

主控温光电式露点测量中冷凝面特性及影响规律研究

谷容睿, 王中宇, 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: 主控温光电式露点测量方法是基于冷凝气液相变物理现象直接测量露点温度, 被广泛应用在湿度的精密测量与校准中, 其冷凝面作为关键器件同时具有热量传递和反射光学信号的作用, 针对冷凝面物理化学特性对主控温光电式露点测量的复杂影响, 提出一种基于光强响应的冷凝实验研究方法; 通过制备不同材料、表面粗糙度和润湿性的金属冷凝面, 分析不同冷凝面特性对水团簇吸附能、液滴成核点位分布与核化能垒、液滴生长与合并过程的影响规律; 研究表明冷凝面特性协同作用于气液相变的热质传输效率, 显著影响冷凝进程发展, 该研究为主控温光电式露点测量仪器中冷凝面的设计与优化提供重要的理论与实验基础。

关键词: 露点测量; 冷凝面特性; 冷凝效率; 湿度测量; 气液相变

Research on Condensation Surface Characteristics and Influence Law for Optical Dew Point Measurement with Active Temperature Control

GU Rongrui, WANG Zhongyu, NIE Jing

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

Abstract: The optical dew point measurement method with active temperature control is based on the physical phenomenon of condensation gas-liquid phase change to directly measure the dew point temperature, which is widely applied in precise humidity measurement and calibration. Its condensation surface, as a key component, has the functions of both heat transfer and optical reflection. Regarding the complex impact of the physical and chemical characteristics of the condensation surface on the active temperature control photoelectric dew point measurement, a condensation experimental method based on optical intensity response is proposed. By preparing metal condensation surfaces with different materials, surface roughness, and wettability, it analyzes the adsorption performance of the water-metal interaction, droplet nucleation point distribution and nucleation energy barrier of different condensation surfaces. Research shows that the cooperative effect of condensation surface characteristics on the heat and mass efficiency of gas-liquid phase transition significantly affects the condensation process. This paper designs and optimizes the condensation surface in the temperature control photoelectric dew point measurement instrument, providing important theoretical and experimental foundations.

Keywords: dew point measurement; condensation surface property; condensation performance; humidity measurement; gas-liquid phase change

0 引言

露点温度是指空气在水汽含量和气压都不改变的条件下, 冷却到饱和时的温度。目前露点温度测量已被国际公认为最精密的湿度测量方法, 世界各国实际的湿度

量值传递均通过露点温度实现。露点测量其关键技术在于露点的探测与识别, 现有的露点测量方法可分为直接和间接测量方法^[1], 其露点识别的有效性和可重复性对武器装备的生产和科学研究都具有重要意义。直接测量方法通过观察气液相变这一基本物理现象, 从基础定义

收稿日期:2025-04-11; 修回日期:2025-05-07。

作者简介:谷容睿(1996-),女,博士研究生。

通讯作者:聂晶(1985-),男,工学博士,副研究员,博士生导师。

引用格式:谷容睿,王中宇,聂晶. 主控温光电式露点测量中冷凝面特性及影响规律研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 94-101, 126.

出发对露点温度进行测量, 和间接露点测量方法相比引入误差更小、测量准确度更高。其中, 主控温光电式露点测量具有精度高、漂移小、长期稳定性好以及适用范围广等优点, 在湿度校准和计量方面已获得国际认可^[2]。

为了提高主控温光电式露点测量仪器精度和可靠性, 已有研究讨论了多种影响因素: 如样气的吹扫速率和管长^[3-4], 冷凝表面的温度分布和均匀性^[5-6], 以及识别过程中控制算法优化或自动校准^[7-9]。根据光电式露点测量原理, 冷凝面作为关键器件, 既用于气液相变过程中的热传导, 也是反射光信号的光学元件。结露过程中水从气相向液相发生质量传输, 必须考虑表面对特性对冷凝效率的影响, 尤其是冷凝面物理化学特性对气固界面和液固界面行为的显著影响。已有大量理论和实验研究^[10-11]对冷凝过程中的液滴成核和生长行为进行了深入探讨, 但其主要关注点在于滴状冷凝的热质传输效率提升, 对于相变初期即液滴成核和生长过程的影响因素缺乏深入研究。

综上所述, 冷凝面特性直接决定光电式露点测量中异相成核及液滴生长等行为, 影响光学信号响应及露点识别的准确性, 也是制约我国高端光电精密露点仪国产化的重要因素。本文提出一种基于光强响应的冷凝实验研究方法, 揭示了冷凝面物理化学特性对主控温光电式露点测量的复杂影响规律, 为主控温光电式露点测量仪器中冷凝面的设计与优化提供重要的理论与实验基础。

1 主控温光电式检测原理

为从传感原理上解释冷凝面特性对主控温光电式露点测量的影响, 需要对其信号响应进行建模。典型的主控温光电式露点测量方法如图 1 所示, 其主要由金属冷凝面、温度控制系统和光学检测系统构成。

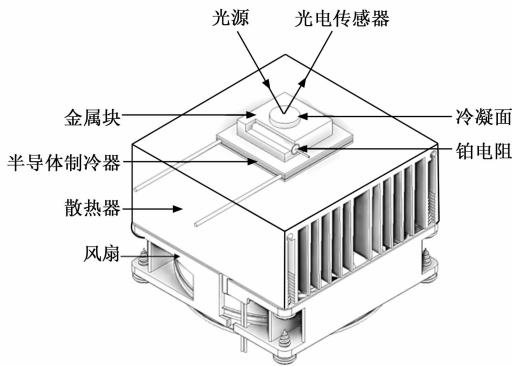


图 1 主控温光电式露点测量原理示意图

露点识别过程中, 冷凝面暴露在被测气体环境中, 通过半导体制冷器金属块中的铂电阻实现表面温度的精密控制; 通过聚焦在冷凝面上的光源和光电检测元件实现反射光信号的采集。随表面温度降低, 被测气体中的水分在近壁区逐渐饱和并在冷凝面上凝结为液滴, 入射

光逐渐从镜面反射演变为漫反射。光电传感器所检测的光学信号对相变过程灵敏, 从而最终确定热力学平衡时的露点温度。

结露早期阶段所形成的初代液滴半径主要处于百纳米至数微米量级, 此时冷凝面上的液态水不可作为几何光学意义上的连续介质进行光传播分析, 并难以利用传统显微成像系统进行原位观测。该尺度下, 入射光在冷凝面主要发生散射和衍射效应, 是微液滴和表面微结构的共同作用结果。为简化模型, 本文仅讨论当使用光纤接收反射光强度信号时, 法线入射^[12]金属冷凝面时反射率可表示为:

$$\rho_m(\lambda, r_d) = R_0(\lambda) \cdot \exp\left[-\left(\frac{4\pi r_q}{\lambda}\right)^2\right] + R_0(\lambda) \cdot \frac{C_0}{s_q(r)^2} \left(\frac{r_q}{\lambda}\right)^4 \theta_a^2 \quad (1)$$

式中, $R_0(\lambda)$ 是理想金属表面在光源波长 λ 处的反射率; r_q 为冷凝面的均方根粗糙度; $s_q(r)$ 是和微液滴半径 r 相关的局部特征参数; C_0 为常数; θ_a 为光纤接收角。

式 (1) 中第一项表示金属表面的固有反射率, 取决于入射光波长和金属表面本身特性 (如表面结构特征), 是未发生冷凝状态下的静态响应; 第二项则是光学信号的冷凝面上液态水的动态响应, 这一项反馈了相变发生后冷凝液滴的几何尺寸和分布信息。式 (1) 定性地说明了冷凝过程中反射光信号响应由冷凝面上液滴尺寸、分布状态和入射光波长决定。由于确定式中参数值或者建立在主控温光电式露点测量方法中的通用模型存在挑战, 本研究直接使用光强作为对气液相变灵敏的传感信号: 即使用相同波长光源时, 光强信号随着冷凝面上液滴尺寸的的生长和液滴密度的增大而减小, 冷凝进程发展越快时反射光信号衰减越早。

为研究冷凝面特性在露点测量中的具体影响机理, 本文主要关注相变发生 (液滴成核) 以及冷凝初期 (液滴生长) 过程。该过程发生在微观尺度且发展快速, 需要设计实验系统实现冷凝面上的可控冷凝行为进行对比分析。

2 冷凝实验系统设计

基于主动控温的光电式测量原理, 本文设计了如图 2 所示的测量系统用于冷凝实验。实验系统主要由标准湿度发生器、光学检测模块 (包括光源、光谱仪和反射式光纤探头)、温度控制模块以及上位机组成。

其中, 标准湿度发生器 (CIMM-TH-0517) 可提供露点温度范围为 $-60\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的湿空气, 最大允许误差为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 用于以稳定流速持续输出给定湿度 (其露点温度在 10 min 内波动不超过 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的样气至测量腔。如图 1 所示的冷凝面、半导体制冷器和铂电阻集成在聚四氟乙烯材料外壳的测量腔内, 半导体制冷器

和铂电阻连接至温度控制电路实现闭环控温。实验所用铂电阻经校准后在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的允许误差约为 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，表面涂有导热硅脂并保证其与半导体制冷器间有良好的热耦合。使用四线制接法连接铂电阻至高精度模数转换器 (ADMA4000) 实现高分辨力、低噪声的温度采集；使用高稳定性、高精度、低漂移的可编程线性直流电源 (Agilent, E3631A) 控制半导体制冷器功率；温度控制电路中 PID 控制器经参数整定且具有高采样和输出更新频率。

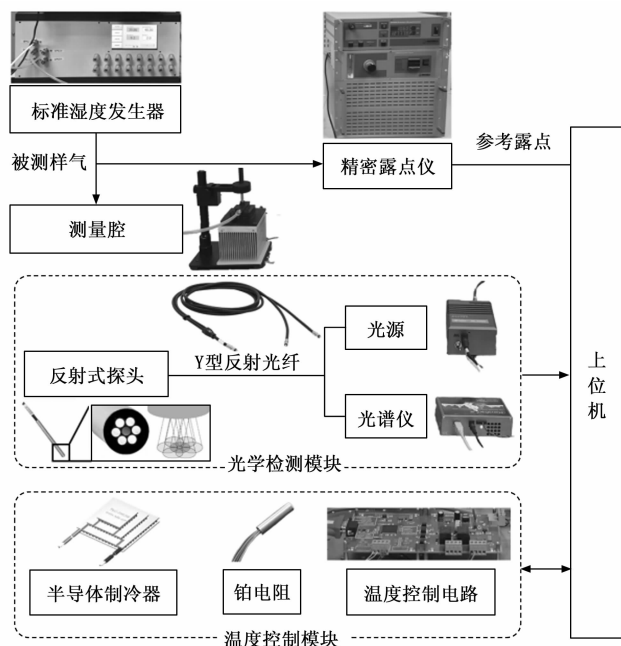


图2 冷凝实验系统组成

测量腔底部固定有散热器和风扇，顶部插入反射式光线探头，结构紧凑并能够减少热量损失和干扰。反射探头使用 Y 型光纤一分为二，两通道分别连接宽带光源 (IdeaOptics, HL2000-12) 和光谱仪 (RL-TEC112E, raylight technology)，从而实现漫反射和镜面反射信号的收集。探头的标准纤芯直径为 $400\text{ }\mu\text{m}$ ，数值孔径为 0.22 ± 0.02 ，接受锥（全角）为 25.4° ；光源光谱范围为 $360\sim 2\,500\text{ nm}$ ；光谱仪在 $200\sim 1\,050\text{ nm}$ 检测范围内分辨率优于 0.5 nm 。

测量过程中使用商用露点仪 (MICHELL S4000) 获取样气露点作为实验参考值，其测量范围为 $-100\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，重复精度优于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用流量计控制输出至测量腔的样气流速稳定，测量所用样气为实验室环境（常温常压）下的空气。这是由于已有研究表明流体流动特性会导致对流传热和传质^[13]特性变化，需排除该因素影响。考虑光电式露点测量对冷凝面的导热性和化学稳定性要求，一般使用贵金属及其合金材料进行加工，因此本文仅考虑滴状冷凝。

冷凝实验中，精密控制金属块和冷凝面温度线性缓慢下降（实验中制冷速度为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ），逼近并最终低于精密露点仪测得的样气参考露点，使冷凝面上缓慢发生可控、可重复的结露行为。同时实时采集光强信号，通过光强变化量化反映表面上冷凝初期的液滴成核和生长现象，研究表面特性变化对冷凝效率的影响。

3 冷凝面特性影响规律研究

由式 (1) 可知，需要关注的冷镜表面特性主要包括表面结构特征、化学组成和润湿性，本研究中分别将其量化为表面粗糙度、制备材料和表观接触角对冷镜进行表征，控制变量对各个表面特性进行实验研究。

由于金属对光的吸收具有波长依赖性，本文在实验中采集未结露状态下的冷凝面反射信号作为参考光强，测量过程中随光强衰减计算相对光强值作为气液相变过程的响应信号，使用归一化光强度进行对比分析。这种方式对实际应用中实验所用不同光源参数没有局限，同时能够减小测量中系统误差和可能引入的不确定度，保证实验结果可靠。在进行冷凝面特性研究前，使用同一光源和同一冷凝面在稳定不变的环境湿度条件下进行重复测量实验，以验证实验重复性和可靠性。根据前期采集的光学显微图像数据，本研究取相对光强度 0.9 为经验值，定义此时对应的冷凝面温度为特征温度 T_c ，多次重复实验测得的特征温度值如图 3 所示。图中灰色虚线为特征温度平均值，灰色区域为一个标准差范围。

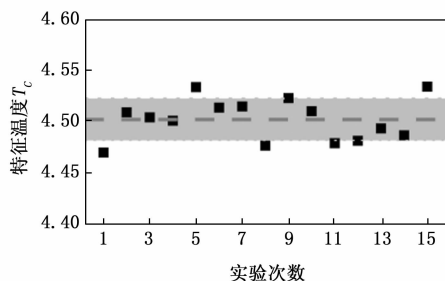


图3 重复性验证实验

图中特征温度值分布的标准差为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，实验可重复性好，特征温度值能够有效表征冷凝实验中的光强信号响应。

3.1 表面粗糙度影响

考虑到冷凝面在能够保证热传导效率的同时，也要具备相对平滑的表面微观结构保证光学测量的信号质量。为实现测量过程中的高效热传递，主控温光电式露点测量装置中的冷凝面表面加工一般不使用化学方法进行改性，而是通过机械加工方法改变其粗糙度。因此，实际应用中表面粗糙度的可调控范围相对受限：粗糙度过高将导致光学信号质量差、响应范围小；而粗糙度过低会导致制备和加工成本显著增加。

为研究表面粗糙度对冷凝效率的影响，使用相同金属材料加工两冷凝面，机械加工抛光表面至不同粗糙度，测得两冷凝面的十点平均粗糙度分别为 $R_{ZA}=0.17\text{ }\mu\text{m}$ ， $R_{ZB}=0.45\text{ }\mu\text{m}$ 。将不同粗糙度的两冷凝面在相同环境气体湿度条件下进行对比实验，光强响应如图 4 所示，图中数据垂线处为冷凝实验对应的特征温度 T_C 。分别在 -4.9 、 -10.1 、 -15.3 和 $-20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的样气露点环境下重复冷凝实验。

图中样气露点为精密露点仪 MICHELL S4000 测量标准湿度发生器所输出样气的参考露点温度，实验中冷凝面温度以 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的速度匀速下降，均使用 525 nm 波长的光信号进行测量。在实际冷凝过程中，近壁面区域存在大量水分子团簇聚集，同时冷凝面光学检测区域内生成尺寸不一的微观液滴。在冷凝初期这些团簇和微液滴主要分布在纳米和微米尺度，难以确定具体的相变发生时刻。在相同样气露点环境和控温条件下，特征温度 T_C 愈大，对应冷凝面上的光强信号衰减愈早，即气液相变进程发展快、冷凝效率高。

由图 4 子图可观察到粗糙度较高冷凝面 ($R_{ZB}=0.45\text{ }\mu\text{m}$) 对应特征温度 T_C 总是高于较低粗糙度冷凝面 ($R_{ZA}=0.17\text{ }\mu\text{m}$)。即粗糙度高的冷凝面上相变发生更快，冷凝效率更高，该规律在不同样气露点环境下均适用。

基于经典成核理论^[14-16]对滴状冷凝的假设，初始气液相变的演化中临界成核半径 $r_{\min}$ 和能量势垒 $\Delta G(r_{\min})$ 定义如下：

$$\begin{cases} r_{\min} = \frac{2T_{\text{sat}}\sigma_{lv}}{H_{fg}\rho_w\Delta T} \\ \Delta G(r_{\min}) = -n^*K_B T_{\text{sat}}\ln S + \sigma_{lv}(S_{lv} - S_{ls}\cos\theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中， T_{sat} 为饱和蒸汽温度； σ_{lv} 为气液界面张力； H_{fg} 为相变潜热； ρ_w 为冷凝水密度； ΔT 为冷凝面的过冷度； n^* 为临界液滴所包含的水分子数； K_B 为玻尔兹曼常数； S 为过饱和度（近壁温度下实际蒸汽压与饱和蒸汽压之比）；是冷凝面的本征接触角； S_{lv} 和 S_{ls} 分别为气液和固液界面的面积。成核能垒表示形成半径超过临界尺寸

$r_{\min}$ 的最小稳定液滴所需的能量。实验中控制气相热力学条件和冷凝面温度，在给定的过饱和度 S 和过冷度 ΔT 下气液界面张力 σ_{lv} 保持不变，而 S_{lv} 和 S_{ls} 受表面特性影响。表面粗糙度增大引入的复杂表面结构导致表面能量不均匀性增高，可用成核点增多，几何缺陷处的成核能垒降低，成核速率上升，有利于冷凝进程的发展。同时，成核点密度的增大也有利于液滴空间重叠^[14]，进一步加快冷凝发展速率。该公式也解释了由于冷凝速率随样气露点环境的降低而减慢。

综上所述，高度抛光的表面对初始液滴的形成和生长有不利影响。同时在下文的其他影响因素研究中，需控制冷凝面粗糙度以排除表面微观结构对冷凝效率的影响。

3.2 冷凝面材料影响

相同的表面粗糙度前提下，冷凝表面材料直接决定其表面自由能和润湿性，并影响液相水形成时的界面现象，因此需要对冷凝面材料影响进行实验分析。在本文所讨论的主控温式结构中，随冷凝面温度降低最终形成测量腔内空间分布的温度梯度，样气中水分子向冷凝面的近壁区运动并逐渐团聚为水分子团簇。微观上，成核相变始于水分子和团簇在冷凝表面的吸附，即水—金属相互作用的结果。由于纳米和亚微米尺度的润湿行为^[17]具有很强的尺寸依赖性，表面接触角测量结果并不适用，本小节基于已有的水在金属表面的吸附能计算结果进行讨论。

现有的主控温光电式露点测量装置一般使用贵金属材料加工冷凝面，或通过涂层和镀膜的方式加工高热导率金属材料基底以节省成本。这是由于贵金属材料具有较强的耐腐蚀和抗氧化能力，使冷凝面具有良好的化学稳定性；在具有优良导热性的同时还在宽光谱范围内有高反射率，能够满足冷凝面功能需求。基于此，实验选择金（Au）、银（Ag）和铑（Rh）3 种常见的贵金属材料制备表面粗糙度近似的 3 个冷凝面，其具体算术平均粗糙度 R_A 值见表 1。

在相同环境湿度和制冷条件下分别使用不同材质的

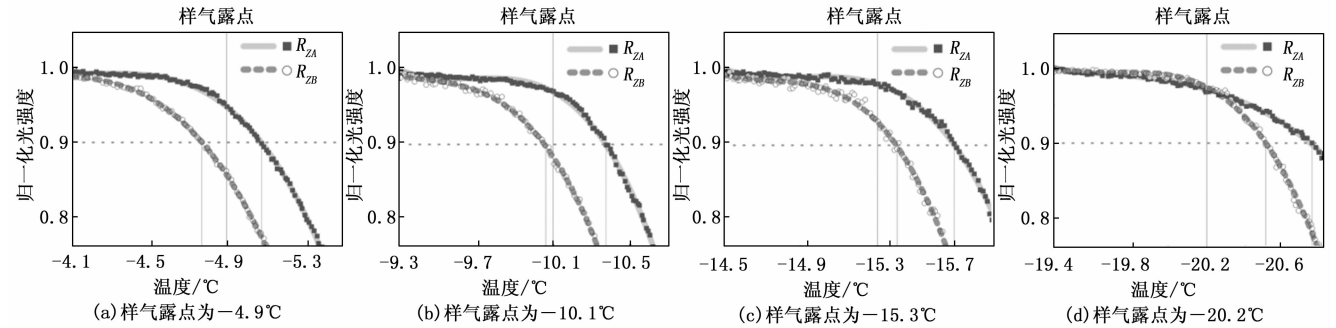


图 4 表面粗糙度对冷凝效率影响

冷凝面进行对比实验，光强响应结果见图 5。实验使用 525 nm 波长的光信号进行测量。分别在 -4.9、-10.1、-15.3 和 -20.2 °C 的样气露点环境下重复冷凝实验。

表 1 冷凝面材质及其对应水-金属相互作用

冷凝面	$R_a / \mu\text{m}$	材质	改进范德华力描述的交换泛函 ^[18]			
			optPBE- vdW		optB88- vdW	
			$E_{\text{nle-ads}} / (\text{meV}/\text{H}_2\text{O})$	$D_{\text{water-metal}} / (\text{\AA})$	$E_{\text{nle-ads}} / (\text{meV}/\text{H}_2\text{O})$	$D_{\text{water-metal}} / \text{\AA}$
A	0.376	Au	-398	2.853	-433	2.750
B	0.367	Ag	-345	2.746	-365	2.704
C	0.346	Rh	-527	2.389	-579	2.334

由图 5 观察可知，每张子图中特征温度 T_c 由大至小排序为 $\text{Rh} > \text{Au} > \text{Ag}$ 。即在相同条件的冷凝实验条件下，Rh 冷凝面上成核最早、冷凝效率最高，而 Ag 冷凝面上的气液相变进展最慢。该规律在不同样气露点环境下均适用。

实验观察到的材料对冷凝效率的显著影响可以由微观尺度下水-金属相互作用来解释：异质成核过程中，水分子和团簇在表面的物理吸附是氢键（水分子间）和范德华分散力（VDF, van der Waals dispersion force）共同作用的结果，分子间作用力的平衡决定了固体表面上团簇的结构组织和稳定性。虽然 VDF 单个作用微弱而短程，但由于参与非平衡相变的分子数量庞大，其累积效应能够克服动能。已有研究^[18-21]证明结合 VDF 对水单体或团簇^[22]和具体金属材料间吸附能的重要性，并且讨论了 VDF 在金属表面上成核^[23]和润湿行为^[24]中的重要作用。

为准确描述水分子在金属表面的吸附现象并考虑范德华相互作用，文献 [18] 采用包含优化的广义梯度近似（GGA）交换泛函的非局部范德华密度泛函方法，研究表明非局域关联效应对水分子在金属表面的吸附有显著影响。其中使用 optPBE- vdW 和 optB88- vdW 交换泛函计算结果见表 1，表格中 $E_{\text{nle-ads}}$ 为非局域关联吸附能（VDF 对水-金属吸附能的贡献），单位为 $\text{meV}/\text{H}_2\text{O}$ ； $D_{\text{water-metal}}$ 为表面水分子的氧原子在吸附点位上与

相应金属原子间的距离，单位为 $\text{\AA}$ 。由于水-金属吸附释放能量， $E_{\text{nle-ads}}$ 均为负值，其绝对值越大，水分子与金属表面结合越稳定。比较分析表 1 数据，不同模型计算结果均显示吸附能 $E_{\text{nle-ads}}$ 由强至弱排序为 $\text{Rh} > \text{Au} > \text{Ag}$ ；Ag 和 Au 表面吸附点位上 $D_{\text{water-metal}}$ 基本一致，Rh 表面的水-金属距离明显较小。实验获得的冷凝效率排序和不同种类金属上的水分子吸附能大小排序一致。较短的平衡距离和较高的吸附能意味着较强的范德华相互作用，而 VDF 是弱键体系中主要的分子间作用力，主导相变初期水分子和团簇在冷凝面上吸附和成核过程。具体来说，VDF 影响水分子团簇在金属表面选择稳定吸附位点，以及随后团簇结构的发展进程^[25]。

为进一步验证，本研究使用不同波长光信号在上述 3 个冷凝面上进行一系列实验，其光强响应对应的特征温度值见图 6。用于露点测量的市售湿度计一般使用可见光波段的 LED 光源，即 450~900 nm 光谱范围。

本文选择工业应用中常用波长作为光源，分别为 475、495、525、585、610、660 和 670 nm。比较图 6 中的子图可知，样气露点环境对光强效应的特征温度影响仍然较为显著。在同样的光源波长和样气露点条件下，特征温度从高到低排序为 $\text{Rh} > \text{Au} > \text{Ag}$ ，即 Rh 表面上气液相变进程发展最快。这是由于水分子或团簇和金属表面原子间 VDF 引起的水-金属吸附能不同的作用结果。该结论在可见光波长范围内和样气露点环境 -5~-20 °C 范围内得到实验验证。

综上所述，在不同冷凝面上观察到的凝结速率变化可归因于表面材料特性对相变初始阶段吸附和成核前所涉及的范德华相互作用的影响：水分子在金属表面的非局域关联吸附越大，越有利于稳定吸附点的形成和水分子团簇的生长，从而降低成核能垒、提高成核速率，促进冷凝过程。

3.3 表面润湿性影响

主控温光电式测量方法的冷凝面在实验测量过程中存在大量微小液滴，其尺寸大小不一，成核点位分布随机。液滴的动态行为如生长、移动或者合并都是向系统

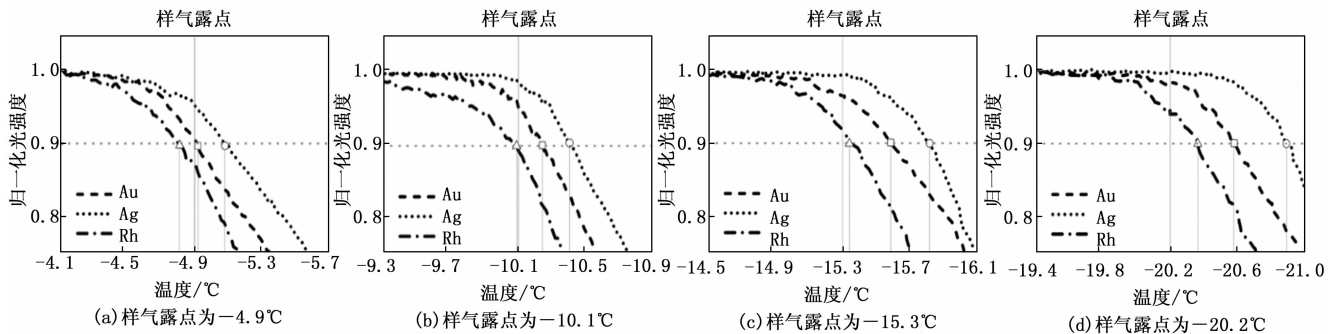


图 5 冷凝面材质对冷凝效率影响

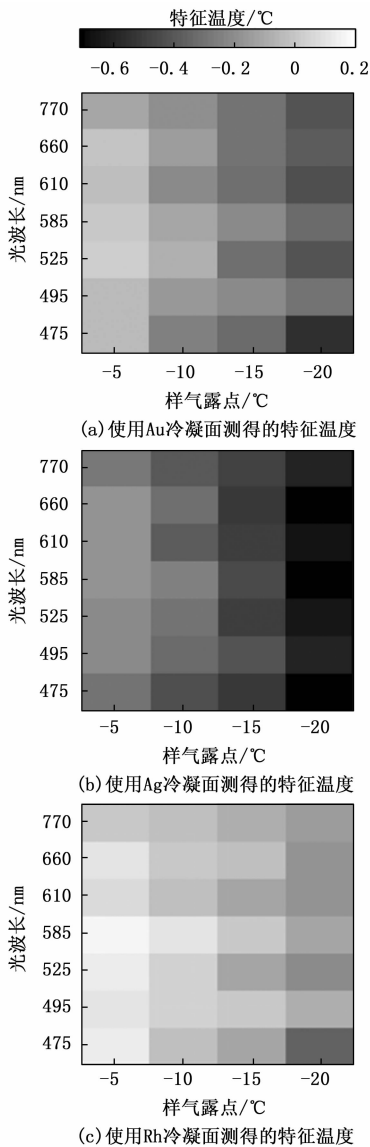


图 6 不同光信号波长下各材料冷凝面实验结果

自由能最小的方向发展，所涉及的润湿特性复杂多变，已有研究观察到液滴润湿模式（Wenzel、Cassie 等）和液滴底部直径随液滴生长表现出阶段性变化规律^[26]。

在冷凝实验过程中，表面润湿特性对液滴的大小分布有重要影响^[14]，是决定液滴生长速度和演变模式的主要因素。尽管经典的杨氏方程在描述相态演变是由于

尺寸跨度存在局限性，但静态接触角测量结果仍然是描述液固（水—金属）界面力平衡的可靠参数，可以用于描述液滴处于微米或毫米尺寸时的相对宏观尺度下表面润湿性。

对 3 个冷凝面进行表观接触角表征，使用接触角测量仪（OCA—20，Dataphysics）测量其静态水接触角 θ ，液滴大小为 $1\ \mu\text{L}$ 。测量结果如图 7 所示，冷凝面 A、B、C 表面水接触角分别为 $86^\circ\pm 1^\circ$ ， $65^\circ\pm 2^\circ$ 和 $97^\circ\pm 1^\circ$ 。

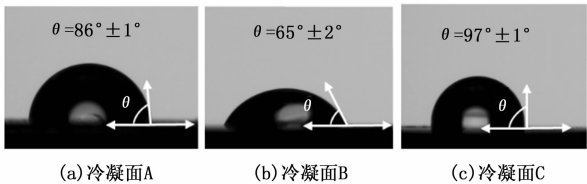


图 7 冷凝面表观接触角测量结果

接触角 θ 表征了气固界面和固液界面间的自由能差，并直接影响镜面上冷凝液滴的几何形态。具体来说，液滴底部的接触面积和液滴顶点的轮廓曲率可有效影响水—金属界面传热效率和相变时空气—水界面的质量传输。

在已有冷凝实验结果中，传感信号光强随冷凝面温度降低和结露而减弱。在匀速制冷条件下，光信号衰减速度在相变初期逐渐加快，并在中期达到稳定的衰减速率，该阶段冷凝面上的液滴行为以微米级液滴生长与合并为主，并伴随着新一代初始液滴的形成。为研究该阶段表面润湿性对冷凝效率的影响规律，比较具有不同表观接触角的冷凝面在相同环境湿度和制冷条件的冷凝实验中光信号响应结果，如图 8 所示。实验使用 525 nm 波长光信号进行测量，并分别在 -4.9 、 -10.1 、 -15.3 和 $-20.2\ ^\circ\text{C}$ 的样气露点环境下重复冷凝实验。同样取相对光强度 0.9 为经验值，对达到特征温度后的光强数据进行线性拟合，由回归拟合结果的斜率表征强度响应信号衰减程度以及冷凝效率的大小。图中将冷凝面 A、B、C 线性拟合结果斜率的绝对值分别记作 k_A 、 k_B 、 k_C 。

分析图 8 可知，不同样气露点环境下的拟合斜率大

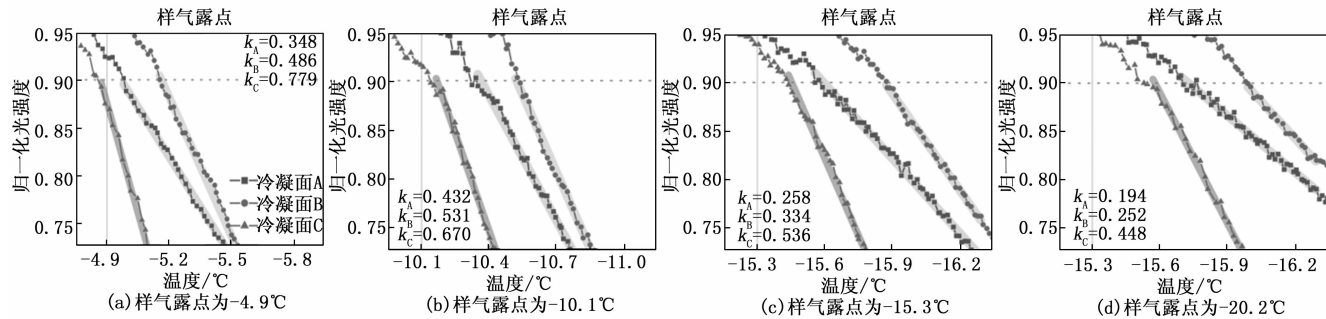


图 8 冷凝面润湿性对冷凝效率影响

小均遵循 $k_C > k_B > k_A$ 规律, 即冷凝效率从高至低排序为冷凝面 $C > B > A$ 。该顺序和冷凝面表观接触角测量结果排序并不完全一致。

从热量传递角度进行分析时单液滴作为最小传热单元, 根据已有的滴状冷凝热传导模型和实验研究^[27-28], 冷凝面热通量与表面润湿性之间存在复杂的相关性。将液滴总热阻按分量讨论: 主要包括液滴曲率热阻、气液界面热阻、液滴导热热阻等。比较图 7 子图可知, 表观接触角大小对冷凝面上的液滴形态和轮廓有显著影响。接触角小的表面润湿性好, 冷凝面 B 上的液滴铺展程度大、扩散能力强, 即液滴底部的水-金属接触面积增大, 降低了液固界面的热传导阻力。同时, 相对亲水表面上的液滴顶部轮廓的曲率半径增大、液滴内部传热路径缩短, 导致曲率热阻和液滴导热热阻均减小。表面润湿性提升对以上液滴热阻分量的影响增强了从金属冷凝面到空气-液滴界面的热传递效率, 同时有利于冷凝过程中的气液相变传质和液滴生长速率。以上分析仅能够解释冷凝面 B 上冷凝效率优于冷凝面 A, 下面对相对疏水的冷凝面 C 进一步讨论。

该阶段冷凝进展主要通过两种方式, 除了由气相向液相传质促进单液滴生长外, 还伴随着液滴合并行为, 这是在液滴发展到一定尺寸后相邻成核点上的液滴在液态水表面张力的作用下形成新的自由能最小态。相对疏水冷凝面上的液滴形态有利于多液滴分布时的空间重叠^[14], 能够促进液滴合并行为, 并暴露出可用的成核点供新的水分子团簇再次吸附, 随后形成新一代初始液滴。数微米尺寸的初代液滴承担了冷凝过程中的主要热通量, 其释放的潜热对推动凝结进程起着至关重要的作用^[10,29]。对于滴状冷凝, 可将冷凝面上的总体热通量 q_d 写作 $q_d = \rho H_{fg} 2\pi r^2 (1 - \cos\theta) V(r, \theta)$, 其中 $V(r, \theta)$ 是与液滴半径 r 和接触角 θ 相关的液滴增长速率。作为光学反射元件, 此处不讨论冷凝面的超疏水状态, 实验研究^[27,30]已经证明冷凝面上宏观热通量随着表观接触角的增加而增加。

疏水性对冷凝实验中热传导效率的提升解释了表观接触角最大的冷凝面 C 上光强信号衰减最快, 冷凝效率最高。总之, 表面润湿性和热传导效率以及液滴空间行为具有复杂关系, 显著影响微米液滴生长效率。

需要注意在冷凝面的实际加工中改变其表观接触角(润湿性)时, 表面材料或表面粗糙度也随之变化, 这种情况下需综合考虑各表面特性对气液相变中成核和液滴生行为的共同影响。下面对各冷凝表面特性在不同冷凝阶段的作用进行总结, 并对可能存在的协同影响进一步分析。

3.4 表面特性对冷凝过程的分阶段影响

整体冷凝相变过程呈现出从纳米到微米的跨尺度特

征, 同时其表界面行为具有显著的尺寸依赖性。按照时间顺序, 分阶段讨论主控温光电式结构中冷凝面物理化学性质对冷凝演变的影响方式, 如图 9 所示。在水分子物理吸附阶段, 微观尺度上的分子间相互作用驱动着气相中的 H_2O 分子在冷凝面的近壁区团聚并演变为团簇。此阶段中, 范德华相互作用是影响水团簇稳定吸附至金属表面的关键因素。对于不同材料的冷凝面, 考虑非局部相关性的水-金属吸附能越高, 水分子和团簇在该冷凝面上吸附速率越快, 越有利于后续成核和稳态液滴的形成。

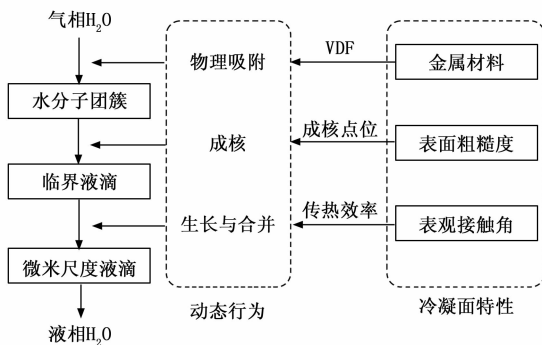


图 9 表面特性对冷凝过程各阶段的影响机制

在团簇核化形成临界液滴阶段, 成核能垒主要由冷凝面的表面微观结构决定。成核点分布局部表面能的显著影响, 即冷凝面粗糙度的增大能够显著降低成核能垒并提高成核点密度, 有利于成核速率的增长和冷凝效率的提升。

在液滴的生长与聚并阶段, 微米尺度液滴的动态行为由润湿特性调控向系统自由能最小方向发展, 决定了单液滴生长速率和多液滴演化模式。由于润湿性变化对液滴形态的影响, 表观接触角小(润湿性高)的冷凝面上单液滴传热热阻更小; 但同时, 较低的润湿性有利于液滴空间分布重叠和合并, 以及新一代临界液滴的形成, 从而提升表面上的整体热通量。需要综合考虑上述两个方面以讨论冷凝面润湿性对冷凝效率的具体影响。

此外, 本文所研究的 3 种冷凝面特性间互相影响, 即材料和表面粗糙度共同决定冷凝面的表观接触角: 单独改变材料或表面粗糙度时表观接触角不同, 同时不同材料和粗糙度下的冷凝面可能具有相同润湿性。

具体而言, 当不考虑超疏水冷凝面时, 粗糙度增大对应表观接触角增大(向疏水变化), 此时冷凝面上的冷凝效率变化需具体分析。对于相对亲水冷凝面(如实验所用冷凝面 B), 表面粗糙度增大使其在成核阶段中成核点密度增大、成核速率提升, 而润湿性降低使其在液滴生长与合并阶段冷凝效率下降。对于中性或相对疏水冷凝面(如实验所用冷凝面 A 和 C), 表面粗糙度增大不仅有利于其成核效率提高, 也有利于之后的液滴

生长与合并,对两个冷凝阶段均起促进作用。

综上所述,在冷凝过程的不同进程中的主导影响因素并不一致,需要分阶段讨论。同时,冷凝面特性间相互关联并存在协同作用,使其对冷凝效率的影响机制更为复杂。实际的露点测量应用中,需要针对具体的主控温光电式装置特性以及冷凝面性能需求,分析和传感灵敏度相关的重点阶段和对应主要影响因素,针对具体冷凝面要求进行优化。

4 结束语

本文针对主控温光电式露点测量方法中的关键器件即金属冷凝面,研究其物理化学特性(材料、表面粗糙度以及润湿性)对气液相变进程发展的具体影响。实验结果表明冷凝面特性的改变能够显著影响冷凝过程中的水分子团簇和液滴行为:与Au和Ag材料相比,Rh材料的冷凝面在水团簇吸附中具有更强的范德华力相互作用,吸附能更大、相变发生更早;在保证光学灵敏信号质量的前提下,粗糙度更大($R_z = 0.45 \mu\text{m}$)的冷凝面上成核能垒低、成核点分布密度大、成核速率高;虽然润湿性有利于单液滴生长,但疏水冷凝面有利于液滴聚并,在冷凝实验中总热通量更大、冷凝发展速度更快。根据以上冷凝面特性对热质传输效率的影响分析,能够为主控温光电式露点测量仪器中冷凝面的优化设计和调控冷凝性能提供重要理论依据。

参考文献:

- [1] NIE J, LIU X. A review of dew point sensors: recent advances and future development [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 417: 136115.
- [2] WIEDERHOLD P R. Water vapor measurement: methods and instrumentation [M]. CRC Press, 2012.
- [3] BAE Y K, HYUN D H. Effect of purging rate on the calibration of dew point sensor and the estimation of measurement uncertainty [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 627: 161–167.
- [4] BAE Y K, JEONG I J, HYUN D H. Response characteristics of dew point sensor with aluminum oxide by means of correlation between purging rate and tube length [J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2017: 348–352.
- [5] WEREMCZUK J, GNIAZDOWSKI Z, YSKO J M, et al. Optimization of semiconductor dew point hygrometer mirrors surface temperature homogeneity [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 92 (1): 10–15.
- [6] WEREMCZUK J, GNIAZDOWSKI Z, JACHOWICZ R, et al. Temperature distribution model for the semiconductor dew point detector [J]. *Optoelectronic and Electronic Sensors*, 2001.

- [7] PACZESNY D, TARAPATA G, WEREMCZUK J, et al. Autocalibration of dew point hygrometer based on integrated semiconductor detector [C] //2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007, 2007: 1–4.
- [8] WEREMCZUK J, TARAPATA G, PACZESNY D, et al. Fast dew point hygrometer with silicon integrated detector—optimization of dynamic properties [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132 (1): 195–198.
- [9] MATSUMOTO S. A new type of dynamic optical dew-point sensor using a laser diode and an optical fiber cable [C] //2005 IEEE Sensors, 2005: 4.
- [10] EL FIL B, KINI G, GARIMELLA S. A review of dropwise condensation: theory, modeling, experiments, and applications [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160: 120172.
- [11] ZHENG S F, GROSS U, WANG X D. Dropwise condensation: from fundamentals of wetting, nucleation, and droplet mobility to performance improvement by advanced functional surfaces [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 295: 102503.
- [12] BENNETT H E, PORTEUS J O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence [J]. *Josa*, 1961, 51 (2): 123–129.
- [13] TEREKHOV V I, PAKHOMOV M A. Flow and heat and mass transfer in laminar and turbulent mist gas-droplets stream over a flat plate [M]. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [14] XU W, LAN Z, LIU Q, et al. Droplet size distributions in dropwise condensation heat transfer: consideration of droplet overlapping and multiple re-nucleation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 44–54.
- [15] KIM S, KIM K J. Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2011, 133: 081502.
- [16] CAREY V P. Liquid-vapor phase-change phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment [M]. 3rd ed. CRC Press, 2020.
- [17] BOLTACHEV G S, BAIDAKOV V G, SCHMELZER J W P. Is gibbs' thermodynamic theory of heterogeneous systems really perfect? [M] //Nucleation Theory and Applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [18] CARRASCO J, KLIMEŠ J, MICHAELIDES A. The role of van der Waals forces in water adsorption on metals [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2013, 138 (2): 024708.

(下转第126页)