

露点测量采样管不同材质的比较研究

张琳 吴龙海 吴志强 熊玉林

连云港太瓦新能源有限公司 江苏 连云港 222000

摘要：准确测量气体的露点对于工业过程控制和产品质量保证至关重要。管材的选择在露点测量系统中扮演着重要角色，其中聚氨酯（PU）管被广泛使用，但半导体厂务实践中发现测量不准现象。本研究从微观角度分析了PU管、尼龙管、特氟龙管对露点测量准确性的影响。通过考察三种材料的微观结构、表面特性以及它们与水蒸气分子间的相互作用，揭示了不同材质管材在露点测量中的作用机制。实验结果表明，PU管和尼龙管在微观层面的差异导致了不同的露点测量响应，这些差异归因于材料表面的微观粗糙度、化学官能团以及吸附-脱附行为的不同。本研究为精确露点测量提供了材料选择的科学依据。^[1]

关键词：露点测量；聚氨酯管；尼龙管；水蒸气吸附；半导体厂务

1 露点温度

露点温度是指气体达到饱和状态并开始凝结出水珠的温度。准确的露点测量对于确保工业过程中的质量管理至关重要，比如半导体工业中，广泛使用洁净压缩空气（CDA）通入伯努利吸盘，CDA会吹向硅片，露点差的CDA会造成硅片表面潮解失效。用于露点测量的采样管是连接测量仪器和被测系统的重要介质，其物理和化学性质直接影响测量结果的准确性。PU管和尼龙管由于它们的机械性能和化学稳定性，通常用于构建测量系统。本研究旨在从微观角度探讨这两种材料在露点测量中的具体影响。^[2]

2 压力露点和常压露点

压力露点和常压露点都是描述空气中水蒸气饱和的概念，压力露点（也称为相对湿度，或者冷却露点）：是指空气在特定压力下饱和和后凝结成露水所需的温度。当空气温度降低到与该温度相等时，水汽就开始凝结为露水。常压露点（也称为露点温度）：是指在标准大气压下，空气中所含水汽在降温时饱和形成露水的温度。常压露点通常用来描述相对湿度的程度，当空气中所含水汽量增加时，常压露点也会增加。

3 实验方案

3.1 测量方式：采用对照实验；

3.2 测量介质：CDA，通过吸附塔干燥；

3.3 测量传输介质：PU管，尼龙管、特氟龙管（采样管、采样阀洁净、干燥）；

3.4 测量仪器：一种用于测量压力露点的仪器；一种用于测量常压露点的仪器（测量仪器检定合格并在检定有效期内）^[3]；

3.5 实验步骤：

（1）第一次测量，控制变量为进气管95%以上为尼龙管，管道长度2 m。

（2）第二次测量，控制变量为进气管95%以上为PU管，管道长度2 m。

（3）第三次测量，控制变量为进气管95%以上为PU管，管道长度3 m。

三组实验都连续测量24 h后记录常压露点和0.7 MPa下的压力露点数据。考虑到吸附塔的A、B塔吸附再生情况，截取开始测量12 h后的有效数据，时长8 h，每5 min记录一次。^[4]

4 实验结果

测量24 h后，常压露点与压力露点数据如表1所示。

表1 常压露点与压力露点数据对比表

常压露点					
第一组实验		第二组实验		第三组实验	
AVERAGE (°Ctd)	-71.02	AVERAGE (°Ctd)	-67.01	AVERAGE (°Ctd)	-61.43
MAX (°Ctd)	-67.7	MAX (°Ctd)	-62.4	MAX (°Ctd)	-53.8
MIN (°Ctd)	-72.4	MIN (°Ctd)	-71.3	MIN (°Ctd)	-62.3
极差	4.7	极差	8.9	极差	8.5
压力露点					
AVERAGE (°Ctd)	-42.3	AVERAGE (°Ctd)	-42	AVERAGE (°Ctd)	-41.1
MAX (°Ctd)	-41.1	MAX (°Ctd)	-39.9	MAX (°Ctd)	-39.2
MIN (°Ctd)	-43.2	MIN (°Ctd)	-42.8	MIN (°Ctd)	-41.1
极差	2.1	极差	2.9	极差	1.9

极差：最大值与最小值差额的绝对值

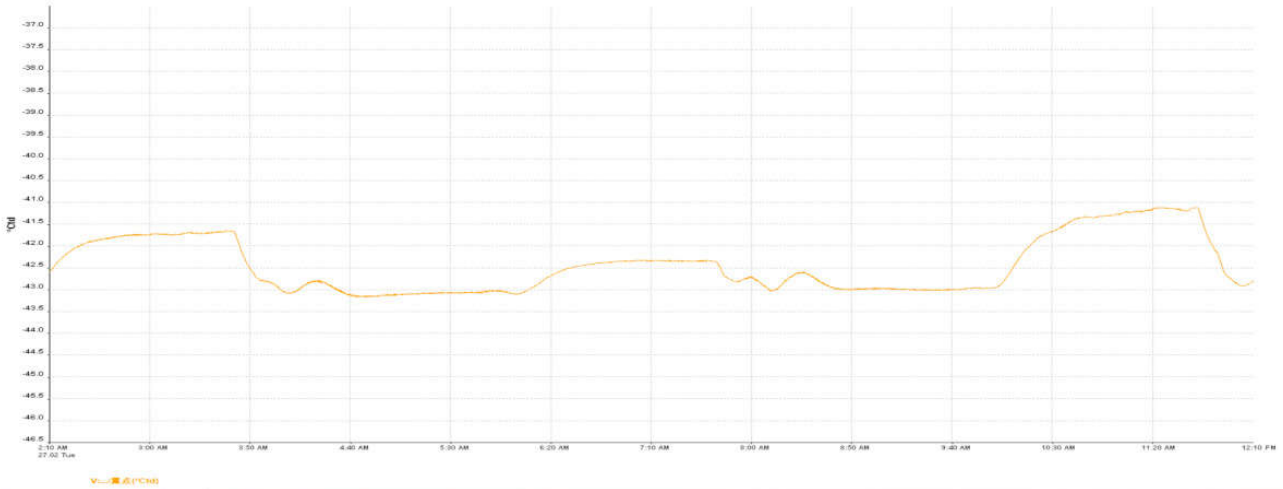


图1 实验一压力露点测量曲线图

实验二常压露点监测曲线图

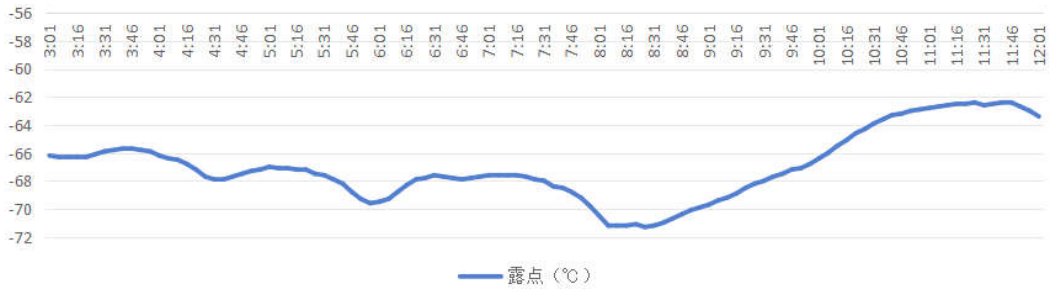


图2 实验二压力露点测量曲线图

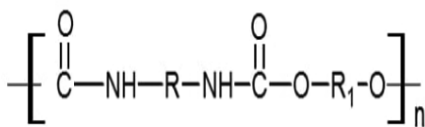
从实验结果来看:

- (1) 使用压力露点进行测量能准确地反应出A、B塔之间的切换时间;
- (2) 对于常压露点而言, 从尼龙管换成PU管之后露点开始变差, 增加1米的PU管长度后露点平均值再次升高了5.58 °Ctd;
- (3) 当使用PU管测量常压露点, 极差变小, 说明管道越长, 测量气体的精度更不达标, 数值变化趋于稳定;
- (4) 对于压力露点而言, 从尼龙管换成PU管之后露

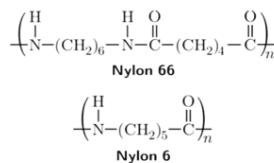
点变化较小。^[5]

5 现象分析

PU管是POLYURETHANE TUBING的英文简称, 主要成分为聚氨酯全名为聚氨基甲酸酯。这种PU管以其卓越的性能而受到广泛应用, 它展现出了极佳的耐高压、抗振动、耐腐蚀、耐磨损、耐气候和耐曲折的特性。这些优点使得PU管在合成皮革、弹性体和涂料等领域中得到了广泛的应用。



a、聚氨酯分子结构



b、尼龙66与尼龙6分子结构



c、特氟龙分子结构

图3 聚氨酯、尼龙、特氟龙分子结构

从聚氨酯的分子式中可以看到其中具有-COO-基团也称作酯键。酯键是由羧基-COOH与羟基-OH脱水缩合而

成(如图3-a)。同时也具有尿素键的特点, 尿素键是一种由碳、氮、氧、氢组成的有机化合物, 尿素键是由异

氰酸酯和胺基反应形成的。这种结构使得聚氨酯具有优异的弹性和耐磨性，广泛应用于合成皮革、弹性体和涂料等领域。

物体的亲水性是指分子能够通过氢键与水形成暂时的键结的物理性质。由于热力学上的原因，这样的分子不仅能溶解在水中，也能溶解在其他极性溶液里。尿素中含有的酰胺基(-NH₂)和羰基(C=O)都可以作为氢键的供体或受体，与水分子形成氢键。因此，尿素及其衍生物通常表现出良好的亲水性。

相比之下，尼龙的分子结构主要由酰胺键组成。酰胺键虽然不是很强的氢键供体(HBD)或氢键受体(HBA)，酰胺键可以通过形成氢键与其他分子相互作用(如图3-b)。然而，这些氢键相对较弱，特别是当与水分子形成氢键时，且由于亚甲基或芳基的存在，整体上尼龙表现出疏水性。亚甲基/酰氨基的比例越大，分子间作用力越小，吸水性越小，从而增强了疏水性。

此外对比特氟龙管的材质主要成分为聚四氟乙烯，它由重复的-(CF₂-CF₂)_n-单元组成，其中碳和氟原子之间形成了非常稳定的共价键(如图3-c)。

氟是所有元素中电负性最强的，这意味着它对电子的吸引力非常大。在特氟龙的分子结构中，氟原子与碳原子紧密相连，形成了非常稳定的结构。这使得水分子很难与特氟龙分子形成氢键。这种结构使得特氟龙分子之间的相互作用力非常小，从而降低了其表面能，使得水和其他液体难以在其表面上扩散或吸附。因此特氟龙表现出疏水性。此外，特氟龙也表现出疏油性。

使用特氟龙管道对压缩空气进行常压露点检测，控制变量为进气管95%以上为特氟龙管，长度分别为10米、20米。考虑到吸附塔的A、B塔吸附再生情况，截取开始测量12 h后的有效数据，时长8 h，每5 min记录一次。测试数据如表2所示。

表2 常压露点10米、20米特氟龙管露点数据对比

常压露点			
10米长特氟龙管		20米长特氟龙管	
AVERAGE	-72.71	AVERAGE	-72.20
MAX	-71.6	MAX	-71.8
MIN	-73.3	MIN	-72.7
极差	1.7	极差	0.9

从两组对照实验来看20米以内的特氟龙管道对测量

常压露点数据无较大影响。

结论

当我们在进行压缩空气、氮气的露点测量时，应优先考虑采用特氟龙管道，其次为尼龙管道，尽量避免使用PU管，以确保结果的精确性和可靠性。在进一步探讨这些管道材料在露点测量中的应用时，我们不得不提到它们各自在特定环境下的性能表现。首先，PU管由于其亲水特性，容易吸收周围空气中的水蒸气，这在一定程度上改变了管道内部环境的湿度，从而对露点的准确测定造成干扰。尤其是在需要高精度测量的场合，这种影响可能更加明显。

特氟龙管道凭借其优异的疏水性和化学稳定性，成为了露点测量的理想选择。特氟龙管道不仅能够有效防止水分和其他液体的吸附，还能在极端化学环境下保持稳定，不受到化学腐蚀的影响。这些特点使得特氟龙管道在需要高精度、高可靠性的露点测量场合中，成为了不可或缺的选择。

除了特氟龙管道和尼龙管道外，还有其他一些材料也被用于露点测量中。例如，不锈钢管道在某些特定场合下也表现出良好的性能。但是，不锈钢管道的成本相对较高，且在一些化学环境中容易受到腐蚀，因此在选择时需要综合考虑各种因素。

在GB/T5832.2-2016 4.2.8中有说明测量时连接管线可采用不锈钢管或聚四氟乙烯管。高精度露点仪的测定池及气路管线等均应采用内抛光材料。

参考文献

- [1] 谢海金. (2006). 露点仪在压缩空气湿度测量中的应用. 安徽化工, 32(5), 3.
- [2] Sionkowska, A., & Urbanczyk-Lipkowska, Z. (2019). Polyurethane materials: Structure, properties and applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(4), 1134-1155. doi: 10.1007/s10924-018-1136-x
- [3] Oertel, G. F. (Ed.). (2016). *Polyamides: Structure, Properties, and Applications*. Hanser Publications.
- [4] Scheirs, A., & Long, J. (Eds.). (2003). *Fluoropolymers*. Wiley-VCH.
- [5] McConnell, R. E. (2018). *Compressed Air and Gas Handbook (6th ed.)*. Gulf Publishing Company.