

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.03.15

基于镜面图像特征的冷镜式精密露点仪 凝结物生长规律分析

高雅*, 王毅, 胡艳青, 李心怡

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 冷镜式精密露点仪光电信号对镜面温度变化不敏感, 导致难以确定不同露点温度下最佳的电压变化值, 影响露点温度测量准确度。针对此问题, 本研究团队开展基于镜面凝结物生长规律的镜面图像特征分析试验, 对光电信号的电压变化值和不同露点温度之间的关系进行研究。使用电子显微镜, 对不同电压变化值的镜面图像进行分析, 通过计算凝结物个数和密度值的方法提取图像特征, 总结出了相同露点温度、不同电压变化值条件下镜面凝结物的生长规律, 明确了不同露点温度最佳电压变化值的选取区间, 解决了冷镜式精密露点仪光电信号对镜面温度变化不敏感的问题, 提高了冷镜式精密露点仪露点测量的准确度。

关键词: 冷镜式露点仪; 光电信号; 电压变化值; 镜面凝结物; 生长规律; 露点温度; 图像特征; 湿度测量

中图分类号: TB943; TH71

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0144-11

Analysis of condensate growth law in chilled-mirror precision dew point meters based on mirror image feature

GAO Ya*, WANG Yi, HU Yanqing, LI Xinyi

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The chilled-mirror precision dew point meter is a device for measuring the dew point temperature of gas, and it plays an important role in the humidity measurement system. However, its photoelectric signal is insensitive to the change of the mirror temperature of the chilled-mirror precision dew point meter, which makes it difficult to determine the optimal voltage change value at different dew point temperatures, resulting in low accuracy of the finally measured dew point temperature. In response to this issue, a mirror image feature analysis test based on the growth law of mirror condensation was designed. With the test, the relationship between the voltage change value of the photoelectric signal and different dew point temperatures was studied, and the law under different dew point temperatures was analyzed. At the same time, an electron microscope was used to analyze the mirror image at different voltage change values. The image features were extracted by calculating the number and density of condensates. The growth law of mirror condensate at the

收稿日期: 2025-11-10; 修回日期: 2026-01-13; 录用日期: 2026-01-21; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础研究项目(JSJL2020205XXXX)

引用格式: 高雅, 王毅, 胡艳青, 等. 基于镜面图像特征的冷镜式精密露点仪凝结物生长规律分析[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 144-154.

Citation: GAO Y, WANG Y, HU Y Q, et al. Analysis of condensate growth law in chilled-mirror precision dew point meters based on mirror image feature[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46 (3): 144-154.



same dew point temperature but different voltage change values was summarized, and the selection range of the optimal voltage change values for different dew point temperatures was clarified. This study solved the problem of insensitivity of the photoelectric signal of the chilled-mirror precision dew point meter to the mirror temperature change, and improved the accuracy of dew point measurement of the chilled-mirror precision dew point meter.

Key words: chilled-mirror dew point meter; photoelectric signal; voltage change value; mirror condensation; growth law; dew point temperature; image feature; humidity measurement

0 引言

冷镜式露点仪是一种标准的湿度测量设备,专门用于确定露点温度,其在湿度检测中扮演着重要的角色。冷镜式精密露点仪在湿度测量量值传递体系中十分重要。冷镜式精密露点仪广泛应用于湿度校准、检定以及相关研究与开发工作,对湿度测量技术的进步与发展做出了重要贡献。

国外研究人员早在20世纪60年代就对冷镜式露点仪测量机理进行了详细研究和分析,明确了光电管电压变化与露点温度的关联逻辑,得出了可以通过控制光电管的电压变化量测量露点温度的方法,并根据热力学方程推导出露层厚度的表达式。同时,国外研究人员对冷镜式露点仪测量过程中的技术难点——过冷水的判断问题也进行了相应的理论研究,并提出了多种解决方案^[1]。

国外生产的冷镜式露点仪制作精良,通常具有较高的测量精确性和良好的重复性能,例如,英国MICHELL公司于1985年推出了Optidew系列冷镜式露点仪,其测量误差不超过 $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,量程覆盖 $-80\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;爱尔兰PANAMETRICS公司1992年生产的DMT242系列露点仪测量误差不超过 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,其采用半导体精准制冷技术实现快速露点响应。瑞士MBW公司2005年推出373数字式高智能冷镜式精密露点仪,其内置ORIS最佳响应注射系统,在量程为 $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时测量误差不超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,成为实验室标准设备的首选;美国General Eastern公司2010年推出M200系列露点仪,其测量误差不超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,量程为 $-90\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$;日本神荣公司2015年生产了DP-70系列露点仪,其测量误差不超过 $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,具备抗恶劣环境干扰能力,广泛应用于工业场景。

20世纪90年代末期,我国研究人员逐步研发

基于冷镜原理的露点仪。近年来,随着国内市场需求的增长和国家政策的支持,国内冷镜式露点仪的研究和生产取得了一定的进展,出现了一批具有自主知识产权和创新能力的企业和产品。思帕奇公司推出的SPD-1000露点仪采用压力法技术,能够实现 $-100\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的露点测量,其具有较高的稳定性、抗干扰能力、适应性,非常适合在天然气、石油气和煤气等相关行业中使用。希尔思仪表公司开发了基于电阻法的HDP-100露点仪,可以测量 $-80\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的露点,且具有高可靠性、高效率、高灵敏度等特点,适用于压缩空气、氮气、氢气等相关测量领域^[2]。国产YH-98精密露点仪基于图像识别技术实现测量,设备中内置显微摄像头对镜面图像进行采集,将采集到的图像进行处理以识别露点。但这款露点仪的露点测量准确度较低,在低温环境下的露点测量误差为 $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。南化集团研究所开发的露点仪,其镜面由镀镍铜棒构成,具有灵敏度高的优点。然而,使用过程中操作人员需密切监控传感器电压变化,并在出现结露时迅速记录露点温度。由于需人工操作,此露点仪的使用便利性有待提高。常州鸿源动力公司研制的HY-0080P-E冷镜式露点仪和北京康高特公司研制的DP-1冷镜式露点仪,测量误差为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,且露点温度的测量量程较窄。

我国科研人员虽然对冷镜式精密露点仪进行了一定的研究,制造了一些成品设备,但是目前国产露点仪的露点测量准确度与国外的露点仪相比仍然有很大的差距。为了解决这个问题,国内的研究人员将研究重心集中在露点仪的比例积分微分控制器(Proportional Integral Derivative, PID)温度控制算法上。2015年,郑州大学的研究人员设计的双光路镜面露点仪,在接收光信号时使用了2个光电传感器,将入射光补偿算法加入露点仪的

软件中^[2]。2020年,华中科技大学的研究人员在露点仪的镜面温度控制中加入了自适应Fuzzy-PID控制算法,以不断调节PID参数,该算法具有较强的自适应性,鲁棒性好,可以增强系统的动态响应特性^[3]。2018年,中国科学技术大学的研究人员将模糊控制算法引入PID参数调节中,通过模糊控制技术更好地调节参数^[4]。2022年,南京信息工程大学的研究人员在冷镜式露点仪的温度控制系统中集成了无线传感网络和神经网络控制算法,该仪器的测量误差不超过 $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,并能实现 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的最低制冷温度^[4]。

对比国内外研究可知,核心差距体现在三个方面:一是国内对露点仪的理论研究深度不足,侧重于控制算法优化,而对凝结物形成机理、生长阶段与光电信号的动态关联研究较少;二是露点特征辨识技术未能突破,国外已实现凝结物生长状态与光电参数的精准匹配,国内仍依赖固定电压变化值进行露点特征辨识,导致敏感性不足;三是测量精度存在差距,国外主流产品的测量准确性高于国内产品。

针对冷镜式精密露点仪光电信号对镜面温度变化不敏感,导致难以确定不同露点温度下最佳的电压变化值,进而影响露点温度测量准确性的问题,本文通过理论分析和梳理冷镜式露点仪的光-温双闭环测量原理、结合热力学条件及光电信号响应机制,明确现有技术中光电信号敏感性不足的核心症结;继而,捕捉不同露点温度下最接近理想露点的镜面状态,解决最佳电压变化值难以确定的问题,采取电子显微镜观测、多工况试验设计、图像特征量化分析等实验手段,系统研究不同露点温度、不同电压变化值下镜面凝结物的生长规律;最后,通过对比试验,验证最优电压变化值选取策略的有效性,为高精度露点仪研制提供技术支撑。

1 冷镜式精密露点仪测量理论基础

1.1 核心测量原理

冷镜式露点仪的核心工作原理是基于光-温双闭环跟踪:当气体通入仪器后,半导体制冷片驱动镜面降温,发光管向镜面发射稳定光线;当镜

面温度降至露点附近时,气体中的水汽在镜面凝结,导致光线从反射态转为散射态,光电接收管检测到电压变化(Δu)并反馈至控制系统,形成光信号闭环;同时,铂电阻实时监测镜面温度,与光信号反馈协同调节半导体制冷片的制冷功率,实现温度闭环控制。双闭环系统的核心目标是跟踪镜面气-液(固)平衡状态,此时的镜面温度即为露点温度。

1.2 结露热力学机理

露点温度的本质是气体中水汽达到饱和相变的临界温度,满足热力学相变平衡条件 $e_s(T_d) = e_a$,其中, $e_s(T_d)$ 为露点温度 T_d 下的饱和水汽压, e_a 为被测气体的实际水汽压。根据Goff-Gratch方程,饱和水汽压与温度的关系为

$$\ln\left[\frac{e_s(T_d)}{e_{s0}}\right] = \frac{L}{R_v}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_d}\right) \quad (1)$$

式中: L 为相变潜热(露为汽化潜热,霜为升华潜热), R_v 为水蒸气比气体常数, e_{s0} 为三相点($0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)饱和水汽压, T_0 为三相点热力学温度(273.16 K)。

冷镜式露点仪的技术核心在于露点辨识,即通过进行光电信号特征参数与露点温度试验,总结出光电信号变化与露点温度之间的关系,选取不同露点温度下最合适的 Δu 值^[5]。理想状态下, Δu 对应镜面首次出现少量凝结物的时刻(即理论露点温度),但现有研究中,光电信号对镜面温度变化的敏感性不足,仅通过单一试验难以精准锁定最优 Δu 值。从结露机理分析,露点温度是镜面上第一批露珠(或冰晶)在凝结核附近生成时的镜面温度,此时凝结物数量少、厚度薄,最接近理想测量状态。

1.3 现有理论的局限性

传统理论基于“光电信号突变即露点”的假设,但未考虑凝结物生长阶段对光电信号的影响:一是未明确 Δu 与凝结物生长状态的对应关系,导致固定 Δu 值无法适配不同露点温度下的相变特性;二是忽略了露与霜的相变差异对光电信号的不同响应,导致低温环境下测量误差增大;三是热力学方程未引入凝结物生长速率修正项,无法量化电压变化与凝结物厚度的动态关联,这也是光电信号敏感性不足的核心理论原因。

2 镜面图像特征分析试验设计

2.1 试验目的

系统研究不同 T_d 、不同 Δu 条件下镜面凝结物的生长状态,提取图像特征参数(凝结物个数、密度),揭示生长规律,确立各露点温度下的最优 Δu 区间。

2.2 试验设备与系统搭建

由于光电信号对镜面温度的变化不敏感,难以选出不同露点温度下的最佳光电信号变化特征参数。为了寻找可进行露点识别的最佳光电信号变化特征参数,更好地判断露点仪在何时达到露点温度,控制镜面的露层厚度尽可能薄。本文使用电子显微镜进行测量,对设备通入同一露点温度的标准气体,设置不同的电压变化量,拍摄电压控制稳定后的镜面状态,并对拍摄得到的图片使用基于图像密度值的露点定量方法进行处理,分析图像的特征。试验设备连接如图1所示。

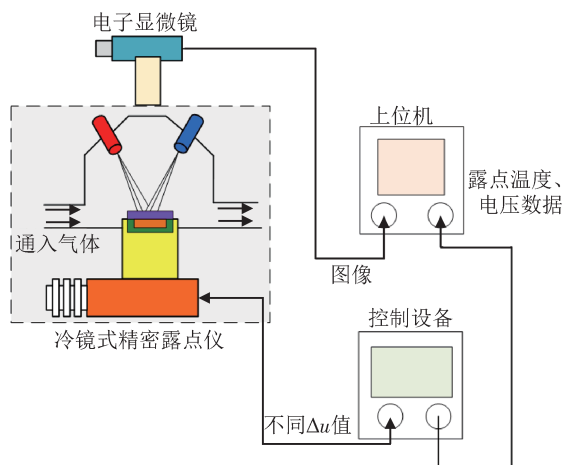


图1 试验设备连接图

Fig.1 Connection diagram of the test equipment

试验中使用的图像采集设备是奥林巴斯的电子显微镜,具备拍照以及视频录制功能,可以对镜面的状态进行实时监测。使用的控制设备是经过改装的宇电控温表,通过该控温表对电压值进行控制。在自主研发的冷镜式精密露点仪冷镜面上方设置了观察窗,电子显微镜通过观察窗采集镜面图像。上位机与电子显微镜和控制设备相连接,以采集试验过程中的露点温度、光电信号电

压值以及镜面图像的试验数据。

2.3 试验方案设计

试验中,选取6个典型露点温度(20、10、5、-20、-30、-40 °C),覆盖露($T_d > 0$ °C)与霜($T_d < 0$ °C)两种凝结形态;每个温度点设置11个 Δu 值(10、20、50、70、100、200、300、400、500、600、700 mV),覆盖凝结物生长的全阶段。

试验开始时,首先打开低霜点湿度发生器,设置露/霜点温度,等待发生器到达设定温度并稳定30 min后,开始进行试验。将标准气(氮气)气瓶接入精密露点仪,确认标准气顺利进入露点仪的气路中后,打开精密露点仪,调节气体流量为0.5~0.8 L/min,然后调节控制设备,设置电压变化值,等待控制设备将电压控制稳定后,使用电子显微镜拍摄镜面图像。在图像采集时,应确保拍摄到的是相同区域的镜面图像,电子显微镜进行图像拍摄时的放大倍数统一设置为2000倍,便于后续进行数据分析和规律总结,每个 T_d - Δu 组合重复3次试验,确保数据可靠性。试验过程中须保持气体压力(0.1 MPa)、流量(0.5~0.8 L/min)、环境温度(25 °C)恒定,避免外部因素干扰。

3 基于图像的凝结物密度值的露点定量方法

在多数情况下,镜面上生成的露珠或冰晶是独立存在的,所以可以使用计算图像区域内凝结物数量的方式对图像进行分析,建立基于图像凝结物密度值的露点定量分析方法。图像预处理计算流程如图2所示。

3.1 图像凝结物个数的计算

使用加权平均法对采集到的图像进行灰度化处理^[6],之后观察图像,如果采集到的图像凝结物是露,将得到的灰度图像使用Otsu(最大类间方差法)自适应二值化阈值算法进行计算并取反^[7]。为了突出图像中需要计算的目标,还要对取反后的图像进行形态学开运算处理^[8-10],之后进行距离变换与分水岭变换^[11-13],将变换后的图像复合叠加并去除图像中的粘连,最后统计目标数量并输出最终结果^[14-16]。加权平均法的灰度化计算公式为

$$G_0 = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (2)$$

式中: G_0 为灰度值, R 为红通道像素值, G 为绿通

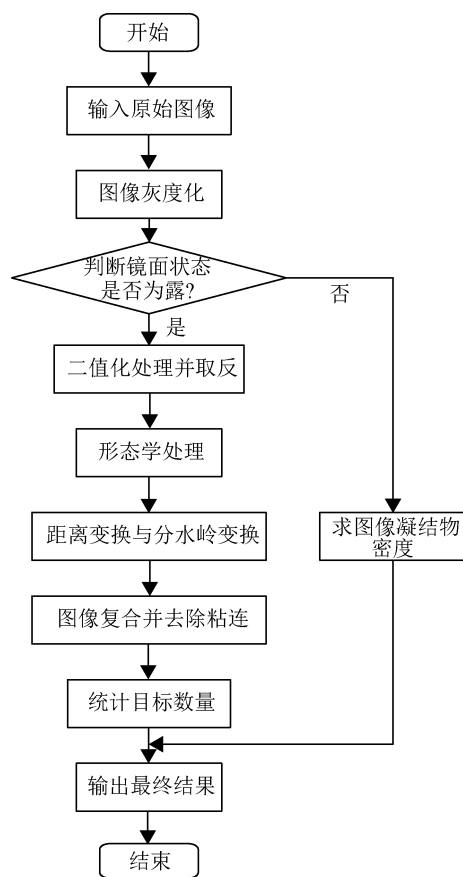


图2 图像预处理计算流程图

Fig.2 Flowchart of image preprocessing calculations

道像素值, B 为蓝通道像素值。

3.2 图像凝结物密度值的计算

在露点温度测量中, 镜面上的凝结物特征分析至关重要。当露点温度高于 0°C 时, 露珠体积通常较小, 且在电压变化较大时, 露层由许多细小露珠紧密连接而成^[17], 这与低于 0°C 时在镜面上形成的独立冰晶有显著差异。露层中露珠个数难以计算, 这会导致测量误差, 使得结果准确性下降, 计算过程也变得更加复杂。

为了更精确地分析镜面图像特征, 本文引入了图像凝结物密度的概念, 即镜面上凝结物面积与镜面总面积的比值。在图像处理过程中, 首先将原始图片转换为灰度图像, 在灰度图像中, 凝结物如露珠或冰晶呈现为黑色, 而未生成凝结物的部分则为白色。通过计算灰度图像中黑色像素数量占总像素数量的比值 ρ , 可以得到镜面上凝结物的生成面积。 ρ 的计算公式为

$$\rho = \frac{N_{\text{black}}}{N_{\text{total}}} \quad (3)$$

式中: N_{black} 为灰度图像中黑色像素数(对应凝结物), N_{total} 为图像总像素数。

对于霜层($T_{\text{露点}} < 0^{\circ}\text{C}$), 需将视场凝结物个数换算为单位面积个数: 电子显微镜放大 2 000 倍时, 视场半径 r 经标定为 $25\text{ }\mu\text{m}$, 视场面积 S 的计算公式如式(4)所示^[18-20]。

$$S = \pi r^2 \quad (4)$$

计算得到 $S = 1\,963.5\text{ }\mu\text{m}^2$ 。设视场中冰晶个数为 N , 则单位面积中个数 N' 计算公式^[21-23]为

$$N' = N/S \quad (5)$$

通过公式(3)至公式(5), 可以计算出镜面凝结物面积占镜面总面积的比值, 这种方法不仅提高了露点温度测量的准确性, 还简化了计算过程。通过对黑色像素的精确计数, 可以有效地避免因为露层的连续性而导致的计数误差。此外, 这种方法还可以应用于不同露点温度下的凝结物特征分析, 无论是露珠还是冰晶, 都能够通过这种方式进行准确的面积计算。这对分析不同电压变化量情况下, 镜面上凝结物的生长状况很有帮助。

4 试验结果分析

4.1 镜面图像分析

在通入的标准气压力和流量保持不变的情况下, 将露点温度设定为 10°C , 改变光电信号的 Δu 值, 通过对结露图像分析, 可以将结露过程分为三个阶段:

第一阶段是露珠生长初始期。此时由于镜面上形成的水膜表面张力的作用, 水膜会在镜面上聚集成露珠^[18]。通过观察可以发现, 露珠在镜面上的生长并不是均匀的, 而是会首先在某个局部区域出现, 这是因为这个区域的镜面上可能存在杂质或者细小的划痕。在这些缺陷区域, 难以清除的杂质和划痕处的棱角起到了露核的作用, 所以露珠会首先在这样的区域内出现。随着电压变化值的增大, 这些区域内的露珠继续生长, 从图像上可以看到露珠在露核周围会逐渐地变多变密, 同时, 在镜面的其他区域基本不存在露珠。露珠生长初期如图3所示。

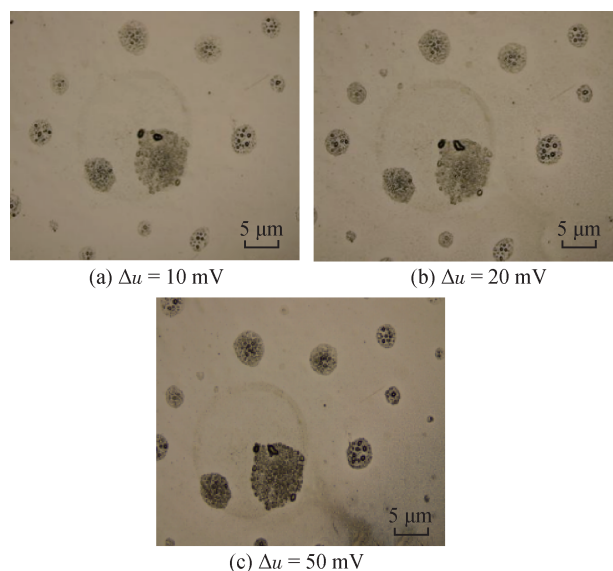


图3 露珠生长初期

Fig.3 The initial stage of dew growth

第二阶段是露珠快速生长期。此时露核周围的露珠数量明显增加，同时，镜面上其他之前未生长露珠的区域也开始出现露珠，随着电压变化值的增大，露珠在镜面上不断地增长，相邻2个露珠之间的距离逐渐减小，最后互相接触而结合，露珠由分散状态变成聚集状态，趋向于形成露层。露珠快速生长期如图4所示。

第三阶段是露层生长期。这时镜面上已经被露珠完全覆盖，形成由一个个露珠相互接触结合的露层，由于镜面上单个露珠生长的空间变得越

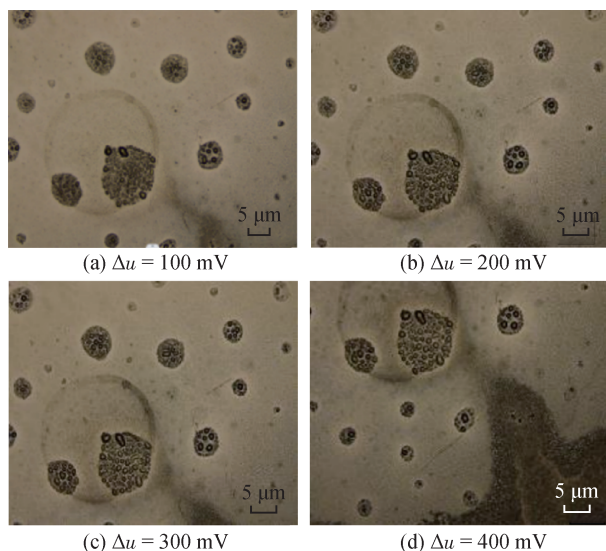


图4 露珠快速生长期

Fig.4 The rapid stage of dew growth

来越小，随着电压变化值的增大，露层厚度不断增加，镜面对光的漫反射越来越大，最终使光电信号的电压值降到最低。露层生长期如图5所示。

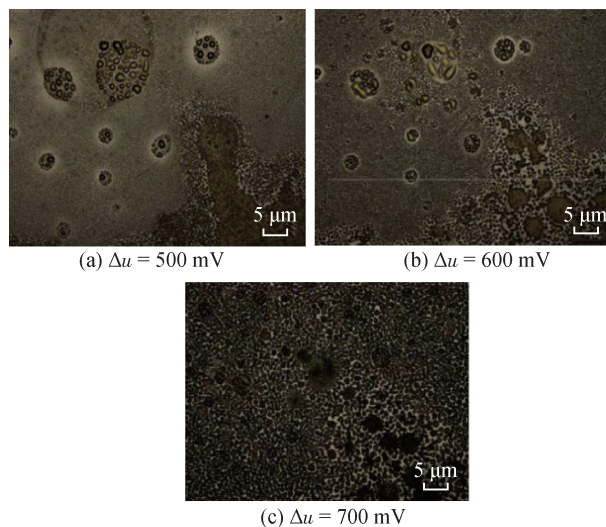


图5 露层生长期

Fig.5 Dew layer growth phase

当露点温度设定在 -20°C ，镜面上的凝结物由露珠转变成冰晶，此时图像反映出的规律与 10°C 时基本一致。

在初始阶段，冰晶会在最易生成凝结物的凝结核周围出现，凝结核仍然是镜面上存在杂质或缺陷的部分，冰晶的大小和个数均不固定，凝结核周围的冰晶可能是许多小冰晶聚集在一起形成的大颗冰晶，也可能是一颗颗大的冰晶。随着电压变化值的增大，冰晶开始在其他容易生成凝结物的凝结核周围出现，凝结核周围的小冰晶汇聚成密集的大颗冰晶，其他位置没有凝结物存在。冰晶生长初始期如图6所示。

随着电压变化值的增大，在镜面上的其他位置也开始出现冰晶，有些位置的冰晶体积较大，有些较小，体积小的冰晶一般会生长在大颗冰晶的缝隙之间，渐渐地，体积较小的冰晶也逐渐增长，相邻的小冰晶开始聚集在一起，在镜面上形成霜层，此时霜层只生长在镜面上的部分区域。冰晶快速生长期如图7所示。

电压变化值越来越大，镜面上可供单颗冰晶生长的区域在逐渐减小，镜面上的冰晶已经连接在一起形成霜层。随着电压变化值增大，霜层也

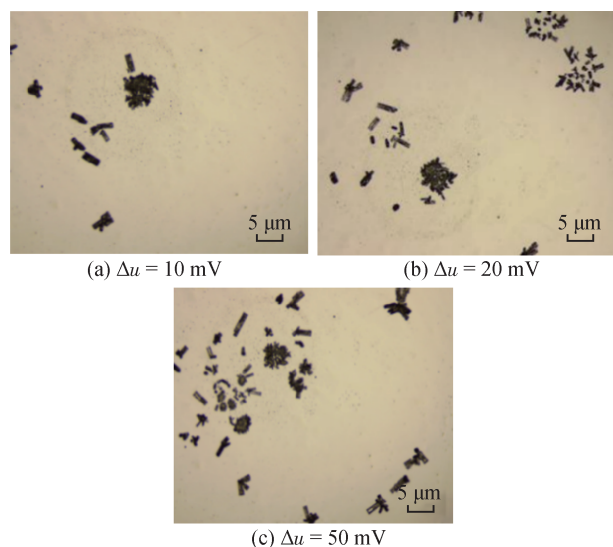


图6 冰晶生长初始期

Fig.6 The initial stage of ice crystal growth

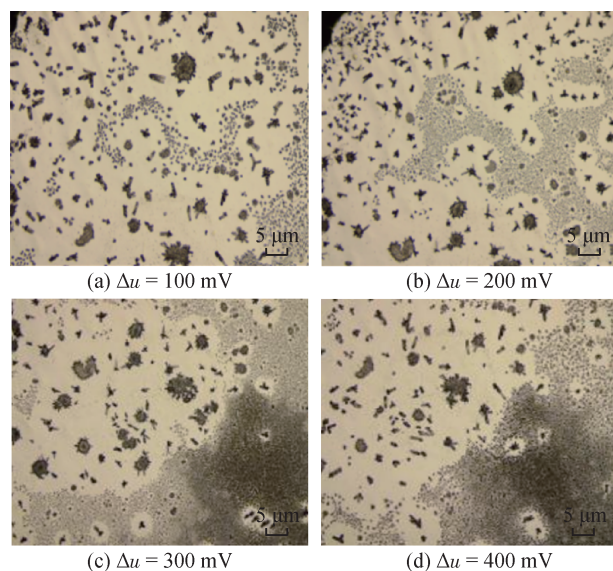


图7 冰晶快速生长期

Fig.7 The rapid stage of ice crystal growth

在不断增厚,直至覆盖整个镜面,此时的电压变化值下降到最低。霜层生长期如图8所示。

随着电压的调整,镜面上凝结物的生成呈现出多样化的趋势。凝结物的形成是一个动态的过程,涉及凝结物生长速率、电压变化以及镜面温度等多个因素的相互作用。在实际应用中,观察和理解凝结物的生成对于控制露点仪的露点测量准确度至关重要,因为它直接关系到设备对湿度变化的响应能力和测量的准确性。通过精细调节电压,可以优化凝结物的生成,从而提高测量结

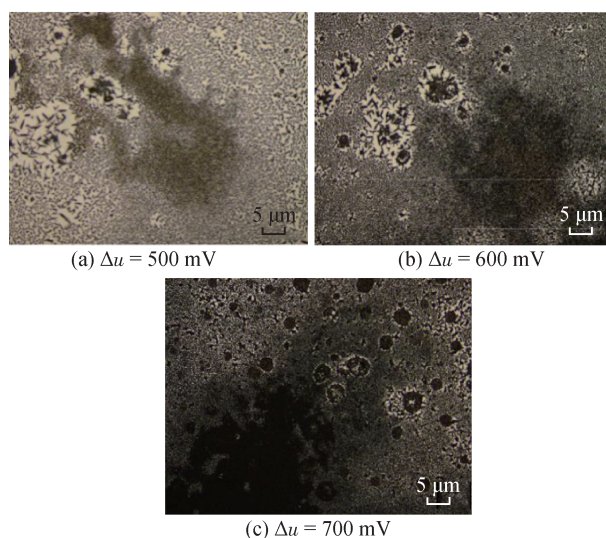


图8 霜层生长期

Fig.8 Frost layer growth phase

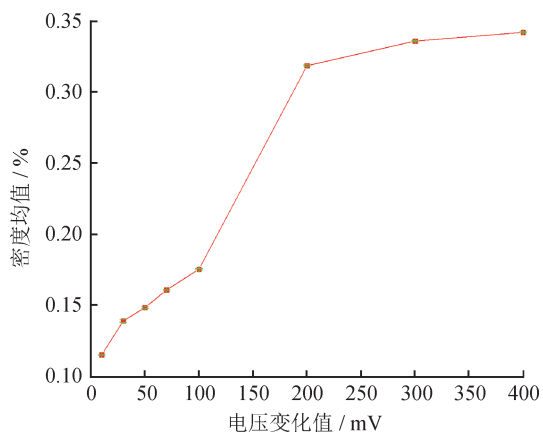
果的可靠性。

可以看出,露点测量的最佳时期在露珠和冰晶生长初期,此时镜面上的凝结物数量少,凝结物只在凝结核周围产生,最接近理论上露点温度下的镜面状态,之前进行的光电信号特征参数试验,选取的电压变化值通常在100~700 mV,此时凝结物的生长已经进入第二和第三阶段,即快速生长期和露/霜层生长期,镜面上的大部分区域都已经有凝结物生成,镜面温度也早已低于露点温度,所以选取这个时候的电压变化值已经失去了意义。

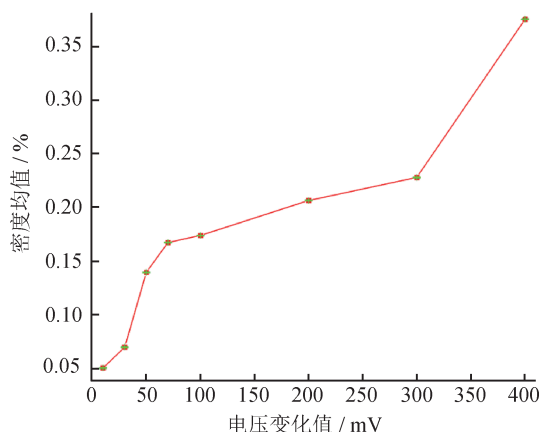
4.2 图像处理数据分析

为了对更多的温度点进行分析,本文使用上述的图像预处理方法,对20、10、5、-20、-30、-40℃露点温度下,电压变化值为10、30、50、70、100、200、300、400 mV时采集到的图片进行数据处理,每个点进行3次重复性试验,计算露点温度在0℃以上时采集图像的凝结物密度值以及露点温度在0℃以下时采集图像镜面上的冰晶个数,计算得到3组数据的平均值与标准差,将计算得到的平均值数据绘制成曲线图,并在每个点的数据处添加误差线,展示同一电压下3组数据的波动范围。

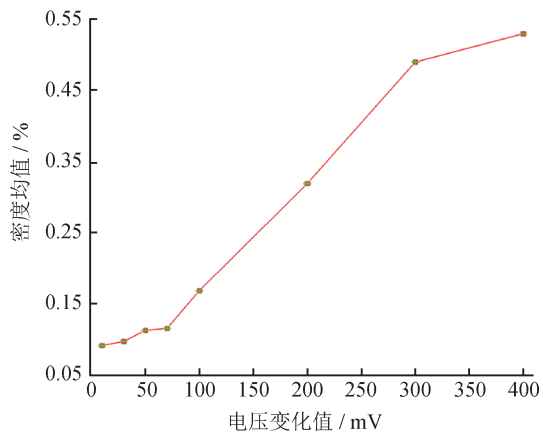
凝结物密度曲线如图9所示。根据图9分析可知:20、10、5℃时的密度曲线均呈现“缓慢增长→快速增长→缓慢增长”的三阶段特征,拐点分



(a) 20 °C时的密度曲线图
(a) Density curve at 20 °C



(b) 10 °C时的密度曲线图
(b) Density curve at 10 °C



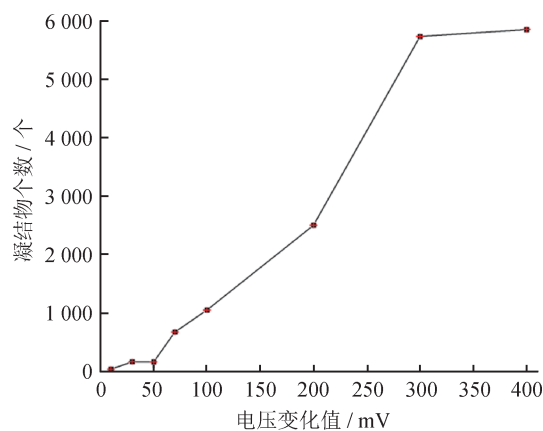
(c) 5 °C时的密度曲线图
(c) Density curve at 5 °C

图9 凝结物密度曲线图

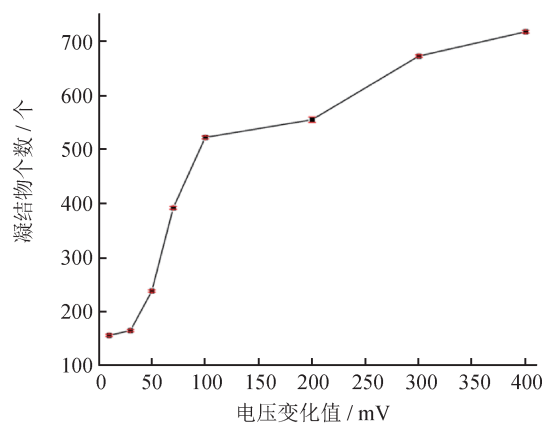
Fig.9 Condensate density curves

别对应 Δu 为50、48、50 mV，与前文中的图像分析结果一致；拐点左侧(初始生长期)密度增长平缓，对应凝结物少、厚度薄的理想状态，即 Δu 最优区间。

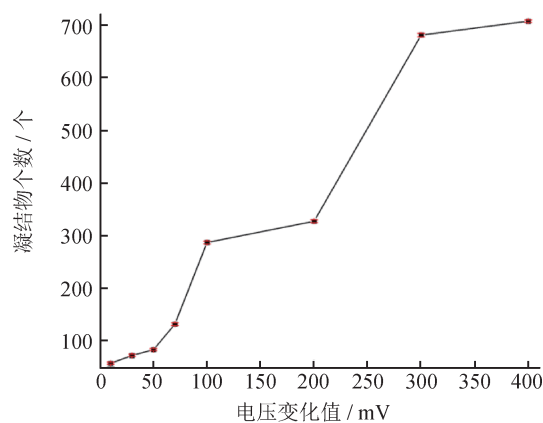
镜面凝结物绘制成的凝结物个数曲线如图10所示，可以看出： -20 、 -30 、 -40 °C时的冰晶个数曲线同样呈现三阶段特征，拐点分别对应 Δu 为42、38、35 mV，拐点左侧为最优 Δu 区间。不同露点温度下 Δu 最优选取区间如表1所示。



(a) -20 °C时的凝结物个数曲线图
(a) Curve of the number of condensates at -20 °C



(b) -30 °C时的凝结物个数曲线图
(b) Curve of the number of condensates at -30 °C



(c) -40 °C时的凝结物个数曲线图
(c) Curve of the number of condensates at -40 °C

图10 凝结物个数曲线图

Fig.10 Curves of the number of condensates

表1 不同露点温度下 Δu 最优选取区间
Tab.1 Optimal selection ranges of Δu at different dew point temperatures

露点温度 / °C	最优 Δu 区间 / mV	对应凝结形态
20	15 ~ 45	露
10	12 ~ 48	露
5	10 ~ 50	露
-20	8 ~ 42	霜
-30	5 ~ 38	霜
-40	5 ~ 35	霜

表2 露点测量准确性试验结果
Tab.2 Accuracy test results for dew point measurement

单位: °C				
标准露点温度	本文方法测量值	传统方法测量值	本文方法误差	传统方法误差
14.9	14.8	13.5	-0.1	-1.4
0.1	-0.1	-1.8	-0.2	-1.9
-9.9	-10.2	-11.9	-0.3	-2.0
-25	-25.3	-26.8	-0.3	-1.8
-35.1	-34.9	-36.5	+0.2	-1.6

6 结论

梳理国内外冷镜式露点仪的研究现状与技术差距,明确国内研究多聚焦于温度控制算法优化,而对凝结物形成机理、露点特征辨识等核心问题关注不足的现状,确立了从镜面凝结物生长规律入手以提升冷镜式露点仪测量准确性的研究方向。开展了镜面图像特征分析试验,利用电子显微镜采集不同露点温度和不同 Δu 值下的镜面图像,设计了包含灰度化、Otsu 自适应二值化、形态学处理、凝结物密度与个数统计的图像特征量化分析方法,对试验图像和数据进行深入分析,揭示凝结物生长的三阶段规律,锁定初始生长期为最接近理想露点温度的测量时机。在此基础上,明确不同露点温度下的 Δu 最优选取区间。利用本文选取的最优 Δu 区间和传统固定 Δu 值进行对比试验,验证了本文研究成果的有效性。

核心结论如下:

5 露点测量准确性试验

为验证最优 Δu 区间的实际效果,设计对比试验。选取5个标准露点温度(15、0、-10、-25、-35 °C),分别采用本文最优 Δu 区间、传统固定 Δu (300 mV)进行测量,对比瑞士 MBW 373 标准露点仪的测量结果,计算相对误差。露点测量准确性试验结果如表2所示。本文方法的测量误差不超过 ± 0.3 °C,测量准确性显著优于传统方法,表明本文选取的最优 Δu 区间可有效提升露点测量准确度。

1) 露点测量的最优时机为凝结物初始生长期,对应 Δu 最优区间(20 °C: 15 ~ 45 mV; 10 °C: 12 ~ 48 mV; 5 °C: 10 ~ 50 mV; -20 °C: 8 ~ 42 mV; -30 °C: 5 ~ 38 mV; -40 °C: 5 ~ 35 mV),该区间内镜面状态最接近理想露点温度;

2) 基于最优 Δu 区间的测量方法显著提升了露点测量准确度,解决了光电信号对镜面温度变化不敏感的问题;

3) 本文提出的图像特征量化方法与最优 Δu 选取策略,为高精度冷镜式精密露点仪的研制提供了关键技术支撑,可推广至工业计量、航空航天等高精度湿度测量场景。

参考文献

[1] 孙文慧. 基于微型制冷机的冷镜式露点仪研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
SUN W H. Research on cold mirror dew point instrument based on micro refrigerator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

- [2] 李亚萍. 双光路镜面露点仪的研制[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- LI Y P. The design of mirror dew point instrument with double light path[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015. (in Chinese)
- [3] 李庆辉, 王晓蕾, 赵世军, 等. 基于凝结物覆盖率的露点仪自适应 PID 温控算法[J]. 测控技术, 2020, 39(7): 98-102.
- LI Q H, WANG X L, ZHAO S J, et al. Adaptive PID temperature control algorithm of dew point meter based on condensate coverage[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(7): 98-102. (in Chinese)
- [4] 高雅. 冷镜式精密露点仪露点辨识方法研究[D]. 北京: 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 2024.
- GAO Y. Research on dew point identification method for chilled-mirror precision dew point hygrometer[D]. Beijing: AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, 2024. (in Chinese)
- [5] 聂晶, 刘曦. 露点温度传感器发展趋势综述[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 43-59.
- NIE J, LIU X. Review of the development trends of dew point temperature sensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 43-59. (in Chinese)
- [6] 高雅, 王毅, 胡艳青, 等. 冷镜式精密露点仪光电信号特征参数试验研究[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 121-126.
- GAO Y, WANG Y, HU Y Q, et al. Research on testing photoelectric signal characteristic parameters of cold mirror precision dew point meter[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 121-126. (in Chinese)
- [7] 许贵强. 基于机器视觉的红枣分拣系统研究[D]. 西安: 西京学院, 2023.
- XU G Q. Research on jujube sorting system based on machine vision[D]. Xi'an: Xijing University, 2023. (in Chinese)
- [8] 申铨京, 刘翔, 陈海鹏. 基于多阈值 Otsu 准则的阈值分割快速计算[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 144-149.
- SHEN X J, LIU X, CHEN H P. Fast computation of threshold based on multi-threshold Otsu criterion[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(1): 144-149. (in Chinese)
- [9] LIU R, DAI W, WU C, et al. Deep learning-based microscopic cell detection using inverse distance transform and auxiliary counting[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2024, 28(10): 6092-6104.
- [10] 刘聪, 董文飞, 蒋克明, 等. 基于改进分水岭分割算法的致密荧光微滴识别[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 783-790.
- LIU C, DONG W F, JIANG K M, et al. Recognition of dense fluorescent droplets using an improved watershed segmentation algorithm[J]. Chinese Optics, 2019, 12(4): 783-790. (in Chinese)
- [11] 丁永军, 张晶晶, LEE W S, 等. 小波变换与分水岭算法融合的番茄冠层叶片图像分割[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 32-37.
- DING Y J, ZHANG J J, LEE W S, et al. Segmentation of tomato leaves from canopy images by combination of wavelet transform and watershed algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 32-37. (in Chinese)
- [12] JOALLAND S, SCREPANTI C, GAUME A, et al. Below-ground biomass accumulation assessed by digital image based leaf area detection[J]. Plant and Soil, 2016, 398(1): 257-266.
- [13] 莫雨洁. 基于分水岭技术的图像分割算法研究与实现[J]. 信息通信, 2020, 33(3): 59-60.
- MO Y J. Research and implementation of image segmentation algorithm based on watershed technology[J]. Information & Communications, 2020, 33(3): 59-60. (in Chinese)
- [14] TIAN H, ZHENG Y F, JIN Z Z. Improved retinanet model for the application of small target detection in the aerial images[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 585(1): 012142.
- [15] 刘进芬, 倪晓波, 李永博. 基于图像分割的医学细胞图像增强算法研究[J]. 物联网技术, 2023, 13(2): 40-41.
- LIU J F, NI X B, LI Y B. Research on medical cell image enhancement algorithm based on image segmentation[J]. Internet of Things Technologies, 2023, 13(2): 40-41. (in Chinese)
- [16] WU Z F, SHEN C H, VAN DEN HENGEL A. Wider or deeper: revisiting the resnet model for visual recognition[J]. Pattern Recognition, 2019, 90: 119-133.
- [17] 李英干. 湿度测量[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- LI Y G. Moisture measurement[M]. Beijing: China Me-

- teorological Press, 1990. (in Chinese)
- [18] OLIVEIRA E M, FERREIRA E C, GOMES NETO J A, et al. Raman spectroscopy coupled to high-resolution continuum source flame molecular absorption spectrometry for sequential determination of nitrogen species in fertilizers [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 283: 121737.
- [19] 徐梅. 基于阈值和分水岭算法对白细胞图像分割的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- XU M. Research on white blood cell image segmentation based on threshold and watershed algorithm[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [20] CAMACHO - FERNÁNDEZ C, HERVÁS D, RIVAS - SENDRA A, et al. Comparison of six different methods to calculate cell densities [J]. *Plant Methods*, 2018, 14 (1): 30.
- [21] ZHANG M H, GU L G, ZHENG P H, et al. Improvement of cell counting method for Neubauer counting chamber [J]. *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, 2020, 34 (1): 23024.
- [22] 肖红, 杨本胜. 基于机器视觉的数字图像处理系统设计[J]. *电子技术与软件工程*, 2021, 10(16): 81-82.
- XIAO H, YANG B S. Design of digital image processing system based on machine vision[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2021, 10(16): 81-82. (in Chinese)
- [23] TAREEF A, SONG Y, FENG D G, et al. Automated multi-stage segmentation of white blood cells via optimizing color processing [C]// 2017 IEEE 14th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2017), Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2017: 565-568.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一/通信作者: 高雅(1999—), 女, 工程师, 主要研究方向为湿度测量测试技术。