

# 气体传感器在环境检测应用中的研究进展

王天翔<sup>1\*</sup>, 丁艳巧<sup>2</sup>

(1. 四川航天计量测试研究所, 成都 610100; 2. 西华大学电气与电子信息学院, 成都 610039)

**摘要:** 日益严峻的环境问题对气体检测技术提出了更高的要求, 高效、精准和实时的气体监测已成为环境保护和公共安全的重要保障。结合现代气体传感器技术的发展, 本文探讨了其在环境检测中的应用。首先, 本文分析了不同类型气体传感器的工作原理和特点; 其次, 针对氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和碳氧化物( $\text{CO}_x$ ), 介绍了常用的气体传感器类型及其适用场景; 最后, 针对气体传感器在灵敏度、稳定性、便携性和智能化方向所面临的挑战, 展望了其未来的发展方向。

**关键词:** 环境检测; 传感器技术; 气体污染物

## 0 引言

随着全球工业化和城市化的快速推进, 能源消耗的增长与化石燃料的广泛使用导致大气污染问题日益严峻。工业排放、交通尾气、燃煤发电等排放的气体污染物, 如氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )等, 不仅加剧了雾霾和光化学污染, 还引发了全球变暖、酸雨侵蚀以及臭氧层破坏等环境问题。此外, 室内空气污染同样不可忽视, 建筑材料、家具和涂料等释放的甲醛( $\text{HCHO}$ )气体污染物, 可能引发头痛、过敏甚至慢性中毒<sup>[1]</sup>, 影响人们的生活质量和身体健康。因此, 准确检测空气污染问题, 对改善环境质量、保障人体健康具有重要意义。目前, 传统的气体污染物检测方法有化学分析法、气相色谱法(GC)、质谱分析法(MS)和傅里叶变换红外光谱法(FTIR)<sup>[2-3]</sup>。这些方法虽然具有较高的检测精度和可靠性, 但往往存在设备昂贵、操作复杂、分析时间长、难以实现实时便携式监测等局限性。因此, 为了满足现代环境监测对高效、便捷、实时检测的需求, 需要引入新的技术来弥补传统方法的不足。气体传感器作为一种新型的检测技术, 凭借其高灵敏度、响应速度快和成本相对较低的优势, 在环境监测和工业安全等领域得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。基于多年的环境检测工作经验与实践, 本文系统归纳总结了物理类和化学类气体传感器的检测原理、性能特点及其在环境监测中的应用局限性。最后, 针对当前气体传感器技术的发展现状, 分析探讨了气体传感器的未来发展趋势并提出了优化方向, 以期对气体污染物监测技术的进一步

发展提供参考。

## 1 传感器的分类及原理

传感器技术作为现代科技的重要组成部分, 涵盖多种类型, 并涉及复杂的工作原理。常见的气体传感器可分为物理型和化学型两大类<sup>[5-6]</sup>。物理传感器是通过物理量的变化来感知和测量气体信息, 如光学式气体传感器。化学传感器依赖于目标气体与材料的相互作用, 主要包括电化学式、接触燃烧式和半导体式气体传感器。

### 1.1 光学式气体传感器

光学式气体传感器通过光学干涉、光谱吸收等原理开发, 通过检测被测气体在特征波长处的光强变化以分析其浓度。常见类型包括红外线式和紫外线式, 其核心组件通常包括光源、气室、光学滤波器、探测器和信号处理单元。当气体分子进入气室后, 会吸收特定波长的光, 导致光强减弱。探测器测量光强的变化, 信号处理单元根据朗伯-比尔定律计算出待测气体浓度<sup>[7]</sup>。光学式气体传感器具有不受强电磁干扰、灵敏度高、不易发生器件中毒以及非接触式测量的优势, 广泛应用于室内空气质量监测和工业排放监测等领域, 尤其适合检测腐蚀性气体(如 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{SO}_2$ 等)。然而, 受限于气体分子的光学特性, 光学式气体传感器无法检测对称性或无偶极矩的气体分子(如 $\text{H}_2$ )以及光学特性相似的气体混合物(如同分异构体)。

### 1.2 电化学式气体传感器

目前, 电化学式气体传感器是空气环境检测中应用最广泛的类型, 按电极配置可分为两电极式和三电极式。两者

\* 通信作者: 王天翔, 硕士, 工程师, 研究方向为电化学气体传感器。E-mail: rodofaaron@126.com

的主要区别在于三电极传感器较两电极传感器多引入了参比电极, 可精确控制工作电极的电位, 从而提高测量的稳定性和准确性<sup>[8]</sup>。电化学式气体传感器的检测原理: 被测气体分子与工作电极表面接触后发生的氧化或还原反应, 反应过程中会产生电流或电压的变化<sup>[9]</sup>, 通过分析工作电极和对电极之间电信号的变化, 可以获得对应气体的浓度和种类信息, 进而实现对空气中污染物含量的检测。电化学式气体传感器具有成本低、体积小、灵敏度高、选择性良好等优势, 适用于工业安全、环境监测和医疗设备等领域, 可检测具有电化学活性的有毒气体(如 CO 和 NO<sub>x</sub> 等)和可燃气体(如 CH<sub>4</sub>、O<sub>2</sub>)。在实际使用中, 电化学式气体传感器的电解质消耗和电极老化会导致基线漂移, 进而影响器件的使用寿命(通常为 2 年), 因此需要定期校准以保证检测的准确性。此外, 电化学式气体传感器对环境温度和湿度较为敏感, 使用时需采取温/湿度补偿措施或优化传感器设计以提高其稳定性和可靠性。

### 1.3 接触燃烧式气体传感器

接触燃烧式气体传感器专门用于检测可燃气体, 其核心元件是表面涂有催化剂的惠斯通电桥。当可燃气体扩散至传感器表面时, 在催化剂的作用下发生氧化燃烧并释放热量, 导致敏感元件的温度升高, 从而改变其电阻值并打破电桥平衡<sup>[10]</sup>, 通过提取电阻变化可实现对可燃气体浓度的准确检测。接触燃烧式气体传感器具有灵敏度高、响应速度快、线性输出稳定、受环境因素(温度、湿度)影响小的优势, 适用于工业生产中的可燃气体报警系统。然而, 由于依赖氧气促进燃烧, 该传感器仅能在有氧环境中正常工作。此外, 接触燃烧式气体传感器中的催化剂易受到含硫化物和重金属蒸汽的影响而中毒失活。因此, 在实际使用中应充分评估检测环境和气体种类, 以确保传感器的可靠性。

### 1.4 半导体式气体传感器

半导体式气体传感器是最常见且研究最为广泛的传感器之一。根据信号检测原理的差异, 半导体式气体传感器可分为电阻式和非电阻式两种类型。其中, 电阻式气体传感器主要采用金属氧化物作为敏感材料, 其检测原理是基于气体吸附与电子交换机制<sup>[11]</sup>。当传感器暴露在目标气体环境中时, 气体分子会与敏感层表面的氧负离子发生化学反应并伴随电子转移, 通过检测器件电阻等电学参量的变化即可实现对气体污染物浓度的检测和分析。相比之下, 非电阻式气体传感器(如场效应管)则主要通过气体吸附引起的电流变化或者阈值电压漂移来衡量气体浓度。而电阻式半导体气体传感器具有成本低、制作工艺简单、易于集成、体积小、稳定性和灵敏度高等优势, 广泛应用于汽车

尾气检测、空气质量监测和工业泄漏检测等领域。然而, 由于金属氧化物敏感材料的化学活性较低, 传感器通常要在 150~500 °C 高温条件下工作<sup>[12]</sup>, 这在一定程度上限制了其在便携式和低功耗设备中的应用。此外, 电阻式半导体气体传感器对干扰气体较为敏感, 容易受到交叉干扰, 因此建议在实际使用中利用传感阵列或者算法进行交叉灵敏度补偿, 以提高检测的准确性。

## 2 气体传感器在环境监测中的应用

随着工业化和城市化进程的加速, 空气污染物和有害气体排放问题日益严重, 给人类健康和环境带来严重威胁。气体传感器作为一种有效的环境监测工具, 能够检测空气中有毒气体和污染物的浓度变化, 有助于预测和预警潜在的空气质量问题。本小节将针对氮氧化物和碳氧化物, 讨论其在环境监测中的应用。

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)是一种常见的大气污染物, 常见于汽车尾气、供热锅炉废气、催化燃烧等工业废气, 给人体健康和环境带来严重的威胁<sup>[13-14]</sup>。电化学气体传感器可实时监测固定污染源废气中的 NO<sub>x</sub>, 其价格低廉, 响应速度快(响应时间 ≤ 90 s), 检测范围广, NO 的测量范围为 3~1300 mg/m<sup>3</sup>, 最大可达 6700 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub> 的测量范围为 3~200 mg/m<sup>3</sup>, 最大可达 2000 mg/m<sup>3</sup>。在实际使用中, 此类传感器存在交叉干扰问题, 需要在后续计算程序中给予修正, 这限制了其在复杂气体检测中的应用。紫外光谱差分吸收传感器也是实时监测工业废气中 NO<sub>x</sub> 的常见传感器之一, 它基于不同气体对特定波长光的选择性吸收差异, 能有效避免气体间的相互干扰。该传感器对 NO 的测量范围为 1~1300 mg/m<sup>3</sup>, 对 NO<sub>2</sub> 的测量范围为 2~1000 mg/m<sup>3</sup>。尽管其在使用寿命和抗干扰性上优于电化学传感器, 但价格高昂, 限制了其更广泛的应用。

一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是碳排放的主要监测对象之一<sup>[15-16]</sup>, 对于其排放量的精准把控至关重要。CO 排放实时监测主要采用电化学传感器与非分散红外吸收传感器两种技术手段。其中, 电化学传感器具有高灵敏度与快速响应特性, 测量范围设定为 3~5000 mg/m<sup>3</sup>, 能够覆盖从低浓度到高浓度的广泛监测需求; 非分散红外吸收传感器是通过分析气体对特定红外波长的吸收特性进行测量, 环境空气中 CO 测量范围为 0.07~50 mg/m<sup>3</sup>, 废气排放中 CO 测量范围为 60~150000 mg/m<sup>3</sup>。CO<sub>2</sub> 排放实时监测主要依赖非分散红外吸收传感器技术, 该技术通过捕捉 CO<sub>2</sub> 分子对红外辐射的吸收特征, 实现对 CO<sub>2</sub> 浓度的精确测量, 其测量范围为 0.03%~20%(体积浓度), 能够满足从低浓度环境到高浓度排放场景的监测需求。通过这些先进传感器的综合应用, 可有效提升碳排放监测的准确性与实

时性, 为碳排放管控提供坚实的数据支撑。

### 3 新型气体传感器的发展趋势

随着社会和科技的快速发展, 现阶段气体传感器在复杂环境中识别目标气体及长期稳定性等方面表现出局限性, 已难以满足现代社会日益增长的需求, 在环境保护、工业安全、公共健康和智能化发展的推动下, 对气体传感器的灵敏度、稳定性、便携性和智能化水平提出了更高的要求。这促使新型传感器不断升级, 以适应更广泛的应用场景。

在灵敏度和稳定性提升方面, 可从以下几个角度进行改性研究: 敏感层材料可应用具有高比表面积的纳米材料(如石墨烯、过渡金属硫族化合物), 以提高对  $\text{NO}_x$ 、VOCs 等特定气体吸附能力<sup>[17]</sup>, 增强检测信号; 可集成多种检测技术, 结合数据融合算法提高对目标气体的识别, 例如, 可根据强化学习算法构建气体浓度预测模型, 精准地完成气体种类识别与浓度预测; 应用信号放大技术, 降低噪声干扰, 提高对弱信号的检测能力; 开发抗环境因素(温度、湿度)影响的漂移补偿算法, 降低交叉干扰。

在便携性和智能化提升方面, 可以采用 MEMS 工艺制造微型气体传感器, 降低尺寸和功耗<sup>[18]</sup>, 使其更适用于便携式和可穿戴设备。此外, 结合机器学习、大数据分析、无线物联网等先进技术, 实现气体高精度检测、远程监测和云端数据存储与智能分析<sup>[19]</sup>。因此, 在实际应用中需不断对新型气体传感器进行探索创新, 紧跟技术前沿, 推动新型传感器向智能化与便携性方向发展。

### 4 结束语

本文详细介绍了光学式、电化学式、接触燃烧式和半导体式气体传感器的工作原理, 并分析了各类传感器的技术优势及其在应用中的局限性, 为技术人员合理选型提供参考。此外, 本文探讨了新型气体传感器在灵敏度、稳定性、便携性和智能化等方面的技术发展趋势, 以期推动其在环境监测、工业安全和智能系统等领域的进一步应用。

### 参考文献

- [1] 熊华竞, 苏丹, 王维康. 室内环境甲醛气体检测技术的研究进展[J]. 化学分析计量, 2024, 33(10): 127-136.
- [2] 卓继斌. 傅里叶变换红外光谱法对一氧化碳气体定量分析研究[J]. 福建分析测试, 2023, 32(1): 28-33.
- [3] 刘广鹏, 高野, 关书会. 气相色谱-质谱法在测定食品中甲醛的作用[J]. 中外食品工业, 2024, (13): 87-89.
- [4] 杨俊超, 潘勇, 秦墨林, 等. 金属氧化物半导体气敏传感

- 器研究进展[J]. 化学传感器, 2022, 42(2): 10-18.
- [5] 黎冰. 简述气体传感器在监测石化区空气污染中的应用[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(15): 127-129.
- [6] 董玉奇. 新型气体传感器技术在空气质量监测中的应用探索[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(11): 139-141.
- [7] 秦孝良, 高健, 王永敏, 等. 传感器技术在环境空气监测与污染治理中的应用现状、问题与展望[J]. 中国环境监测, 2019, 35(4): 162-172.
- [8] 陈涛, 周婕妤, 沈亚芹, 等. 有害气体检测传感器技术进展[J]. 化学分析计量, 2022, 31(7): 90-94.
- [9] 马玉林, 李尚松, 张红霞, 等. 电化学气体传感器综合实验设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(7): 47-49+61.
- [10] 薛为阳. 可燃气体报警器的传感器故障研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(7): 28-29.
- [11] MILLER D R, AKAR S A, MORRIS P A. Nanoscale metal oxide-based heterojunctions for gas sensing: A review[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 204: 250-272.
- [12] 许佳欣, 陈程, 邱诗波, 等. 氨气传感器研究现状及智能化应用[J]. 包装学报, 2022, 14(2): 57-66.
- [13] ZHANG Z, LIU J, DU H, *et al.* Key to unlocking  $\text{NO}_2$  sensing performance of monolayer  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ : Regulating OH/F functional groups[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 484: 149620.
- [14] 杜文静. 氧化锡与氧化铜基半导体纳米材料的 $\text{NO}_2$ 气敏性能及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [15] ZHANG Y, XIONG H, CHEN Q, *et al.* Hollow-sphere  $\text{NiO}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -based gas sensor for CO sensing[J]. ACS Applied Nano Materials, 2025, 8: 4832-4840.
- [16] XU X, ZHOU T, YANG A, *et al.* Mixed-matrix membrane-based piezoelectric  $\text{CO}_2$  sensor with self-humidity compensation[J]. ACS Sensors, 2025, 10(2): 1483-1492.
- [17] 秦孝良, 高健, 王永敏, 等. 传感器技术在环境空气监测与污染治理中的应用现状、问题与展望[J]. 中国环境监测, 2019, 35(4): 162-172.
- [18] 高松, 焦正, 吴克食, 等. 恶臭气体监测技术研究进展[J/OL]. 自然杂志, 1-10 [2025-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1418.N.20250108.1454.002.html>.
- [19] KIM T, KIM Y, CHO W, *et al.* Ultralow-power single-sensor-based e-nose system powered by duty cycling and deep learning for real-time gas identification[J]. ACS Sensors, 2024, 9(7): 3557-3572.