

基于声化学微试剂快速检测方法研究

李文, 高亚松*, 马永跃, 陈银银, 温昕
(北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要:针对高锰酸盐检测存在试剂用量大, 检测周期长等问题, 基于超声液体声化反应机理, 应用超声辅助消解技术和顺序注射分析技术(SIA), 提出了一种高锰酸盐微试剂快速检测方法。基于超声辅助高锰酸盐溶液消解原理, 设计消解池结构, 采用最小二乘法建立高锰酸盐回归模型。结果表明, 超声辅助消解法曲线相关性优于光谱法。基于高锰酸盐指数检测仪行业标准, 量程漂移与零点漂移在 $\pm 5\%$ 以下, 系统重复性误差为2.51%以内。实验表明, 该方法具有一定的应用价值。

关键词:超声辅助; 快速检测; 顺序注射; 高锰酸盐

中图分类号: TP23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)03-0246-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.03.044

Research on rapid detection method based on acoustic chemical micro-reagents

LI Wen, GAO Ya-song*, MA Yong-yue, CHEN Yin-yin, WEN Xin

(School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In view of the problems such as large reagent consumption and long detection period for permanganate detection, a rapid micro-reagent detection method for permanganate is proposed by using ultrasonic-assisted ablation technique and sequential injection analysis (SIA) according to the acoustic reaction mechanism of ultrasonic liquid. Based on the ultrasound-assisted permanganate solution ablation principle, the structure of the ablation cell is designed, and the permanganate regression mode is established by means of the least squares method. Results demonstrate that the curve correlation of ultrasound-assisted ablation method exhibits better than that of spectroscopic method. Based on the industry standard for permanganate index tester, the range drift and zero point drift are within the range from -5% to $+5\%$, and the system repeatability error is within 2.51%. Experiments show that this method has certain application value.

Key words: ultrasonic assisted; rapid detection; sequential injection; permanganates

高锰酸盐在环境水样中常以大分子有机物的形式存在^[1], 为测定其指数含量, 需要将待测水质样品进行酸化消解后再进行检测, 强氧化剂与小分子更易充分氧化, 得到耗氧量后计算高锰酸盐浓度。当前主要应用的水质消解法为加热消解法^[2]。

超声消解法^[3]机理是: 超声波^[4]在经过液体介质时会传递过的液体产生振动, 振动会产生疏密相间的波使流体产生压力变化, 此时液体内部压力低的部分会出现负压区, 该区域内出现空化效果, 液体内部大量的微小气泡逸出^[5]。由于液体处于高流速区的压强低, 低压强会使空化泡^[6]的体积持续膨胀, 当此部分液体流经低流速高压强区域时气泡会爆开, 瞬时产生几千摄氏度高温和几百兆帕的高压环境, 同时伴有高速微射流和强烈冲击波。对液体起较好的搅拌和加快化学反应的作用。为缩短消解时长提高效率, 将光谱分析法^[7-8]、化学法结合应用于水质检测领域中^[9], 超声消解法能加快试剂与水样之间的反应速度, 有极大的优势。

基于顺序注射分析技术(sequential injection

analysis, SIA)与分光光度法^[10-13]结合, 设计水质高锰酸盐指数检测系统平台。顺序注射技术具有试剂用量小、自动化等优点, 本文中结合超声辅助消解技术和顺序注射分析技术的优点, 基于高锰酸盐指数检测仪行业标准^[14], 根据朗伯比尔原理, 采用分光光度法设计了一种新的运用超声波空化效应辅助消解完成水质 COD_{Mn} ^[15]测定的监测仪。

1 超声辅助水质快速检测实验部分

1.1 仪器与试剂

采用高压液体常闭型合金钢电磁阀, 阀头型号 TM01-1P, 抗腐蚀性强, 用于控制试剂流路的快速启闭; 氩-卤钨灯光源, 发射光谱为 190~2 500 nm; 规格 10 mL 高精度立式注射泵; 通讯接口使用 RS-485 和 RS-232、RS-485 和 RS-232, 通信速率为 9 600 bps/115 200 bps; AvaSpec 光谱仪; KSD-FSQ 型超声波发生器, 提供 40~68 kHz 超声波频率; 多通道切换阀岛, 使用耐腐蚀的聚四氟乙烯材料作阀芯阀体; 聚四氟乙烯材料的管路; 量程为 0.1 μL ~

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2024-01-16

作者简介: 李文(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能传感器、机器人技术, lw@ncut.edu.cn; 高亚松(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为智能传感器, 通讯联系人, 13146455458@163.com。

10 mL 的单通道移液器;10 mg 电子天平;智能数显恒温磁力搅拌器;SD5443 型号的光电晶体管;24~220 V 的电源开关模块;545 nm 光电二极管;变幅杆与消解池结合的超声反应器;读取测试实验过程检测值的电脑 1 台;高锰酸盐指数检测池。

实验用水采用《GB 11446-1—2013 去离子水国家标准》中的去离子水;依照 GB 11892—89 配制 KMnO_4 标准贮备液, $c(1/5\text{KMnO}_4) = 0.1 \text{ mol/L}$;从国家安全平台备案购买 (1+3) 硫酸,草酸钠标准溶液浓度 $c(1/2\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4) = 0.01 \text{ mol/L}$; COD_{Mn} 标准溶液 ($\rho\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = 200 \text{ mol/L}$);该实验使用溶液均按照国标要求保存。

1.2 超声消解池选型

实验室常见的超声反应器^[16-17]类型分为槽式超声反应器与变幅杆式超声反应器。其中槽式超声反应器^[18]如图 1(a)所示,换能器^[19]位于池底部,超声波传入池体后进入液体,优势在于可将上方池体替换为不同容量的容器。但缺点是传递次数多,超声波会有一定能量损耗,因此功率消耗大。变幅杆式超声反应器如图 1(b)所示,超声换能器连接变幅杆置于待测液体中,超声波通过变幅杆末端直接将声波传播入液体介质中。

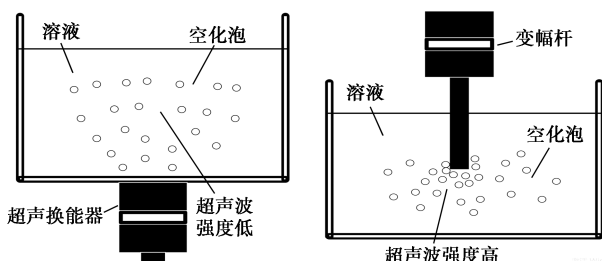


图 1 槽式超声反应器与变幅杆式超声反应器

通过对比 2 种超声反应器的优点,选用变幅杆式超声反应器。同时对液体容器结构进行调整,将变幅杆式与反应容器相结合。使容器容积符合高锰酸盐指数检测微试剂的用量,结合变幅杆的尺寸完成超声反应消解池的整体设计。

1.3 微试剂顺序注射实验平台设计

本系统结合了顺序注射技术与分光光度法,基于顺序注射分析技术(SIA)搭建了水质高锰酸盐指数检测系统的平台。本系统分为以下 6 个部分,分别为水样预处理、超声反应消解池、顺序注射部分、光谱检测系统、供电电源以及终端显示器,结构如图 2 所示。首先进行的是对采集水样的前处理过程,即对水样进行初级处理的过程。处理需要用到具有吸

附性的活性炭和过滤细网,是因为繁杂环境中的水含泥浆沙石与细菌病毒等杂质,如果不将这些杂质去除将会影响后面检测的准确性。对于不同地区的不同水质,需采取的前处理也有一定不同,但总体来说一般为 3 个步骤,即沉淀、过滤与吸附。将待前处理的液体注入沉淀池内静置一段时间将大粒泥土沙子等杂质沉降,然后使用过滤细网滤掉漂浮在水样里面的杂质,之后利用具有吸附性的活性炭吸附水中的细菌等微小杂质。顺序注射分析(SIA)部分含有释压阀、储液环、阀岛、高压电磁阀、试剂瓶、注射泵的试剂管等器件。每种试剂在流路管内需用一小段空气作为隔离,避免试剂在流路中被污染后进入阀岛,选用具有抗腐蚀性的 PTFE 材料作为试剂流通的管路。在水样检测之前,需要先进行消解处理。超声波消解部分,由超声电源、自主设计的变幅杆式超声反应消解池以及高精度压力传感器组成。为保证溶液不与变幅杆上部压电陶瓷接触,该消解池底部设有高精度压力传感器^[20],压力传感器检测到溶液加至限位线时自动停止注入。高锰酸盐浓度检测部分由光源、水样检测池和检测二极管构成。继电器输入电压为 3.3 V,散热风扇要输入 5 V 的电压,阀岛与注射泵需要 24 V 电压,通信模块需输入 3.8 V 电压,因此选用 24 V 直流电源作为电源部分,电源模块的降压和稳压作用由稳压芯片实现。上位机界面用 LabVIEW 软件编辑程序设计远程应用,完成系统平台的数据显示。水质高锰酸盐指数测得数值,设定为每 15 min 记录。若现场系统出现故障,及时远程发送指令开展故障分析,排查故障。

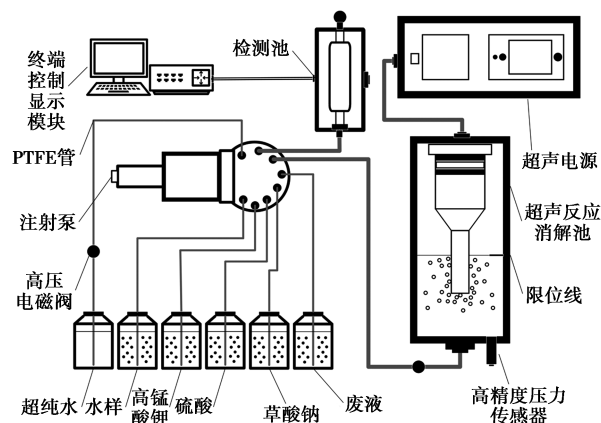


图 2 超声辅助消解及顺序注射平台示意图

2 检测总流程设计

2.1 检测流程设计

该检测系统的重点为检测流程设计,检测数据

准确与否直接受到设计的合理程度影响。将顺序注射技术结合分光光度法,有效减少检测试剂与水样使用量。采样是实验的第一步,将定量水样用被注射泵带动的试剂瓶吸取注入到超声波消解池,为尽量避免管道内壁有试剂残留影响实验结果,采用多通道阀岛切换试剂与水样注射时,在管路内注入小段空气后更换不同试剂,使管路中的水样或试剂所处位置与切换阀产生间隔,从而避免试剂与水样留于阀中切换时混合污染造成结果不准。在使用注射泵抽取所需定量水样或试剂之前,应先抽取大约0.1 mL的该种水样或试剂对管路内壁充分润洗后排放至废液池,该做法可起到避免实验所抽取的定量溶液浓度发生改变的作用,根据已设计好的流程开始依次抽取所需剂量水样及试剂注入到消解池内。系统采样的流程如图3所示。

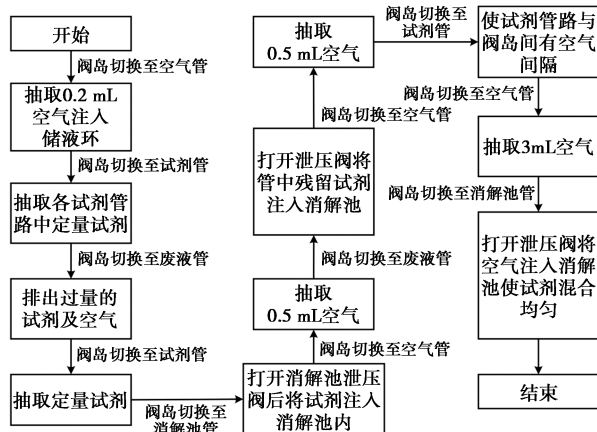


图3 系统采样流程

检测实验的关键部分是标定实验,标定实验流程主要设计为分3次检测信号值:量程、零样以及纯水的信号值。标定实验是比较量程、零样和纯水的信号值的差异是否明显,量程和零样的检测方法基本相似,首先使用超声波辅助溶液快速消解,然后将消解后液体注入检测池,最后将溶液冷却降温后进行检测。找出零样信号值与量程信号值在标定过程中的数据差异,如数据有显著不同,则能确保之后检测的结果精准。如果两者相差不明显,就需要调整信号放大的比例,纯水的电压值放大至2.7 V即可,得到零样的电压信号数值,量程的电压信号数值,运用公式带入零样及量程信号值计算出各吸光度,纵坐标用零样作为起点和将量程标注为终点,横坐标用浓度标注,绘制标定工作的线图。这样标注下所有检测数据均会绘制在该线图范围里面,所以结合标定直线即可得出水样浓度的数值。以上标定过程

的实验流程如图4所示。

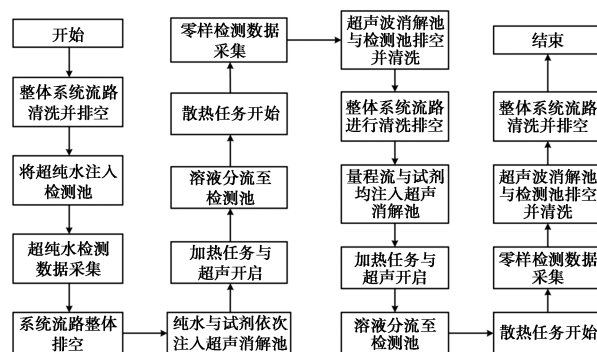


图4 系统标定实验流程

最后一步为设计检测系统实验流程,按照高锰酸盐水质检测仪的技术要求,针对减少检测所需时间、减少试剂用量以及增加检测系统稳定性,对该检测步骤进行一定调整改进。实验流程如图5所示。

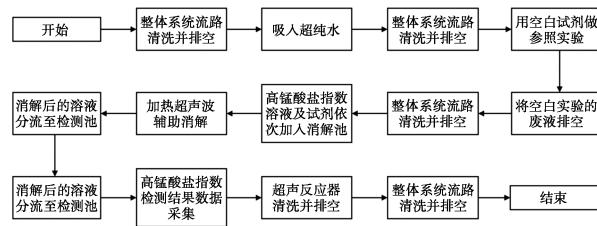


图5 系统整体实验流程

2.2 实验平台搭建

考虑到各模块的实际尺寸进行实验检测平台的结构设计,进行实验检测平台的模型搭建,平台箱内中心竖向放置一块金属板固定于箱体内部,将各主器件分别安置于箱内金属板面上,均匀布局使器件间保持合理距离,不造成相互干扰。固定于箱内金属板一侧的器件有储液环支架、主控板放置槽、注射泵、电磁阀、多通道阀岛以及检测池。固定于金属板另一侧的器件主要有继电器模块、阀岛主体以及超声波消解装置。

进行管路气密性检验以验证实验平台的可靠性,如果液体在实验过程中发生外泄,将对检测结果产生影响。若液体具有腐蚀性,长时间泄漏将会对各器件造成损坏,比如腐蚀性液体流入电路中,将使整个电路系统发生故障。重点检查各部分流路连接处,首先查验连通超声波消解池和高锰酸盐指数检测池之间的管路以及注射泵与电磁阀阀岛间连通的管路端与各进出液体接口的部位密封连接是否可靠。泵和阀岛间连接处的倒锥接头是否拧紧,阀岛用不到的接头需要安装堵头。用注射器压空气进入仪器系统管路、超声波消解池与检测池内部各处的

密闭是否合格,连接处若冒出气泡则气密性欠佳需要进一步调整,反之可证明气密性理想。最后需要检查器件复位情况,上电后可自动复位。以上均无异常,说明平台可以进行实验。

2.3 对比试验设计

常用的加热消解法结合连续光谱法检测相的方法和超声辅助消解技术结合分光光度法检测水质的方法分别进行实验,对比最终检测准确性。对比试验流程(如图6所示)。使用光谱法检测以上2种消解方法经过实验消解后的化合物。

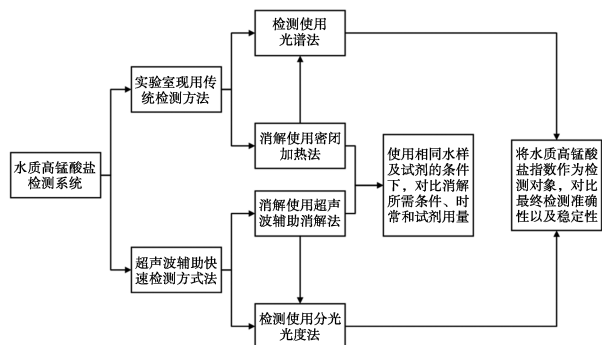


图6 对比试验流程

依照控制变量法设计传统加热消解法结合连续光谱法检测方法和超声辅助消解技术结合分光光度法2种配合检测方法之间的对比试验,需要的仪器有检测管、微型光谱仪、氘-卤钨灯光源、高锰酸盐指数不同浓度标准样品以及高锰酸盐指数525 nm光源。

先进行对比试验,针对不同的消解方法运用控制变量法,2次检测均使用连续光谱法。检测浓度为20 mg/L的高锰酸盐指数样品,使用传统加热消解法和超声辅助消解技术分别对样品进行消解,高锰酸钾水样在含有硫酸的酸性溶液环境下出现强氧化反应。待溶液颜色逐渐呈现无色后消解完成,消解后溶液输送进检测池进行光谱检测,检测池两侧通过光纤传导至光谱仪中检测溶液吸光度。得到光谱检测数据后,绘制吸光度曲线和吸收波长曲线。记录2种消解方法所需的检测时间,计算出2种水质消解法各自的效率数据。之后继续使用控制变量法开展相同消解方法,不同检测方法的对比试验,由于本次实验的超声辅助消解法结合光谱法检测于上次实验已经做过,故可延用上次试验所得数据,因此只需做超声辅助消解法与分光光度法的检测实验与之数据对比即可,需注意要用上次实验浓度相同的样品进行检测。试验结束后分别绘制出水质高锰酸

盐指数曲线图,结合数据与图表进行几种方法的检测精度比较。

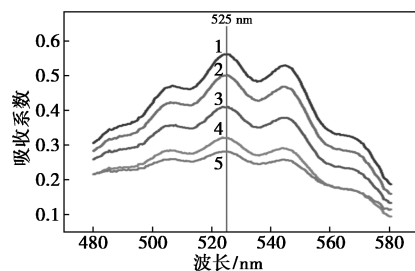
3 实验数据分析

用同浓度的高锰酸盐指数水样,通过控制变量依次采取超声辅助消解法和加热密闭消解法完成2次实验,记录2次消解所使用的时间对比表格(如表1所示)。

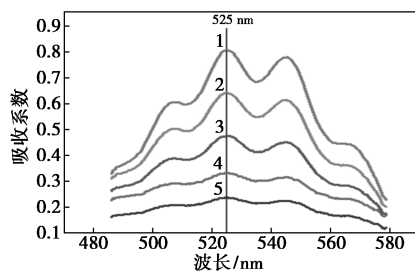
表1 消解方法对比表

消解方法	消解条件	消解时间/ min	检测重复性/ %
加热密闭消解	升温至90℃	25	3.14
超声辅助消解	升温至90℃	10	2.16

经过消解对比之后,下一步进行光谱检测对比。经过超声波消解将溶液注入光谱检测池中并对溶液进行扫描,高锰酸盐指数经扫描数据绘制出的波长曲线图以及吸光度曲线图如图7所示。使用实验室方法进行检测得出的结果如图7(a)所示,该图高锰酸盐指数测定的量程设定为0~8 mg/L,随着浓度升高,吸光度随之降低。浓度偏高的高锰酸盐指数样品中,高锰酸钾与水样内有机物反应时,有机物被氧化时溶液会逐渐转变为无色透明,因此高锰酸盐浓度越高的水样经过氧化后对应的吸光度越低。该检测法进行高锰酸盐指数检测时会测量值测量的准确度造成较大偏差,因此需用最小二乘法原理对测



1—0 mg/L; 2—2 mg/L; 3—4 mg/L; 4—6 mg/L; 5—8 mg/L
(a) 量程范围0~8 mg/L



1—0 mg/L; 2—5 mg/L; 3—10 mg/L; 4—15 mg/L; 5—20 mg/L
(b) 量程范围0~20 mg/L

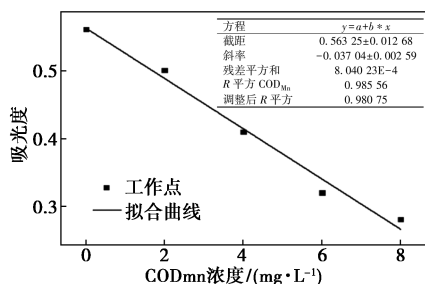
图7 COD_{Mn} 波长与吸光度曲线

得数据进行线性拟合, 所得的回归方程可表示为 $Y = -0.037\ 04X + 0.563\ 25$, 绘制图如图 8(a) 所示, R^2 系数的值为 0.980 75。所采用的超声辅助消解法结合光谱法检测的量程范围是 0~20 mg/L 的高锰酸盐指数溶液, 吸收波长作为横坐标与所测得的吸光度作为纵坐标绘制出的曲线图如图 7(b) 所示, 可看出吸收波峰出现在 525 nm 波长处, 并且 525 nm

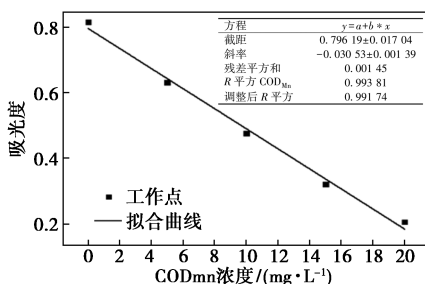
波长处各个浓度的高锰酸盐指数水样测得的吸光度线性比实验室传统方法测得数据的线性更好。以 0 mg/L 作为量程下限, 20 mg/L 作为量程检测上限。经过线性拟合后, 回归方程为 $Y = -0.305\ 3X + 0.796\ 19$, 其中系数 R^2 的值是 0.991 4, 绘制线图如图 8(b) 所示。

经过上述实验室数据与曲线图分析, 先采用超声波辅助高锰酸盐消解, 后对试剂样品进行光谱检测得出的浓度与吸光度曲线相关性与直线性更好。

检测方法的对比实验使用超声辅助消解方法结合分光光度法进行, 针对高锰酸盐指数检测量程为 0~20 mg/L。使用该实验平台开展高锰酸盐指数检测实验前, 首先需要完成标定实验。标定实验的电压信号值结果如下, 纯水 2.703 V、零样 0.741 V、量程 2.016 V。标定完成后使用高锰酸盐指数浓度分别为 0、5、10、15、20 mg/L 的标准配制样品检测实验, 6 次去除干扰后测定的各浓度水样结果为: 浓度为 0 mg/L 的电压值为 0.7 V, 浓度为 5 mg/L 的电压值为 0.924 V, 浓度为 10 mg/L 的电压值为 1.241 V, 浓度为 15 mg/L 的电压值为 1.706 V, 浓度为 20 mg/L 的电压值为 2.228 V。使用朗伯比尔吸收定律, 对以上各浓度的消解后高锰酸盐指数溶液吸光度值进行计算, 计算所得结果需采取最小二乘法进行数据拟合, 拟合后所得数据如表 2 所示。



(a) 量程范围 0~8 mg/L



(b) 量程范围 0~20 mg/L

图 8 对比实验结果

表 2 拟合数据计算

序号	X_i	Y_i	x_i	y_i	$x_i y_i$	X_i^2	e_i^2
1	0	0.586270	-10	0.255852	-2.55852	0	0.000052330756
2	5	0.466230	-5	0.135812	-0.67906	25	0.000018224361
3	10	0.337990	0	0.007572	0	100	0.000057335184
4	15	0.199860	5	-0.130558	-0.65279	225	0.000000970225
5	20	0.061740	10	-0.268678	-2.68678	400	0.000031270464
合计	50	1.652090	0	0	-6.57715	750	0.000160130990
平均	10	0.330418	0	0	—	—	—

根据以上基础数据可以求得:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} = -0.026\ 3 \quad (1)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X} = 0.593\ 5 \quad (2)$$

所以样本的回归方程为:

$$\hat{Y}_i = 0.593\ 5 - 0.026\ 3X_i \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{(\sum x_i y_i)^2}{[(\sum x_i^2)(\sum y_i^2)]} = 0.999\ 1 \quad (4)$$

依据该计算结果, 绘制高锰酸盐指数拟合曲线如图 9 所示。

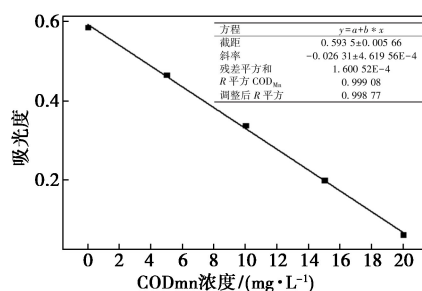


图 9 COD_{Mn} 标准工作曲线

由图9分析,高锰酸盐指数浓度范围在0~20 mg/L,使用该平台进行超声辅助消解配合分光光度法检测得出的结果可以算出,高锰酸盐指数的标准曲线相关系数为 $R^2=0.9991$,由此可得该曲线的相关性优于光谱法。为进行回归系数与回归方程的显著性验证,分别进行如下检验:

$$\hat{\sigma}^2 = (\sum y_i^2 - \hat{\beta}_1^2 \sum x_i^2) / (n - 2) = 5.3376 \times 10^{-5} \quad (5)$$

$$S_e(\hat{\beta}_1) = \sqrt{\text{Var}(\hat{\beta}_1)} = \sqrt{\hat{\sigma}^2 / \sum x_i^2} = 0.0004 \quad (6)$$

$$S_e(\hat{\beta}_0) = \sqrt{\text{Var}(\hat{\beta}_0)} = \sqrt{(\hat{\sigma}^2 \sum X_i^2) / (n \sum x_i^2)} = 0.0056 \quad (7)$$

在显著水平 $\alpha=0.05, n-2=3$ 时,查 t 分布表,得:

$$t_{\alpha/2}(n-2) = 3.2$$

计算:

$$t(\hat{\beta}_1) = (\hat{\beta}_1 - \beta_1) / [S_e(\hat{\beta}_1)] = -56.9 \quad (8)$$

因 $t(\hat{\beta}_1) > 3.2$,故 COD_{Mn} 的回归系数显著。

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (9)$$

在显著水平 $\alpha=0.05, n-2=3$ 时,查 F 分布表得到 $F(1, 3) = 10.13$ 。

$$F = (\hat{\beta}_1^2 \sum x_i^2 / 1) / [\sum e_i^2 / (n - 2)] = 3241.7 \quad (10)$$

由于 $F > F(1, 3)$,故回归方程线性关系显著。

4 结语

依据超声技术在水介质中传播产生空化效应能加速化学反应的原理,基于光吸收定律即朗伯比尔定律原理与顺序注射技术相结合,自主设计了系统超声反应消解器结构。针对现代水质高锰酸盐浓度快速在线监测仪器的需求,参照水质 COD_{Mn} 仪器技术要求,提出并验证了超声辅助高锰酸盐消解方法,相比于现有水质高锰酸盐浓度国家标准检测方法,能够高效快速消解高锰酸盐,缩短检测时间,满足水质高锰酸盐快速检测的需求,在环境监测领域的水质高锰酸盐快速检测有应用价值。

参考文献

[1] 朱欢,张飞,季晔鑫.环境水样中高锰酸盐指数测定方法研究进展[J].环境与发展,2014,26(4):76-78.
 [2] GB/T 11892—1989.水质高锰酸盐指数的测定[S].
 [3] 李文,汪楷健,杨守波,等.应用超声消解快速检测COD方法的实验研究[J].工业水处理,2016,36(6):90-93.
 [4] 方桂红,李晓珍,周静.超声技术在食品行业中的应用[J].轻工

科技,2021,37(11):1-3.

[5] Tan K L, Yeo S H. Bubble dynamics and cavitation intensity in milli-scale channels under an ultrasonic horn[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 58: 104666.
 [6] Ye Linzheng, Zhu Xijing, Liu Yao. Numerical study on dual-frequency ultrasonic enhancing cavitation effect based on bubble dynamic evolution [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 59: 104744.
 [7] 买巍,赵晓明,张健飞,等.紫外-可见光谱结合多元分析法在线检测混合染料溶液化学需氧量[J].光谱学与光谱分析,2017,37(7):2105-2109.
 [8] Kavdir, Ilay, Camci Cetin, et al. Monitoring composting process of olive oil solid waste using FT-NIR spectroscopy[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51(6): 816-828.
 [9] 潘伟超,邹俏,刘红.超声辅助消解-ICP-MS法测定矿山废水中钍含量的不确定度评定[J].世界核地质科学,2021,38(4): 517-525.
 [10] 周艺蓉.水质高锰酸盐指数的测定方法探讨[J].农业与技术,2021,41(9):91-93.
 [11] 杨颖,程祥圣,张辉.流动注射-分光光度法测定河口中氨氮的盐效应及校正[J].理化检验:化学分册,2015,51(2):197-199.
 [12] 胡博,叶峻宏,贾衍琰,等.超声-分光光度法快速测定水样中的化学需氧量[J].应用化工,2017,46(1):190-193.
 [13] Ahmed S. Novel spectrophotometric method for selective determination of compounds in ternary mixtures (dual wavelength in ratio spectra) [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015, 147: 257-261.
 [14] 曹军,钟声.对国产高锰酸盐指数在线监测仪的性能探究[J].环境科技,2018,31(3):71-73.
 [15] 褚华男,农永光,郭炜,等.分光光度法测定高锰酸盐指数中有关问题探讨[J].应用化工,2013,42(11):2115-2117.
 [16] Johansson Ö, Pamidi T, Löfqvist T. Design of a high-intensity ultrasound reactor [C] // 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Washington, DC, USA, 2017: 1-4.
 [17] Savin I I, Tsyganok S N, Lebedev A N, et al. Ultrasonic chemical reactors [C] // 2007 8th Siberian Russian Workshop and Tutorial on Electron Devices and Materials. IEEE, 2007: 289-292.
 [18] 李明宇,胡丽华,云泽霖,等.一种前端开放式超声换能器封装结构[J].电声技术,2022,46(7):23-27.
 [19] Daw J, Tittmann B, Reinhardt B, et al. Irradiation testing of ultrasonic transducers [C] // 2013 3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA). IEEE, 2013: 1-7.
 [20] 蓝镇立,杨晓生,周国方,等.小尺寸高精度薄膜压力传感器研制[J].传感器世界,2022,28(10):20-25. ■