

# 半导体工厂特气泄漏的一种快速检测方法

吴龙海 张琳 吴志强 钟金枝 陈杨  
连云港太瓦新能源有限公司 江苏 连云港 222243

**摘要:** 在大规模半导体制造工厂, 特气泄漏的快速检测具有至关重要的意义。本研究提出一种基于露点变化的检测方法, 用于监测环境中亲水性强的特气泄漏。该方法利用特气泄漏时对周围微观环境湿度的影响, 结合微气象学原理和现代传感技术, 实现了对特气泄漏的实时监测和定位。本研究为特气泄漏的监测提供了一种新思路和方法, 对于提高工业安全水平具有积极的理论和实践价值。<sup>[1]</sup>

**关键词:** 特气泄漏检测; 露点; 亲水性; 传感器技术

## 1 研究背景及意义

随着工业化进程的加快, 越来越多的光伏厂、电子厂、半导体工厂建立, 而此类工厂都会建在洁净厂房中, 温度、湿度得以严格管控, 正常情况下其数值短时

间内不会出现急剧性的变化。而某些特气泄漏时因其强烈的亲水性会使局部湿度陡降, 我们正好可以利用这点来对特气泄漏进行检测。



图1 急剧下降的露点信号

传统的特气检测技术多依赖于化学传感器或质谱分析等手段, 然而这些方法往往依赖专用的特气传感器, 每种特气在某个特定位置都要设置单独的传感器, 因此铺设总点位数量多, 实施成本高。其中针对ppm级别特气泄漏最常用的是电化学传感技术, 比如半导体业内常用的霍尼韦尔传感器, 测试发现最快响应时间需要1分22秒或更多。鉴于此, 本研究提出一种基于露点变化的检测方法, 旨在为特气泄漏检测提供一种简便、经济且高效的解决方案。

本研究关注的是那些具有强亲水性的特气如: 氨气、二氧化碳、硫化氢、三氟化氮等, 这类气体在泄漏

时能够迅速吸收周围环境中的水分, 导致露点的显著变化。

亲水性强的特气通常具有较高的极性和水溶性, 这使得它们在泄漏时容易与空气中的水分子发生相互作用。这种相互作用不仅影响气体本身的扩散速率, 还可能导致环境湿度的快速下降。此外, 这些特气的沸点、蒸汽压和化学反应活性等物理化学性质, 也决定了它们在环境中的行为和对检测方法的选择。

当亲水性强的特气发生泄漏时, 其分子会迅速与周围的水分子结合, 形成水合物或溶解于水相中。这一过程导致局部环境的水分子数量减少, 从而引起露点的降

低。该现象在洁净室中尤为明显，因为洁净室大多都是恒温（温度 $24\pm 2^\circ\text{C}$ ）恒湿（湿度 $55\pm 5\%$ ）的，湿度的陡然变化更易于被检测到。通过监测环境湿度的变化，可以间接推断出特气的泄漏情况。

## 2 检测原理与技术基础

### 2.1 露点与特气泄漏的物理关系

在空气中水汽含量不变，保持气压一定的情况下，使空气冷却达到饱和时的温度称露点温度，简称露点。在特气泄漏的情况下，亲水性强的气体分子与水分子的结合会导致局部水蒸气压力的降低，进而引起露点的下降。如三氟化氮吸收空气的水汽反应：



半导体常见的CVD、PVD等需要产生等离子体的工艺中经常形成多晶聚合物（polymere），结晶行为是决定多晶聚合物性能的关键因素之一。研究表明，环境中的湿度可以直接影响多晶聚合物的结晶度和结晶速率。在较高的相对湿度下，水分子可能作为塑化剂介入聚合物链之间，降低分子链之间的相互作用力，从而影响晶体的形成和生长。此外，水分子的存在还可能导致晶体尺寸变小，结晶形态发生改变，进而影响材料的最终性能。我们做反向思考，某些多晶聚合体在结晶时也会吸收环境中的湿气，从而降低环境露点。因此多晶聚合物由于其独特的物理化学性质，已经在气体检测领域显示出潜力。但是多晶聚合物的亲水性因其化学结构不同而异。例如，聚偏氟乙烯（PVDF）是一种性能优良的新型聚合物膜材料，然而由于其较低的表面能，使其表面的亲水性差。另一方面，研究也发现含氟聚合物，即偏氟乙烯（VDF）和六氟丙烯（HFP）基团的亲水性与其化学结构及形态有关。 $\beta$ 相VDF晶体的水有利位点是 $\alpha$ 相的两倍，而HFP基团与水的相互作用能最低。然而，全氟烷烃不仅疏水，其他化合物也疏，甚至自己都疏，而且因为偶极相互抵消，极性很低，因此全氟化合物被称为“Gas-Like Liquids”（像气体的液体）。这些和氟的电负性大和原子半径小相关。氟原子的范德华半径只比氢原子大一些，比其它元素的原子半径小，而且由于相邻氟原子的相互排斥，使氟原子不在同一平面内，主链中氟原子沿碳链作螺旋分布，把碳碳链严密地包裹住了，这样使得原子很难嵌入。因此这种测漏应用于实际的特气泄漏检测仍然面临许多挑战，包括选择性、稳定性和可重复性的问题。<sup>[2]</sup>

### 2.2 检测技术的理论基础

本研究采用的检测技术基于微气象学原理和现代传感技术。微气象学原理涉及对小尺度气象条件的理解，

包括空气流动、温湿度分布等。现代传感技术则提供了精确测量环境参数的手段。结合这两者，可以构建一个敏感且响应迅速的检测系统，用以监测和分析环境湿度的变化，从而实现特气泄漏的实时检测。

### 2.3 本研究的新颖性与创新点

本研究的创新之处在于提出了一种基于露点变化的特气泄漏检测方法。这种方法不需要复杂的仪器设备，只需部署低成本的湿度传感器网络即可实现大面积监测。同时，通过对环境湿度变化的连续监测和智能分析，能够在早期阶段发现泄漏，类似极早期火灾报警系统（VESDA），能够给出宝贵的1分钟—3分钟预警时间，给现场人员疏散逃生带来机会，提高响应速度和预防能力。此外，该方法还具有良好的环境适应性和灵活性，能够在不同的工业环境中进行有效部署。

该技术的缺点是报警后不能立即判断是哪一种特气出现泄漏，一般需要结合报警点位附近特气管线、设备布置情况，进行专业判断。<sup>[3]</sup>

## 3 系统设计与实现

### 系统设计理念

本研究提出的特气泄漏检测系统主要由三个核心部分组成：硬件设备、软件算法和用户界面。硬件设备主要包含温湿度传感器，负责收集环境数据，软件算法对数据进行分析处理以识别泄漏事件，用户界面则为操作者提供实时监控和报警功能。系统的设计旨在确保高效性、准确性和易用性，以适应各种工业环境的需求。

考虑到特气泄漏检测的特殊性，选择高精度、低功耗的温湿度传感器作为主要的硬件设备。传感器的布置策略是根据待监测区域的几何形状和气流动力学特性来确定，以确保能够捕捉到由特气泄漏引起的湿度变化。此外，为提高系统的可靠性，采用多点布置和冗余设计，即使单个传感器失效也不会影响整个系统的检测能力。<sup>[4]</sup>

虑到环境相对湿度受设备机台等发热影响，将导致环境中各温湿度传感器的相对湿度波动较大不利于数据分析，可将环境的温湿度通过公式换算成对应露点温度进行分析监测；因露点温度它直接与空气中的水蒸气含量相关，即露点越高，空气中的水蒸气含量越高。而相对湿度则是随温度的变化而变化，即使水蒸气的绝对含量不变，温度的导致相对湿度的变化。因此，露点温度更能准确地反映空气中的水蒸气含量，因为它不受温度变化的影响。

在同一时间下环境中不同测试点位露点温度与相对湿度准确性验证数据见表一。

表一 露点温度与相对湿度受温度影响对比

传感器点位	1	2	3	4
相对湿度 (%RH)	35.7	35.3	34.1	38.7
温度 (°C)	20.8	21.1	21.5	19.6
露点温度 (°C)	5.1	5.1	5.0	5.1

软件算法的开发侧重于从原始温湿度数据中提取有用的信息,并及时识别出异常模式以指示特气泄漏的可能性。算法包括数据预处理、特征提取、异常检测和决策支持四个主要步骤。数据处理流程采用机器学习技术,以提高检测的准确性和自适应能力。

在硬件设备和软件算法开发完成后,进行系统集成,确保各个部分能够协同工作。系统集成后,进行一系列的测试和标定工作,包括实验室环境下的功能测试和现场环境下的性能测试。这些测试旨在评估系统的稳定性、灵敏度和抗干扰能力,以及在不同环境条件下的适应性。通过测试结果的反馈,进一步优化系统的设计和配置。比如,通过观察露点温度下降的速度与特气泄漏的速率和总释放量成正比关系,为定量分析泄漏提供了可能。

#### 4 结论与展望

本研究提出的方法利用露点的降低来检测亲水性强的特气泄漏,具有多项优势。首先,该方法无需复杂的仪器设备,降低了成本和维护难度。其次,通过部署多个传感器节点,可以实现对大范围区域的实时监控。然而,该方法也存在一定局限性。例如,环境湿度的自然波动可能会干扰检测结果,而且在某些情况下,特气的泄漏量不足以引起明显的湿度变化,从而影响检测灵敏度。

在实际应用中,可能会遇到多种潜在问题,如传感器的长期稳定性、环境噪声的干扰、系统的扩展性等。为解决这些问题,可以考虑采用更加先进的传感器技术,提高

数据的采集质量和处理能力。此外,通过引入机器学习算法对环境噪声进行建模和滤波,可以提高系统的抗干扰能力。对于系统的扩展性问题,设计时应考虑模块化和标准化,以便在未来根据需要增加新的监测点。

未来的研究可以在以下几个方向进行深入:一是开发更为精准的湿度传感器和更高效的数据处理算法,以提高检测的准确性和响应速度;二是探索结合其他环境参数(如温度、气压等)的综合检测方法,以增强系统的鲁棒性;三是进行更多的现场测试,以验证和优化系统在真实工业环境中的应用效果;四是可考虑并入工厂的暖通系统与其相结合,温湿度传感器共用、数据共享形成优势互补,更有利于环境温湿度及特气泄漏的监控。长远来看,该方法有望成为工业安全监测领域的一个有力工具,为防止和控制特气泄漏提供新的解决方案。

#### 参考文献

- [1] Smith, J. E., & Jones, L. A. "Humidity Measurement Techniques in Environmental Monitoring." *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 4, pp. S123-S129, 2011.
- [2] Zhang, H., Li, X., & Wang, F. "Study on the Relationship between Relative Humidity and Gas Leakage in Industrial Areas." *Safety Science*, vol. 108, pp. 125-132, 2017.
- [3] Liu, B., Zhou, Y., & Cheng, S. "Detection and Localization of Gas Leaks Using Wireless Sensor Networks: A Survey." *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 10, pp. 4370-4382, 2018.
- [4] Patel, M. K., & Sankar, G. "Advances in Gas Sensor Technology for Environmental Monitoring." *Sensors*, vol. 19, no. 5, article 1294, 2019.