

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.03

# QCM露点传感器水粘性影响的抑制方法研究

谷容睿, 王中宇, 白雪松, 王国华, 聂晶\*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 为了解决基于主动温控式的石英晶体微天平(Quartz Crystal Microbalance, QCM)露点测量系统中冷凝水粘弹特性影响露点识别准确性的问题, 对QCM电极进行疏水处理, 改善凝结特性, 减小水粘性引起的频率耗散, 实现液态水质量变化引起的谐振频率偏移测量。在QCM电极上制备静态水接触角为 $133^\circ \pm 2^\circ$ 的疏水层并对其进行表征, 将疏水电极与未经处理的电极用于露点识别实验, 并与精密露点仪获得的标准露点进行对比。实验证明, 通过疏水处理电极凝结面的方法能够有效提升QCM露点传感器的露点识别精度, 为主动温控露点传感器结构的优化设计提供理论和实验依据。

**关键词:** 露点传感器; 石英晶体微天平(QCM); 粘弹性; 疏水处理; 水接触角

中图分类号: TB93; TH837 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2023) 06-0030-08

## Study on suppression method for the effect of water viscosity in QCM dew point sensor

GU Rongrui, WANG Zhongyu, BAI Xuesong, WANG Guohua, NIE Jing\*

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In active temperature-controlled dew point measurement based on a quartz crystal microbalance (QCM), the viscoelastic property of liquid water leads to a frequency dissipation which has an effect on the detection accuracy of dew point. Here, the QCM electrode was modified by hydrophobic treatment to improve the condensation form, minimize the dissipation attributed to the water viscosity, and achieve the measurement of resonance frequency offset caused by changes in liquid water quality. A hydrophobic layer with a static water contact angle of  $133^\circ \pm 2^\circ$  was prepared on the QCM electrode and characterized. The hydrophobic electrode and untreated electrode were applied in the dew point recognition experiments, and compared with the standard dew point obtained by a precision dew point meter. The experiments proved that the hydrophobic treatment of the electrode surface can effectively improve the dew point recognition accuracy of the QCM sensor. The optimal approach can provide basis for the design of dew point sensor structure with active temperature control.

**Key words:** dew point sensor; quartz crystal microbalance (QCM); viscoelasticity; hydrophobic treatment; water contact angle

## 0 引言

QCM是一种基于压电效应的质量敏感传感

器<sup>[1]</sup>, 可对电极表面的质量载荷进行纳克量级灵敏度的高精度测量。1959年, Gunter Sauerbrey提出的Sauerbrey方程为QCM在气体环境中的传感提供

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-10-31

基金项目: 国家“十四五”基础科研项目(JCKY2021601B011)

引用格式: 谷容睿, 王中宇, 白雪松, 等. QCM露点传感器水粘性影响的抑制方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 30-37.

**Citation:** GU R R, WANG Z Y, BAI X S, et al. Study on suppression method for the effect of water viscosity in QCM dew point sensor[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 30-37.



了理论基础。1985年, BRUCKENSTEIN S等学者于对QCM谐振频率和液体粘度、密度间关系的建模<sup>[2-3]</sup>使其在液体环境中的应用成为可能。QCM传感器具有分辨力高、体积小且易于集成等优点, 随着对敏感材料研究的深入和镀膜处理方法的逐渐成熟, 这种质量敏感器件的应用已经扩展到气相分子沉积监测<sup>[4]</sup>、特种气体传感<sup>[5]</sup>、湿度传感<sup>[6-7]</sup>、生物传感<sup>[8-9]</sup>、粘弹性研究等领域<sup>[10]</sup>。

湿度是环境监测和控制的重要参数, 谐振式湿度传感器的出现为高精度湿度测量提供了新的解决方案。目前, 基于QCM的相对湿度传感器主要依赖电极表面的涂敷材料<sup>[11-12]</sup>中亲水性基团和多孔沉积结构吸收水分子, 或使用金属氧化物材料<sup>[6, 13]</sup>获得快速响应和恢复性能。而主控温式的QCM露点传感器<sup>[14-17]</sup>主要通过识别结露引起的电极负载的变化, 以确定对应时刻的露点温度。在实际露点测量实验中, 测量过程中观察到的频率信号并不完全符合Sauerbrey经典方程, 这是因为石英晶体的温频特性会引起频移, 且气体中的水分子凝结在电极表面形成液态水, 液态水作为牛顿液体具有粘弹性, 敏感电极上的粘性负载会使谐振器产生耗散。针对水的粘性行为对结露过程中频率响应的影响进行研究, 发现这种由冷凝水本身的粘度特性引起的频移与温度和质量变化引起的频率响应不同, 无法被量化或标定。为解决此问题, 本文对实际露点测量中的频率信号响应进行分析和建模, 提出对QCM电极进行疏水处理的方法, 以疏水层隔离传感电极和冷凝水, 减少水粘度对露点传感精度的影响, 并对疏水处理后的QCM与未处理的QCM进行了一系列露点识别对比研究。

## 1 传感原理

如图1所示, QCM由石英晶片和一对金属电极组成。在主动控温式QCM露点传感器<sup>[14, 18-19]</sup>中, 将电极暴露在被测空气环境中, 对QCM片制冷直至空气中的水分子在电极上结露, 冷凝水作为质量负载直接接触电极。

QCM露点传感的实现基于Sauerbrey方程中谐振频率偏移量和电极质量负载变化间的线性关系, 即

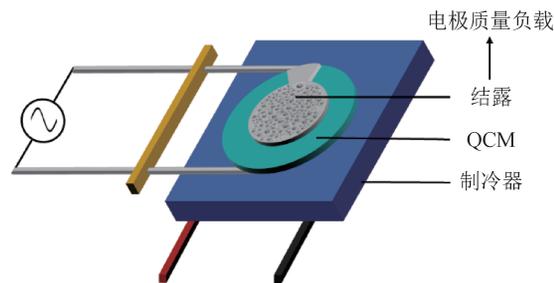


图1 QCM露点传感示意图

Fig.1 Schematic diagram of QCM dew point sensing

$$\Delta f_{\text{mass}} = -\frac{2f_0^2 \Delta M}{A \sqrt{\rho_q \mu_q}} = -\frac{2f_0^2 \Delta m}{\sqrt{\rho_q \mu_q}} = -C_f \cdot \Delta m \quad (1)$$

式中:  $\Delta f_{\text{mass}}$  为QCM传感器对负载的频率响应,  $f_0$  为谐振器基频,  $\Delta M$  为电极上的质量负载,  $A$  为电极的有效传感面积,  $\rho_q$  为石英晶体密度,  $\mu_q$  为石英晶体的剪切模量,  $\Delta m$  为单位传感区域的质量负载,  $C_f$  为灵敏度系数。式(1)将露点测量中的QCM频移和质量负载通过灵敏系数  $C_f$  建立联系, 从而识别出电极表面结露时液态水质量变化引起的谐振频率降低。

但在实验中, 频率响应不完全遵循式(1), 与理论推导存在差异, 这是由于Sauerbrey方程中频移和质量变化线性关系仅在严格符合3个适用条件时成立<sup>[1]</sup>: ①频率响应  $\Delta f_{\text{mass}}$  远小于基频  $f_0$ , 质量载荷  $\Delta m$  远小于石英晶体质量; ②QCM电极上的质量负载与电极刚性耦合; ③质量负载均匀分布在电极的有效传感区域内。即式(1)仅适用于均匀、薄膜状载荷的质量传感, 且载荷不会因震荡发生滑移或变形。在实际露点测量过程中, QCM传感器不能严格满足条件②和③: 由于液态水的粘弹性, 水与电极表面并不严格刚性连接, 不满足条件②; 冷凝水的微液滴在电极表面大致呈随机分布, 不满足条件③, 但是已有研究证明: 在形态不均匀的情况下电极上总质量仍然符合Sauerbrey方程<sup>[20]</sup>。虽然液态水作为牛顿液体同时表现出粘性和弹性, 其弹性使QCM质量负载响应遵循Sauerbrey方程, 但是结露过程中其粘性导致QCM响应产生额外耗散, 这种频率耗散是影响QCM露点传感识别精度的重要因素之一。将结露过程中出现的液态水近似为电极上的液体膜, 讨论其粘性引起的频率耗散时, 可将其近似为液体环境中QCM响应模型<sup>[2-3]</sup>, 即

$$\Delta f_V = -\frac{f_w^{3/2} \sqrt{\rho_L v_L}}{\sqrt{\pi \rho_q \mu_q}} \quad (2)$$

式中： $\Delta f_V$ 为粘性导致的频率偏移， $f_w$ 为液体环境中QCM的谐振频率， $\rho_L$ 和 $v_L$ 分别为电极上附着水的密度和常规粘度。

同时考虑QCM弹性负载和液体粘性负载时，其频率响应可写为<sup>[21]</sup>

$$\Delta f_{\text{DPM}} = -\frac{2f_0^2}{N \sqrt{\rho_q \mu_q}} \left( \rho_s + \sqrt{\frac{\rho_L v_L}{4\pi f_0}} \right) = \Delta f'_{\text{mass}} + \Delta f'_V \quad (3)$$

式中： $\Delta f_{\text{DPM}}$ 为实际露点测量过程中的QCM频率响应， $\rho_s$ 为电极表面质量负载层的密度， $N$ 为谐波数， $\Delta f'_{\text{mass}}$ 为电极上水等效质量引起的频移， $\Delta f'_V$ 为水粘性引起的耗散。 $\Delta f'_V$ 作为未知干扰项，使测量结果偏离了原始Sauerbrey方程的预期。本文提出对QCM电极表面进行疏水处理，通过疏水膜的隔绝减少液态水粘性的影响，即尽可能减小 $\Delta f'_V$ ，传感器频率响应能够尽可能遵循理想Sauerbrey方程，即 $\Delta f_{\text{DPM}} \approx \Delta f'_{\text{mass}}$ 。

疏水处理对电极表面特性的影响如图2所示。本文主要关注表面处理对微液滴和传感电极间润湿性和疏水性的影响，利用疏水角(Water Contact Angle, WCA)<sup>[22]</sup>对电极表面的疏水特性进行表征，即

$$\theta = \arccos \frac{\gamma_{\text{SG}} - \gamma_{\text{SL}}}{\gamma_{\text{LG}}} \quad (4)$$

式中： $\theta$ 为疏水角， $\gamma_{\text{SG}}$ 、 $\gamma_{\text{SL}}$ 和 $\gamma_{\text{LG}}$ 分别为固-气、固-液、气-液界面的单位面积表面能。接触角越小，润湿性越好；接触角越大，疏水性越好。如图2所示，电极表面疏水角 $\theta$ 小于疏水处理后表面疏水角 $\theta'$ ，即有疏水膜的QCM电极疏水性能更好。

疏水处理后的QCM电极不再直接与冷凝水液滴接触，疏水膜与传感电极间刚性连接作为传感器敏感膜。这种优化的疏水结构可以得到近似对纯质量负载响应的频率信号

$$\Delta f_{\text{HPO}} \approx -\frac{2f_z^2}{\sqrt{\rho_q \mu_q}} \cdot \Delta m \quad (5)$$

式中： $\Delta f_{\text{HPO}}$ 为疏水QCM传感器的频率响应， $f_z$ 为带有疏水涂层的QCM谐振频率。

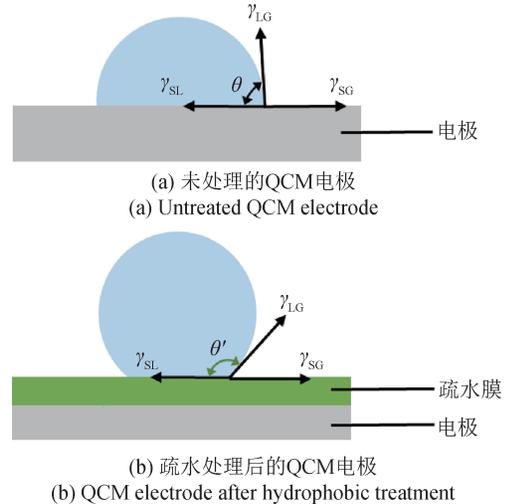


图2 疏水处理对电极表面特性的影响  
Fig.2 Effect of hydrophobic treatment on electrode surface properties

## 2 露点测量实验

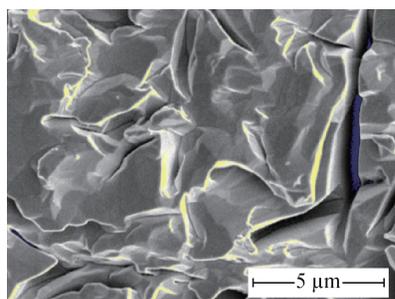
### 2.1 QCM疏水层制备和表征

为了验证QCM露点传感器疏水处理对冷凝水粘性影响的抑制作用，实验使用有机氟硅烷物质<sup>[23]</sup>降低电极表面润湿性。氟硅烷与银电极接触后发生水解反应产生硅氧烷分子，之后再与电极表面羟基(-OH)发生脱水反应产生醚键(-O-)，使烷基(-R)均匀覆盖QCM银电极，降低其表面能，最终形成疏水层。疏水处理过程如下：首先用去离子水和乙醇清洗原始的QCM银电极，并完全干燥。使用1H, 1H, 2H, 2H-全氟辛基三氯硅烷(Perfluorooctyltrichlorosilane, PFOTS)对QCM银电极进行修饰，在90℃减压下化学气相沉积12h后电极表面形成疏水三氟甲基基团(-CF<sub>3</sub>基团)，将获得的电极样品记为CF<sub>3</sub>-QCM。为了增强疏水性，将清洁后的QCM银电极用氧-等离子体(30 W, 200 mTorr)处理5 min后，立即用上述PFOTS修饰，将获得的电极样品记为P-CF<sub>3</sub>-QCM。所用的AT-切型QCM谐振频率为4 MHz，石英晶体直径为8.6 mm，银电极直径为5.2 mm。

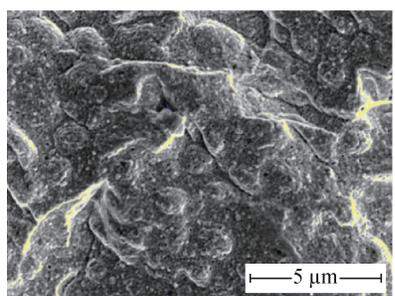
为对以上电极样品表面进行表征，使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对原始QCM电极和制备的疏水CF<sub>3</sub>-QCM、P-CF<sub>3</sub>-QCM电极表面进行拍摄，并使用表面接触角仪测

量样品表面静态接触角(液滴体积为  $2 \mu\text{L}$ )，结果如图3所示。图3(a)、图3(c)和图3(e)分别为未处理电极、CF3-QCM和P-CF3-QCM在放大倍数为

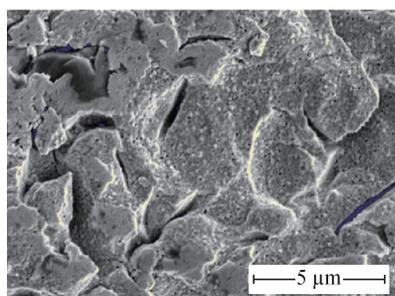
20 000时的SEM显微照片。图3(b)、图3(d)和图3(f)分别为未处理电极、CF3-QCM和P-CF3-QCM表面疏水角测量结果。



(a) 未处理电极表面SEM图  
(a) SEM micrographs of untreated electrode surface



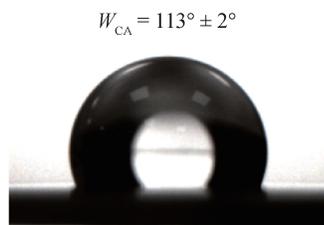
(c) 疏水处理后CF3-QCM表面SEM图  
(c) SEM micrographs of CF3-QCM surface after hydrophobic treatment



(e) 疏水处理后P-CF3-QCM表面SEM图  
(e) SEM micrographs of P-CF3-QCM surface after hydrophobic treatment



(b) 未处理电极表面静态疏水角  
(b) Static water contact angle of untreated electrode surface



(d) 疏水处理后CF3-QCM电极表面静态接触角  
(d) Static water contact angle of CF3-QCM electrode surface after hydrophobic treatment



(f) 疏水处理后P-CF3-QCM电极表面静态接触角  
(f) Static water contact angle of P-CF3-QCM electrode surface after hydrophobic treatment

图3 QCM电极样品表面分析

Fig.3 Characterization of QCM electrode sample

在较高的放大倍数下，未处理电极表面相对光滑，而CF3-QCM和P-CF3-QCM电极表面相对粗糙，润湿性较低。如图3(c)所示，在CF3-QCM电极表面存在大量直径几百纳米的微粒，这是由于电极表面缺乏羟基，使得硅烷偶联剂难以锚定并自发水解。在使用等离子体处理银电极后，电极表面存在多孔结构而不是纳米颗粒，如图3(e)中P-CF3-QCM电极样品所示。产生这种表面形貌的

原因为等离子体处理在银电极表面提供了更多的羟基，能够使硅烷偶联剂分布更加均匀、覆盖率更高。同时，这种微孔结构进一步提高了表面粗糙度，使得电极表面比未经等离子体处理的表面更加疏水。以上QCM电极样品的疏水性由强到弱排列为P-CF3-QCM > CF3-QCM > 未处理电极，由静态接触角测量结果可以得到同样的结论。

通过上述疏水处理得到的电极表面具有较大

的比表面积，为水的结露提供了吸附位点。选用疏水性更优的P-CF3-QCM电极样品装配至主控温结构<sup>[17, 19]</sup>中用于露点测量实验，并与未处理QCM性能进行比对，以验证本文关于疏水处理对水凝结特性和露点识别精度影响的推论。

## 2.2 露点测量系统搭建与实验条件

在实验室环境下，搭建露点测量系统用于模拟空气环境下的QCM露点传感器响应过程，测量系统示意图如图4(a)所示，主控温式QCM露点传感器如图4(b)所示。

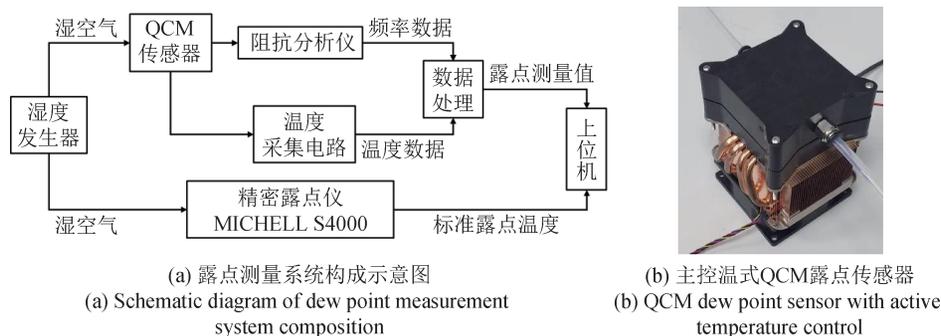


图4 露点测量实验系统

Fig.4 Experimental setup of dew point measurement system

该测量系统由湿度发生器、商用精密露点仪、QCM露点传感器、阻抗分析仪和信号采集与分析系统组成。湿度发生器可提供稳定露点的湿空气，最大允许误差为 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ （露点温度范围为 $-60\text{ }^\circ\text{C}$  ~  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ）。发生器稳定输出湿空气至待评估的QCM传感器和精密露点仪，以保证二者测量环境一致。通过阻抗分析仪驱动石英晶体并采集QCM输出频率信号，通过温度采集电路获得铂电阻测量的温度信号，使用上位机进行信号分析，确定QCM传感器的露点测量结果。实验所用的阻抗分析仪可用频率范围为 $20\text{ } \sim\text{ } 10\text{ MHz}$ ，误差不超过 $0.5\%$ 。

另一路湿空气由精密露点仪测量，测量值作为标准露点温度与QCM传感器露点测量结果进行比对。实验使用的精密露点仪在 $-100\text{ } \sim\text{ } 20\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内露点测量误差不超过 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ，重复性优于 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ，分辨力为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。露点测量实验中环境温度为 $22\text{ }^\circ\text{C}$ ，压力为 $101\text{ kPa}$ ，气体流速为 $0.5\text{ L/min}$ 。

## 2.3 实验结果与分析

控制湿度发生器输出同一露点温度的湿空气，将未处理QCM和疏水P-CF3-QCM分别装配至露点传感结构中进行实验。相同露点环境下未处理和疏水处理QCM传感器频率响应如图5所示。

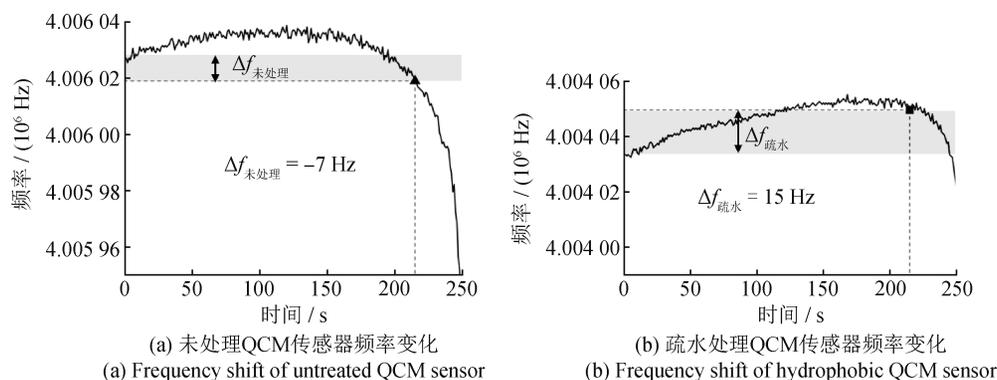


图5 相同露点环境下未处理和疏水处理QCM传感器频率响应

Fig.5 Frequency response of untreated and hydrophobic-treated QCM sensors in the same dew point environment

由图5可观察到未处理QCM和疏水处理QCM频率均先升高，这是由于制冷过程中石英晶体的温频效应引起了频移。传感器温度达到露点后频

率信号明显下降，露点时刻(符号和虚线标注处)的QCM频率值由精密露点仪给出的标准露点和铂电阻测量所得温度值比对确定。

频移  $\Delta f_{\text{疏水}}$  和  $\Delta f_{\text{未处理}}$  为制冷开始前 QCM 基频值和露点时刻频率值之差，二者差异显著。两个传感器响应总体趋势上符合 Sauerbrey 方程的预期，但在温度降低到露点前，未处理 QCM 频率已经开始单调下降，如图 5(a) 所示。而疏水处理 QCM 在达到露点温度前频率信号相对稳定，没有下降趋势，如图 5(b) 所示。

设露点时刻未处理 QCM 和疏水处理 QCM 的频率值分别为  $f_{\text{DPa}}$  和  $f_{\text{DPb}}$ ，则两传感器的频移可以表示为温度引起的频率变化和负载引起的频率变化之和

$$\Delta f_{\text{未处理}} = f_{\text{DPa}} - f_0 = \Delta f_{\text{温度}} + \Delta f_{\text{DPM}} \quad (6)$$

$$\Delta f_{\text{疏水处理}} = f_{\text{DPb}} - f_z = \Delta f'_{\text{温度}} + \Delta f_{\text{HPO}} \quad (7)$$

式中： $f_0$  和  $f_z$  分别为未处理 QCM 和疏水处理 QCM

的基频， $\Delta f_{\text{温度}}$  和  $\Delta f'_{\text{温度}}$  分别为两 QCM 频率对温度变化的响应， $\Delta f_{\text{DPM}}$  为同时考虑液态水粘性影响和等效质量负载时 QCM 频移， $\Delta f_{\text{HPO}}$  为仅对电极上质量响应的 QCM 频移。

两个传感器使用的 QCM 为同一批次产品，经测量疏水处理前后 QCM 基频相差约 2 kHz，已通过实验验证二者的温频效应近似，即  $\Delta f_{\text{温度}} \approx \Delta f'_{\text{温度}}$ 。

由式 (6) 和式 (7) 可知频移  $\Delta f_{\text{未处理}} = -7 \text{ Hz}$  和  $\Delta f_{\text{疏水}} = 15 \text{ Hz}$  间的显著差异主要由  $\Delta f_{\text{DPM}}$  和  $\Delta f_{\text{HPO}}$  引起，明显  $|\Delta f_{\text{HPO}}| < |\Delta f_{\text{DPM}}|$ ，即疏水处理有效减小了粘性导致的频率损耗。为了验证以上结论，利用传感器在不同露点环境下进行测量和比对。图 6 为约 1 °C 和约 14 °C 露点下两个传感器的温度-频率响应。

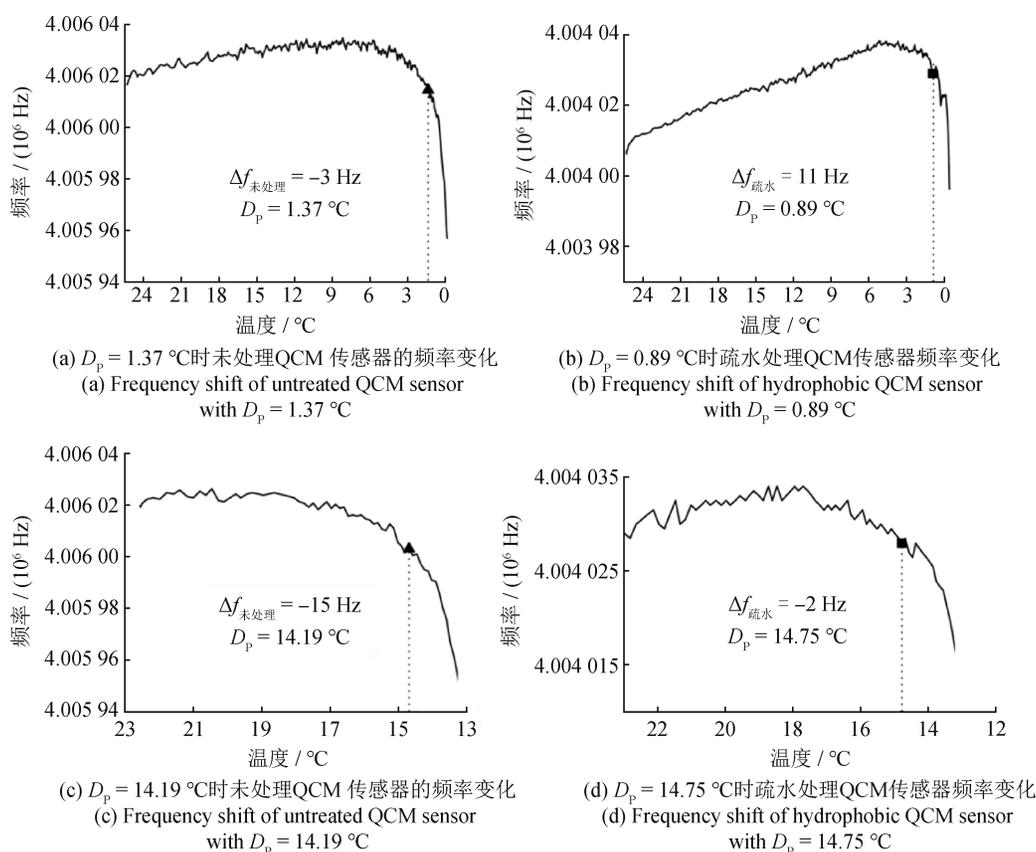


图 6 不同露点环境下未处理 QCM 和疏水处理 QCM 传感器的温度-频率响应

Fig. 6 Temperature-frequency response of untreated QCM and hydrophobic-treated QCM sensors at different dew points

对比图 6(a) 和图 6(b) 可以得到和图 5 近似的结论，即疏水处理 QCM 的频率响应更接近理想 Sauerbrey 方程，图 6(c) 和图 6(d) 同样符合这一规律。QCM 随温度降低频率升高，这解释了图 6(a) 和

图 6(b) 中的频移整体明显大于图 6(c) 和图 6(d)，即在较低露点环境下温频响应更显著。虽然疏水处理前后 QCM 基频相差约 2 kHz，经计算，这种差异对温频效应和传感器灵敏系数的影响可忽略不

计。实验结果证明,疏水处理QCM可显著减小液体负载的粘弹性引起的频率响应不理想,抑制冷凝水粘性的影响,使QCM频率响应更加符合Sauerbrey方程。

### 3 结论

对主控温式QCM露点传感器的频率响应建模,分析电极上液态水粘性影响和质量负载的频率响应。为验证疏水处理QCM电极对露点识别精度的影响,在电极上制备疏水层以隔离冷凝产生的微液滴。使用SEM和表面接触角仪对疏水电极表面进行表征以评价其润湿性能,选择静态接触角为 $133^{\circ} \pm 2^{\circ}$ 的QCM片装配至露点测量系统验证其传感性能。以精密露点仪测量结果为标准露点进行对比,实验结果表明:经疏水处理的P-CH<sub>3</sub>-QCM传感器能够有效改变测量过程中水在传感电极上的凝结形式,从而抑制冷凝水粘性对频率响应的影响,实现近似纯质量响应的露点识别。这种QCM电极疏水处理方法可以广泛应用于其他主动控温式QCM露点传感结构,进一步提升露点传感精度。

#### 参考文献

- [1] SAUERBREY G. The use of quartz oscillators for weighing thin layers and for microweighing[C/OL]. [2023-05-18]. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-use-of-quartz-oscillators-for-weighing-thin-and-Sauerbrey-Sauerbrey/6846021648129e29e41c4371b71fb561781c0936>.
- [2] BRUCKENSTEIN S, SHAY M. Experimental aspects of use of the quartz crystal microbalance in solution[J]. *Electrochimica Acta*, 1985, 30(10): 1295-1300.
- [3] KEIJI K K, GORDON J G. The oscillation frequency of a quartz resonator in contact with liquid[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1985, 175: 99-105.
- [4] INAMI E, YAMAGUCHI M, YAMAGUCHI T, et al. Controlled deposition number of organic molecules using quartz crystal microbalance evaluated by scanning tunneling microscopy single-molecule-counting[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(15): 8954-8959.
- [5] WANG L. Metal-organic frameworks for qcm-based gas sensors: a review[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020.
- [6] ZHAO X, CHEN X, LIU F, et al. An ultrafast qcm humidity sensor for respiratory monitoring outside a mask[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022.
- [7] WANG T, GUAN Y, PANG J, et al. An accurate dew point sensor based on mems piezoelectric resonator and piecewise fitting method[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022.
- [8] ZHOU L, KATO F, IJIMA M, et al. Mass-fabrication scheme of highly sensitive wireless electrodeless mems qcm biosensor with antennas on inner walls of microchannel[J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 95(13): 5507-5513.
- [9] NOI K, IJIMA M, KURODA S, et al. Ultrahigh-sensitive wireless QCM with bio-nanocapsules[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 293: 59-62.
- [10] NA SONGKHLA S, NAKAMOTO T. Overview of quartz crystal microbalance behavior analysis and measurement: 12[J]. *Chemosensors*, 2021, 9(12): 350.
- [11] YAN W, ZHANG D, LIU X, et al. Guar gum / ethyl cellulose-polyvinyl pyrrolidone composite-based quartz crystal microbalance humidity sensor for human respiration monitoring[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022.
- [12] FAUZI F, RIANJANU A, SANTOSO I, et al. Gas and humidity sensing with quartz crystal microbalance (QCM) coated with graphene-based materials-a mini review[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021.
- [13] GAO N, LI H Y, ZHANG W, et al. QCM-based humidity sensor and sensing properties employing colloidal snO<sub>2</sub> nanowires[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 293: 129-135.
- [14] LI N, HUANG Q, NIE J, et al. Dew point measurements using montmorillonite (mtt) and molybdenum disulfide (mos<sub>2</sub>) coated QCM sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 279: 122-129.
- [15] NIE J, MENG X, LI N, et al. Active temperature control of quartz resonant dew point sensors based on dual surface cooling[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 256: 1-6.
- [16] NIE J, LIU J, LI N, et al. Dew point measurement using dual quartz crystal resonator sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 246: 792-799.
- [17] 白雪松, 王国华, 刘嘉, 等. 基于双半导体制冷器的谐振式露点仪主控温系统设计[J]. *计测技术*, 2022, 42(2): 73-78.
- BAI X S, WANG G H, LIU J, et al. Design of main temperature control system of resonant dew point meter based

- on double TEC [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(2): 73–78. (in Chinese)
- [18] LI N, WANG G, BAI X, et al. Effect of quartz crystal thermal stress on its performance in active temperature control quartz crystal microbalance dew point sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 369.
- [19] LI N, MENG X, NIE J, et al. A QCM dew point sensor with active temperature control using thermally conductive electrodes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(14): 5715–5722.
- [20] MAGNA G, BELUGINA R, MANDOJ F, et al. Experimental determination of the mass sensitivity of quartz microbalances coated by an optical dye [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020.
- [21] MARTIN S J, GRANSTAFF V E, FRYE G C. Characterization of a quartz crystal microbalance with simultaneous mass and liquid loading [J]. *Analytical Chemistry*, 1991, 63(20): 2272–2281.
- [22] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1997, 95: 65–87.
- [23] DENG X, MAMMEN L, BUTT H J, et al. Candle soot as

a template for a transparent robust superamphiphobic coating [J]. *Science*, 2012, 335(6064): 67–70.

(本文编辑: 刘宇轩)



**第一作者:** 谷容睿 (1996—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密传感技术和露点测量方法。



**通讯作者:** 聂晶 (1985—), 男, 副研究员, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为精密测量与特种传感技术等; 发表学术论文 70 余篇, 授权发明专利 15 项, 获省部级科技进步二等奖 2 项; 现为中国仪器仪表学会高级会员、中国湿度与水分专业委员会副秘书长。