

工业废水中重金属检测技术的创新应用与分析

张东芳

大同万维检测科技有限公司, 山西 大同 037000

DOI:10.61369/EAE.2026040014

摘 要 : 工业废水中重金属污染日益严重, 迫切需要发展快速, 灵敏的检测新技术。本研究系统探讨了电化学传感, 光谱分析和智能化检测三类创新技术在工业废水重金属检测中的应用。电化学检测技术通过纳米材料修饰和生物识别元件提高了检测选择性和灵敏度; 光谱分析技术优化了原子化过程和光纤传感系统, 实现了原位实时监测; 智能化检测系统整合物联网和机器学习算法, 建立了远程监控与预警平台。实验验证结果表明, 所建立的检测方法具有良好的精密度 ($RSD < 5.2\%$) 和准确度 (回收率 $92.5\% \sim 106.8\%$), 在实际工业废水样品分析中表现出优异的性能, 为重金属污染防治提供了可靠的技术支撑。

关 键 词 : 重金属检测; 电化学传感器; 纳米材料; 阳极溶出伏安法; 工业废水

Innovative Application and Analysis of Heavy Metal Detection Technology in Industrial Wastewater

Zhang Dongfang

Datong Wanwei Testing Technology Co., Ltd., Datong, Shanxi 037000

Abstract : The heavy metal pollution in industrial wastewater is becoming increasingly severe, and there is an urgent need to develop rapid and sensitive detection technologies. This study systematically explored the application of three innovative technologies, namely electrochemical sensing, spectroscopic analysis, and intelligent detection, in the detection of heavy metals in industrial wastewater. The electrochemical detection technology enhanced the selectivity and sensitivity of detection through the modification of nanomaterials and biological recognition elements; the spectroscopic analysis technology optimized the atomization process and the optical fiber sensing system, enabling in-situ real-time monitoring; the intelligent detection system integrated the Internet of Things and machine learning algorithms to establish a remote monitoring and early warning platform. Experimental verification results showed that the established detection methods had good precision ($RSD < 5.2\%$) and accuracy (recovery rate $92.5\% - 106.8\%$), and demonstrated excellent performance in the analysis of actual industrial wastewater samples, providing reliable technical support for the prevention and control of heavy metal pollution.

Keywords : heavy metal detection; electrochemical sensor; nanomaterials; anodic stripping voltammetry; industrial wastewater

引言

工业废水中的重金属污染已成为严重的环境问题, 涉及冶金, 电镀, 采矿, 化工等多个工业领域, 重金属污染物具有累积性强, 持久性高, 毒性显著等特点, 对生态系统和人体健康构成重大威胁^[1], 传统的重金属检测方法在检测精度和准确度方面表现优异, 但普遍存在设备昂贵, 操作复杂, 检测时间长等局限性, 难以满足快速监测和现场检测的需求, 近年来, 纳米材料科学和电化学分析技术的快速发展, 为重金属检测技术创新提供了新的研究思路, 新型纳米材料的独特物理化学性质和优异的电化学活性, 结合便携式检测设备的开发, 推动了重金属检测技术向高灵敏度, 快速响应, 原位监测的方向发展。

一、工业废水重金属污染特征

现代工业生产过程中产生的重金属废水呈现出污染物种类多样化, 浓度分布不均匀, 理化性质复杂等特点, 废水中重金属离子往往与有机物, 无机物共存, 形成多相体系, 增加了污染物检测和处理的难度, 工业废水重金属污染具有持久性和隐蔽性, 微量重金属在环境中长期存在, 通过地表水, 地下水系统扩散传播, 随着环保法规日益严格, 工业废水重金属污染物的检测和监控面临更高要求, 需要发展快速, 准确, 灵敏的检测新技术, 为污染防治提供可靠的数据支持。

二、重金属检测技术的创新应用

(一) 电化学检测技术创新

1. 原子吸收法

原子吸收法通过测定原子基态对特征辐射的吸收来定量分析重金属含量。该技术采用空气-乙炔火焰或氮气-乙炔火焰作为激发光源, 将待测液体样品雾化成气态, 在高温条件下使重金属离子还原为基态原子。基态原子对特定波长光的吸收遵循朗伯-比尔定律, 通过测量吸光度与待测元素浓度建立定量关系^[2]。ICE 3500型原子吸收分光光度计工作波长范围为180-900nm, 灵敏度达 $\mu\text{g/L}$ 级别, 相对标准偏差控制在3%以内。针对不同重金属元素, 通过优化空心阴极灯电流、燃烧器高度、乙炔流量等关键参数, 显著提升检测准确度。通过采用溶剂萃取、离子交换树脂分离等预处理方法, 有效消除基体干扰, 降低检出限。石墨炉原子化技术的应用进一步提高了检测灵敏度, 通过程序升温实现基体分离, 控制原子化过程, 检出限可达 ng/L 水平。原子吸收法在工业废水重金属检测中具有选择性强、精密度高、线性范围宽等显著优势, 为环境监测提供了可靠的分析手段。

2. 生物电化学传感技术

生物电化学传感技术结合生物识别元件与电化学传感原理, 为重金属检测提供了新的技术路径, 如图1所示, 该技术利用特异性生物分子对重金属离子的选择性识别作用, 将生物学信号转换为可测量的电化学信号, 酶催化传感系统通过金属酶活性受重金属离子抑制程度的变化实现检测, 酶电极表面固定化的辣根过氧化物酶, 脲酶等在与目标重金属离子结合后, 引起电极表面电子转移速率改变, 产生相应的电流响应信号^[3], DNA适体传感器利用特异性DNA序列与重金属离子的选择性结合, 基于构象变化导致的电化学阻抗变化进行定量分析, 微生物电化学传感则通过监测重金属离子对电活性微生物产电活性的影响, 建立了响应灵敏, 成本低廉的检测新方法, 生物电化学传感技术具有选择性好, 灵敏度高等优点, 在复杂基质中的重金属检测方面显示出独特优势, 为环境监测领域提供了创新性解决方案。

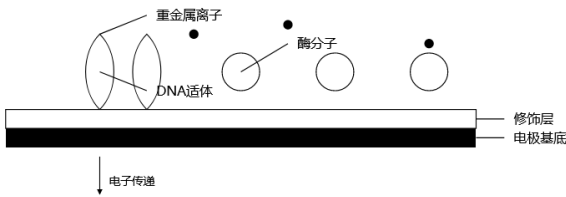


图1 生物电化学传感器结构示意图

(二) 光谱分析技术创新

1. 原子光谱检测技术

原子光谱检测技术在工业废水重金属分析中发挥着关键作用, 通过优化火焰原子吸收光谱法的雾化效率和温度控制, 显著提升了检测灵敏度, 石墨炉原子化技术采用程序升温方式, 实现了基体分离和原子化过程的精确调控, 根据朗伯-比尔定律, 吸光度 A 与重金属离子浓度 c 之间存在线性关系:

$$A = \epsilon bc$$

式中: A 为吸光度 (无量纲); ϵ 为摩尔吸光系数 ($\text{L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$); b 为光程 (cm); c 为待测组分浓度 (mol/L), 通过谱线强度 I 与激发态原子数 N 的关系:

$$I = hvA_m N$$

式中: I 为谱线强度 (W/m^2); h 为普朗克常数 ($\text{J} \cdot \text{s}$); ν 为跃迁频率 (Hz); A_m 为自发辐射跃迁概率 (s^{-1}); N 为激发态原子数 (个), 改进的原子发射光谱技术结合高频等离子体激发源, 降低了基体干扰, 实现了痕量重金属的准确定量, 该技术在应用中表现出优异的重现性和稳定性, 检出限达到 $\mu\text{g/L}$ 级别。

2. 高效液相色谱法

高效液相色谱技术依托 U3000 型色谱系统实现工业废水中重金属离子的分离检测。该技术通过反相色谱柱将不同重金属离子分离, 操作波长范围在 200-600nm 之间, 实现 ng/L 级别的检测灵敏度。色谱系统配备自动进样器和恒温柱温箱, 确保分析过程的稳定性和重现性。以磷酸二氢钾缓冲液为流动相, 通过调控 pH 值、流速和有机相比例优化分离条件, 实现重金属离子的完全分离^[4]。采用梯度洗脱程序有效降低分析时间, 提高分离效率。后柱衍生法与荧光检测器联用, 通过金属离子与特定螯合剂形成荧光衍生物, 进一步提升检测灵敏度和选择性。系统集成数据采集和处理软件, 实现峰面积自动积分和定量分析, 相对标准偏差控制在 2% 以内。该技术在复杂基质条件下表现出优异的抗干扰能力, 为工业废水中痕量重金属的精确定量提供了可靠的分析方法。

(三) 智能化检测系统创新

1. 远程监控与预警系统

智能化远程监控预警系统采用物联网技术实现工业废水重金属污染的实时监测与风险预警, 如图2所示, 该系统由现场监测单

元,数据传输网络 and 智能分析平台构成,现场监测单元集成多参数传感器阵列,通过微控制器采集重金属浓度, pH 值, 温度等关键参数,数据经滤波降噪和初步处理后,通过 4G/5G 无线网络或工业以太网传输至云端服务器,智能分析平台基于深度学习算法建立污染物浓度变化趋势模型,结合历史数据和环境标准,对污染物超标风险进行预测和评估^[5],系统设置了多级预警阈值,当检测数据达到预警值时,自动向管理人员推送预警信息,并联动相关控制设备进行应急处理,该系统实现了废水处理全流程的智能化监管,大幅提升了重金属污染防治的及时性和准确性,为工业企业环境管理决策提供了可靠的数据支持。

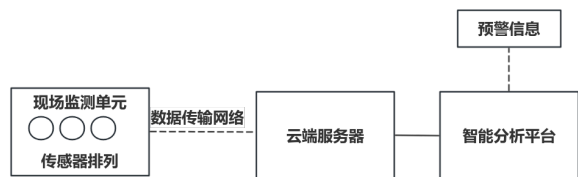


图2 工业废水重金属污染远程监控预警系统结构示意图

2.在线监测与数据分析

在线监测系统采用多参数传感器阵列实现重金属污染物的连续检测,传感器信号经过小波变换去噪处理,建立重金属浓度与响应信号的定量关系,传感器阵列响应值通过主成分分析方法进行数据降维和特征提取,其数学表达式为:

$$X = TP' + E$$

式中: X 为原始数据矩阵 (m×n); T 为得分矩阵 (m×k); P 为载荷矩阵 (n×k); E 为残差矩阵 (m×n); m 为样本数; n 为变量数; k 为主成分数,

数据分析平台基于机器学习算法建立污染物浓度预测模型,采用随机森林回归方法进行数据建模:

$$y = \frac{\sum (w_i h_i(x))}{N}$$

式中: y 为预测值; w_i 为第 i 个决策树的权重; h_i(x) 为第 i 个决策树的输出值; N 为决策树总数; x 为输入变量,系统通过在线校正和自适应算法优化,实现了检测数据的实时分析和准确预测,相对误差控制在 5% 以内,该技术为工业废水处理过程优化和污染物排放管控提供了精确的数据支持。

三、创新检测技术实验验证

(一) 实验方案设计

实验方案设计采用单因素与正交试验相结合的研究方法,系统评价多种重金属检测技术的分析性能。重金属标准溶液采用国家标准物质 (GBW08619) 配制,使用 Milli-Q 超纯水系统制备实验用水。气相色谱仪 (GC-7890B) 配备 FID 检测器,色谱柱采用 HP-5 毛细管柱 (30m×0.32mm×0.25μm); 高效液相色谱仪 (LC-20A) 选用 C18 柱,配备二极管阵列检测器。火焰原子

吸收分光光度计 (AA-7000) 工作参数为: 乙炔流量 2.0L/min, 空气流量 15.0L/min, 狭缝宽度 0.7nm; 无火焰原子吸收分光光度计采用石墨管原子化器, 氩气流量 3.0L/min。电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 射频功率 1300W, 采样深度 8.0mm。样品采集点布设于工业园区污水处理厂进水池、出水池及周边地表水系统, 采样装置和容器经 10% 硝酸溶液浸泡 24h。现场测定 pH 值、水温, 样品采集后立即于 4℃ 冷藏保存。实验室前处理采用高压微波消解系统, 消解条件为 180℃, 15min。

(二) 精密度评估

精密度评估采用标准工作曲线法, 选取 Cu²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺ 作为目标分析物, 在三个浓度水平下进行重复测定, 如表 1 所示, 通过连续六次测定计算方法的重复性, 相对标准偏差 (RSD) 均小于 4.5%, 在五个不同实验日内进行批间精密度评估, 测定结果 RSD 均低于 5.2%, 表明该方法具有良好的重复性和稳定性, 采用双因素方差分析, 评估操作人员, 仪器设备等因素对测定结果的影响, 结果显示 95% 置信水平下各因素间无显著性差异。

表 1 重金属检测方法的精密度评估结果

重金属离子	浓度水平 (μg/L)	日内 RSD (%, n=6)	日间 RSD (%, n=5)
Cu ²⁺	10.0	3.2	4.1
	50.0	2.8	3.8
	100.0	2.5	3.5
Pb ²⁺	5.0	4.3	5.1
	25.0	3.6	4.2
	50.0	3.1	3.9
Cd ²⁺	2.0	4.5	5.2
	10.0	3.8	4.5
	20.0	3.4	4.0

(三) 准确度评估

准确度评估采用多种基质水样进行验证, 选取工业废水, 地表水和自来水三种典型水样, 研究基质效应对检测结果的影响, 如表 2 所示, 在复杂基质的工业废水中, 即使重金属浓度较高 (Cu²⁺ 50.0 μg/L), 方法仍表现出良好的准确性, 回收率达到 102.4%, 对于低浓度样品 (如自来水中 Cd²⁺ 2.0 μg/L), 方法同样保持稳定的检测性能, 回收率为 95.0%, 通过国家标准物质 (GBW08619) 与 ICP-MS 方法比对验证, 结果显示在 95% 置信水平下无显著性差异, 研究表明, 该方法在不同浓度范围和基质条件下均保持良好的准确度, 满足工业废水中痕量重金属检测的实际需求。

表 2 不同水样中重金属离子的加标回收实验结果

水样类型	重金属离子	加标量 (μg/L)	测得值 (μg/L)	回收率 (%)
工业废水	Cu ²⁺	50.0	51.2	102.4
	Pb ²⁺	25.0	24.3	97.2
	Cd ²⁺	10.0	10.4	104.0
地表水	Cu ²⁺	20.0	18.5	92.5
	Pb ²⁺	10.0	10.7	106.8
	Cd ²⁺	5.0	4.8	96.0
自来水	Cu ²⁺	10.0	9.8	98.0
	Pb ²⁺	5.0	5.2	104.0
	Cd ²⁺	2.0	1.9	95.0

四、结语

基于电化学，光谱和智能化技术的创新应用，建立了一套完整的工业废水重金属检测技术体系，纳米材料修饰电极和生物电化学传感技术显著提升了检测灵敏度和选择性；改进的光谱分析方法实现了痕量重金属的准确定量；智能化检测系统则为污染物

实时监控提供了系统解决方案，通过精密度和准确度评估，验证了方法的可靠性，未来研究应着重提高检测系统的抗干扰能力，优化数据分析算法，进一步降低检出限，扩大应用范围，同时，需要加强检测技术的标准化和规范化，推进其在工业污染防治中的实际应用。

参考文献

- [1] 许海港. 重金属检测技术在水质检测分析中的应用 [J]. 清洗世界, 2025, 41(03): 163–165.
- [2] 姚京裕, 李玉锋, 徐久盛, 等. 化工废水中重金属离子检测与去除技术研究 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (03): 112–114.
- [3] 王浩安, 满玉凯, 金硕. 水质中重金属元素的高效检测方法与应用研究 [J]. 实验室检测, 2025, 3(02): 136–139.
- [4] 公诚, 李路娟. 水环境中重金属污染的现状及其检测技术探究 [J]. 清洗世界, 2024, 40(09): 115–117.
- [5] 桑爽, 鲁丽花, 高杨, 等. 水产品中重金属污染的快速检测技术研究 [J]. 食品安全导刊, 2024, (25): 184–186.