实测最低温度与设备设定温度的差值，即为温度下偏差。

本部分以温度上偏差为例进行不确定度评定。

C.2 测量模型

温度偏差公式：

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_N \quad (\text{C.1})$$

$$\Delta t_{\min} = t_{\min} - t_N \quad (\text{C.2})$$

式中： Δt_{\max} ——温度上偏差，℃；

Δt_{\min} ——温度下偏差，℃；

t_{\max} ——规定时间内实测最高温度，℃；

t_{\min} ——规定时间内实测最低温度，℃；

t_N ——设定温度，℃。

由于公式 (C.1) 和 (C.2) 评定方法一致，因此本文仅以温度上偏差为例进行不确定度评定。

C.3 灵敏系数

C.3.1 对公式 (C.1) 各分量求偏导，得到各分量的灵敏系数：

$$c_1 = \partial \Delta t_{\max} / \partial t_{\max} = 1 \quad c_2 = \partial \Delta t_{\max} / \partial t_N = -1$$

C.4 标准不确定度分量

不确定度来源：测量重复性，标准器修正值，标准器稳定性，热老化设备设定值分辨力。

C.4.1 标准器引入的不确定度分量

C.4.1.1 标准器温度测量重复性及分辨力引入的标准不确定度 u_1 评定

在 100℃ 测试点重复测量 16 次，标准偏差 s 用下式计算得到：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [t_i - \bar{t}]^2}{n-1}} = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{C.3})$$

标准器分辨力为 0.01℃，由此引入的标准不确定度为 0.0029℃，小于重复测量标准偏差 s ，因此： $u_1 = s = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

C.4.1.2 标准器温度修正值引入的标准不确定度 u_2 评定

标准器温度修正值的不确定度 $U = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C}$ ， $k = 2$ ，则：

$$u_2 = U/k = 0.06/2 = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.4.1.3 标准器稳定性引入的标准不确定度 u_3 的评定

标准器稳定性取两年变化的最大值 0.20℃，区间半宽为 0.10℃，服从均匀分布，由此引入的标准不确定度为： $u_3 = 0.1/\sqrt{3} = 0.058 \text{ } ^\circ\text{C}$

C.4.2 设备温度设定值分辨力引入的标准不确定度分量 u_4 的评定

设备温度设定值分辨力为 0.1℃，按均匀分布，由此引入的标准不确定度为：

$$u_4 = 0.1/2/\sqrt{3} = 0.029 \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.5 合成标准不确定度的计算

C.5.1 标准不确定度分量汇总表见表 C.1

表 C.1 温度偏差测试标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	灵敏系数 c_i	不确定度来源	标准不确定度 u_i 值	$ c_i u_i$
u_1	1	测量重复性	0.05℃	0.05℃
u_2	1	标准器温度修正值	0.03℃	0.03℃
u_3	1	标准器稳定性	0.058℃	0.058℃
u_4	-1	设定值分辨力	0.029℃	0.029℃

C.5.2 合成标准不确定度的计算

由于 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 互不相关，合成标准不确定度 u_c 按下式计算

$$u_c = \sqrt{(c_1u_1)^2 + (c_1u_2)^2 + (c_1u_3)^2 + (c_2u_4)^2} = 0.09 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{C.4})$$

C.6 扩展不确定度评定

取包含因子 $k=2$ ，温度上偏差测试扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (k=2)$$

附录 D

空气热老化试验设备换气率测试结果不确定度评定示例

D.1 测试方法

使用 0.1 级三相标准电能表、温度巡回检测仪对一台 RL100 型热老化试验设备的换气率参数进行测试，温度设定值为 120℃。

D.2 测量模型

$$N = \frac{h_s(P_2 - P_1)}{c_p V \rho (t_2 - t_1)} \quad (\text{D.1})$$

式中： N ——换气率，次/h；

h_s ——系数（ $h_s=3600$ ）；

P_1 ——气门关闭时的平均功率，W；

P_2 ——气门开启时的平均功率，W；

c_p ——常压下空气的比热容，J/(g·℃)， c_p 通常取 1.005 J/(g·℃)；

t_1 ——环境温度测量点实测温度的平均值，℃；

t_2 ——工作空间内各测量点实测温度的平均值，℃；

V ——试验设备箱内（含风道）容积，L；

ρ ——试验时的环境空气密度，g/L。

由于根据测量模型计算各分量灵敏系数较为复杂，因此采用变量替换的方法，设 $\Delta P = P_2 - P_1$ ， $\Delta t = t_2 - t_1$ ，测量模型转换为：

$$N = \frac{h_s \Delta P}{c_p V \Delta t} \quad (\text{D.2})$$

式 (D.2) 全部为积商形式，且各分量独立不存在相关性，可采用相对合成不确定度方式进行评定，即：

$$\begin{aligned} u_{\text{rel}}(N) &= \sqrt{u_{\text{rel}}^2(P) + u_{\text{rel}}^2(t) + u_{\text{rel}}^2(V) + u_{\text{rel}}^2(d)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{u(P)}{P}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(d)}{d}\right)^2} \end{aligned} \quad (\text{D.3})$$

D.3 输入量 P 的标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P)$ 的评定

$u_{\text{rel}}(P)$ 来源于测量重复性及标准电能表测量误差。

D.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_{1\text{rel}}(P)$

设定值为 120℃ 时使用标准电能表得到设备在密封状态下平均功率 P_1 ，然后打开换气孔，稳定时间后，得到开启状态下的平均功率 P_2 ，重复测量 3 次，采用极差法计算实验标准偏差，测量结果如表 D.1 所示：

表 D.1

测量次数	P_1 (W)	P_2 (W)	ΔP (W)
1	152.0	169.0	17.0
2	151.3	168.7	17.4
3	152.7	169.9	17.2
平均值	152.0	169.2	17.2

$$s(P) = \frac{(17.4 - 17.0)}{1.69} = 0.24\text{W}$$

实际测量时一般要求单次测量，则重复性引入的标准不确定度即为实验标准偏差： $u_1(P) = s = 0.24\text{W}$ ，转换成相对标准不确定度：

$$u_{1\text{rel}}(P) = \frac{u_1(P)}{P} = 1.38\% \quad (\text{D.4})$$

D.3.2 标准电能表测量误差引入的标准不确定度 $u_{2\text{rel}}(P)$

标准电能表相对允许误差为 $\pm 0.1\%$ ，服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ， P_1 和 P_2 同时具有该不确定度，合成应乘以 $\sqrt{2}$ ，则

$$u_{2\text{rel}}(P) = \frac{0.1\% \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0.08\%$$

因此输入量 P 引入的相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(P) = \sqrt{u_{1\text{rel}}^2(P) + u_{2\text{rel}}^2(P)} = 1.38\% \quad (\text{D.5})$$

D.4 输入量 t 的标准不确定度 $u_{\text{rel}}(t)$ 的评定

$u_{\text{rel}}(t)$ 来源于测量重复性及温度巡检仪的修正值。

D.4.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_{1\text{rel}}(t)$

使用温度巡检仪同时测量环境温度 t_1 和箱内温度 t_2 ，在 30min 内每隔 2min 进行 16 次测量，16 次测量 t_1 和 t_2 的差值 Δt 测量结果如表 D.2 所示，采用贝塞尔公式计算

实验标准偏差:

表 D. 2

测量次数	Δt (°C)
1	93.9
2	94.1
3	94.6
4	94.4
5	95.4
6	94.1
7	94.4
8	94.2
9	93.6
10	95.8
11	93.8
12	95.1
13	96.3
14	94.6
15	94.5
16	93.9
平均值	94.5

$$s(\Delta t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t})^2}{n-1}} = 0.75^\circ\text{C} \quad (\text{D.6})$$

取平均值作为测量结果，则重复性引入的标准不确定度为平均值实验标准偏差：

$$u_1(t) = \frac{s(\Delta t)}{\sqrt{n}} = 0.19^\circ\text{C}, \text{ 转换成相对标准不确定度:}$$

$$u_{1\text{rel}}(t) = \frac{u_1(t)}{\Delta t} = 0.20\% \quad (\text{D.7})$$

D.4.2 温度巡检仪修正值引入的标准不确定度 $u_{2\text{rel}}(t)$

温度巡检仪修正值引入的扩展不确定度为 $U=0.06^\circ\text{C}$ ($k=2$)，标准不确定度为 0.03°C ， t_1 和 t_2 同时具有该修正值不确定度，合成应乘以 $\sqrt{2}$ ，则相对标准不确定度为：

$$u_{2\text{rel}}(t) = \frac{0.03 \times \sqrt{2}}{\Delta t} = 0.04\%$$

因此输入量 t 引入的相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(t) = \sqrt{u_{1\text{rel}}^2(t) + u_{2\text{rel}}^2(t)} = 0.20\% \quad (\text{D.8})$$

D.5 输入量 V 的标准不确定度 $u_{\text{rel}}(V)$

$u_{\text{rel}}(V)$ 来源于钢卷尺测量误差。

钢卷尺相对最大允许误差为 $\pm 1\%$ ，取半宽为 1% ，服从均匀分布，体积为测量箱体长宽高的乘积，因此为三者合成，则

$$u_{\text{rel}}(V) = \sqrt{\left(\frac{1\%}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1\%}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1\%}{\sqrt{3}}\right)^2} = 1.00\% \quad (\text{D.9})$$

D.6 输入量 d 的标准不确定度 $u_{\text{rel}}(d)$

$u_{\text{rel}}(d)$ 来源于空气密度的变化。

本次测量环境温度在 $(25\sim 27)^\circ\text{C}$ 范围内变化，由此造成空气密度变化范围为 $(1.185\sim 1.177)\text{g/L}$ ，服从均匀分布，空气密度实际值取 1.181g/L ，则

$$u_{\text{rel}}(d) = \frac{(1.185 - 1.177)}{2 \times \sqrt{3} \times 1.181} = 0.20\% \quad (\text{D.10})$$

D.7 合成标准不确定度的计算

D.7.1 标准不确定度分量汇总表见表 D.3

表 D.3 换气率测试标准不确定度分量汇总表

不确定度分量 $u(x_i)$		不确定度来源	分量相对标准 不确定度	输入量相对标准 不确定度
$u_{\text{rel}}(P)$	$u_{1\text{rel}}(P)$	电能表测量重复性	1.38%	1.38%
	$u_{2\text{rel}}(P)$	电能表测量误差	0.08%	
$u_{\text{rel}}(t)$	$u_{1\text{rel}}(t)$	温度测量重复性	0.20%	0.20%
	$u_{2\text{rel}}(t)$	温度测量误差	0.04%	
$u_{\text{rel}}(V)$		体积测量误差	1.00%	1.00%
$u_{\text{rel}}(d)$		空气密度变化	0.20%	0.20%

D.7.2 合成标准不确定度的计算

由于上述各分量互不相关，合成相对标准不确定度 u_{crel} 按下式计算：

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{(u_{\text{rel}}(P))^2 + (u_{\text{rel}}(t))^2 + (u_{\text{rel}}(V))^2 + (u_{\text{rel}}(d))^2} = 1.7\% \quad (\text{D.11})$$

D.8 扩展不确定度评定

取包含因子 $k=2$ ，相对扩展不确定度为： $U_{\text{rel}} = k \times u_{\text{crel}} = 4\%$ ($k=2$)

本次换气率测量结果为 $N=12$ 次/小时，则扩展不确定度为：

$$U = N \times u_{\text{crel}} = 4\% \times 12 = 0.48 \text{ 次/小时} \approx 1 \text{ 次/小时} \quad (k=2)$$

附录 E

干空气密度表

温度℃	密度 g/L						
1	1.288	11	1.243	21	1.201	31	1.161
2	1.284	12	1.239	22	1.197	32	1.157
3	1.279	13	1.235	23	1.193	33	1.154
4	1.275	14	1.230	24	1.189	34	1.150
5	1.270	15	1.226	25	1.185	35	1.146
6	1.265	16	1.222	26	1.181	36	1.142
7	1.261	17	1.217	27	1.177	37	1.139
8	1.256	18	1.213	28	1.173	38	1.135
9	1.252	19	1.209	29	1.169	39	1.132
10	1.248	20	1.205	30	1.165	40	1.128

注：干空气密度计算式为：

$$\rho = 3.4858 \frac{P}{T}$$

式中： P ——空气的绝对压力，kPa；

T ——空气的热力学温度，K。