

改进分光光度法测 Ni 以规避大量干扰离子

谭淞文^{1,2} 李维国^{1*} 丛媛媛³ 公天齐¹ 李红桔¹

(1. 哈尔滨工业大学(威海)海洋学院,威海 264200; 2. 中联重科环境产业分公司,长沙 410000;
3. 威海市环境保护监测站,威海 264200)

摘要 为测定含大量干扰离子的水样中镍的浓度,提出一种改进的分光光度法。即以多种物质的吸光曲线回归方程,将实时测得的水样吸光度分解成多种物质的吸光度,利用多元一次方程进行求解并计算出浓度的方法。新方法在不进行修正时,对含 Cr^{6+} 干扰的水样 Ni^{2+} 测定的结果,误差较小。多组分的水样测量吸光度误差较大,通过引入修正系数修正后误差大幅下降。方法中 Ni^{2+} 、 Fe^{3+} 的吸光度与显色时间基本无关;而对于 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cr^{6+} ,显色时间应控制在 0.5 ~ 2.5 min 内或 10 min 外,以保证测得吸光度值的稳定与准确。对组成不同的含 Mn^{2+} 和 Fe^{3+} 水样测得的 Ni^{2+} 浓度分析,变异系数(CV)4.74%,检出限为 0.275 mg/L,精确度和精密性较好。同时,这种规避方法还具有其他作用,可以在分析组分的同时粗略算出含量。

关键词 分光光度法 镍 干扰离子 回归方程

中图分类号 X832 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)09-3161-06

Improved spectrophotometry of Ni measuring for masking many interference ions

Tan Songwen^{1,2} Li Weiguo¹ Cong Yuanyuan³ Gong Tianqi¹ Li Hongju¹

(1. Marine College, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China; 2. Environmental & Sanitation Branch Company, Zoomlion Heavy Industry Science & Technology Development Co. Ltd., Changsha 410000, China;
3. Environmental Protection Monitoring Stations in Weihai, Weihai 264200, China)

Abstract For masking many interference ions, this paper introduced a new method of Ni determination using improved spectrophotometry. With a variety of material suction light curves regression equations, the real-time measurement of water absorbency are decomposed into various material spectrophotometry. Errors of Ni^{2+} determination interfered with Cr^{6+} are small without correction. For errors of more complex samples, they plunged through introducing the error correction coefficient. Absorbency of Ni^{2+} or Fe^{3+} won't change as the change of time. But for the absorbency of Mn^{2+} , Cu^{2+} or Cr^{6+} are stable and precise, time must be limited in 0.5 ~ 2.5 min or 10 min later. The Ni^{2+} measured by this new method of the water, which including Mn^{2+} and Fe^{3+} , had the coefficient of variation(CV) for 4.74% and detection limit for 0.275 mg/L. That all means the accuracy and precision are good. Furthermore the method could have another application value of figuring out their contents approximately while analyzing samples.

Key words spectrophotometry; Ni; interference ions; regression equation

工业废水中常含有各种重金属离子会引起水污染。其中 Ni 对生物毒性极大,不能生物降解且容易在生物体内累积^[1,2]。因此废水中 Ni 的排放要求非常严格,例如制药工业排放标准要求 Ni 的排放限制为 1 mg/L^[3]。

分光光度法测 Ni 是目前对镍监测广泛使用的国家环境保护总局发布的标准方法^[4],即氨性碘溶液中, Ni 与丁二酮肟作用,形成酒红色可溶性络合物,用分光光度法测定。由于一些金属离子影响测定,该方法要求即使同时使用掩蔽剂柠檬酸钠和

EDTA 时, Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cr^{6+} 也不能超过 5 mg, Fe^{3+} 不能超过 3 mg, Hg^{2+} 、 Co^{2+} 不能超过 1 mg, Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 不能超过 0.5 mg, Ag^{+} 、 Cr^{3+} 不能超过 0.05 mg^[5]。这说明金属离子含量一旦超过这些数值,测量结果会不准确。而实际水质监测中,废水中

收稿日期:2011-01-07;修订日期:2011-03-09

作者简介:谭淞文(1990~),男,本科生,主要从事环境工程水处理研究工作。E-mail:tansongwen@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail:lwghmmmm@yahoo.com.cn

含有多种大量的金属离子的情况并不少见,一般只能通过沉淀、络合、萃取或稀释的手段减小影响。由于这些手段存在共沉淀、非理想的络合或萃取会降低 Ni 的浓度,以及稀释增大误差的不足,对含大量干扰离子的废水中 Ni 浓度的测量便存在较大的改良需求。

1 研究方法

1.1 方法原理

分光光度法立足于 Lambert-Beer 定律^[6],即吸光度和浓度成正比且吸光度具有加和性。改进的方法是基于论文前言所述的国标方法所提出的,以总吸光度作为 Ni^{2+} 的吸光度和干扰离子的吸光度之和,联立各波长下测出并建立的标准曲线求解。方法运用时,首先明确待测水样的干扰离子种类。根据种类的多少,假设已知是 4 种干扰离子,则必须选择 5 个波长,在 5 个波长下分别建立吸光度与浓度的相关方程(如果 3 种组分,就要 4 个波长),可以称其为 5 个子方程;然后再在各波长下测定混合溶液的吸光值,建立混合溶液吸光值与浓度之间的关系,我们称其为 5 个总方程。面对混合溶液,我们可以直接测定其吸光值,再根据上述 5 个子方程和 5 个总方程,计算出各组分的含量。由于 Ni 的分光光度法测量中在波长为 440 nm 和 560 nm 有最大吸收峰,因此,本实验选取的 5 个波长范围在 440 ~ 560 nm 之间。

如果有需要,这个方程组同时还能解出干扰离子的含量。某种意义上,这种多波长的测量方法是对双波长分光光度法的改进和延伸^[7]。

1.2 实验方法

仪器:可见光分光光度计(NEULABO 2200Pro UV-visible spectrophotometer),数显恒温水浴锅(山东鄄城新科教学仪器厂 HH-4)。药剂:氯化镍、硫酸锌、氯化钙、硫酸镁、铬酸钾、氯化铬、硫酸铁、硫酸亚铁、硫酸汞、氯化钴、硫酸铜、硫酸锰、硝酸银以及国标中测镍的药品均为分析纯。所测对象均水浴恒温:20℃;室温:12 ~ 15℃。

定性实验表明,大量的 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 可和丁二酮肟络合显色, Cr^{6+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cr^{3+} 自身具色, Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 与丁二酮肟形成带色沉淀, Hg^{2+} 、 Ag^{+} 与氨性碘溶液形成碘化物沉淀, Ca^{2+} 络合而消耗显色剂不显色,这些都干扰测量。

其中, Mg^{2+} 、 Hg^{2+} 或 Ag^{+} 在碱性条件下生成沉淀,这种干扰是不可避免的。而 Fe^{2+} 可在加热条件下被氧化剂完全氧化成 Fe^{3+} 。同时, Ca^{2+} 与显色剂络合而消耗显色剂,这在显色剂过量的条件下不干扰监测。改进的改进分光光度法测 Ni 主要是规避大量的 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Cr^{3+} 和 Fe^{3+} ,即络合显色和自身具色的物质。由于干扰显色的机理大致相同,此实验代表性的研究 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Fe^{3+} 的干扰去除。由于在波长 440 ~ 560 nm 间, Ni 在络合显色后所测的摩尔吸光系数比较大,因此利用分光光度计测出 Ni 和这些物质在波长 440、470、500、530 和 560 nm 下的吸光度和浓度的关系,运用 Origin 软件拟合回归方程并绘制成标准曲线。

在工业检测中,我们需要估计废水水样中可能含有的干扰离子,由于废水中各离子的吸光度具有一定的加和性,选择这些物质对应的多个光波长下标准曲线,然后在 440 ~ 560 nm 下测定混合水样的吸光度 A,根据下式求得对应浓度:

$$A_1 = Y_{11} + Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} \cdots (Y = kC + b \text{ 标准曲线})$$

$$A_2 = Y_{21} + Y_{22} + Y_{23} + Y_{24} \cdots$$

$$A_3 = Y_{31} + Y_{32} + Y_{33} + Y_{34} \cdots$$

$$A_4 = Y_{41} + Y_{42} + Y_{43} + Y_{44} \cdots$$

$$\cdots \cdots \quad (\text{吸光度加和})$$

其中, A_i 是第 i 组波长下测得的吸光度, Y_{ij} 是第 i 组波长下第 j 种物质的吸光度($i, j = 1, 2, 3, 4 \cdots$), C 为物质浓度, k 和 b 是已测曲线参数。

因此,联立吸光度与浓度关系的总方程和子方程即可求得的对应该物质的浓度(C)。同时通过引入校正系数和考虑显色时间的影响,进一步对方法的准确度进行优化。

1.3 吸光度标准曲线

由于各种离子与显色剂显色后在同一波长下的吸光度不同,我们测量多组分含大量干扰离子废水的时候,需要选取作为计算的波长应满足所有待测物质在该波长下均有较好的吸光性。由于显色时间、水温以及作图方法等因素对标准曲线有影响,以下给出参考性的标准曲线及其数据。如图 1 所示,在 440 ~ 560 nm 间测量的标准曲线, Cu^{2+} 、 Cr^{6+} 应选取 440 nm 以获得较大的吸光度值,而 Mn^{2+} 在 560 nm 下线性相关性最好。根据这些曲线,可以直观地决策该使用多少纳米波长的光来测量吸光度,以得到更准确的结果。

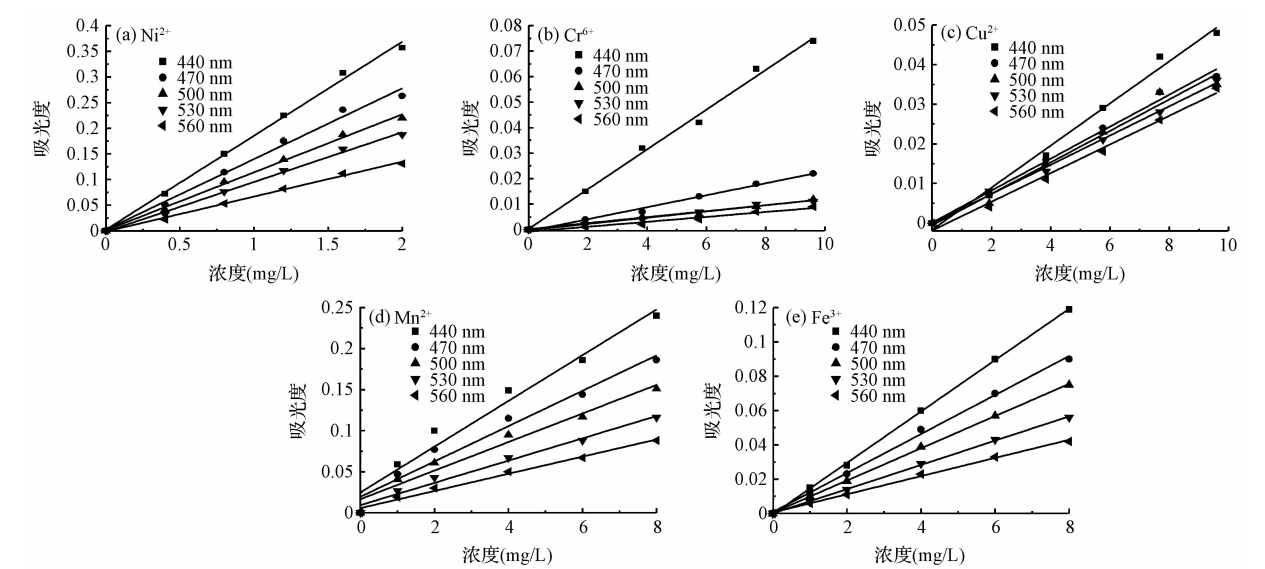


图 1 吸光度与显色液中浓度变化关系的标准曲线

Fig. 1 Standard curves of absorbance as change of concentration

表 1 吸光度标准曲线数据

Table 1 Data of absorbance stadard curve						
离 子	数据种类	440 nm	470 nm	500 nm	530 nm	560 nm
Ni ²⁺	截距	0.0019	0.0019	0.0009	−0.0018	−0.0015
	斜率	0.1834	0.1379	0.1131	0.09693	0.06814
	相关系数 <i>R</i> ²	0.9957	0.9884	0.9951	0.9956	0.9949
Cr ⁶⁺	截距	0.0002	−0.0006	0.0002	−0.0002	−0.0008
	斜率	0.0078	0.00235	0.00118	0.00122	9.673E − 4
	相关系数 <i>R</i> ²	0.9928	0.9906	0.9769	0.9836	0.9504
Cu ²⁺	截距	−0.0017	0.0001	−0.0006	0	−0.0019
	斜率	0.00531	0.00403	0.00397	0.00369	0.00362
	相关系数 <i>R</i> ²	0.9878	0.9901	0.9746	0.9962	0.9883
Mn ²⁺	截距	0.0249	0.0196	0.0167	0.0094	0.0058
	斜率	0.02783	0.02151	0.01738	0.01355	0.01044
	相关系数 <i>R</i> ²	0.9576	0.9578	0.9552	0.9762	0.9852
Fe ³⁺	截距	−0.0004	0.0009	0.0005	0.0001	0.0006
	斜率	0.01497	0.01137	0.00939	0.00706	0.00529
	相关系数 <i>R</i> ²	0.9996	0.9975	0.9995	0.9994	0.997

2 结果与分析

2.1 利用吸光度计算浓度

对于水样中含大量 Cr^{6+} 干扰离子的废水,通过测得混合后的吸光度(表 2)。选定 440 nm 和 500 nm 2 个光度下的数据进行计算。根据实验方法有:

$A_1 = Y_{11} + Y_{12} = 0.423; A_2 = Y_{21} + Y_{22} = 0.230$ 。而对于 Ni^{2+} : $Y_{11} = 0.183C_1 + 0.002$ (440 nm), $Y_{21} = 0.113C_1 + 0.001$ (500 nm); 对于 Cr^{6+} : $Y_{12} = 0.0078C_2$ (440 nm), $Y_{22} = 0.00118C_2$ (500 nm)。求解得: $C_1 = 1.936, C_2 = 8.686$ 。理论上 Ni^{2+} 在显色液中的浓度是 2 mg/L,新方法所测浓度误差对 Ni^{2+}

为-3.2%。若选定 440 nm 和 530 nm 2 个光度下的数据进行计算,则求得 $C_1 = 1.916$,误差为-4.2%;选定 470 nm 和 560 nm 2 个光度下的数据进行计算,则求得 $C_1 = 1.689$,误差为-15.5%,这也说明选定 440 nm 较好于其他。由图 1 的标准曲线亦知,Cr 在 440 nm 下浓度与吸光度的线性相关性更好。而鉴于仪器的稳定程度,吸光值最好在 0.1 到 1.0 之间。因此,必须要正确选择波长。

表 2 水样吸光度(Ni^{2+} : 2 mg, Cr^{6+} : 7.6 mg)
Table 2 Absorbency of solution (Ni^{2+} : 2 mg, Cr^{6+} : 7.6 mg)

波 长	440 nm	470 nm	500 nm	530 nm	560 nm
吸光度	0.423	0.295	0.230	0.195	0.138

而对于含多种物质的水样,例如主要含 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Fe^{3+} 的 3 组分水样,或含有 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{6+} 和 Cu^{2+} 5 种物质的水样,采用上面的计算方法,可以根据光波长 440、470、500、540 和 570

nm 下的吸光度加和式建立五元一次方程求解浓度。实际应用中,可以在 360~560 nm 下尽量多的建立吸光度曲线,得到尽量多的回归方程以解出含更多组分的水样各浓度。当然,组分越多误差越大,还需要通过研究理论加和与实验吸光度误差,引入校正系数和考虑显色时间影响以完善这个方法。

2.2 理论加和与实验吸光度误差

为验证 Lambert-Beer 定律的吸光度加和性的适用度,即测试式 $A = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \cdots$ 与实验真实所测的误差,在各种混合干扰离子的含 Ni 水溶液中测试理论加和与实验吸光度之间的误差。根据表 2 所示,一种干扰离子大量存在下的检测,理论加和与实验吸光度误差较小,锰或铜的干扰较大于铬;多种干扰离子存在的情况下误差增大,4 种干扰离子存在时误差超过 10%,此时误差较小的数据取自波长为 440 nm 和 560 nm 下所测。则当检测复杂多干扰离子水样时,误差就已经达到较大的程度,需要修正所测数据,引入修正因子。

表 3 理论与实验吸光度误差
Table 3 Error between theory and experiment absorbency

物质含量 (mg/L)		波 长 (nm)				
		440	470	500	530	560
Ni^{2+} : 2; Cr^{6+} : 7.6	实验吸光度	0.423	0.295	0.230	0.195	0.138
	理论加和	0.427	0.295	0.236	0.201	0.141
	实验误差	-1.0%	+0.0%	-2.5%	-3.2%	-2.4%
Ni^{2+} : 2; Cu^{2+} : 7.6	实验吸光度	0.426	0.302	0.236	0.220	0.170
	理论加和	0.406	0.308	0.256	0.220	0.160
	实验误差	+4.9%	-2.1%	-8.6%	-0.1%	+6.0%
Ni^{2+} : 2; Mn^{2+} : 4	实验吸光度	0.539	0.406	0.339	0.275	0.198
	理论加和	0.504	0.384	0.314	0.259	0.183
	实验误差	+6.9%	+5.7%	+8.0%	+6.2%	+8.2%
Ni^{2+} : 2; Mn^{2+} : 2; Fe^{3+} : 4	实验吸光度	0.545	0.422	0.353	0.284	0.199
	理论加和	0.509	0.389	0.316	0.261	0.184
	实验误差	+7.1%	+8.5%	+11.7%	+8.8%	+8.2%
Ni^{2+} : 1.2; Mn^{2+} : 2; Fe^{3+} : 2; Cr^{6+} : 2; Cu^{2+} : 2	实验吸光度	0.394	0.316	0.244	0.192	0.144
	理论加和	0.356	0.266	0.217	0.175	0.125
	实验误差	+10.8%	+18.8%	+12.4%	+9.7%	+15.2

2.3 修正系数

由于 Ni^{2+} 和丁二酮肟形成稳定的酒红色可溶性络合物,吸光度与浓度拟合成的回归曲线相关系数 $R > 0.99$,且为主要待测物质。则令其吸光度修正系数为 1 作标准以确定其他物质的修正系数。由

于 Mn^{2+} 的络合物线性相关性最差,故以其为代表研究修正系数。根据表 3,如在 440 nm 下,实测吸光度和 Ni^{2+} 的络合物吸光度差为 0.171,则 Mn^{2+} 修正系数 = $0.171/\text{Mn}^{2+}$ 络合物吸光度 = $0.171/0.136 = 1.26$;同理可求得所有波长下的修正系数。故 1.2

实验方法中提到的计算公式引入修正系数后变为 $A = a_1 Y_1 + a_2 Y_2 + a_3 Y_3 + a_4 Y_4 \cdots$, 则可以计算得到修正后的浓度。实验数据表明引入修正系数后的吸光度误差明显减小, 如表 4 所示含 Mn^{2+} 和 Fe^{3+} 2 种干

扰离子的情况下, 仅通过修正 Mn^{2+} 的吸光度也能将误差降到很小的范围内。这个方法的实际运用, 完全可以通过编写修正系数的标准资料表, 在计算加和吸光度时引入修正系数, 以达到更高的准确度。

表 4 Mn^{2+} 修正系数
Table 4 Correction coefficient of Mn^{2+}

波 长 (nm)	Ni^{2+} : 2 mg/L 时吸光度	Mn^{2+} : 4 mg/L 时吸光度	加和吸光度	实测吸光度	修正系数
440	0.368	0.136	0.504	0.539	1.26
470	0.278	0.106	0.384	0.406	1.21
500	0.227	0.087	0.314	0.339	1.29
530	0.192	0.063	0.259	0.275	1.32
560	0.135	0.048	0.183	0.198	1.31

表 5 修正后误差 (Ni^{2+} : 2 mg/L, Mn^{2+} : 2 mg/L, Fe^{3+} : 4 mg/L)
Table 5 Fixed error (Ni^{2+} : 2 mg/L, Mn^{2+} : 2 mg/L, Fe^{3+} : 4 mg/L)

波 长 (nm)	实验吸光度	加和吸光度	理论误差 (%)	修正后加和吸光度	理论误差 (%)
440	0.545	0.509	-6.6	0.541	-0.7
470	0.422	0.389	-7.8	0.414	-1.9
500	0.353	0.316	-10.5	0.338	-4.2
530	0.284	0.261	-8.1	0.274	-3.5
560	0.199	0.184	-7.5	0.193	-2.9

2.4 显色时间

由于实验全程均水浴控温在 $20 \sim 20.2^\circ\text{C}$, 温度的影响极小。为了进一步完善方法, 各种离子络合丁二酮肟的稳定性又有所差异, 应考虑显色时间对吸光度的影响。数据表明, Ni^{2+} 和 Fe^{3+} 稳定性很好, 不需要特别控制读数时间; 而其他离子的吸光度会在 $0.5 \sim 2.5 \text{ min}$ 内维持稳定后, 随着显色时间的加长而降低, 10 min 以后又呈新的稳定状态。因此, 使用新方法监测, 应控制读数时间在 2.5 min 内或

10 min 外。本实验读取吸光度的时间均在 $1 \sim 2 \text{ min}$ 之间。

2.5 方法精确度和精密度

由于此分光光度法测量各种物质的检出限不同, 甚至相差一个数量级。实验选取含 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Fe^{3+} 的废水进行分析, 旨在研究在含 2 种大量干扰离子时, Ni 检测的精确度和精密度。

配置含 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Fe^{3+} 不同比例的混合废水, 根据方法在波长 440 、 470 和 500 nm 下测量并修正 Mn^{2+} 的吸光度后, 计算出 Ni^{2+} 的浓度 (表 5)。所得此检测结果的变异系数为 4.74% , 检出限为 0.275 mg/L , 方法具有较好的精确度和精密度。

3 讨 论

改进后的分光光度法由于能在干扰离子大量存在的情况下较好的测量 Ni^{2+} 含量。若有需要, 还可以利用方程式解出干扰离子的大致含量。然而纸笔计算这些多元一次方程颇为费时, 通过计算机存储

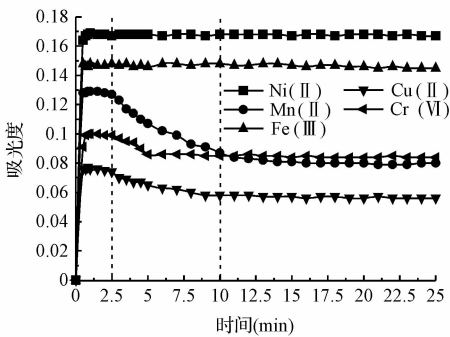


图 2 吸光度随显色时间的变化
Fig. 2 Absorbency variation with of time

表 6 精确度与精密度 (含 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Fe^{3+})
Table 6 Accuracy and precision (including Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+})

组 成	浓度计算值 (mg/L)	组 成	浓度计算值 (mg/L)	组 成	浓度计算值 (mg/L)
2:5:3	1.97	2:3:1	2.06	(理论值)仅 Ni^{2+}	2.00
2:5:1	1.95	2:2:3	1.89	平均值	1.93
2:4:3	1.82	2:2:1	2.02	标准偏差	0.0915
2:4:1	1.91	2:1:3	1.88	变异系数	4.74%
2:3:3	1.79	2:1:1	2.04	检出限	0.275

复杂的标准曲线等信息,并利用数学工具编程对实时数据分析求值,十分快速。这且很大程度上促进水质监测工作的自动化,更能突出此方法便于实时监测、直接读数的优点。由于此方法只涉及多元一次线性方程的计算,利用 Visual C 或 MATLAB 等软件编程能瞬间求解,算法采用高斯消元法^[8,9]。

同时,这种方法具有广泛应用价值。例如,利用此多波长分光光度法测定含大量干扰物质水样中的 Fe 离子,原理是相同的。而且,由于此法不但能测量待测物质的浓度,还能测出干扰物质的含量,这将有利于开发新的分析方法。例如,在 254 nm 下有机物具有一定的吸光度^[10,11],这种方法可以借鉴用来分析水质的 COD 值,甚至各种有机物含量。

4 结 论

(1)新方法在不进行修正的情况下,对含 Ni^{2+} 、 Cr^{6+} 的双组分水样进行测量,在选定不同波长下测得的数据求得的 Ni^{2+} 浓度误差分别为 -3.2%、-4.2% 和 -15.5%。

(2)在引入修正系数前,含 1 种干扰离子的实测吸光度和理论值之间的误差较小,而含 2 或 4 种干扰离子时,部分误差超过 10%。引入修正系数修正 1 种干扰离子后,含 2 种干扰离子的测定误差降至 5% 以内。

(3)方法中 Ni^{2+} 、 Fe^{3+} 的吸光度与显色时间基本无关;而对于 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cr^{6+} ,显色时间应控制在 0.5~2.5 min 内或 10 min 外,以保证测得吸光度值的稳定与准确。

(4)分析了此种方法的精确度和精密度,对混合组分的 10 次测量得出的 Ni^{2+} 浓度,标准偏差为 0.0915 mg/L,变异系数 4.74%,有较好的可信度。

参 考 文 献

[1] 赵清华,全学军,谭怀琴,等.柑橘皮渣生物吸附剂对

Ni^{2+} 的吸附特性.重庆工学院学报,2009,23(5):50-54
Zhao Qinghua, Quan Xuejun, Tan Huaqin, et al. Adsorption properties of orange peel adsorbent for Ni^{2+} . Journal of Chongqing Institute of Technology,2009,23(5):50-54 (in Chinese)
[2] 郭平,郎兴华,郭鹏.固定化细菌吸附铜、锌和镍最佳包埋条件的确定.环境保护科学,2009,35(1):9-11
Guo Ping, Lang Xinghua, Guo Peng. To confirm the optimal entrapping condition of the immobilized bacteria beads which adsorbs cuprum, zinc and nickel. Environmental Protection Science, 2009,35(1): 9-11 (in Chinese)
[3] 环境保护部/国家质量监督检验检疫总局.化学合成类制药工业水污染物排放标准 (GB 21904-2008).北京:中国标准出版社,2008
[4] 国家环境保护总局.水质镍的测定 丁二酮肟分光光度法 (GB11910-89).北京:中国标准出版社,1990
[5] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第4版).北京:中国环境科学出版社,2002.375-377
[6] Eaton A. D. Measuring UV-absorbing organics: A standard method. Jour. AWWA, 1995, 87(2):86-90
[7] 厦门大学化学系分析化学教研室.双波长分光光度法原理简介.分析化学,1978,6(3):224-231
[8] 李文汉.高斯消元法是中国古法.中国大学教学,1992,(1):30-32
[9] 蔡和熙,陈沐天.对高斯消元法的改进以及在工程上的应用.计算机辅助工程,1997,(4):61-66
Cai Hexi, Chen Mutian. Improvement to gaussian elimination and its engineering application. Computer Aided Engineering, 1997,(4): 61-66(in Chinese)
[10] 国家环境保护总局.紫外(UV)吸收水质自动在线监测仪技术要求(HJ/T 191-2005).北京:中国标准出版社,2005
[11] 袁雅姝,傅金祥,刘军.紫外分光光度法测 COD 影响因素研究.辽宁化工,2010,39(4):448-450
Yuan Yashu, Fu Jinxiang, Liu Jun. Study on influencing factors of determining COD with UV spectrophotometry. Liaoning Chemical Industry, 2010,39(4): 448-450 (in Chinese)