

烟气二氧化硫 (SO₂) 监测方法的探讨

王东

辽宁省本溪生态环境监测中心

摘要: 本文综述了烟气中二氧化硫 (SO₂) 监测的传统方法及现代技术发展。鉴于SO₂作为空气污染物对环境及人体健康造成严重影响, 监测其浓度对环境保护和污染管控至关重要。文中比较了湿化学方法、红外光谱法、紫外光谱法和电化学技术等主流的SO₂检测技术, 以及这些方法的优势、限制和潜在的改进方向。通过分析, 本文旨在提供一个关于环境监测领域烟气二氧化硫检测技术的当前状态和未来发展趋势的理解。

关键词: 二氧化硫监测; 烟气; 湿化学分析; 光谱法; 电化学感测

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-6261.2023.10.213

引言

环境监测的重要性日益凸显, 尤其是针对烟气中有害气体监测。二氧化硫 (SO₂) 作为燃煤和石油产品燃烧的主要副产物之一, 对空气质量、公众健康和生态系统都有潜在的负面影响。因此, 开发和完善烟气中SO₂监测的方法对减少大气污染和促进环境可持续性具有必要性。本文将探讨并分析当前SO₂监测的技术和方法, 指出其挑战, 并展望未来技术发展的趋势。

一、SO₂的环境影响

1. 概述SO₂对空气质量的影响

二氧化硫 (SO₂) 是一种具有刺激性气味的无色气体, 主要由燃煤电厂、工厂和汽车尾气等人为源以及一些自然源 (如火山活动) 释放到大气中。它对空气质量的影响显著: SO₂可与大气中的其他物质反应生成细小的硫酸盐颗粒物, 这些细颗粒可以悬浮在空气中并影响能见度, 导致所谓的雾霾现象。此外, SO₂还是酸雨的主要成分之一; 当它与大气中的水蒸气反应时, 会形成硫酸, 进一步导致土壤、淡水和海洋生态系统的酸化。这种空气质量的恶化不但直接损害了自然和城市景观, 也可能对人类活动产生长期的负面经济影响, 比如农作物损失和建筑物腐蚀。

2. 讨论SO₂造成的健康问题和生态影响

在健康方面, SO₂的影响主要体现在其对人体呼吸系统的刺激作用。即使是短暂暴露, 也可能引起喉咙疼痛、咳嗽、呼吸困难和气喘发作等症状; 长期暴露则可能导致呼吸道疾病的加重, 如慢性支气管炎和哮喘, 并可能降低肺功能。儿童和老年人以及已有心肺疾病的人群对SO₂更为敏感。在生态方面, 二氧化硫可以导致植物叶片受损, 抑制生长, 严重时甚至会导致枯死。它还会降低土壤中的肥力, 影响各种生物的生存。SO₂在水体中

形成的酸化现象也破坏了水生生态, 损害了鱼类和其他水生生物的健康, 进而影响了该生态系统的生物多样性和食物链的稳定性。

二、烟气SO₂监测的传统方法

1. 湿化学分析方法

湿化学分析法是监测烟气中SO₂浓度的一种传统技术, 其原理主要是通过化学吸收来转化SO₂。通常情况下, 烟气样本会被引导通过含特定化学试剂的洗涤塔。这些试剂能够与SO₂反应生成稳定的化合物, 最常见的吸收液包括亚硫酸盐或硫酸盐溶液。反应完成后, 吸收的SO₂通过滴定 (如碘量法)、分光光度法或离子色谱法等技术量化。湿化学法的优点在于其准确度较高, 能够为环境监控提供可靠的基线数据。但由于涉及多步骤的手动操作, 这种方法劳动强度大, 耗时较长, 并且难以进行连续自动化监测。同时, 湿化学法通常不适用于实时或现场检测, 因为它通常需要将样本带回实验室进行分析。

2. 气体滤纸法

气体滤纸法又称为吸收性滤纸法 (Absorption Paper Method), 作为一种简易的现场采样方法, 它在环境空气和烟气的SO₂监测中得到较广泛的应用。在这个方法中, 用硫酸钡、硫酸钡-甘油、对甲酚紫等化学试剂浸湿的滤纸片被安置在烟道或气体流通的路径上。过滤器上的试剂与SO₂发生化学反应, 滤纸的颜色会随着吸收的SO₂量发生变化。颜色的变化通常与吸收的SO₂浓度成正比, 通过颜色评价或光谱分析的方法可以定量分析SO₂的浓度。气体滤纸法简单经济, 不需要复杂设备, 适合快速采样。但是这个方法提供的是一个时间累积的平均值而非瞬时浓度, 并且可能受到湿度、其他气体的干扰以及滤纸处理的一致性等因素的影响, 准确性和灵敏度不如先进的监测技术。尽管如此, 由于操作简单, 气

体滤纸法仍旧被用于初步监测和那些缺乏复杂设备的场合。

三、现代SO₂监测技术

1. 红外光谱法

红外光谱法是一种现代SO₂监测技术，它基于SO₂分子吸收特定波长红外光的原理。当红外光通过含有SO₂的气体样本时，SO₂分子特定的振动和转动模式会吸收特定的红外光谱。这种吸收可以用红外光谱仪检测和量化。红外光谱法的主要设备是非分散红外光谱（NDIR）分析仪，它通常配置有一个光源、一个样品室、一个波长选择装置（如光栅或滤光片）和一个探测器。这种技术非常适用于连续排放监测系统（CEMS）和工业过程控制，因为它可以提供实时、在线的监测数据。红外光谱法的主要优点包括对干扰气体的高选择性、维护需求低和运行成本相对较低。但是，在高湿度的环境中，水蒸汽可能会干扰红外线的测量，因为水也会吸收红外光，这可能需要通过仪器设计或数据处理方法进行补偿。

2. 紫外光谱法

紫外光谱法利用SO₂分子在紫外区域能够吸收光的性质来测量其浓度。SO₂能在紫外区域产生特征吸收，尤其是在波长范围200–230纳米之间。通过分析穿过含有SO₂气体的样品室的紫外光的吸收光谱，可以确定SO₂的浓度。紫外差分吸收光谱（UV-DOAS）和紫外荧光法是此类监测中常用的技术。UV-DOAS通常用于环境监测，因为它允许在较远的距离上进行测量，而紫外荧光法则在工业应用中比较常见。紫外光谱法的优点包括无需样品前处理、快速响应和高灵敏度，还可以实现非接触式的远程监测。紫外法识别特定气体的能力使得它在监测特定气体浓度时具有很高的准确度。但是，与红外光谱法一样，紫外光谱法也可能受到其他吸收紫外光化合物的干扰，需要适当地选择测量窗口和进行光谱分析处理来解决这些问题。此外，紫外光谱仪器通常比红外光谱仪器更受环境条件（如温度和压力波动）的影响。

3. 电化学感测法

电化学感测法是一种用于监测气体中SO₂浓度的现代技术，它基于电化学原理工作。在这种传感器中，待测的SO₂气体分子在电化学池中与特定的电极发生反应，这引起了电化学池内部的电流变化。电化学传感器里通常包括一对或更多的电极，浸泡在电解液中，当有SO₂通过传感器时，它在工作电极上被氧化或还原，从而产生一

个与SO₂浓度成正比的电流信号。这种方法的主要优势包括灵敏度高、响应时间快、体积小且易于携带，因而非常适合于现场和便携式仪器中的应用。此外，它可通过选择不同的电极材料和电解液成分来实现对SO₂的选择性检测。然而，电化学感测器的性能可能受到温度、湿度以及其他气体的干扰，它们需要定期校准和更换来维护其准确度和稳定性。

4. 遥感与卫星监测技术

遥感与卫星监测技术是通过空间平台上搭载的传感器远距离监测地球表面和大气的态势，它们对于跟踪全球SO₂排放量和分布尤为有用。遥感技术可以使用不同的传感器，如紫外/可见光谱仪、热红外探测器和微波探测器，这些传感器能够捕捉大气中的SO₂对特定波长光谱的吸收特性。与地面传感器相比，卫星监测的主要优势在于能够提供大范围、定期的大气SO₂浓度数据，这对于理解全球大气污染的模式和趋势至关重要。卫星数据可以用于气候模型、空气质量评估和预测以及火山活动监测等。这种技术还能监测到偏远地区和海洋上空的SO₂排放，这些区域常常很难用地面设备覆盖。不过，卫星监测数据的分辨率相比地面监测来说较低，它依赖于清晰的天气条件，并且需要复杂的算法来分析和解释数据。

四、方法比较与评估

监测技术在评估大气中二氧化硫（SO₂）浓度时各有其独特的优势与限制，广泛应用于不同情境下的监测需求。例如，电化学感测技术以其便携性、低成本和用户友好的操作界面获得好评，适合快速现场检测。但是，这种技术对于环境变化敏感，可能需要频繁校准，且在低浓度检测时的精确度有局限。遥感技术如卫星遥感和地面基于遥感的光谱仪，能够提供大范围的SO₂监测数据，特别是在不易到达或范围广阔的地区非常有用，但其空间和时间分辨率相对较低，且容易受到天气条件和其他大气成分的影响。光谱分析法，包括紫外和红外光谱，能够提供高精度和高灵敏度的测量，对持续监控实时排放尤其有效，但是设备通常复杂且成本高昂，对技术操作人员有一定要求。湿化学与气体滤纸法虽然成本相对较低且测试方法经过了时间的验证，但它们无法提供即时数据并且在数据收集和分析过程中耗时较长。在总体上，这些监测方法在实际应用中往往需要结合使用，以弥补单一技术的不足，为环境保护和污染控制提供全面的数据支持。在选择最适合的监测方案时，人们

需要考虑监测目的、所需的数据精确度、操作的可行性、以及经济和技术资源。

五、技术和方法发展趋势

1. 多参数联合监测系统

随着技术的进步和环境监测需求的增加，多参数联合监测系统正在成为一个重要的发展趋势。这些系统通过结合多种监测技术来同时收集多样的环境数据，能够提供更为全面的空气质量分析。多参数系统通常包含对各种气体成分（如SO₂、NO_x、CO、O₃等）以及颗粒物（PM_{2.5}和PM₁₀）的监测。它们不仅能够提高监测的准确性和可靠性，还能增强对复杂污染事件的理解，例如据此可以区分自然和人为的污染来源，并且能够监测到气体组分之间可能存在的复杂相互作用。此外，由于联合监测系统整合了各类传感器和分析法，它们可以实时或接近实时地监控空气质量，并通过数据融合提供更准确的环境健康风险评估。由于这些系统需要处理和分析大量数据，因此人工智能和机器学习技术正被越来越多地应用于数据处理，以辨识模式、优化系统表现并预测未来的污染事件。然而，这种系统的挑战在于要精确地校准和验证不同的传感器，并确保它们在各种环境条件下都能稳定工作。

2. 微型和便携式监测设备发展

微型和便携式监测设备的发展是另一项显著的趋势，正引领着环境监测技术朝着更加灵活和用户友好的方向发展。这些设备通常轻便、装配方便，让个人用户或小型社区组织也可轻松地开展监测工作。此类设备的小型化是通过现代微电子和纳米技术实现的，它们让传感器的大小显著减少，同时保持或甚至提高了传感器的灵敏度和选择性。这些微型设备的优点是成本较低、维护简单、易于普及，这使得空气质量监测不再仅仅是政府和大型机构的专利。便携设备可以被安装在车辆、无人机或手机等移动平台上，这样不仅可以实时监测单个污染源，而且还可以实现宽域覆盖的动态空气质量评估。不过，这些设备通常需要定期校准，且可能在不同情境下的性能各异。随着物联网（IoT）技术的发展，微型传感器正被集成到更广泛的连接设备中，允许实现实时数据的远程传输和智能监测。与此同时，使用者对于监测数据的真实性、稳定性和准确性的要求也越来越高。整体而言，未来的便携式监测设备将集中在提高测量准确性、增强传感器的智能化处理能力，以及改善设

备与更大的数据分析平台之间的集成。

3. 数据分析与智能化监测

数据分析与智能化监测技术的发展是现代监测方法中一个重要趋势，它们正在彻底改变着环境监测、健康监督以及工业过程的实施方式。随着物联网（IoT）技术与传感器技术的融合，越来越多的监测设备能够实时收集环境数据，并通过无线网络传输至云端或数据处理中心。利用大数据分析技术，这些庞大的数据集能够进行深度分析以识别模式和趋势，使得环境监测不再局限于简单的数据收集，而是进化成智能化的决策支持系统。智能监测系统的一个核心特性是它的自学习能力，通过采用机器学习和人工智能算法，系统能够从历史数据中学习，预测未来的环境变化，甚至是提前警告可能的异常或污染事件。这种预测性监测不仅可以提高响应时间，减少潜在的健康风险和环境污染，还可以帮助企业 and 政府制定更有效的环境政策和规划。此外，智能监测技术也推动了监测设备的自动化和远程控制，实现了设备的自我校准和维护，大大减少了人工干预的需求和成本。这不仅提高了监测工作的效率，也增加了监测系统在偏远或危险区域的应用潜力。

结束语

综合分析上述研究，可以看到监测SO₂的方法不断进步并向着更高灵敏度、更低成本、更快响应时间和更简使用户体验方向发展。随着技术进步，未来SO₂监测方法将更具可持续性，更加准确和实时，为环境监管部门和公共健康防护提供强有力的技术支撑。务必需要政策制定者、工业参与者和科研人员密切协作，以推动高效的SO₂监测技术的研发和应用，共同维护和改善全球的空气质量。

参考文献

- [1] 王世龙, 王丽娜, 王宏博, 等. 烟气二氧化硫在线监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021 (4): 38-41.
- [2] 周力, 袁野. 如何排除烟气二氧化硫监测中其他气体的干扰[J]. 价值工程, 2022 (16): 301-301, 302.
- [3] 王丽娜, 于立君. 烟气二氧化硫排量在线监测系统[J]. 自动化仪表, 2020, 32 (9): 50-53, 56.
- [4] 闻欣, 姚朝英, 陆芝伟, 等. 水泥干法窑尾烟气中二氧化硫测试方法比对研究[J]. 化学分析计量, 2019 (4): 57-59.