

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.03.02

气体中痕量水蒸气测量技术进展

宋巍巍, 盖文*, 顾正华

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 气体中水蒸气含量测量在工业生产和科研领域发挥至关重要的作用。随着许多工业生产和科研领域对气体水分含量更加严格的测试要求, 对于气体中水蒸气含量测量灵敏度的要求也越来越高。目前测量 nmol/mol 痕量水分的仪器方法有可调谐二极管激光吸收光谱法、光腔衰荡光谱法、大气压离子质谱仪法; 达到这个痕量水平的传感器类测量技术有石英晶体微天平法、冷镜露点法、阻容法、电解法。针对这些测量方法的优缺点以及今后的发展趋势进行了论述分析, 通过克服测量过程中的干扰因素, 可在一定的程度上提高痕量水含量的测量准确性, 对促进痕量水含量准确测量技术的发展有所裨益。

关键词: 气体痕量水分; 湿度测量技术; 水蒸气露点温度

中图分类号: TB94

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)03-0010-06

Technical progress in measurement of trace water vapor in gas

SONG Weiwei, GAI Wen*, GU Zhenghua

(Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The measurement of water vapor in gas is very important for many industrial production and scientific research fields. With the more stringent test requirements of gas moisture content, the analysis and measurement methods are also required to be more sensitive. At present, the instrument methods for measuring nmol/mol trace water include tunable diode laser absorption spectroscopy, optical cavity ring down spectroscopy and atmospheric pressure ion mass spectrometry. In addition, the measurement techniques of sensors reaching this trace level include quartz crystal microbalance method, cold mirror dew point method, resistance capacitance method and electrolytic method. These approaches are reviewed. The advantages and disadvantages of these methods as well as the future development trends are discussed. It is pointed out that the measurement accuracy of trace moisture content can be improved to a certain extent by overcoming the interference factors in the measurement process. It is beneficial to promote the development of accurate measurement technology of trace water content.

Key words: trace moisture in gas; humidity measurement technology; dew point temperature of water vapor

0 引言

气体中的水蒸气含量是一个重要的物性参数。许多工业生产和科研领域对湿度参数均有严格的技术要求。随着半导体器件高新技术的发展, 制造加工过程对使用气体的水分含量有越来越高的要求, 可到痕量 $\mu\text{mol/mol}$ (相当于大气压露点 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和超痕量 nmol/mol (相当于大气压露

点 $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$), 甚至 pmol/mol (相当于大气压露点 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$) 水平, 相应对于气体水分含量的测量技术要求也越来越高^[1-4]。在微电子生产制造中, 需要使用许多不同的气态化学组分。许多微电子制造过程对工艺气体中的污染物非常敏感, 痕量的杂质如氧气、水分、二氧化碳、碳氢化合物、微粒、过渡金属、重金属都可能会降低器件的性能和产量, 因此, 微电子制造厂家要求气体供应

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-04-13

引用格式: 宋巍巍, 盖文, 顾正华. 气体中痕量水蒸气测量技术进展 [J]. 计测技术, 2022, 42 (3): 10-15.

Citation: SONG W W, GAI W, GU Z H. Technical progress in measurement of trace water vapor in gas [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (3): 10-15.



商保证水分含量达到一定量级。当前分析仪器水分含量检出限达到1 nmol/mol (ppb) 或1 pmol/mol (ppt) 量级, 生产的特种气体总杂质含量小于500 ppb, 水分含量小于1 ppb^[2-5]。为适应不同测量环境和条件, 要求痕量水分分析仪具有灵敏度高、准确性好、响应快速及抗腐蚀性等特点。

气体中痕量水蒸气测量具有一些特殊性, 首先水是极性分子, 有很强的活性, 容易发生吸附和化学反应, 影响气体中水分含量的准确测量; 其次, 特种气体可能会和管壁缺陷或水分子反应, 影响水分含量的测量; 再次, 测量时采样管路的材质以及采样过程气体温度、压力的变化会引起水的吸附或相变, 均会影响水分含量的测量。此外, 分析仪器的测量原理和实验操作中还有可能存在影响水分含量准确测量的实验方法因素。因此有必要深入了解所用水分分析仪器的测量原理和实验注意事项。

本文对气体中痕量水蒸气的不同测量原理分别进行介绍, 分析不同测量方法的优缺点及测试注意事项, 并对今后的发展趋势进行了探讨, 以期为实现气体中痕量水蒸气准确测量起到积极作用。

1 测量技术

气体痕量水分测量技术主要有两大类: 一类

是以水分子的光谱、质谱特性为测量原理的分析技术, 可称为仪器谱学法; 另一类是以水的物理、化学或热力学性质作为传感特性的测量技术, 称为传感器法。

气体中水蒸气的测量通常需要较长时间, 这不仅与分析测量原理有关, 很大程度还与样品气体采样条件有关。为了减少采样管路中水蒸气的吸附和吹扫时间, 建议在测量痕量水蒸气含量的实验设备中, 所有管路均采用内壁电抛光不锈钢管, 并且管路尽可能短一些。采样阀和管路接头采用VCR金属面密封连接, 采样阀、接头及管路应采取保温措施防止气体中组分相变, 减少水蒸气在采样过程中受到的不良影响。总之, 尽可能保持气体中的水蒸气含量这一被测量在分析测量过程中始终不变。

1.1 光谱法

光谱法是目前使用广泛、发展迅速的气体水分测量方法。水分子对光的吸收强度和水分子的浓度符合比尔-兰伯特定律, 光谱法利用比尔-兰伯特定律实现气体中水蒸气含量测量。该方法具有分辨力高、响应快速的特点, 可以获得气体水分绝对含量。通过增强光程技术, 可实现痕量水含量测量。该方法已在各行业领域内得到普遍应用^[6-10]。表1给出了最常用的两种吸收光谱水分分析仪参数和性能特点^[1-3]。

表1 吸收光谱水分分析仪参数和性能特点

Tab.1 Parameters and performance characteristics of absorption spectrum moisture analyzer

技术	光谱分辨力/cm ⁻¹	功率/W	响应时间	样品池长度/cm	单元体积/cm ³	样品压力/torr	流量/slpm	检测极限(典型值)	优化后极限值	兼容腐蚀性/活性气体
TDLAS	<0.001	1~3	分	50~100	103	50	0.5~1	10 ppbv	1~2 ppbv	是
CRDS	0.1(脉冲)	>5	分	10~100	102	100~760	0.5~1	500 pptv (R>99.5%)	50 pptv (R>99.999%)	取决于镜面是否兼容

1.1.1 可调谐二极管激光吸收光谱法

可调谐二极管激光吸收光谱法 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 是一种很有发展前景的痕量水分测量技术, 具有十亿分之一的测量灵敏度, 用于半导体工业等高纯气体杂质检测^[6-9]。激光提供的信号线宽极窄, 大约为10⁻⁴ cm⁻¹, 即使水分子吸收波长附近存在干扰也能获得样品吸收信号的良好分辨力。根据气体种类不同, 可选择不同波长的激光器来避开干扰。

TDLAS 一般采用直接吸收光谱技术或调制吸收光谱技术。前者只针对一些常规浓度的检测。在波长调制光谱 (WMS) 技术中, 改变激光器的注入电流, 使激光器的输出波长在气体组分的吸收峰附近调谐扫描, 光束通过气体吸收池后被测组分产生吸收信号, 可利用锁相放大器进行谐波检测, 解调出二次谐波信号。调制光谱法产生的二次谐波信号与气体组分浓度成正比, 即可计算得到气体组分的信息^[7-9]。该技术提高了系统的

稳定性,且使得测试准确度和灵敏度均有所提高。TDLAS采用分束器将激光分成两束,分别用于测量气体水分子吸收和气体基体组分背景吸收,真正的气体水分子吸收通过整个样品吸收信号扣除背景基体组分信号获得,这样得到的气体水分子浓度更准确^[7-9]。

在吸收光谱法中,不同测量条件下,样品吸收峰的形状有所不同,气体样品吸收峰在10 Torr (1 Torr=133.3223684 Pa) 压力下呈高斯线型,在760 Torr压力下呈 Lorentz 线型,在50~200 Torr压力下呈 Voigt 线型。气体样品高斯线型吸收峰的宽度随着温度的升高而增加,因此通过线宽可以得出气体的温度^[11]。在用该种方式进行水份检测时,需要选择适合的实验条件,在允许的测量条件下,检测样品气体才能得到比较准确的水分含量。

1.1.2 光腔衰荡光谱法

光腔衰荡光谱 (Cavity Ring Down Spectroscopy, CRDS) 是一种直接吸收光谱技术。在 CRDS 中,光强通过样品池后呈指数型衰减,光强的衰荡时间与多项因素有关:待测介质吸收截面尺寸、浓度(密度)大小、腔内容积大小、吸收波长长度,以及内部镜面反射能力等。因此,测试衰荡时间即可反应待测介质的分子浓度(密度)^[4, 10]。相关研制厂商的测试结果证明:当水份含量为0~7×10⁻⁷时,测试响应时间仅需几分钟。CRDS检测方法有望在未来成为痕量水检测的标准方法^[5]。

CRDS分析仪的主要部件有激光器、光腔衰荡池和检测衰荡信号的光探测器。其中,光腔衰荡池配有超高反射率镜片。

在光腔衰荡光谱法中,引入的光强信号经过高反射率镜面往复不停反射,部分光离开光腔形成了光衰荡信号,指数衰减参数 e 代表光强度变化。

在光腔内,激光频率对气体不存在吸收情况下测试的衰荡时间称为 τ_{empty} , τ_{empty} 由镜子固有的反射率决定。

当激光频率刚好和腔内水分子振动波长形成吸收峰时,光腔衰荡时间为 $\tau(\nu)$, $\tau(\nu)$ 不仅与镜子固有的反射率、镜面之间的距离及光速有关,还取决于水分子的吸收强度,该吸收强度遵守比尔定律。如果吸收是由单一组分引起的,吸收系数 $\alpha(\nu)=\sigma(\nu)N$,即可导出光腔衰荡时间 $\tau(\nu)$ 与

水分子的浓度相关。

$$\tau_{\text{empty}} = \frac{d}{c(1-R)} \quad (1)$$

$$\tau(\nu) = \frac{d}{c((1-R) + \sigma(\nu)Nd)} \quad (2)$$

式中: τ_{empty} 为空腔光衰荡时间; $\tau(\nu)$ 为在激光频率为 ν 时的衰荡时间; d 为两个镜面的距离; c 为光速; R 为镜面反射率; $\sigma(\nu)$ 为分子在激光频率为 ν 时的吸收截面; N 为分子密度。

在光腔衰荡光谱法中,首先要测量没有水分子吸收时的空腔光衰荡时间 τ_{empty} ,然后再测量含有水分子时对应吸收频率为 ν 时的衰荡时间 $\tau(\nu)$ 。分子浓度测量的准确度取决于衰荡时间和分子吸收截面 $\sigma(\nu)$ 的测量准确性^[10]。为了使灵敏度最高,需要选取具有较大的吸收截面的分子吸收峰,并使光程长距离,且使镜面损失尽可能地小。光程在常规吸收方法中受样品池的大小所限制。高反射率镜面利用“多重反射”的方法可以增加有效光程,可达到100000倍于样品池的长度^[4, 10]。水分检测限可达70 pmol/mol。激光法在原理上测量时间很短,可以很快达到测量结果。衰荡时间 $\tau(\nu)$ 一般在十到百微秒之间即可完成,但实际测量中,仅仪器开机到激光器稳定所需时间就至少需要数分钟。

1.2 质谱法

大气压离子质谱仪 (Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometry, APIMS) 的测量原理是:在大气压下使基体气体离子化,离子化的基体分子与水分子反应形成带有水分子的离子基团,通过测量水分子离子基团的质荷比丰度来检测水分子的浓度。由于电离发生在大气压条件下,此时的分子运动自由程相对较短,因此基体气体离子与少量杂质分子碰撞的几率会极大地增加,从而提高了杂质的电离效率。大气压离子质谱法灵敏度高,一般比电子轰击电离质谱 (EI-MS) 提升10⁴~10⁶倍,可实现ppt量级的超痕量水分测量。

APIMS有高效的电离方式和极高的灵敏度,特别适合检测nmol/mol,甚至pmol/mol浓度量级的气体组分,该方法既可以测量水分含量也能够测量其他组分含量。其缺点是成本高、操作复杂^[12-14]。

1.3 冷镜露点法

气体中的水蒸气含量决定水的露点/霜点温度。

水的露点/霜点温度是指气体中水蒸气在压力不变的条件下,冷却到饱和和结露/霜时的温度。水蒸气含量大,水的露点/霜点温度高,水蒸气含量小,水的露点/霜点温度低。在恒定的气体压力下,气体通过测量镜面,当气体的露点温度低于镜面温度时,镜面呈干燥状态,此时,通过发射光信号和接收光信号,利用控制系统对镜面降温制冷,当镜面温度低于气体露点时,镜面上开始结露,同时光接收器采集的信号发生变化,控制系统通过调整制冷功率,使镜面温度保持在气体的露点温度上,采用铂电阻进行结露时镜面温度测量,即为气体的露点温度^[15]。冷镜露点仪测量原理可靠、生产工艺成熟,有长期的技术积累和实际测量应用,在计量行业作为湿度标准被广泛使用,可测露点温度范围-95~95℃,误差为±0.1℃。带有快速响应ORIS功能的冷镜式精密露点仪,在测被测气体管路吹扫好的情况下,测量-75℃露点达到平衡只需要20 min。新型的冷镜精密露点仪还有清除镜面过冷水的功能,配备了进气管路加热附件后,可用于环境温度以上的露点测量^[5]。

1.4 石英晶体振荡法

石英晶体传感器湿度仪的工作原理是:压电石英晶体表面涂敷有吸湿材料,当被测气体经过石英晶振片时,由于吸附水分,石英晶振片质量增加,振荡频率发生变化。不同含湿量的气体经过石英晶体传感器的振荡频率不同,实际测量过程中,交替将被测气体和参比干气通入石英晶体传感器,测量只是由于吸湿引起的频率变化,从而得到水分含量^[16-18]。石英晶体传感器湿度仪的优点是仪器灵敏度高,能测量痕量水分含量;缺点是抗干扰性差、气路复杂、有恒温要求、参比干气要求高。

1.5 P₂O₅电解法

P₂O₅电解法微量水分仪利用P₂O₅吸收气体中的水分,被吸收的水电解为氢气和氧气,当水的吸收和电解达到平衡时,根据电解电流和气体的流量,即可获得其中的水分含量^[19]。由于P₂O₅吸收流经电解池气体中的全部水分,因此,每一种类型的电解池均需要对应一个额定气体流量,而且在测量时必须保持流量恒定。根据法拉第电解定律和气体状态方程可导出电解电流与被测气体含水量的关系为^[24]

$$I = \frac{QpT_0FV_r}{3p_0TV_0} \times 10^{-4} \quad (3)$$

式中: I 为电解电流,μA; Q 为气样流量,mL/min; p 为大气压,Pa; T_0 为临界绝对温度, $T_0=273.15$ K; F 为法拉第常数, $F=96484.56$ C/mol; V_r 为气体湿度体积比,μL/L; P_0 为标准大气压, $P_0=101325$ Pa; T 为环境温度,K; V_0 为摩尔体积, $V_0=22.4$ L/mol。

P₂O₅电解法微量水分仪水分含量的测量范围为0.1~2000 μL/L。其优点是价格低,测量原理可靠;缺点是对流量测量要求高,电解池吹扫时间长,且要求被测气体不可破坏P₂O₅涂层和池体、不在电极上起聚合反应、不参与电解反应^[16, 18-19]。

1.6 Al₂O₃传感器法

Al₂O₃传感器露点仪的测量原理为:Al₂O₃薄膜吸附水后,其阻抗发生变化,Al₂O₃传感器的阻抗值与气体露点之间存在对应关系,通过计量标定即可确定气体露点。Al₂O₃传感器露点仪能测量-110℃至20℃范围的露点温度,其优点是灵敏度高、功耗小、易于半导体集成工艺结合、便于实现小型化、价格低。但是Al₂O₃传感器露点仪也存在不足:当气体由高露点向低露点变化时,氧化铝传感器响应速度较慢,响应时间需要数小时甚至数十小时;氧化铝传感器露点测量误差仅能达到不高于2℃~3℃的水平,且存在长期漂移,漂移量可能达到几十摄氏度。Al₂O₃传感器露点仪一般用于在线监测露点温度的变化^[20-21]。

2 气体中痕量水蒸气测量技术总结

对不同痕量水分分析方法的测试原理进行了阐述,从应用角度对不同测试技术的优点、缺点和适用性等进行了分析,为实现气体中痕量水蒸气准确、高效测量提供了技术借鉴。表2总结了目前各痕量水分分析方法的使用性能和特点^[1-3, 23]。

3 气体中痕量水蒸气测量技术展望

随着微电子设备向复杂化和小型化方向发展,半导体工艺气体中的水分含量要求会越来越严格。惰性气体的水分要求将从ppb提升至ppt水平;特种气体的水分要求将从数百ppb提升至数十ppb的水平。为了提高气体中痕量水蒸气测量的灵敏度,将进一步完善现有的测量方法并开发新技术。

表2 痕量水分测量技术对比

Tab.2 Comparison of trace moisture measurement techniques

技术	可测气体	原理	灵敏度(典型)	评价	费用
TDLAS	HCl, HBr, NH ₃ , H ₂ , O ₂ , 惰性气体, N ₂ O, CO, SiH ₄	绝对	1 ~ 10 ppbv	低微量水的检测必须保持较窄的谱线宽度	高
CRDS	N ₂ , HCl	绝对	<500 ppt	需要高反射率镜面	高
APIMS	惰性气体, O ₂ , GeH ₄ , SiH ₄ , NH ₃ , HCl	相对	10 ppt ~ 10 ppbv	操作复杂, 需要操作熟练的人员, 且需定期维护	非常高
石英晶体振荡	O ₂ , H ₂ , NO, CO, 碳氢化合物, 惰性气体, AsH ₃ , PH ₃ , SF ₆ , NH ₃	相对	10 ~ 50 ppbv	要有参考干气且需定期校准	中等
冷镜法	HCl, HBr, PH ₃ , 惰性气体	绝对	变化	测量微水含量时需较长的平衡时间	中等
电容法	CO, 卤化碳, N ₂ O, 惰性气体, PH ₃ , AsH ₃	相对	>100 ppbv	测量微水含量时需要反复校准	低
电解法	Cl ₂ , 惰性气体, SF ₆ , CO, CO ₂ , 氟利昂	绝对	2 ~ 5 ppbv 惰性 Cl ₂ 中: 1 ppmv	需要精准的流量控制, 干的电解池可能对水没有反应	中等

TDLAS 可以进行 ppbv 量级的测量, 腔室外的有效吹扫和去除条纹噪声干扰将是 TDLAS 进一步提升灵敏度的关键。CRDS 具有亚 ppbv 量级腐蚀性气体水分测量潜力, 仪器的可靠性是分析技术应用的关键, 棱镜反射镜等新方法具有帮助 CRDS 进一步提升性能的潜力, 但是镜面反射率问题可能会限制其在反应性气体中的适用性, 需要开展相关研究进行解决。随着质谱仪小型化的发展, APIMS 将越来越地多用于惰性气体和特种气体水分测量。石英晶体振荡微量天平方法的装置易建立, 晶体表面涂层材料使用 MgCl₂, 该涂层能够不可逆转地吸收 HCl 中的水分, 因而, 可作为特种气体的简便水分检测方法^[22]。冷镜式露点仪在深冷技术、露点测量和控制技术、快速平衡技术方面均有一些新研究进展: 对于 -120 °C 露点的测量, 可采用液氮制冷和其它新型制冷技术, 其露点测量和控制技术具有自学习控制模式^[17], 将成为下一代用于痕量水分测量的最有前途的分析仪器。电阻/电容传感器中新介电材料的开发和使用, 可改进电阻/电容传感器的响应时间和灵敏度^[23]。通过改进材料和结构, 降低影响水含量测试准确度的干扰因素是电解法未来需要解决的问题。许多水分分析技术的灵敏度将达到极限, 要实现更高的测量灵敏度, 预浓缩是一种可行的方法, 但用于定量分析时, 必须先对完全吸附和可逆脱附进行验证。

未来随着湿度测量理论和方法的逐步发展以及新材料新工艺的逐步涌现与成熟, 气体中痕量水蒸气测量技术将进一步向高精度、高灵敏度和快速测量的方向发展。

参考文献

- [1] MOSS S J, LEDWITH A. Chemistry of the semiconductor industry[M]. London: Blackie and Son Ltd, 1987.
- [2] MISRA A, HOGAN J D, CHORUSH R. Handbook of chemicals and gases for the semiconductor industry[M]. New York: John Wiley, 2002.
- [3] HOGAN J D. Specialty gas analysis: a practical guidebook[M]. New York: Wiley-VCH, 1997.
- [4] 阎文斌. 微量气体定量分析的新方法: 光腔衰荡光谱[J]. 低温与特气, 2007, 25(1): 35-38.
YAN W B. New technique for trace gas analyses: cavity ring-down spectroscopy[J]. Low temperature and specialty gases, 2007, 25(1): 35-38. (in Chinese)
- [5] 易洪. 湿度测量的新进展[J]. 计测技术, 2008, 28(S1): 1-3.
YI H. New development of humidity measurement[J]. Metrology and measurement technology, 2008, 28(S1): 1-3. (in Chinese)
- [6] CLARK R J, HESTER R E. Spectroscopy in environmental science[M]. New York: Wiley, 1995.
- [7] FEHER M, MARTIN P A. Tunable diode laser monitoring of atmospheric trace gas constituents[J]. Spectrochim acta, 1995, 51(10): 1579-1599.

- [8] BOMSE D S, STANTON A C, SILVER J A. Frequency modulation and wavelength modulation spectroscopies: comparison of experimental methods using a lead-salt diode laser[J]. *Applied optics*, 1992, 31: 718-731.
- [9] HOVDE D C, HODGES J T, SCACE G E, et al. Wavelength-modulation laser hygrometer for ultrasensitive detection of water vapor in semiconductor gases[J]. *Applied optics*, 2001, 40(6): 829-839.
- [10] BUSCH K W, BUSCH M A. Cavity ring down spectroscopy: an ultratrace-absorption measurement technique[M]. Washington, DC: American Chemical Society, 1999.
- [11] 陈兵. 高灵敏光腔衰荡光谱测量痕量气体分子[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- CHEN B. High sensitivity cavity ring down spectroscopy for trace gas detection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [12] SIEFERING K, BERGER H, WHITLOCK W. Quantitative analysis of contaminants in ultrapure gases at the parts pertrillion level using atmospheric pressure ionization mass spectroscopy[J]. *Journal of vacuum science and technology*, 1993, 11(4): 1593.
- [13] DHEANDHANOO S, YANG J H, CIOTTY R J, et al. Empirical validation of a gas distribution system moisture drydown model[J]. *Journal of the IES*, 1998, 41: 33-38.
- [14] 张体强, 胡树国, 韩桥. 大气压电离质谱及其用于超高纯气体分析研究进展[J]. *岩矿测试*, 2014(6): 775-781.
- ZHANG T Q, HU S G, HAN Q. Atmospheric pressure ionization mass spectrometry and its application in ultra high purity gases analysis: a review[J]. *Rock and mineral analysis*, 2014(6): 775-781. (in Chinese)
- [15] WIEDERHOLD P R. Water vapor measurement: methods and instrumentation [M]. Taylor and francis group, 1997.
- [16] WEI J, PILLION J E, HOANG C. In-line moisture monitoring in semiconductor process gases by a reactive metal coated quartz crystal microbalance[J]. *Journal of the institute of environmental sciences*, 1997, 40: 43-48.
- [17] KLEINFELD E R, FERGUSON G S. Rapid, reversible sorption of water from the vapor by a multilayered composite film: a nanostructured humidity sensor[J]. *Chemistry of materials*, 1995, 7: 2327-2331.
- [18] 李玉忠. 物性分析仪器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- LI Y Z. Physical analysis instrument [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [19] 国家质量监督检验检疫总局. 湿度测量方法: GB/T 11605-2005[S]. 北京: 北京分析仪器研究所, 2005.
- State Administration for Market Regulation. Methods of humidity measurement: GB/T 11605-2005[S]. Beijing: Beijing Institute of Analytical Instruments, 2005. (in Chinese)
- [20] MERMOUD F, BRANDT M D, WEINSTEIN B L. Recalibration of capacitive-type moisture sensors[J]. *Solid state technology*, 1989, 32(5): 59-61.
- [21] 李英干, 范金鹏. 湿度测量[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- LI Y G, FAN J P. Humidity measurement[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990. (in Chinese)
- [22] HANDLEY J. Quartz crystal microbalances[J]. *Analytical chemistry*, 2001, 73(7): 225-229.
- [23] GEIGER W M, RAYNOR M W. Trace analysis of specialty and electronic gases[M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2013.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局. 电解法湿度仪: JJG 500-2005[S]. 北京: 全国物理化学计量技术委员会, 2005.
- State Administration for Market Regulation. Electrolytic hygrometers: JJG 500-2005[S]. Beijing: National Physical and Chemical Metrology Technical Committee, 2005. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)

第一作者: 宋巍巍(1972—), 女, 辽宁丹东人, 满族, 高级工程师, 硕士, 研究方向为数字信号处理与风洞测量技术。



通讯作者: 盖文(1969—), 男, 河北石家庄人, 汉族, 高级工程师, 研究方向为风洞控制技术。

