

刘建, 闫英桃, 候兴汉. 2009 二乙烯三胺接枝螯合絮凝剂的制备及其除汞性能[J]. 环境科学学报, 29(12): 2591–2596

Liu J Y, Yan Y T, Hou X H. 2009 Preparation of a chelating flocculant grafted with diethylene triamine and its performance in the removal of mercury[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(12): 2591–2596

# 二乙烯三胺接枝螯合絮凝剂的制备及其除汞性能

刘建<sup>\*</sup>, 闫英桃, 候兴汉

长安大学环境科学与工程学院化工系, 西安 710054

收稿日期: 2009-03-25 修回日期: 2009-05-31 录用日期: 2009-10-15

摘要: 以聚丙烯酰胺(PAM)、甲醛、二乙烯三胺(DETA)为原料,按照 Mannich 反应机理制备部分胺化接枝型螯合絮凝剂(CFA),并对其去除水中汞的性能进行了研究.同时,实验考察了螯合絮凝剂合成及从含汞废水中除汞的最佳条件.结果表明,基于在聚丙烯酰胺分子长链上引入具有螯合作用的基团,所得的螯合絮凝剂既具有捕捉  $Hg^{2+}$  的螯合作用又具有絮凝作用,对含汞  $8\text{ mg L}^{-1}$  的模拟废水,按 0.020% 的投加量(絮凝剂与废水质量比),在搅拌速度  $80\sim 100\text{ r min}^{-1}$ 、搅拌时间  $15\text{ min}$ 、沉降时间  $10\text{ min}$  的条件下,进行絮凝沉淀处理后,可去除 99.5% 的汞,除汞效果明显,处理后的水可达到国家排放标准.因此,螯合絮凝剂可用于低浓度含汞废水的处理.同时,该螯合絮凝剂具有合成工艺简单、除汞快速、操作简便等特点,可望成为一种新型、低成本含汞废水处理材料.

关键词: 汞; 螯合絮凝剂; 除汞; 含  $Hg^{2+}$  废水; 二乙烯三胺

文章编号: 0253-2468(2009)12-2591-06 中图分类号: X131 文献标识码: A

## Preparation of a chelating flocculant grafted with diethylene triamine and its performance in the removal of mercury

LIU Jian<sup>\*</sup>, YAN Yingtao, HOU Xinghan

Department of Applied Chemistry, College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054

Received 25 March 2009 received in revised form 31 May 2009 accepted 15 October 2009

**Abstract** A novel and low-cost method to remove mercury from wastewater is obtained. Based on the Mannich-Reaction, a chelating flocculant grafted with diethylene triamine has been prepared from polyacrylamide (PAM), formaldehyde and diethylene triamine (DETA). Use of the prepared flocculant to remove mercury from wastewater was studied. The optimal conditions for synthesizing the flocculant and using it to remove mercury were determined. The results show that the as-obtained flocculant possessed good flocculation and mercury capture due to the introduction of the chelating functional group grafted on the long chain of PAM. For wastewater containing  $8\text{ mg L}^{-1}$  mercury, 99.5% of mercury was removed from water under the following conditions: added flocculant volumetric concentration 0.020%; stirring rate  $80\sim 100\text{ r min}^{-1}$ ; stirring time  $15\text{ min}$ ; and sedimentation time  $10\text{ min}$ . The treated water reached the national standard for wastewater released to rivers.

**Keywords** mercury; chelating flocculant; removing mercury; wastewater with  $Hg^{2+}$ ; diethylene triamine

### 1 引言 (Introduction)

重金属离子在水体和土壤环境中都不能被微生物分解而消失,成为环境中的持久性污染物,且重金属离子对水体的污染会造成严重的生态环境问题.因此,世界各国针对水中重金属离子含量制定了严格的排放标准(金熙等,1999).  $Hg^{2+}$  是毒性极大的重金属离子,溶入水体中的  $Hg^{2+}$  在自然环境条件下可进一步转化为汞的烷基化合物,其毒性更大.在矿物采选、冶金、催化化工及电子工业生产过

程中,由于自然释放或生产中汞的使用,汞都容易以  $Hg^{2+}$  的形式溶解在水体中,形成含汞废水.由于汞的毒害性较大,因此,含汞废水需深度处理后才能满足排放要求.目前,含汞废水处理方法主要有化学沉淀法(唐宁等,2004;吴秀英等,1995)、混凝沉淀法(孟祥和等,2000)、吸附法(王代芝等,2004;Dias Filho *et al.*, 2006)、树脂吸附法(Senkalet al., 2004;Bicak *et al.*, 2003)及其他一些方法(张延安等,1997;黄美荣等,2005).在实际应用中,化学和混凝沉淀法因操作简单、效率高的特点得到广泛应

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50679003)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50679003)

作者简介: 刘建(1954—),男,教授,\*通讯作者(责任作者),E-mail: liujian@chd.edu.cn

Biography: LIU Jian (1954—), male professor, \*Corresponding author, E-mail: liujian@chd.edu.cn

用,一般所采用的沉淀剂为硫化钠、氢氧化钙等,但为能达到汞排放标准,试剂用量要远大于理论用量.吸附法以固液分离为特点,特别适用于微量重金属离子污染废水处理,但选择性低是该类方法难以克服的缺陷.另外,该法还存在着试剂投放量大、处理材料成本高、易造成二次污染,难以达到深度去除汞等缺点.尤其是处理大量含汞废水时,这些缺点显得尤为突出.利用絮凝剂处理污染废水(如印染废水、含油废水及高浊水等),具有试剂用量少、操作简便、成本低且处理量大等优点.但目前有关用絮凝剂处理含重金属离子废水的报道尚不多见,且絮凝剂一般仅作为促进沉降的助剂使用.根据絮凝剂絮凝机理,絮凝剂不具有去除水溶性离子的性能,倘若在絮凝剂结构中引入能够捕捉汞离子基团,使其同时具备与汞离子反应和絮凝两种性能,可望获得能够有效处理含汞废水的实用方法.

因此,本文以聚丙烯酰胺(PAM)分子链为骨架,按照 Mannich 反应机理(李述文等,1981),通过甲醛甲基化接枝具有螯合功能基团的二乙烯三胺(DETA)分子,合成得到部分胺化接枝型螯合絮凝剂(CFA),并通过实验验证该絮凝剂去除水中  $Hg^{2+}$  的性能.同时,考察并确定螯合絮凝剂合成及除汞过程的最佳工艺条件,以期获得一种新的处理含汞废水材料和方法.

## 2 实验部分 (Experimental)

### 2.1 实验仪器与试剂

仪器: CS50II 型电热恒温水浴锅(重庆实验仪器厂)、JJ-1 电动搅拌器(上海浦东物理光学仪器厂)、三口瓶、冷凝及加液装置、752spectrum 紫外可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司)、pHS-3C 型精密 pH 计(上海雷磁仪器厂)、Y-2 调速多用振荡器(国华仪器有限公司)、Sartorius 电子天平(北京赛多利斯仪器公司).

试剂:聚丙烯酰胺(相对分子量 500 万以上)、甲醛、二乙烯三胺、硝酸汞、碘化银、乙酸钠、苯、NaOH、盐酸均为分析纯;高岭土为市售试剂;实验用水为蒸馏水.

### 2.2 分析方法

2.2.1 胺化接枝率测定 二乙烯三胺在聚丙烯酰胺链上的接枝率用合成产品的胺化度表示,胺化度由盐酸标准溶液滴定法测定,测定步骤为:①取 0.2mL 二乙烯三胺置于锥形瓶中,加入 50mL 蒸馏水,滴加 0.05mL 甲基橙溶液摇匀,用  $0.1\text{mol L}^{-1}$  HCl 标液滴定至溶液颜色由橙色变为红色,记录此时 HCl 溶液消耗量  $V_0$  (mL);②取 5mL 合成产物于锥形瓶并加入 45mL 蒸馏水,滴加 0.05mL 甲基橙溶液后摇匀,用  $0.1\text{mol L}^{-1}$  HCl 标液滴定至溶液颜色由橙色变为红色,记录此时 HCl 溶液消耗量  $V_1$  (mL);③取 5mL 1% (w/w) 聚丙烯酰胺溶液于锥形瓶并加入 45mL 蒸馏水,滴加 0.05mL 甲基橙溶液后摇匀,用  $0.1\text{mol L}^{-1}$  HCl 标液滴定至溶液颜色由橙色变为红色,记录此时 HCl 溶液消耗量  $V_2$  (mL). 合成产物中游离胺的量 ( $V$ ) 和胺化度 ( $\eta$ ) 由公式 (1) 和公式 (2) 计算可得.

$$V = 0.2 \times 20(V_1 - V_2) / V_0 \quad (1)$$

$$\eta = [(V' - V)\rho M_1] / (m M_2) \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $V'$  为合成时加入的二乙烯三胺的量 (mL);  $\rho$  和  $M_1$  分别为二乙烯三胺的密度 ( $\text{g L}^{-1}$ ) 和摩尔质量 ( $\text{g mol}^{-1}$ );  $m$  和  $M_2$  分别为聚丙烯酰胺加入量 (g) 和聚丙烯酰胺摩尔质量 ( $\text{g mol}^{-1}$ ).

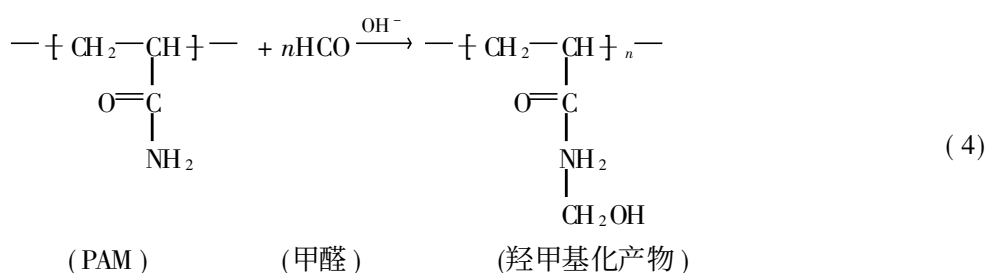
2.2.2 溶液  $Hg^{2+}$  含量测定 汞离子含量由双硫腙萃取光度法测定(国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会,2002),测定波长  $\lambda = 630\text{nm}$ , 标准曲线回归方程为:

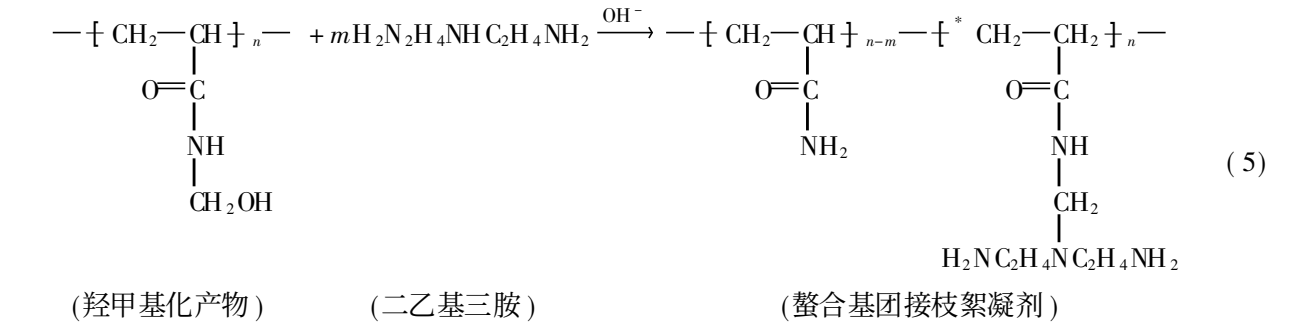
$$A = 0.0676C - 0.00038 \quad (3)$$

式中,  $A$  为测定吸光度;  $C$  为溶液  $Hg^{2+}$  浓度 ( $\text{mol L}^{-1}$ ).

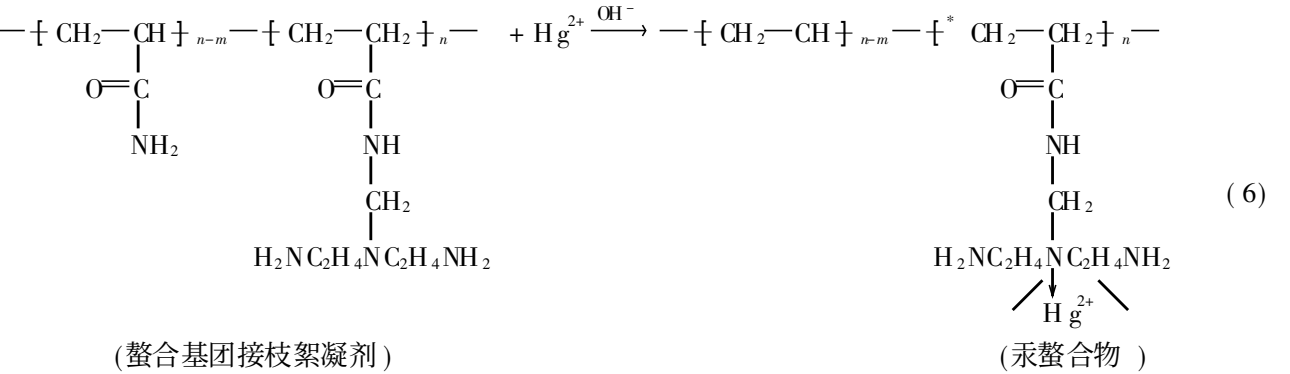
### 2.3 实验过程

2.3.1 聚丙烯酰胺接枝螯合絮凝剂的制备 以聚丙烯酰胺(PAM)为原料,对其聚合链上的酰胺基团通过 Mannich 反应制备.其反应过程分为 PAM 与甲醛反应使酰胺基部分羟甲基化(式(4))和反应产物羟甲基化聚丙烯酰胺与二乙烯三胺接枝反应(式(5))两个步骤.





取 100mL 1% 聚丙烯酰胺溶液,用 10% (w/w) 氢氧化钠溶液调 pH 值至 10 左右,移入配有冷凝管和滴液漏斗的三口瓶中,向三口瓶中加入一定量的甲醛溶液,在一定温度下反应一段时间 ( $t_1$ ) 后,缓慢地加一定量的二乙烯三胺,继续反应一定时间 ( $t_2$ ),即得到叔胺型二乙烯三胺接枝螯合基团絮凝剂。



配置一定浓度的  $\text{Hg}^{2+}$  溶液,在一定体积该溶液中加入一定量的絮凝剂,搅拌并加入少量高岭土促进絮凝沉淀,测定絮凝前后  $\text{Hg}^{2+}$  起始浓度和沉淀上清液浓度,由差减法确定絮凝剂去除汞的效率,从而获得絮凝去除  $\text{Hg}^{2+}$  的条件参数。

3 结果 (Results)

3.1 CFA 絮凝剂最佳制备条件的确定

CFA 的合成根据 Mannich 反应进行,二乙烯三胺是以螯合基团接枝在聚丙烯酰胺链上构成具有螯合性能的接枝型絮凝剂,该絮凝剂应用于处理含金属离子废水时,其携带的螯合基团与  $\text{Hg}^{2+}$  按 1:1 反应系数与金属离子作用。因此,制备中接枝到聚合链上的二乙烯三胺越多,对金属离子的去除效率就越高。实验以胺化度表达胺化接枝率,通过测定不同合成条件下的胺化度,确定螯合絮凝剂最佳合成条件。

3.1.1 合成原料配比的确定 按 2.3.1 节所述合成步骤,固定其他反应条件,通过改变反应物的物

料配比 ( $n_{\text{PAM}}:n_{\text{甲醛}}:n_{\text{二乙烯三胺}}$ ) 合成一系列螯合絮凝剂,测定合成产物胺化度,结果见表 1。由表 1 可知,当物料配比为 1:0.7:0.84 时,合成产物的胺化度最高,达到 32.9%。本研究的合成物料比未能按 Mannich 反应的理论物料比进行,这是因为 PAM 是链状高聚物,其溶液有一定黏度,且聚合链造成的位阻作用均会影响反应过程,即影响接枝率。从处理含汞废水的角度考虑,PAM 的部分酰胺基胺化接枝既具备了螯合金属离子的作用,同时保持了原有的絮凝作用。因此,以下实验采用物料比为 1:0.7:0.84 即可,所获得絮凝剂液中高聚物含量(固含量)为 2.5% 左右。

表 1 不同物料比条件下合成产物的胺化度对比

Table 1 Comparison of amination degree of synthetic products using different ratios of materials

| 编号 | 物料配比       | 胺化度   |
|----|------------|-------|
| 1  | 1:0.5:0.6  | 29.3% |
| 2  | 1:0.5:0.8  | 30.2% |
| 3  | 1:0.7:0.84 | 32.9% |
| 4  | 1:0.8:0.96 | 32.8% |
| 5  | 1:1:1      | 32.1% |

3.1.2 合成反应时间的确定 合成反应需控制的时间为 PAM 与甲醛的羟甲基化反应时间  $t_1$ 和羟甲基化产物与二乙基三胺接枝反应时间  $t_2$ . 在其他反应条件不变的情况下, 不同反应时间下所得的整合絮凝剂产物接枝率见表 2. 由表 2 可知, 当固定  $t_2$  为 2h,  $t_1$  为 1h 时, 所得产物的胺化度最高. 若继续延长  $t_1$ , 所得产物胺化度变化不明显, 故确定  $t_1$  为 1h. 固定  $t_1$  为 1h, 改变  $t_2$  进行试验. 结果表明,  $t_2$  为 3h 时, 所得产物的胺化接枝率最高. 因此, 实验确定聚丙烯酰胺和甲醛混合羟甲基化反应 1h, 然后缓慢滴加二乙烯三胺后再反应 3h. 此时所得絮凝剂的整合剂接枝效率最高.

表 2 不同反应时间所得产物的胺化接枝率

| Table 2 Relationship of graft rate of products with reaction time |          |       |          |          |       |
|-------------------------------------------------------------------|----------|-------|----------|----------|-------|
| $t_1$ /h                                                          | $t_2$ /h | 胺化度   | $t_1$ /h | $t_2$ /h | 胺化度   |
| 0.5                                                               | 2.0      | 31.9% | 1.0      | 1.0      | 32.1% |
| 1.0                                                               | 2.0      | 33.0% | 1.0      | 3.0      | 33.2% |
| 2.0                                                               | 2.0      | 32.0% | 1.0      | 4.0      | 32.9% |
| 3.0                                                               | 2.0      | 32.9% | 1.0      | 5.0      | 32.6% |

3.1.3 合成反应体系的酸度和温度确定 固定其他反应条件不变, 分别改变原料液的 pH 和反应温度, 所得产物的接枝率见表 3. 由表 3 可知, 反应原料液的 pH 对接枝率的影响较为明显, 酸性条件下胺化度明显降低, 尤其是当反应液的 pH 值为 3 和 5 时, 所得整合絮凝剂极不稳定, 稍经放置即会发生分层现象, 由此可以断定合成反应不宜在酸性条件下进行. 当反应液 pH 值在 9~11 之间时, 合成产物具有较高的胺化度, 即接枝率较高. 整合剂的接枝反应温度以 40~50℃ 范围为宜.

表 3 不同 pH 和温度条件下合成产物的接枝率

| Table 3 Relationship of Graft rate of products with pH of liquid feed and reaction temperature |    |       |         |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------|---------|-------|
| 编号                                                                                             | pH | 胺化度   | 反应温度 /℃ | 胺化度   |
| 1                                                                                              | 3  | 27.5% | 30      | 29.0% |
| 2                                                                                              | 5  | 29.0% | 40      | 32.5% |
| 3                                                                                              | 7  | 31.5% | 45      | 32.8% |
| 4                                                                                              | 9  | 33.0% | 50      | 32.9% |
| 5                                                                                              | 11 | 32.1% | 60      | 32.7% |

3.2 CFA 整合絮凝剂去除含汞废水的性能

配制  $Hg^{2+}$  浓度为  $8.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的水溶液作为实验用含汞废水, 所用 CFA 整合絮凝剂为未稀释的合成产品. 取含汞废水 250mL 于 300mL 烧杯中, 加入 1g 高岭土和一定量合成絮凝剂 CFA, 然后置于六联搅拌机上在一定的水力条件下搅拌, 使其整合汞离

子反应并絮凝沉淀, 静置一段时间后取距上层水面 3cm 处的上清液测定汞浓度, 以确定整合絮凝剂处理含汞废水的性能和最佳工艺条件. 在水中加入高岭土是为了加快絮凝沉降速度, 高岭土本身不具有去除  $Hg^{2+}$  的作用.

3.2.1 絮凝剂用量确定 按上述实验方法, 固定其他实验条件不变, 改变絮凝剂投放比例, 测定不同絮凝剂用量下的汞去除率, 结果见图 1. 由图 1 可知, 随絮凝剂加入量的增加, 汞的去除率逐渐增高, 当絮凝剂加入量为 0.015%~0.025% 时, 汞去除率在 93% 左右, 表明絮凝剂的投放量对汞的去除率有较大的影响, 过低或过高的絮凝剂用量都会降低汞去除率. 当絮凝剂投放量大于 0.025% 后, 汞去除率不升反降, 这是因为过量的絮凝剂使已絮凝的絮体再次形成稳定的分散体系, 从而使上清液中悬浮的细小絮体增多, 导致汞去除率下降. 本实验合成整合絮凝剂的投加量确定为 0.020%.

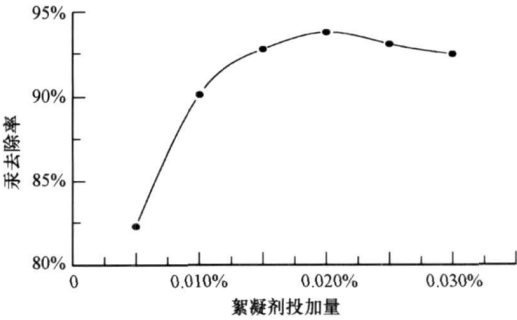


图 1 整合絮凝剂用量与汞去除率关系  
Fig. 1 Relationship between the removal rate of mercury and CFA dosage

3.2.2 pH 值对汞去除率影响 调节待处理水样的 pH, 在不同 pH 值下进行絮凝沉降实验, 考察废水 pH 值对汞的去除率影响 (图 2). 由图 2 可知, 汞去除率是随水样 pH 值的升高而增大, 当  $pH > 5$  以后,

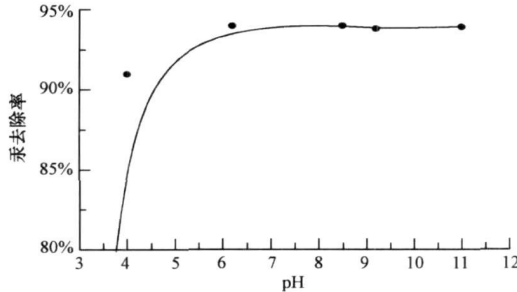


图 2 水样 pH 值与汞去除率关系  
Fig. 2 Relationship between the removal rate of mercury and pH of water

汞去除率基本保持不变, 维持在 94% 左右, 说明合成絮凝剂在处理一般含汞废水过程中受 pH 值影响较小.

3 2 3 沉降时间对汞去除率的影响 保持水样 pH 值为 7, 絮凝剂投加量为 0.020%, 考察不同沉降时间对汞去除率的影响 (图 3). 图 3 结果表明, 随沉降时间的增加, 汞去除率增加, 当沉降时间达到 10min 时, 汞去除率有最大值为 93.8%; 之后随沉降时间的延长, 去除率基本不变, 维持在 93.8% 左右. 因此, 确定沉降时间为 10min

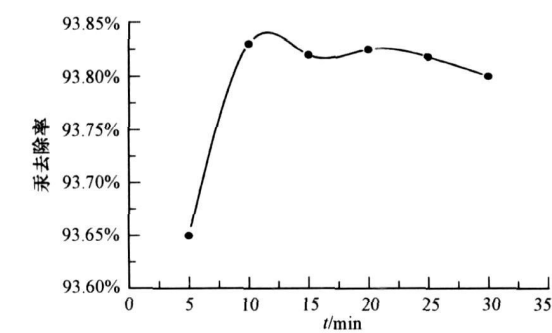


图 3 沉降时间与汞去除率关系

Fig 3 Relationship between the removal rate of mercury and sedimentation time

3 2 4 水力条件对汞去除率影响 采用前述实验确定的条件, 水样加入絮凝剂后, 使之在不同的搅拌速度下进行絮凝沉降, 考察搅拌速度和搅拌时间对汞去除率的影响, 结果如图 4 所示. 由图 4a 可知, 在低于  $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  搅拌速度条件下, 汞的去除率随搅拌速度的增加而增加, 但到  $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  左右后, 汞去除率反而随搅拌速度增加而降低. 这是因为过快的搅拌速度不利于絮体的增长, 会使悬浮在水体中的细小“矾花”增多, 因而降低汞去除率. 搅拌速度为  $80\sim 100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 汞的去除率最大, 可达 96.2%.

当确定搅拌速度为  $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 改变搅拌时间并测定相应的汞去除率 (图 4b). 由图 4b 可知, 搅拌时间对除汞率的影响与螯合作用速率一致, 即絮凝剂上的螯合基团与  $\text{Hg}^{2+}$  的螯合反应有一定的活化能, 因此, 反应速度较慢, 达到平衡需一定的反应时间. 当搅拌时间为 15min 时, 螯合反应达到平衡, 再延长搅拌时间也不会增加除汞率, 此时的汞去除率为 96% 左右.

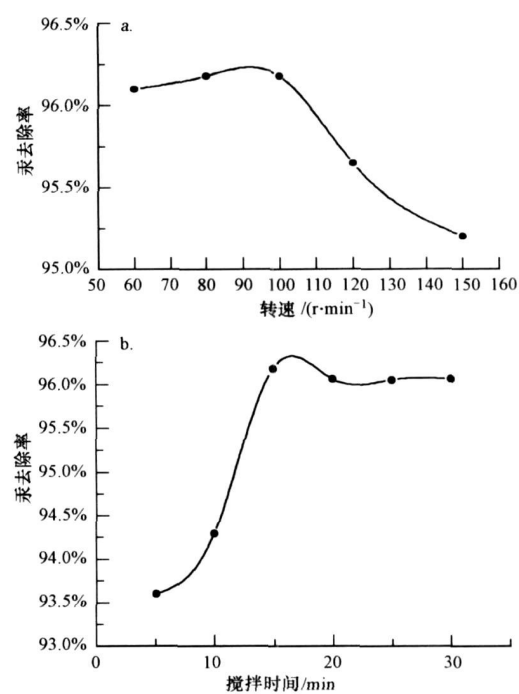


图 4 搅拌速度、搅拌时间与汞去除率关系

Fig 4 Relationship between the removal rate of mercury and stirring rate or stirring time

3 2 5 二次絮凝处理含汞废水效果 按照一次絮凝的操作手续, 将一次絮凝后的上清液进行二次絮凝, 保持工艺参数与第一次絮凝时一致, 实验结果如表 4 所示. 由表 4 可知, 经二次絮凝后水中剩余  $\text{Hg}^{2+}$  浓度为  $0.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 汞的去除率达 99.5%, 达到汞的废水排放标准. 因此, 若只进行一次螯合絮凝沉降处理, 可将其作为预处理过程, 将废水中大量的汞通过絮凝沉降去除, 为后续处理单元减轻处理负荷.

表 4 二次絮凝处理效果数据

| Table 4 Effect of removing mercury by secondary flocculation |                               |                                |       |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|
| 絮凝工序                                                         | 原水汞浓度 / (mg L <sup>-1</sup> ) | 絮凝后汞浓度 / (mg L <sup>-1</sup> ) | 汞去除率  |
| 一次絮凝                                                         | 8.11                          | 0.310                          | 96.2% |
| 二次絮凝                                                         | 0.31                          | 0.041                          | 99.5% |

4 结论 (Conclusions)

1) 以聚丙烯酰胺絮凝剂分子为主链骨架, 以甲醛、二乙烯三胺为接枝基团, 通过 Mannich 反应机理, 可以容易地将二乙烯三胺部分接枝在聚丙烯酰胺分子链上, 使其获得螯合金属离子性能, 从而得到一种既具有螯合性能又具有絮凝性能的螯合絮

凝剂.

2) 该絮凝剂处理含汞废水的实验结果表明, 聚合絮凝剂对汞具有良好的去除效果, 在絮凝剂投加量为  $0.020\%$ , 搅拌速度为  $80 \sim 100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 搅拌时间  $15 \text{ min}$ , 沉降时间  $10 \text{ min}$  的最佳条件下, 含汞  $8.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的废水经二次絮凝沉降后,  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率可达到  $99.5\%$ .

责任作者简介: 刘建 (1954—), 男, 教授. 主要从事环境化学与环境污染控制与治理研究.

#### 参考文献 (References):

- Bicak N, Sherrington D C. 2003. A glycidyl methacrylate based resin with pendant urea groups as a high capacity mercury specific sorbent [J]. *Reactive & Functional Polymers* 54: 141—147
- Dias Filho N L, Do Camo D R, Rosa A H. 2006. Selective sorption of mercury(II) from aqueous solution with an organically modified clay and its electroanalytical application [J]. *Sep Sci Technol* 41(4): 733—746
- 国家环保总局. 2002. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 361—364
- State Environmental Protection Administration of China. 2002. Analysis Method for Detection of Water and Wastewater (4th Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 361—364 (in Chinese)
- 黄美荣, 李新贵, 李圣贤. 2005. 聚蔡二胺的合成及其对重金属离子的高效反应吸收 [J]. *化学进展*, 17(2): 299—309
- Huang M R, Li X G, Li S X. 2005. The synthesis of polydian ionaphthalene and its highly reactive adsorption for heavy metal ions [J]. *Progress in Chemistry* 17(2): 299—309 (in Chinese)
- 金熙, 项成林, 齐冬子. 1999. 工业水处理技术问答及常用数据 (第 2 版) [M]. 北京: 化学工业出版社. 684
- Jin X, Xiang C L, Qi D Z. 1999. Common Data and Technical Know-how for Industrial Water Treatment (2nd Edition) [M]. Beijing: Chemical

Industry Press 684 (in Chinese)

- 李述文, 范如霖. 1981. 实用有机化学手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社. 374
- Li S W, Fan R L. 1981. Handbook of Practical Organic Chemistry [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Press. 374 (in Chinese)
- 孟祥和, 胡国飞. 2000. 重金属废水处理 [M]. 北京: 化学工业出版社. 222—224
- Meng X H, Hu G F. 2000. Treatment of Heavy Metal-Containing Wastewater [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 222—224 (in Chinese)
- Senkal B F, Yavuz E. 2004. Poly(acrylamide) grafts on spherical polymeric sulfonamide based resin for selective removal of mercury ions from aqueous solutions [J]. *Macromol Symp* 217(1): 169—178
- 唐宁, 柴立元, 闵小波. 2004. 含汞废水处理技术的研究进展 [J]. *工业水处理*, 24(8): 5—8
- Tang N, Cai L Y, Min X B. 2004. Research development in the treatment of mercury-containing wastewater [J]. *Industrial Water Treatment* 24(8): 5—8 (in Chinese)
- 王代芝, 赵艳萍, 周珊. 2004. 改性膨润土处理含汞废水研究 [J]. *非金属矿*, 27(3): 43—44
- Wang D Z, Zao Y P, Zhou S. 2004. Study on treatment of Hg-containing wastewater by modified bentonite [J]. *Non-metallic Mines* 27(3): 43—44 (in Chinese)
- 吴秀英, 吴农忠. 1995. 硫化钠处理含汞废水 [J]. *中国环境科学*, 15(2): 128—130
- Wu X Y, Wu N Z. 1995. To treat mercury-containing wastewater with sodium sulfide [J]. *China Environmental Science* 15(2): 128—130 (in Chinese)
- 张延安, 赵乃仁. 1997. 用壳聚糖絮凝剂去除水中汞 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 18(1): 68—71
- Zhang Y A, Zhao N R. 1997. Removal of Hg(II) in water with chitosan [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 18(1): 68—71 (in Chinese)