

高温蒸汽凝结法相对湿度测量^{*}

高琳锋¹ 徐志军² 梁俊钦³ 张彩良² 皇甫永春² 陈建利¹

(1. 中国辐射防护研究院 太原 030006; 2. 福建宁德核电有限公司 宁德 355000;
3. 中广核惠州核电有限公司 惠州 516003)

摘要:为实现露点温度 100 °C 以上高温高压蒸汽相对湿度的精确测量,设计了以凝结称重装置、不凝气体含湿量测量装置、数据处理系统为核心部件的凝结法相对湿度测量系统。测量系统依据蒸汽相对湿度与含湿量对应关系,采用蒸汽快速凝结,实时监测冷凝液质量与不凝气流含湿量的方式实现了目标蒸汽所处温度、压力条件下相对湿度的在线测量。凝结法测量工艺能实现露点温度 -40 °C ~ 130 °C 条件下气体相对湿度 0.15% ~ 100% 范围内的有效测量。在露点温度 128 °C、相对湿度 95% 条件下,测量不确定度 0.59%,测量偏差小于 0.4%,具有测量精度高、测量速率快的特点。该系统能开展瞬态条件下蒸汽相对湿度测量,湿度测量值能溯源到国际单位制基本单位。

关键词:蒸汽凝结;湿度测量;瞬态条件;计量溯源

中图分类号: TB943; TH837 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Measurement of relative humidity for high temperature steam by condensation method

Gao Linfeng¹ Xu Zhijun² Liang Junqin³ Zhang Cailiang² Huangfu Yongchun² Chen Jianli¹

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China; 2. Fujian Ningde Nuclear Power Co., Ltd., Ningde 355000, China; 3. CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd., Huizhou 516003, China)

Abstract: In order to accurately measure the relative humidity of high-temperature and high-pressure steam with a dew point temperature above 100 °C, a relative humidity measurement system based on the condensation method has been designed, with the main core components including a condensation weighing device, a non-condensable gas humidity measurement device and a data processing system. Based on the relationship between steam relative humidity and moisture content, the measurement system realizes the online measurement of steam relative humidity value under the temperature and pressure conditions of the target steam by real-time monitoring of condensate quality and non-condensable gas moisture content. The condensation method can effectively measure the relative humidity of the gas in the range of 0.15% ~ 100% under the condition of dew point temperature of -40 °C ~ 130 °C. The measurement uncertainty of the condensation method is 0.59% at the steam dew point temperature of 128 °C and the relative humidity of 95%, and the relative humidity measurement deviation is less than 0.4%. It has the characteristics of high measurement accuracy and fast measurement rate. This system can realize the instantaneous measurement and can realize the traceability of the international system of units (SI) of the relative humidity value.

Keywords: steam condensation; humidity measurement; transient conditions; metrological traceability

0 引言

在木材干燥、制药、电力等领域,蒸汽相对湿度(relative humidity, RH)是工艺条件与节能控制的重要参数。

目前,国内外商业化湿度测量仪器工作范围大都限定在露点温度 100 °C 以下^[1-3],更高露点温度下湿度校准标准还需开展国际单位制(international system of units, SI)溯源工作^[4]。

收稿日期:2024-02-27

^{*} 基金项目:国防科工局乏燃料后处理科研专项(KY20007)资助

为了实现高温和瞬态条件下蒸汽相对湿度测量与校准,2015年欧盟内部多国合作开展了一项100℃以上蒸汽相对湿度的测量与溯源工作^[5]。根据2022年研究报道^[6],国外仅意大利、荷兰两家国家计量机构实现了温度180℃(最高露点温度150℃)、压力600kPa范围内蒸汽相对湿度的制备,并分别采用微波谐振法和蒸汽膨胀法进行了相对湿度的测量验证^[7-8],但在有限参数条件下的非正式平行对比中,部分高湿度条件下(露点温度127℃)测试结果并不理想,相对湿度存在3%~4%的较大差异。

传统湿度传感器以电容式为代表,高温、高压条件会对湿敏材料产生非线性影响,因此为保持测量准确性需要频繁校准,这在很大程度上限制了工业应用^[9-10]。微波谐振法^[5-7]只能针对与纯蒸汽介电常数区别较大的预设气体组份的蒸汽介质(不含二氧化碳等),并且微波谐振器要处于良好的保温环境中,因此适宜实验室校准。蒸汽膨胀法^[1,6-7]受限于蒸汽膨胀过程热平衡时间长与温度梯度的影响,无法进行快速测量,因此适宜实验室静态条件下湿度测量与校准。当前,国外高温蒸汽相对湿度测量虽然取得了较大进展,但是离工业成熟应用还有一定距离。

目前,国内关于相对湿度的研究主要集中于常压条件^[11-14],蒸汽分压高于大气压条件下相对湿度的研究相对较少。近期,本团队^[15-16]采用干空气与高温高压蒸汽充分混合的方式形成恒温常压过热气体,通过测量过热气体参数实现了露点温度128℃条件下蒸汽相对湿度的在线测量,测量偏差小于1%。

本文采用蒸汽凝结,实时监测冷凝液质量与不凝气体含湿量的方式实现了露点温度100℃以上蒸汽相对湿度的有效测量,并对相对湿度测量范围、测量准确性、瞬态条件湿度测量以及SI基本单位溯源进行了验证与分析讨论。

1 系统设计

1.1 原理与工艺

依据确定参数条件下蒸汽相对湿度与含湿量对应关系,采用蒸汽凝结,实时监测蒸汽液化质量与常压下不凝气体含湿量的方式进行蒸汽相对湿度的在线测量。工艺流程如图1所示。

1.2 相对湿度计算

1) 饱和蒸汽压与绝对湿度

在给定温度和压力条件下,对应的饱和蒸汽压 P_w 和蒸汽绝对湿度 A ^[15,17]表示为:

$$P_{sv} = P_c \times \exp(a_1\theta + a_2\theta^{1.5} + a_3\theta^3 + a_4\theta^{3.5} + a_5\theta^4 + a_6\theta^{7.5}) \quad (1)$$

$$A = \frac{C \times P_w}{100 \times T} \quad (2)$$

式中:水的临界参数为 $T_c=647.096\text{ K}$, $P_c=22\,064\,000\text{ Pa}$; $\theta=1-T/T_c$, T 为蒸汽温度; $a_1\sim a_6$ 分别为 $-7.859\,517\,83$ 、 $1.844\,082\,59$ 、 $-11.786\,649\,7$ 、 $22.680\,741\,1$ 、 $-15.961\,871\,9$ 、 $1.801\,225\,02$; C 为 216.679 gK/J ; P_w 为蒸汽分压。

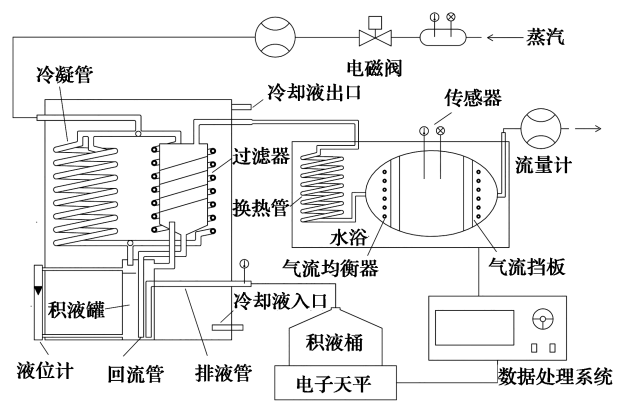


图1 蒸汽相对湿度监测工艺

Fig.1 Process diagram of steam relative humidity monitoring

2) 相对湿度

蒸汽相对湿度通过数据转化计算得出^[16]:

$$RH = \frac{A_w}{A_{sv}} = \frac{m_l + m_g}{m_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_w 、 A_{sv} 分别为蒸汽绝对湿度与饱和状态时的绝对湿度; m_l 、 m_g 、 m_s 分别为单位体积蒸汽对应冷凝液质量、不凝气流含水量、饱和蒸汽含水量。

本文采用确定流量比的干空气、去离子水加热、汽化后在整体置于恒温油浴内的不锈钢椭球形腔内形成高温高压过热蒸汽,相对湿度计算直接引用蒸汽初始输入参数。

1.3 系统与功能

关键部件包含电子天平 METTLER ME3002(0~3 200 g,±0.01 g)、露点仪 MICHELL Optidew(露点温度-40℃~90℃,±0.15℃露点、±0.1℃温度)、压力传感器 WEIKA S-20(0~1 MPa,±0.125%)、温度传感器 西安仪表厂 PT100(-30℃~150℃,±0.1℃)、超级恒温水浴 顺流仪器 SLSC-50(室温~100℃,±0.05℃)。

湿度监测系统主要部件与装置如图2所示。

1) 凝结称重装置

蒸汽凝结称重装置采用逆流换热设计,换热管为多组小半径垂直螺旋管。通过二次流与场协同来加强换热^[18],同时有助于实现各冷凝管内蒸汽凝结速率的一致性。积液罐内通过液封实现不凝气体与冷凝液流路分离(图1),当液体压力与内外气压达到平衡后冷凝液通过导流方式收集到积液桶中实时称量。

2) 不凝气体含湿量测量装置

不凝气流经冷凝器内金属过滤器滤除液滴、水浴盘管换热器精确控温后进入气体测量腔。气体参数测量位于测量腔中间部位,气流均衡器(等间距开孔的平面螺旋管)和金属纤维挡板在两侧对称布置进行气流分布调节^[15]。通过测量气体温度、相对湿度、压力、流量等参数进行不凝气流含湿量计算。

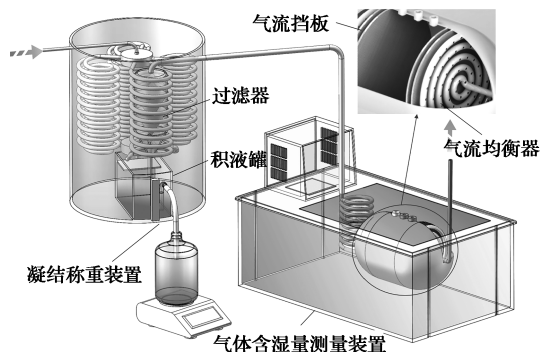


图2 相对湿度监测装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of relative humidity monitoring device

3) 数据处理系统

数据处理系统设计框图如图3所示,在蒸汽凝结与称重过程通过温度传感器监测排液口冷凝液温度来动态调节冷却液温度与流量进行冷凝过程控制,并通过监测天平称重质量进行冷凝速率计算。不凝气体含水量监测通过数据采集单元实时获取气流参数后经数据处理单元计算实现。数据处理系统对系统控制参数进行动态调节并综合蒸汽、冷凝液、不凝气体监测参数进行蒸汽相对湿度实时计算。

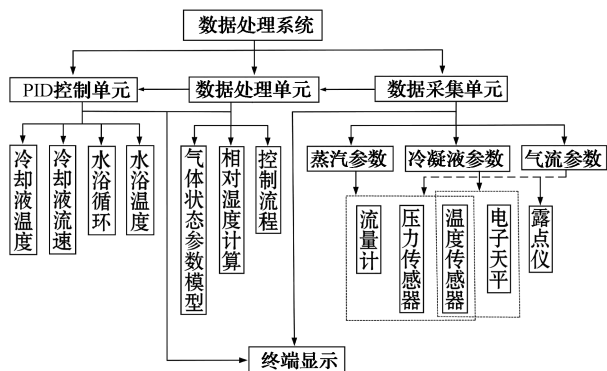


图3 数据处理系统设计框图

Fig. 3 Design block diagram of data processing system

2 实验验证

2.1 功能验证

采用温度、压力、相对湿度(系统实测值)稳定的预设过热蒸汽进行相对湿度监测验证。预设蒸汽露点温度 $128.1\text{ }^\circ\text{C}$,蒸汽参数曲线如图4所示。

蒸汽相对湿度监测过程,冷凝液温度维持在 $3.3\pm 0.10\text{ }^\circ\text{C}$,冷凝液称重速率为 33.04 g/min (图5(a)),曲线线性良好,表明蒸汽经充分凝结后实现了连续匀速收集,也辅助验证了连续制备的蒸汽含水量等参数能一直保持稳定状态。测量腔中不凝气体温度 $70.0\pm 0.10\text{ }^\circ\text{C}$ 、绝对压力 $91.3\pm 0.10\text{ kPa}$ 、相对湿度 $3.0\pm 0.20\%$ (图5(b)),

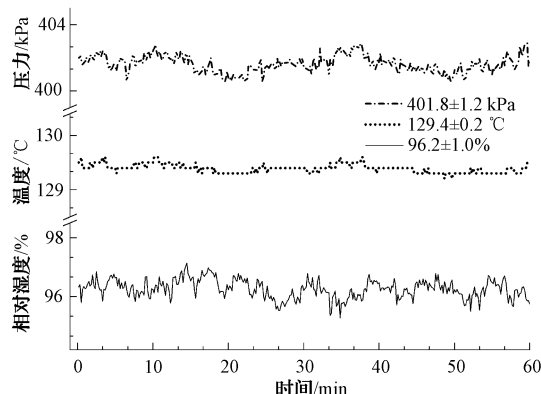
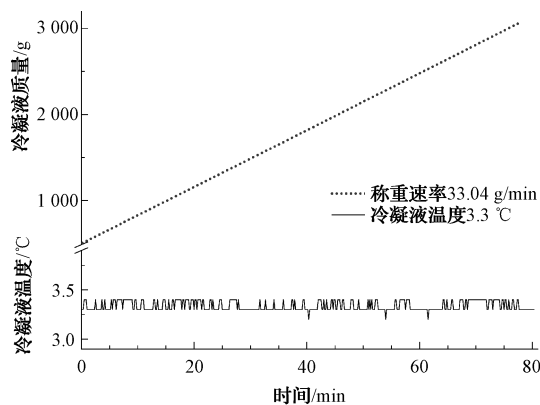
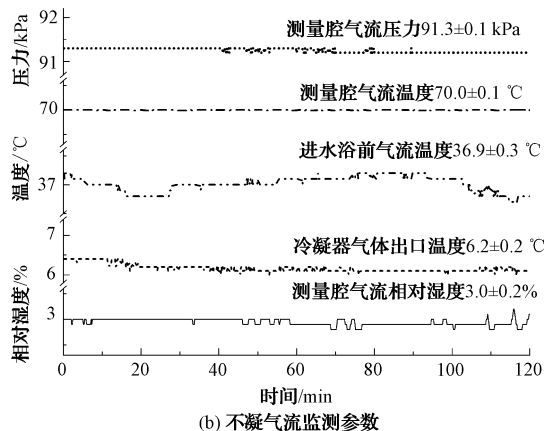


图4 预设蒸汽参数

Fig. 4 Preset steam parameters



(a) 冷凝液称重参数
(a) Condensate weighing parameters



(b) 不凝气流监测参数
(b) Non-condensable airflow monitoring parameters

图5 相对湿度监测

Fig. 5 Relative humidity monitoring

计算的含水量 5.92 g/m^3 。监测的冷凝液与不凝气体含水量合计 33.23 g/min ,对比液体汽化流量 33.19 g/min ,监测偏差 $+0.13\%$ (仪器测量精度与干空气极微量含水量所致)。在 120 min 实验验证过程,各参数监测值能持续维持稳定,波动较小,表明系统运行状态良好。功能验证表明,系统实现了蒸汽相对湿度实时测量。

2.2 测量范围验证

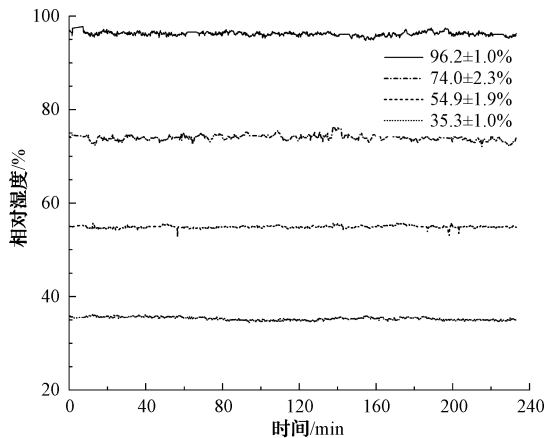
实验以相对湿度 95%、75%、55%、35% 为代表在 130 °C、399 kPa 预设条件下进行湿度监测范围验证,参数如表 1 所示^[19]。4 次实验制备的蒸汽温度、压力在 130±0.7 °C、399±

5 kPa 范围波动,相对湿度分别为 96.5±1.4%、73.9±1.5%、55.0±1.2%、35.4±0.9%,如图 6(a)所示。图 6(b)为蒸汽冷凝液质量监测曲线,不同相对湿度对应称重曲线线性良好,测量系统实现了预设条件下蒸汽充分换热与参数实时测量。

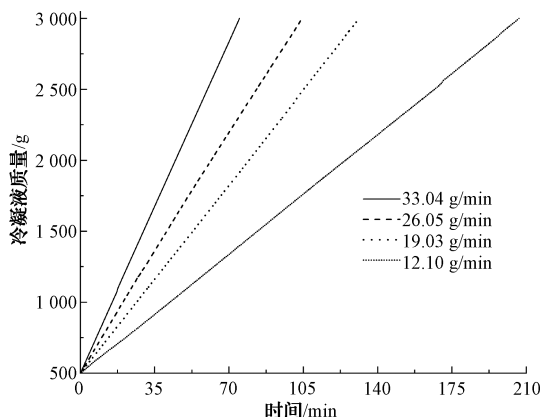
表 1 相对湿度测量精度对比

Table 1 Comparison of relative humidity measurement accuracy

参数	数值			
相对湿度/%	96.5±1.4	73.9±1.5	55.0±1.2	35.4±0.9
温度/°C	129.3±0.2	130.3±0.2	129.8±0.1	129.5±0.3
压力/kPa	401.1±1.5	396.2±1.0	400.0±1.2	401.2±1.7
工艺气体/(sl/min)	26.0	36.8	46.9	57.1
注液流量/(g/min)	33.19	26.20	19.21	12.23
冷凝速率/(g/min)	33.040	26.045	19.026	12.096
气体载液/(g/min)	0.193	0.283	0.337	0.410
水汽总监测量/(g/min)	33.233	26.328	19.363	12.506
冷凝液占比/%	99.42	98.93	98.26	96.72
相对称重速率/(g/min)	0.347 8	0.347 3	0.345 9	0.345 6
称重相对偏差/%	0.34	0.18	0.21	0.30
气体载液占比/%	0.58	1.07	1.74	3.28
测量偏差/%	+0.13	+0.49	+0.80	+2.26



(a) 相对湿度
(a) Relative humidity



(b) 冷凝液称重速率
(b) Condensate weighing rate

图 6 相对湿度监测范围

Fig. 6 Relative humidity monitoring range

测量系统由于采用蒸汽凝结称重的方式进行湿度测量,所以不受蒸汽含水量限制(如饱和蒸汽)。露点仪测量下限为-40 °C,对应 130 °C、399 kPa 蒸汽湿度测量限值为 0.01%,结合露点仪实际测量精度,冷凝称重工艺在 130 °C、399 kPa 参数条件下能使相对湿度 0.15%~100% 的有效测量(对应最大露点 130 °C)。

蒸汽凝结工艺冷凝液温度为 0 °C~5 °C,对应最高露点为 5.0 °C,因此,测量系统能开展蒸汽露点温度 5 °C~130 °C 范围内相对湿度的有效测量。露点仪单独露点测量范围-40 °C~90 °C,因此采用凝结称重和不凝气体含水量测量工艺能实现露点温度-40 °C~130 °C 范围内气体相对湿度 0.15%~100% 范围内的有效测量。

2.3 瞬态条件测量验证

实现瞬态条件下湿度测量是工业应用的关键要素。瞬态条件下湿度监测验证实验在 120 °C、250 kPa 预设条件下进行,如图 7 所示。

测量系统对设备参数进行约 12.2 min 调节后,参数运行稳定的预设蒸汽相对湿度维持在小范围波动,相对湿度测量值为 17.5±0.6%。25 min 后,通过数据处理系统对蒸汽相对湿度进行调节,蒸汽相对湿度经过约 14 min 汽、气流量比调节后相对湿度稳定在 37.2±0.8% 范围,稳定测量时长超 15 min。57 min 后再次进行湿度调节,约 10 min 后实现了相对湿度 46.5±0.9% 范围的稳定测量。

瞬态测量验证过程蒸汽相对湿度调节与湿度监测参数调节同步进行,分别用时约 14.0、10.0 min 实现了相对湿度从 17.5%~37.2%、37.2%~46.5% 的调节与监测。测量系统对比传统电容式湿度传感器(测量用时约 5 min)

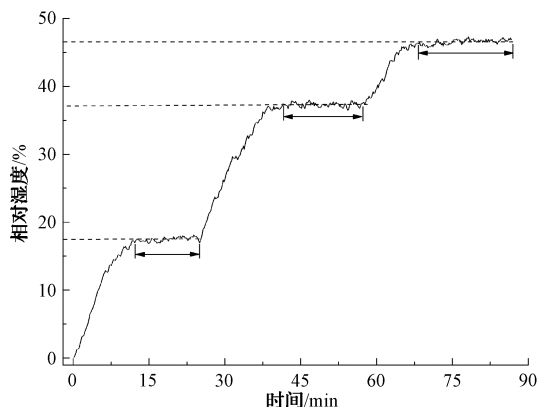


图7 相对湿度瞬态监测

Fig.7 Monitoring for humidity at transient conditions

略有滞后^[7],但同样实现了瞬态条件下相对湿度的有效测量。

3 分析与讨论

3.1 温度、压力影响分析

含湿量确定条件下温度与压力会对过热蒸汽相对湿度产生一定影响。本文以 130 °C、399 kPa、95%RH 条件下(绝对湿度 1 380.45 g/m³,露点温度 128.3 °C),进行温度、压力、相对湿度之间的影响分析^[17],如图 8 所示。在绝对湿度 1 380.45 g/m³、压力 399 kPa 条件下,温度对相对湿度产生直接的影响,温度 128.5 °C 对应相对湿度 99.01%,温度增加到 140 °C,相对湿度下降到 72.76%。在 130 ± 1.5 °C 范围,平均影响值约为 0.259% RH/0.1 °C。结合图 4 蒸汽相对湿度测量值(96.2 ± 1.0%),温度波动对相对湿度波动影响约占 52%。在上述温度范围内,温度波动 ± 0.2 °C 对蒸汽分压 P_w 的影响较为固定,约为 0.127 kPa,对不凝气体分压 P_g 的影响逐渐降低,从 0.223 kPa 下降到 0.194 kPa,对总压($P_{total} = P_w + P_g$)影响从 0.350 kPa 下降到 0.321 kPa。结合图 4 蒸汽压测量

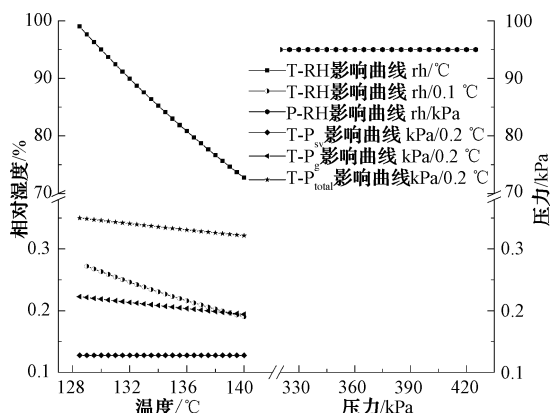


图8 温度、压力对相对湿度的影响

Fig.8 Influence of temperature and pressure on relative humidity

值(401.8 ± 1.2 kPa),温度波动对压力波动影响约占 56%。

蒸汽在温度 130 °C、绝对湿度 1 380.45 g/m³ 条件下,气体总压从 320 kPa 升高到 420 kPa,蒸汽相对湿度变化很小。气体总压超过饱和蒸气压后,增加不凝气体分压对饱和蒸汽压影响较小,所以温度、含湿量确定条件下增加不凝气体分压对蒸汽相对湿度产生的影响较小。

3.2 测量精确性与平行性分析

蒸汽相对湿度受温度等参数影响会有波动,但过热蒸汽含湿量是定值不会改变,因此为规避蒸汽温度等参数波动带来的影响,本文蒸汽相对湿度的监测精度以单位体积预设蒸汽含湿量与监测到的液体总量的偏差表示。

如表 1 所示,预设蒸汽在 130 °C、399 kPa,相对湿度 95%、75%、55%、35%时总的水汽监测质量与汽化的液体质量偏差依次为 + 0.13%、+ 0.49%、+ 0.80%、+ 2.26%。冷凝液称重速率分别为 33.040、26.045、19.026、12.096 g/min,冷凝液质量占比蒸汽中总的液体监测量大于 96%,占绝对比例。相对称重速率(单位相对湿度称重质量)分别为 0.347 8、0.347 3、0.345 9、0.345 6 g/min,相对偏差小于 0.34%,表明蒸汽凝结称重工艺在不同相对湿度条件下一致性良好。

随着预设蒸汽相对湿度降低(95%~35%),不凝气体含湿量占比从 0.58% 增大到 3.28%,不凝气体含湿量对湿度监测带来不可忽略的影响。

实验表明,蒸汽相对湿度 ≥ 55% 时系统湿度监测具有较高的精度(≤ 0.8%),在较低相对湿度条件下(35%)仍能实现比较理想的监测效果(约 2.26%)。

相对湿度监测平行性验证如表 2 所示,在露点温度约 128 °C 条件下,相对湿度重复测量偏差小于 0.4%,重复性良好,湿度监测装置具有良好的稳定性与测量平行性。

表2 相对湿度监测平行性对比

Table 2 Parallelism comparison of relative humidity monitoring

参数	1	2	3
工艺气体/(sl/min)	26.0	26.0	26.0
注液流量/(g/min)	33.19	33.19	33.19
温度/°C	129.5 ± 0.2	129.5 ± 0.2	129.4 ± 0.2
压力/kPa	400.2 ± 1.4	401.6 ± 1.3	401.8 ± 1.2
相对湿度/%	96.37 ± 1.4	96.03 ± 1.3	96.24 ± 1.0
露点温度/°C	128.38	128.16	128.03
水汽总量/(g/min)	33.312	33.092	33.233
监测偏差/%	+0.37	-0.30	+0.13

3.3 测量不确定度分析

相对湿度测量不确定度由 A 类不确定度和 B 类不确定度两部分组成^[20]。在保守条件下,通过安全系数对 A

类不确定度进行修正^[21]。安全系数 $h > 1$, 依据学生 t -分布得出。B类不确定度依据计量设备实际检定值来确定(天平相对不确定度量程范围取最大值), 各分量之间认为互不影响, 做简单处理。

测量系统在 130 °C、399 kPa、95% RH 代表性参数条件下不确定度分析如表 3 所示^[16]。平行测量过程, A类不确定度修正后为 0.36%。计量设备中, 露点仪的精度成为影响 B类不确定度的主要因素。测量系统合成不确定度为 0.59%, 相对湿度测量结果可靠性良好。

表 3 湿度测量不确定度分析

Table 3 Uncertainty analysis of humidity monitoring

不确定度类别	不确定度来源	数值
A类不确定度 $U_a / \%$ ($k=2$)	平行测量偏差 %	0.37 0.30 0.13
	不确定度 u_a	0.16
	修正不确定度 U_a	0.36
B类不确定度 $U_b / \%$ ($k=2$)	电子天平	0.01
	温度传感器	0.02
	压力传感器	0.08
	露点仪	0.46
合成不确定度 $U_c / \%$		0.59

注: $u_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n(n-1))}$, $U_a = h \cdot u_a$, n

为 3, 安全系数 $h=2.3$, $U_c = \sqrt{U_a^2 + \sum_{i=1}^n U_b^2}$

3.4 SI 溯源与对比分析

要实现蒸汽相对湿度测量应用与计量校准, 相对湿度需溯源到 SI 基本单位。结合其他测量方法, 相对湿度到 SI 基本单位溯源树^[7,16]如图 9 所示。

凝结法(Ⅲ线)依据露点温度的 SI 可追溯性以及压力、质量、时间、温度、流量测量的校准实现了相对湿度的溯源。微波谐振法(Ⅰ线)通过蒸汽介电常数、共振频率与蒸汽摩尔分数对应关系, 依据温度、压力等参数的校准实现了相对湿度的溯源, 虚线(Ⅱ线)代表的部分通过数据融合来最小化不确定性。蒸汽膨胀法(Ⅳ线)通过温度、压力的校准以及露点温度的可追溯性实现相对湿度到 SI 基本单位的溯源。水、气通过一定比配制蒸汽相对湿度(V线), 通过载气和水的质量流量校准实现了蒸汽相对湿度的溯源。

图 9 中, x 为水蒸气摩尔分数, ϵ 为相对介电常数, f_1 / f_2 为共振频率, ρ 为密度, T_{-dp} 为露点温度, q 为含湿量, ρ 为极化率, Q 为流量, M 为摩尔质量。

测量系统监测蒸汽含湿量采用的重量法, 是计量中可以达到最高准确度的绝对测量方法, 因此相对湿度到 SI 基本单位溯源具有溯源精度高、可靠性强的特点。

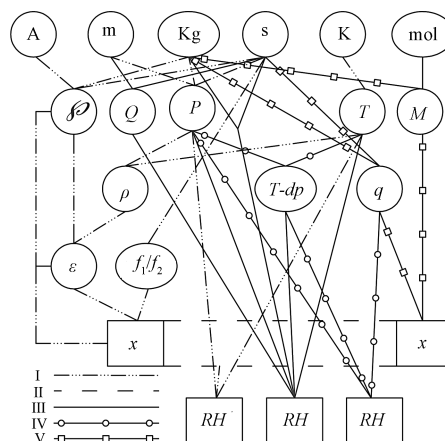


图 9 相对湿度 SI 基本单位溯源树

Fig. 9 The traceability tree of the relative humidity to the basic SI units

4 结论

本文研制的湿度测量系统采用实时监测蒸汽绝对湿度的测量方式, 实现了露点温度 100 °C 以上蒸汽相对湿度的有效测量。实验验证与分析表明, 测量系统具有良好的稳定性与测量平行性, 能实现含不凝气体组份蒸汽介质宽范围相对湿度测量, 测量值能溯源到 SI 基本单位。对比其他湿度测量装置与方法, 研制系统性能表现良好, 在露点温度 128 °C 条件下测量不确定度 0.59%, 测量偏差小于 0.4%。

凝结法湿度测量系统可应用于科研领域蒸汽环境精确模拟与工业生产工艺参数控制, 在节能方面具有现实的应用价值。

参考文献

- [1] BOSMA R, POUW R J, VAN SCHAİK W, et al. Climatic chamber for dew-point temperatures up to 150 °C[J]. Metrologia, 2018, 55(4): 597-608.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 湿度传感器校准规范: JJF 1076-2020[S]. 北京: 中国计量出版社, 2020. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1076-2020 humidity sensor calibration specification [S] Beijing: China Metrology Press, 2020.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 精密露点仪: JJG 499-2021[S]. 北京: 中国质检出版社, 2021. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJG 499-2021 Precision dew point meter[S].

- Beijing: China Quality Inspection Press, 2021.
- [4] BOSMA R, NIELSEN J, PERUZZI A. Development of the high-temperature dew-point generator over the past 15 years[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38(10): 161.
- [5] HEINONEN M, ARPINO F, BOSMA R, et al. Towards improved humidity measurements at high temperatures and transient conditions [C]. 18th International Congress of Metrology, Paris, France, EDP Sciences, 2017: 06002.
- [6] PERUZZI A, BOSMA R, TABANDEH S, et al. A comparison of relative humidity calibration facilities at temperatures up to 170°C [J]. *Measurement*, 2022, 189: 110435.
- [7] TABANDEH S. *Advances in humidity standards*[D]. Torino: Politecnico di Torino, 2019.
- [8] GEORGIN E, BERNARD N, SALEM M. New calibration facility developed at LNE-CETIAT[C]. 19th International Congress of Metrology. Paris:EDP Sciences, 2019: 18004.
- [9] SAJID M, KHATTAK Z J, RAHMAN K, et al. Progress and future of relative humidity sensors: A review from materials perspective [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2022, 45: 238.
- [10] WELLER, FABIAN, KELLER, et al. Sensing characteristics of smart microsensor systems for measuring relative humidity in pressurized air [J]. *Proceedings*, 2018, 2(13): 871.
- [11] 王俊琴, 张爱华, 祁靖, 等. 柔性叉指电容式焊条湿度无损检测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(1): 157-166.
- WANG J Q, ZHANG AI H, QI J, et al. Non-destructive testing method for humidity of flexible interdigital capacitive electrode [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(1): 157-166.
- [12] 魏明明, 刘小刚, 李蕾. 精密露点仪标准装置校准结果的验证研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(10): 84-90.
- WEI M M, LIU X G, LI L. Verification study on calibration results of precision dew point meter standard device[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(10): 84-90.
- [13] 王思睿, 薛严冰, 宋智, 等. 纸基底印刷无芯片 RFID 湿度传感器 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 150-158.
- WANG S R, XUE Y B, SONG ZH, et al. Inkjet-printed chipless RFID humidity sensor based on paper substrate [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 150-158.
- [14] 印佳楠, 蒋涛, 刘宇, 等. 两种气象用湿度传感器比对结果的详细统计分析[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(6): 49-53.
- YIN J N, JIANG T, LIU Y, et al. Comprehensive statistical analysis of comparison results of two types of humidity sensors in meteorology [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(6): 49-53.
- [15] 高琳锋, 姚岩岩, 梁俊钦, 等. 高温压力蒸汽气-汽混合法相对湿度测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 325-333.
- GAO L F, YAO Y Y, LIANG J Q, et al. Relative humidity measuring of high temperature and pressure steam by air-steam mixing method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 325-333.
- [16] 高琳锋, 徐志军, 皇甫永春, 等. 高温高压蒸汽相对湿度测量 [J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(9): 99-105.
- GAO L F, XU ZH J, HUANGFU Y CH, et al. Measurement of relative humidity for high-temperature and high-pressure steam [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(9): 99-105.
- [17] KRETZSCHMAR H J, WAGNER W. *International steam tables: Properties of water and steam based on the industrial formulation IAPWS-IF97*[M]. Berlin: Springer, 2019.
- [18] KUMAR E P, SOLANKI A K, KUMAR M M. Numerical investigation of heat transfer and pressure drop characteristics in the micro-fin helically coiled tubes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 182(1): 116093.
- [19] 高琳锋, 梁俊钦, 姚岩岩, 等. 熔堆事故下有机碘形成、滤除排放与蒸汽环境模拟 [J]. *辐射防护*, 2023, 43(6): 576-585.
- GAO L F, LIANG J Q, YAO Y Y, et al. Organic iodine formation, filtration emission, and steam environment simulation under core melt accident [J]. *Radiation Protection*, 2023, 43(6): 576-585.

- [20] 张昌尧, 吴清锋, 张秋怡, 等. 工业机器人位置稳定时间不确定度的研究分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(8): 148-153.
ZHANG CH Y, WU Q F, ZHANG Q Y, et al. Research and analysis on uncertainty of position stabilization time of industrial robot [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(8): 148-153.
- [21] International Standard Organization. Geometrical product specifications (GPS)-inspection by measurement of workpieces and measuring equipment-part 2: Guidance

for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification; ISO 14253-2:2011/cor1:2013[S]. Geneva: International Standard Organization, 2013: 15.

作者简介

高琳锋, 硕士, 研究员, 主要研究方向为核电厂事故工况蒸汽环境模拟与核空气净化等。
E-mail: gaolinfeng2008@126.com