

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.03.07

高露点湿度标准装置的研制

胡艳青¹, 柴源¹, 陈洁新¹, 刘嘉², 白雪松³, 聂晶³

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 郑州轻工业大学 软件学院, 河南 郑州 450002;

3. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院, 北京 100191)

摘要: 目前我国湿度计量基准中露点温度溯源的最高上限为 80 ℃, 为满足更高露点温度下的湿度参数溯源需求, 研制了一套基于双温双压法原理的高露点湿度标准装置。该装置由恒温系统、预饱和系统、饱和系统、测量室和温度、压力测量与控制系统等部分组成, 能够产生的露点温度范围为 80 ~ 150 ℃, 对应测量室的温度范围为 80 ~ 200 ℃, 绝对压力范围为 0 ~ 1 MPa, 扩展不确定度为 0.34 ~ 0.80 ℃ ($k=2$)。该装置准确性好、操作方便, 弥补了国内在露点温度高于 100 ℃ 时, 温度计校准的不足。

关键词: 高露点湿度; 高温相对湿度; 饱和系统

中图分类号: TB943

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)03-0034-05

Development of High Dew Point Humidity Standard Generator

HU Yanqing¹, CHAI Yuan¹, CHEN Jiexin¹, LIU Jia², BAI Xuesong³, NIE Jing³

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Software Engineering College, Zhengzhou University of light Industry, Zhengzhou 450002, China;

3. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100095, China)

Abstract: At present, the maximum upper limit of dew point temperature traceability in China's humidity measurement is 80 ℃. In order to meet the demand of humidity parameter traceability at higher dew point temperature, a high dew point humidity standard device set based on the principle of double temperature and double pressure method is developed. The device consists of the constant temperature system, pre-saturation system, saturation system, measuring chamber and temperature, pressure measurement and control system. It can produce the dew point temperature of 80 ~ 150 ℃, the corresponding measuring temperature range is 80 ~ 200 ℃, the absolute pressure range is 0 ~ 1 MPa, and the expanded uncertainty is 0.34 ~ 0.80 ℃ ($k=2$). The device has good accuracy, convenience to operate and important technical application value.

Key words: high dew-point generator; high temperature; high pressure; humidity standard

0 引言

高温环境下的湿度测量在工业领域中具有重要作用, 许多设备及装备需要在高温高湿环境下进行测试^[1], 例如: 燃料电池中的增湿系统需要在温度为 200 ℃ 且相对湿度为 90% 的环境中进行测试; 核动力装置控制系统中的温湿度计需要在高于 100 ℃ 的条件下监测湿度值, 其测量数据的准确与否将直接决定控制效果的好坏; 在工业干燥行业中也需开展高温条件下的湿度测量, 等等。

目前, 常用的高温湿度计有瑞士 Rotronic、芬兰 Vaisala 等公司的相关产品。其中, Rotronic 公司研制的 HC2 型高温湿度计, 相对湿度范围为 5% ~ 95% (温度

范围 -100 ~ 200 ℃), 对应的露点温度上限可达 150 ℃, 允许误差为 ± 3 ℃。Vaisala 公司研制的 HMT334 系列高温湿度计, 可在温度范围 50 ~ 180 ℃ 下, 0 ~ 100% RH 全量程测量。

在实际应用中, 高温湿度计往往需要测量高于 100 ℃ 的露点温度, 但是目前我国湿度计量基准中露点温度溯源的最高上限为 80 ℃, 超过 80 ℃ 则无法开展溯源, 因此需要研究温度上限更高的高露点湿度标准装置, 扩展高露点湿度参数量传范围。

国外早在 2010 年已开展了高露点湿度标准装置的研究, 并建立了相应标准^[2]。例如: 美国 NIST 基于干湿气混流原理研制了露点温度为 85 ~ 200 ℃, 压力为 0.2 ~ 1.6 MPa 的高露点湿度标准装置。随着科技水平

的提高,国内对于高露点湿度校准技术的发展也越来越重视,各计量机构开展了不同温度范围的高温湿度发生装置研究,例如:国家计量院研制了基于双温双压法原理的高温湿度发生装置,该装置可产生露点温度为 90℃ 的高温高湿气体,用于开展检定和校准工作。但是目前国内尚无法实现露点温度高于 100 ℃ 的湿度计校准。

基于这种情况,本文研制了一套高露点湿度标准装置,该装置可发生的露点温度范围为 80 ~ 150 ℃,对应测量室内的温度范围为 80 ~ 200 ℃,压力范围为 0 ~ 1 MPa,能够有效满足高露点湿度量值溯源需求。

1 原理及构成

1.1 发生原理

高露点湿度标准装置采用双温双压法^[3],原理图如图 1 所示。其工作过程为:气源系统流出气体进入饱和系统,在饱和系统内产生一定温度和压力下的饱和湿气,经减压阀和排气阀减压后,饱和湿气进入测量室,通过改变测量室的压力产生不同露点的气体。

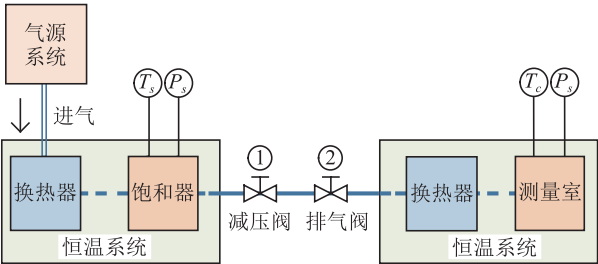


图 1 高露点湿度标准装置发生原理图

测量室内的气体露点计算公式为

$$e(T_d) = e(T_s) \times \frac{P_c}{P_s} \tag{1}$$

式中: T_d 为测量室内气体的露点温度,℃; T_s 为饱和系统内气体的露点温度,℃; $e(T_d)$, $e(T_s)$ 分别为温度 T_d , T_s 对应的饱和水蒸气压, Pa; P_c 为测量室内的压力, Pa; P_s 为饱和系统内的压力, Pa。

在 100 ℃ 范围内,水的饱和蒸汽压采用 Wexler 方程计算^[4],对于 100 ℃ 以上的温度范围,目前国际上尚未有饱和水蒸气压的经验公式,本文仍采用 Wexler 方程计算

$$e(T_d) = e \sum_{i=0}^6 g_i T_d^i + g_7 \ln T_d \tag{2}$$

公式(2)中的各系数值如表 1 所示。

表 1 g 系数列表值

系数	数值
g_0	-2836.5744
g_1	-6028.076559
g_2	19.54263612
g_3	-0.0273783
g_4	1.62616×10^{-5}
g_5	7.02290×10^{-10}
g_6	-1.868×10^{-13}
g_7	2.7150305

1.2 装置结构组成

高露点湿度标准装置由恒温系统、预饱和系统、饱和系统、测量室和温度、压力测量与控制系统等部分组成,如图 2 所示。恒温系统的作用是为饱和系统和测量系统提供恒定的温场。温度是湿度发生装置中最重要的参数之一,在压力不变的情况下,饱和系统的温度和露点温度直接相关,因此温度的测量与控制在整套装置中尤为重要。

高露点湿度标准装置的恒温系统采用一体双槽式结构^[5],饱和系统和测量室所处的恒温环境采用油浴的方式实现,以确保温场的均匀性和稳定性;预饱和和系统温场的均匀性与稳定性对露点温度的测量结果影响不大,因此预饱和系统采用加热带缠绕方式加热。为实现 80 ~ 150 ℃ 的露点环境,恒温系统的具体技术指标为:温度范围为 50 ~ 200 ℃,温度均匀性为 0.01 ℃,温度稳定性为 0.01 ℃/30 min。

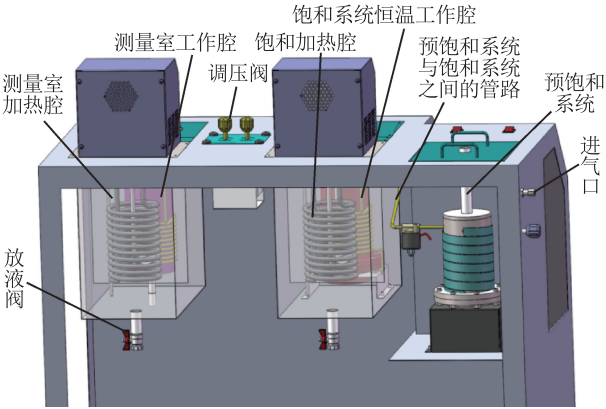


图 2 高露点湿度标准装置总体结构图

气体的传热传质过程在饱和系统内完成,饱和系统属于两相流接触的场合,由式(1)可知,饱和系统出气的露点温度与装置所能实现的露点温度成正比,为了提高系统的饱和效率,装置采用预饱和系统与饱和系统双级饱和的方式^[6]。

在设计饱和系统时,需要考虑温度 T_s 和压力 P_s 两个关键参数,由于饱和系统耐温范围为 $50 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,耐压范围为 $0 \sim 1\text{ MPa}$ 。因此采用“鼓泡式”结构设计。预饱和系统与饱和系统的结构完全相同,均为 316L 不锈钢材质,壁厚为 3 mm ,总体尺寸为 $\Phi 100\text{ mm} \times 215\text{ mm}$,内腔尺寸为 $\Phi 94\text{ mm} \times 205\text{ mm}$ 。

饱和腔体采用上层和下层分离结构设计,上端和下端分别设有注水口和排水口,注水口安装有锁紧螺母,排水口连接排水管路。气体在进入饱和系统之前先进入换热器,进行充分换热之后再进入饱和系统与水面接触,达到饱和的目的。饱和系统三维结构如图 3 所示。

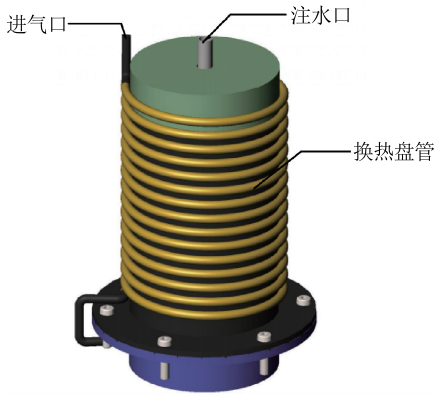


图 3 饱和系统三维结构图

饱和系统采用多孔出气法增加气体与水的接触面积,提高饱和效率。由于气体与水面充分接触后易夹带水滴,在饱和系统出气处设计有丝网分离器。丝网分离器的分离效率 η 和压力损失 ΔP 是影响饱和系统饱和性能的主要因素。丝网分离器的孔径大小是设计的关键,为了尽可能地提高气液分离效率,减小压力损失,针对不同孔径,对丝网分离器的分离效率和压力损失进行计算,结果如表 2 所示。综合考虑分离效率和压力损失,最终丝网分离器选用孔径为 400 目的金属丝网。

饱和系统与测量室之间的气体传输管路为自动加热管路,其温度总是高于饱和系统 $5 \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。联合调

节气体传输管路中的减压阀和排气阀,改变测量室内

表 2 不同孔径的丝网分离器分离效率和压力损失计算结果

丝网分离器孔径/目	$\eta/\%$	$\Delta P/\text{Pa}$
200	55.70	70
400	99.70	76
600	80.50	95

测量室由带有法兰密封的不锈钢腔体和对外供气加热管路组成。供气加热管路可根据需要设定加热温度,便于进行装置的溯源或连接其他抽气式被校设备。测量室的变温范围为 $80 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大耐压 1 MPa 。法兰密封盖上开有不同规格的密封螺纹孔,可同时校准多支高露点传感器。

2 试验及不确定度分析

为了验证装置所能发生的露点温度范围,选用芬兰 VAISALA 公司生产的 HMT334 高露点湿度计进行测试^[7]。测试时,高露点湿度计的探头与测量室之间采用螺纹密封连接,测量室内的温度设定为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,饱和系统的温度 T_s 设定为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,饱和压力 P_s 设定为 1.0 MPa ,联合调节减压阀和排气阀,使测量室内的压力 P_c 在 $0 \sim 1.0\text{ MPa}$ 范围内变化,将实际测得的 T_s , P_s 和 P_c 值代入式(1),并依据饱和水蒸气压方程,计算得出不同压力下对应的露点温度值^[8]。将高露点湿度标准装置所发生的露点温度值与湿度计实际测得的值进行对比,结果如图 4 所示。

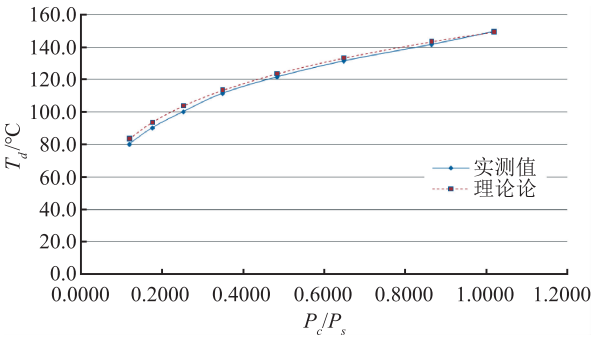


图 4 高露点湿度标准装置与湿度计测量结果对比图

根据图 4 可知,高露点湿度标准装置可实现 $80 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的露点温度,对应测量室内的压力范围为 $0 \sim$

1 MPa。露点温度的计算公式为

$$T_d = \frac{\sum_{i=0}^3 c_i \left(\ln e_w(T_s) \times \frac{P_c}{P_s} \right)^i}{\sum_{i=0}^3 d_i \left(\ln e_w(T_s) \times \frac{P_c}{P_s} \right)^i} \quad (3)$$

式中: T_d 为露点温度, $^{\circ}\text{C}$; $e_w(T_d)$ 为露点温度下的饱和水蒸气压, Pa; c_i , d_i 为露点温度计算系数, 数值分别为 $c_0 = 207.98233$, $c_1 = -20.156028$, $c_2 = 0.46778925$, $c_3 = -9.2288067 \times 10^{-6}$, $d_0 = 1$, $d_1 = -0.13319669$, $d_2 = 5.6577518 \times 10^{-3}$, $d_3 = -7.5172865 \times 10^{-5}$ 。

饱和室温度 T_s 对应的饱和水蒸气压计算公式为

$$e_w(T_s) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 g_i T_s^{i-2} + g_7 \ln T_s\right) \quad (4)$$

根据式(3)和式(4), 保证 T_s , P_s 和 P_c 中两个参数不变, 微小地改变第三个参数值, 计算灵敏系数。各灵敏系数值^[9]如表3所示。

表3 灵敏系数值

高露点湿度标准装置				灵敏系数		
露点/ $^{\circ}\text{C}$	T_s / $^{\circ}\text{C}$	P_s / kPa	P_c / kPa	C_1	C_2	C_3
80	80	100.073	100.03	1	0.241	0.241
100	100	1010.32	232.03	1	0.350	0.350
130	130	1010.32	531.02	1	0.550	0.550
150	150	1010.32	987.05	1	0.605	0.605

露点温度不确定度^[10]的主要分量包括饱和系统内温度测量与控制引入的标准不确定度 u_1 、饱和系统压力测量与控制引入的不确定度 u_2 、测量室压力引入的不确定度 u_3 、饱和系统饱和度引入的不确定度 u_4 、饱和水蒸气压引入的不确定度 u_5 、增强因子 f_s 引入的不确定度 u_6 、增强因子 f_c 引入的不确定度 u_7 、水蒸气浓度变化引入的不确定度 u_8 。各不确定度分量大小如表4所示。

露点温度的合成标准不确定度的计算公式为

$$u_c(T_d) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2} \quad (5)$$

扩展不确定度计算公式为

$$U = u_c(T_d) \times k \quad (6)$$

计算得出不同露点温度下的扩展不确定度如表7所示。

表4 标准不确定度分量

不确定度分量	标准不确定度	灵敏系数	露点温度标准不确定度/ $^{\circ}\text{C}$
u_1	0.014 $^{\circ}\text{C}$	1	0.014
u_2	0.104 kPa	0.241 ~ 0.605	0.025 ~ 0.063
u_3	0.104 kPa	0.241 ~ 0.605	0.025 ~ 0.032
u_4	0.06 $^{\circ}\text{C}$	1	0.06
u_5	0.25 $^{\circ}\text{C}$	1	0.25
u_6	0.19 $^{\circ}\text{C}$	1	0.19
u_7	0.19 $^{\circ}\text{C}$	1	0.19
u_8	0.02 $^{\circ}\text{C}$	1	0.02

表5 不同露点温度下的扩展不确定度 $^{\circ}\text{C}$

露点温度	标准不确定度 u_c	扩展不确定度 $U(k=2)$
80	0.17	0.34
100	0.23	0.46
130	0.36	0.72
150	0.40	0.80

3 结论

利用双温双压法原理, 通过优化设计高饱和度的饱和系统, 研制了高露点湿度标准装置, 实现露点温度 80 ~ 150 $^{\circ}\text{C}$, 测量室压力 0 ~ 1 MPa, 露点温度的扩展不确定度 $U = 0.34 \sim 0.80^{\circ}\text{C}$ ($k=2$)。该装置结构紧凑, 操作方便, 拓展了湿度的量传范围。

未来还需进行装置重复性和稳定性试验, 对装置的饱和系统进行系统地饱和效率评价, 提高装置的不确定度, 完善我国湿度量传体系, 满足高露点湿度参数的量值溯源需求。

参 考 文 献

- [1] 廖理. 热学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [2] Bosma R, Peruzzi A. Development of a dew-point generator for gases other than air and nitrogen and pressures up to 6MPa[J]. International Journal of Thermophysics, 2012, 33(8): 1511 - 1519.
- [3] 张文东, 殷龙德, 丁逸民, 等. 双温双压法低露点标准湿度发生器[J]. 上海计量测试, 2002, 29(1): 24 - 26.
- [4] 余云飞, 孟晓风, 张卫军. 双温双压法湿度测量不确定度的综合评定[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(4): 16 - 21.
- [5] L. Lages Martins, A. Silva Ribeiro, J. Alves e Sousa, et al.

- Measurement uncertainty of dew-point temperature in a two-pressure humidity generator [J]. International Journal of Thermophysics, 2012, 33(8): 1568 – 1582.
- [6] Meyer C W, Miller W W, Ripple D C, et al. Performance and validation tests on the nist hybrid humidity generator[J]. International Journal of Thermophysics, 2008, 29 (5): 1606 – 1614.
- [7] 吕国义, 巩娟, 何萌, 等. 便携式高温露点湿度发生器的研制[J]. 计测技术, 2018, 38 (1): 28 – 31.
- [8] Zvizdic D, Heinonen M, Sestan D. Investigation of primary dew-point saturator efficiency in two different thermal environments[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36 (8): 2215 – 2230.
- [9] Choi B I, Nham H S, Woo S B, et al. The new kriss low frost-point humidity generator[J]. International Journal of Thermophysics, 2008, 29(5): 1578 – 1588.
- [10] Tistomo A S, Achmadi A, Rifai I A. Characterization of KIM LIPI' s relative humidity standard [J]. Mapan, 2014, 29 (1): 51 – 55.
-
- 收稿日期: 2021 – 01 – 26; 修回日期: 2021 – 03 – 16
- 基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2016205A002)
- 引用格式: 胡艳青, 柴源, 陈洁新, 等. 高露点湿度标准装置的研制[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 34 – 38.