

PAC/PDM 复合混凝剂用于夏季太湖水混凝脱浊研究

张跃军, 李潇潇, 赵晓蕾, 孙彬, 张巧巧

(南京理工大学化工学院, 南京 210094)

摘要:用特征粘度系列化的聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDM)与聚合氯化铝(PAC)复合得到稳定的复合混凝剂,用于夏季高藻太湖水强化混凝脱浊处理.通过混凝烧杯实验,考察了无机/有机复合比例、PDM 特征粘度对脱浊效果及絮团沉淀性能的影响.结果表明,对浊度为 30~33 NTU,温度为 28~30℃,藻含量为 2.6×10^7 个/L 的太湖水,在与某市水厂混凝强度相近的搅拌强度下,当达到该水厂 2NTU 沉淀池出水的余浊标准时, PAC 需 7.00 mg/L 的投加量,质量复合比例为 5:1、10:1、20:1 的 PAC(以 Al_2O_3 计)/PDM 复合混凝剂所需 PAC 投加量随 PDM 特征粘度 0.52、1.53、2.46 dL/g 的增加分别为 3.00~2.83 mg/L、3.50~3.49 mg/L、5.37~4.67 mg/L,相对于 PAC 减少投加量 57.14%~59.57%、50%~50.14%、23.29%~33.29%;作为深度处理的技术准备,当沉淀出水浊度要求提高至 1NTU 的情况下,复合药剂依然可发挥好的作用, PAC 需 10 mg/L 的投加量, PAC(以 Al_2O_3 计)与 PDM 质量复合配比为 20:1、10:1、5:1 的复合混凝剂需 8.33~3.91 mg/L 的投加量,能比 PAC 减少投加量 16.7%~60.9%.可见, PDM 明显提高了 PAC 的混凝脱浊效果与沉淀性能,且 PAC/PDM 质量复合配比越低, PDM 特征粘度越高,脱浊效果与沉淀性能越好.

关键词:太湖;夏季;含藻水;聚合氯化铝;聚二甲基二烯丙基氯化铵;复合混凝剂;强化混凝;脱浊

中图分类号: X506 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2195-06

Turbidity Removal of Summer High Algae Content Taihu Lake Raw Water Using Composite Coagulants of Polyaluminum Chloride and Polydimethyldiallylammonium Chloride

ZHANG Yue-jun, LI Xiao-xiao, ZHAO Xiao-lei, SUN Bin, ZHANG Qiao-qiao

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A series of stable composite coagulants was prepared using polyaluminum chloride (PAC) and polydimethyldiallylammonium chloride (PDM) with different intrinsic viscosity as raw materials. The enhanced coagulation processes of summer high algae content Taihu lake raw water by using the composite coagulants were reported in this paper. Jar tests were used to study the influences of the composite ratios of PAC to PDM and the intrinsic viscosity of PDM on the turbidity removal and precipitating performance. The results showed that for the summer Taihu raw water with temperature of 28-30℃ and turbidity of 30-33 NTU, algae content of 2.6×10^7 cells/L. When 2NTU turbidity of supernatant from settlement tank was required according to the current process of potable water plant in Wuxi, the dosage of 7.00 mg/L PAC was necessary, the PAC/PDM composite coagulants with the ratios (m/m) of 20:1, 10:1, 5:1 only needed dosage ranges of 3.00-2.83 mg/L, 3.50-3.49 mg/L, 5.37-4.67 mg/L with the increasing of PDM intrinsic viscosity from 0.52 dL/g to 2.46 dL/g. And compared with PAC only used, composite coagulants could decrease the PAC dose by 57.14%-59.57%, 50%-50.14%, 23.29%-33.29% correspondingly. When residual turbidity of 1 NTU was required, the dosage of 10 mg/L were necessary for the treatment with PAC, composite coagulants with the ratios (m/m) of PAC to PDM of 20:1, 10:1, 5:1 and the different intrinsic viscosity of PDM needed dosage of 8.33-3.91 mg/L, and could decrease the PAC dose by 16.7%-60.9%. Therefore, the efficiency turbidity removal and precipitating performance of composite coagulants were remarkably, and the lower the ratios of PAC to PDM and the higher the intrinsic viscosity of PDM, the higher efficiency of turbidity removal.

Key words: Taihu lake; summer; algae-containing water; polyaluminum chloride; polydimethyldiallylammonium chloride; composite coagulants; enhanced coagulation; turbidity removal

太湖是长江三角洲地区上海、苏州、无锡等大城市最重要的供水源地^[1].但近年来,太湖流域水质恶化趋势明显,湖泊富营养化以及所带来的夏季蓝藻大暴发已经成为太湖主要水环境问题^[2].由此造成的太湖周边城乡供水水源污染和水质性缺水,已成为该地区经济发展中新的制约因素^[3].由藻类形成的浊度颗粒,电动电位高,具较高的稳定性,同时藻类密度低,形成的絮体比重小,难于下沉,因此高

藻水较难于混凝处理^[4,5].特别是在春夏季藻类暴发期,采用简单增加混凝剂投加量的方法来改善处理效果,不仅增加成本,而且导致出水中残铝含量的增

收稿日期: 2007-08-11; 修订日期: 2007-09-03

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2003BA327C); 南京市科技计划项目(04d251016)

作者简介: 张跃军(1959~),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为水溶性高分子、表面活性剂、含能材料合成、工艺、机理和应用, E-mail: zhyuejun@mail.njst.edu.cn

加,尤其是有时增加再多的投加量也不能达到所需的水质要求.

针对受污染水源水的现状,国内外采用的方法有:预处理、深度处理和强化混凝技术及它们的组合技术.而鉴于我国国情,利用现有工艺选择适合处理水质的优质高效的混凝剂,以最经济的方法最大限度地提高水质,是强化混凝的重要途径之一^[6~9].聚合氯化铝(PAC)是我国原水处理中使用最为广泛的混凝剂之一,有高效低廉的特点.但在形态、聚合度及相应的凝聚、絮凝效果方面,PAC仍处于传统金属盐混凝剂与有机絮凝剂之间的位置^[10~12].聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDM)是阳离子型有机高分子絮凝剂的一种,其与无机混凝剂复合使用能对高藻水、低浊度水等难处理原水有较好的处理效果^[13,14].但是迄今为止国内外报道的 PDM 为助凝剂的复合混凝剂的研究及应用工作均受到其制备或购得的 PDM 相对分子质量低、品种单一未系列化或含丙烯酰胺扩链剂的限制,致使复合混凝剂的优势得不到充分体现^[15~22].

本研究以特征粘度系列化的 PDM 与 PAC 复合得到新型系列复合混凝剂,将其应用于夏季高藻期太湖水混凝脱浊处理,以期为新型复合混凝剂的开发,及其在以富营养化的含藻湖泊水为原水的水厂的实际生产应用探求新途径,同时为含藻微污染水的强化混凝机制研究奠定基础.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

仪器: 散射式浊度仪, QZ201 型, 苏州青安仪器有限公司; 六联程控搅拌器, TA6- II 型, 武汉恒岭有限公司.

药剂: 聚合氯化铝(PAC), 液体, 含量以 Al_2O_3 计为 10%, 工业品; 有机阳离子高分子絮凝剂聚二甲基二烯丙基氯化铵 (PDM), 选取 0.52、1.53、2.46 dL/g 3 种特征粘度, 均为工业品.

药剂的配置为① PAC 溶液的配制: 按 Al_2O_3 计, 把 PAC 配制成一定质量分数的溶液投加; ② 复合药剂的配制: PAC 按 Al_2O_3 计, 按 5 : 1、10 : 1、20 : 1 PAC/PDM 质量配比将 PDM 直接溶入 PAC 原液中, 获得系列复合药剂. 使用时稀释成一定质量分数的溶液, 一次性投加. 复合混凝剂配方以下面方法表示: PAC/PDM(PDM 特征粘度/质量比例), 其中 PDM 特征粘度单位为 dL/g.

水样: 于某年夏季取自某市源水厂取水点, 一次

取足量, 在 20 ~ 30 min 内取完, 以尽量保证水质的一致性. 水样总体水质见表 1.

表 1 实验用夏季太湖水主要水质		
Table 1 Quality of Taihu lake raw water for study		
浊度/NTU	温度/℃	藻 $\times 10^7/\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$
30 ~ 33	28 ~ 30	2 ~ 4

1.2 混凝除浊性能评价

1.2.1 烧杯搅拌实验

在 1 组烧杯中加入 1 000 mL 水样置于六联搅拌仪中. 于快速搅拌 (300 r/min) 下加入一定量的混凝剂. 300 r/min 快速搅拌一定时间后, 以 100 r/min 中速搅拌一定时间, 再以 30 r/min 慢速搅拌一定时间后静置沉淀, 在沉淀时间为 10 min 与 30 min 时分别于液面下约 2 cm 处取上清液测定其浊度.

1.2.2 处理效果评价方法

投加不同量无机混凝剂或复合药剂于原水中, 采用选定的搅拌条件搅拌, 考察各药剂在不同投加量时所能达到的剩余浊度和每一种药剂所能达到的最低剩余浊度, 以比较不同混凝剂对夏季太湖水的混凝脱浊效果. 同时, 通过考察经 10 min 或 30 min 沉淀达相同剩余浊度时, 各药剂投加量的剂量差, 比较不同混凝剂处理过程中絮团的沉淀性能.

1.2.3 混凝搅拌强度的选择

以实验当时某市水厂实际生产所用混凝剂 AS 的投加量与该厂沉淀池出水 2 ~ 3 NTU 的浊度标准作为参考, 通过混凝烧杯实验选择与水厂实际混凝强度较为接近的搅拌条件. 该搅拌条件确定为: 于快速搅拌 (300 r/min) 下加入一定量的混凝剂, 先以 300 r/min 快速搅拌 1 min, 再以 100 r/min 中速搅拌 2 min, 再以 30 r/min 慢速搅拌 2 min 后静置沉淀.

2 结果与讨论

2.1 PDM 单独处理结果

单独投加不同剂量的不同特征黏度的 PDM 于夏季太湖含藻原水中, 采用 1.2.1 的操作步骤与 1.2.3 选定的搅拌条件进行混凝脱浊处理, 得到结果见图 1.

从图 1 可以看出, 各不同特征黏度的 PDM 处理夏季太湖水余浊规律趋于一致, 都是随加药量的增加剩余浊度先下降后上升. 在 PDM 除浊最佳点, 浊度最低仅能达 12 NTU 左右, 远不能达水厂沉淀池出水 2 NTU 的浊度标准, 因此, PDM 单独处理夏季太湖水效果不佳.

2.2 复合混凝剂脱浊效果

2.2.1 低特征粘度 PDM 产品复合 PAC 对夏季太湖水混凝脱浊结果

用特征粘度为 0.52 dL/g 的 PDM 与 PAC 复合, 选取PAC/PDM质量配比为 5:1、10:1、20:1 的复合药剂进行实验.投加不同剂量混凝剂于夏季太湖水中, 采用 1.2.1 的操作步骤与 1.2.3 选定的搅拌条件进行混凝脱浊处理, 结果见图 2.

2.2.2 中特征粘度 PDM 产品复合 PAC 对夏季太湖水混凝脱浊结果

用特征粘度为 1.53 dL/g 的 PDM 与 PAC 复合, 选取PAC/PDM质量配比为 5:1、10:1、20:1 的复合药剂进行实验.投加不同剂量混凝剂于夏季太湖水中, 采用 1.2.1 的操作步骤与 1.2.3 选定的搅拌条

件进行混凝脱浊处理, 结果见图 3.

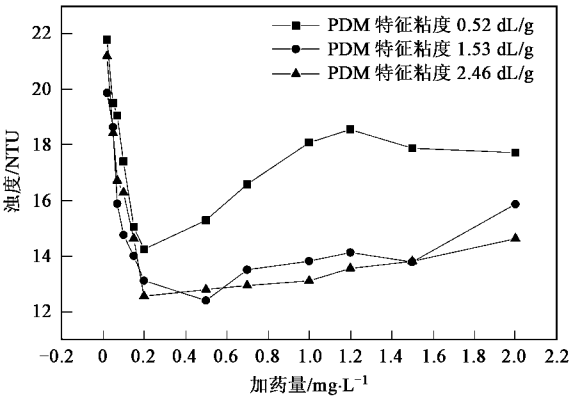


图 1 PDM 脱浊处理效果
Fig.1 Efficiency of turbidity removal using PDM

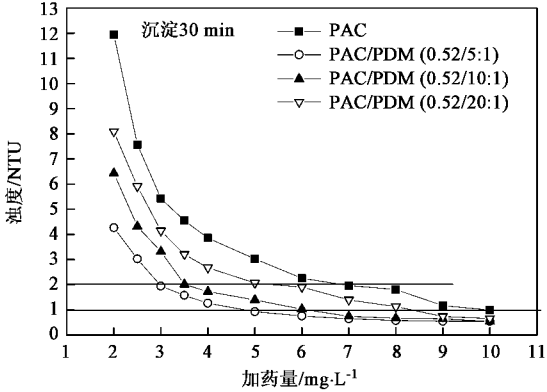
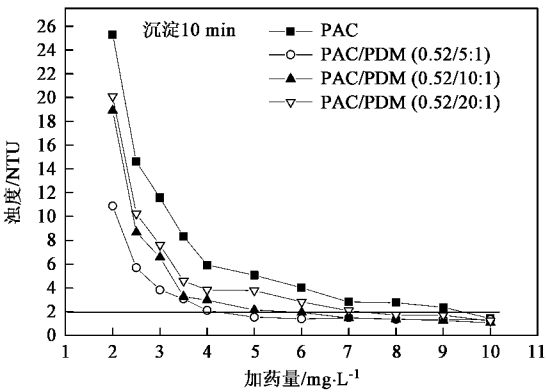


图 2 特征粘度为 0.52 dL/g 的 PDM 与 PAC 不同比例复合处理夏季太湖水
Fig.2 Efficiency of turbidity removal by using composite coagulants of PAC and PDM with intrinsic viscosity of 0.52 dL/g

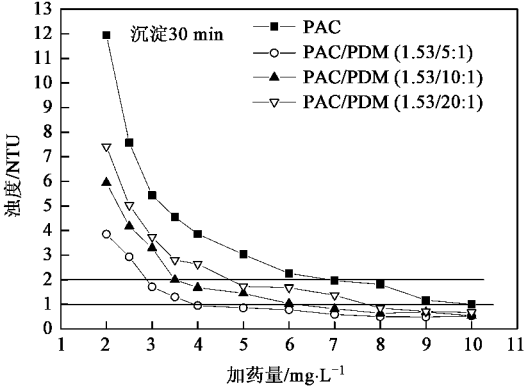
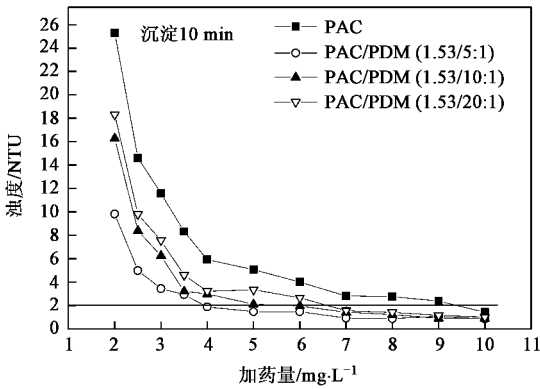


图 3 特征粘度为 1.53 dL/g 的 PDM 与 PAC 不同比例复合处理夏季太湖水
Fig.3 Efficiency of turbidity removal by using composite coagulants of PAC and PDM with intrinsic viscosity of 1.53 dL/g

2.2.3 高特征粘度 PDM 产品复合 PAC 对夏季太湖水混凝脱浊结果

用特征粘度为 2.46 dL/g 的 PDM 与 PAC 复合, 选取PAC/PDM质量配比为 5:1、10:1、20:1 的复合药

剂进行实验.投加不同剂量混凝剂于夏季太湖水中, 采用 1.2.1 的操作步骤与 1.2.3 选定的搅拌条件进行混凝脱浊处理, 结果见图 4.

2.2.4 脱浊效果整体比较

图 2~4 中在剩余浊度为 2 NTU 处作平行于横轴的直线,与各药剂投加量-浊度折线相交,读取交点的横坐标值,可得到各药剂在剩余浊度达 2 NTU

时所需的药剂投加量;同时,把达到 2 NTU 时沉淀 10 min 与 30 min 所需的药剂剂量相减,可得到沉淀 10 min 与 30 min 的剂量差,见表 2。

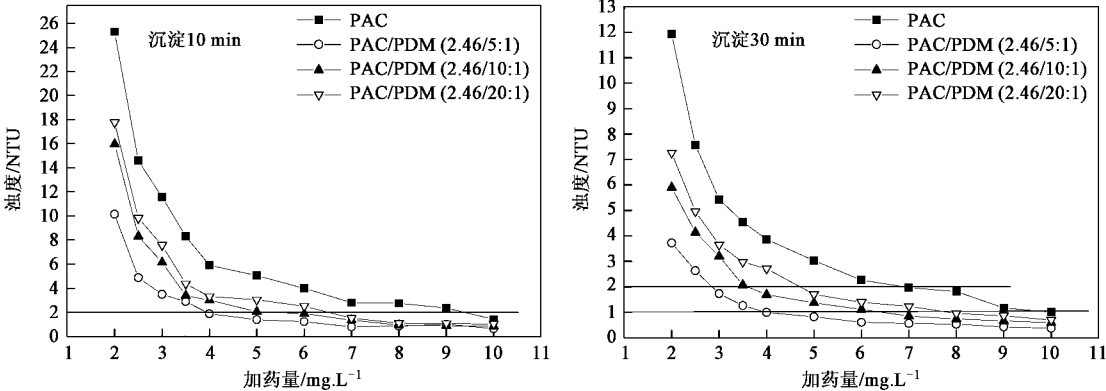


图 4 特征粘度为 2.46 dL/g 的 PDM 与 PAC 不同比例复合处理夏季太湖水

Fig.4 Efficiency of turbidity removal by using composite coagulants of PAC and PDM with intrinsic viscosity of 2.46 dL/g

表 2 达到 2 NTU 时各药剂沉淀不同时间所需投加量/mg·L⁻¹
Table 2 Coagulant dosages for residual turbidity of 2 NTU/mg·L⁻¹

项目	PAC	PAC:PDM(0.52 dL/g)			PAC:PDM(1.53 dL/g)			PAC:PDM(2.46 dL/g)		
		20:1	10:1	5:1	20:1	10:1	5:1	20:1	10:1	5:1
沉淀 10 min	9.39	7.29	5.41	4.13	6.54	5.33	4.00	6.52	5.32	3.92
沉淀 30 min	7.00	5.37	3.50	3.00	4.72	3.49	2.88	4.69	3.50	2.83
剂量差	2.39	1.92	1.91	1.13	1.82	1.84	1.12	1.83	1.82	1.09

2.3 PDM 助凝脱浊效果分析

从表 2 可以看出,沉淀 30min, PAC 单独混凝能使出水浊度达到 2NTU 的水厂沉淀池出水浊度标准,但投加量高达 7.00 mg/L,而复合比例分别为 5:1、10:1、20:1 的 PAC(以 Al₂O₃ 计)/PDM 复合混凝剂所需 PAC 投加量为 2.83~3.00 mg/L、3.49~3.50 mg/L、4.67~5.37 mg/L,相对于 PAC 减少投加量 57.14%~59.57%、50%~50.14%、23.29%~33.29%。因此各特征粘度的 PDM 与 PAC 复合用于夏季太湖高藻水处理均明显提高了 PAC 的混凝除浊效果,在达到 2NTU 水厂沉淀出水标准的情况下,大大降低了 PAC 的投加量,同时 PAC/PDM 复合比例越低,脱浊效果越好。这是因为太湖水营养化程度重,水中藻类及有机污染物含量较高,胶体稳定性强,要达理想的脱浊效果,需较多的混凝剂剂量^[23]。PDM 是一种阳离子高分子, PDM 配入 PAC 后,一方面 PDM 所带的正电荷与 PAC 的相互叠加,使得复合混凝剂电中和能力大大增强,另一方面 PDM 的高分子链使得复合混凝剂的架桥能力与卷扫能力也得以增强,两方面的作用使复合混凝剂混凝处理效果得到较大的提高^[24,25]。但是,由于 PDM 价格较高, PDM

配入的量越多,复合混凝剂的成本也就会相应提高,在复合混凝剂用于供水处理的应用过程中应该综合考虑处理效果与使用成本间的关系,找出最为经济的复合配比。

从表 2 可以看出,复合比例同为 5:1 的 PAC/PDM 复合混凝剂, PDM 特征粘度为 0.52 dL/g、1.53 dL/g、2.46 dL/g 时,所需 PAC 投加量分别为 3.00 mg/L、2.88 mg/L、2.83 mg/L。可看出复合混凝剂脱浊效果呈 PDM 特征粘度越高,脱浊效果越好的趋势。这是因为随着特性粘度的增大,相对分子质量升高,吸附架桥的能力增强,从而使絮凝效果变好,且投加量降低。同时高特性粘度的 PDM 具有较长的分子链和较多的正电荷点位,因而能更容易被胶体颗粒吸附,从而更有效地中和颗粒表面的负电荷^[26]。由此,提高 PDM 特征粘度,可在保持一定药剂成本的前提下,大幅度增强复合混凝剂的混凝效果。

2.4 复合混凝剂沉淀性能分析

从表 2 可看出,达到 2NTU 的相同的剩余浊度时,不同沉淀时间下, PAC 沉淀 10 min 所需剂量与沉淀 30 min 所需的剂量相差 2.39 mg/L,复合混凝剂沉淀 10 min 与沉淀 30 min 所需的剂量差为 1.09~

1.92 mg/L,同时可看出,PAC/PDM复合比例越低,PDM特征粘度越大,达2 NTU的剩余浊度时,剂量差越小.不同沉淀时间下达相同剩余浊度药剂剂量差大,这说明生成的矾花不易沉淀,需要增加沉淀时间,才能使剩余浊度降低;反之,药剂剂量差小,说明生成的矾花沉淀性能较好.

夏季太湖水中浊度基本上由藻类和有机胶体造成,密度较小,用常用的无机混凝剂处理形成的絮体比重轻,难于沉淀,实际生产中水量稍大即容易上浮而造成“跑矾花”现象.而复合混凝剂处理生成的矾花直径大,沉淀快,在相对较短的时间内即可使沉淀出水余浊达到标准.这样一方面可防止水量大时较轻矾花的上涌导致处理效果变差,另一方面可增大出水产量,提高生产效率,为水厂在现有工艺条件不变的情况下,提高供水产量提供一条可行的途径.

表3 达到1 NTU时各药剂所需投加量/mg·L⁻¹
Table 3 Coagulant dosages for residual turbidity of 1 NTU/mg·L⁻¹

沉淀时间 /min	PAC	PAC:PDM(0.52 dL/g)			PAC:PDM(1.53 dL/g)			PAC:PDM(2.46 dL/g)		
		20:1	10:1	5:1	20:1	10:1	5:1	20:1	10:1	5:1
30	10	8.33	6.13	4.85	7.71	6.10	3.90	7.66	6.27	3.91

从表3可以看出,要达到1 NTU的沉淀池出水余浊,PAC需高达10 mg/L的投加量,比达2 NTU的沉淀池出水浊度标准时增加了40%.这样处理费用、污泥量都将大大增加,沉淀出水中残余铝浓度也会相应提高,对供水安全性会造成较大影响.而使用复合混凝剂时,在达到1 NTU沉淀出水浊度的情况下,复合混凝剂需8.33~3.91 mg/L的投加量,能比PAC减少投加量16.7%~60.9%,说明在沉淀出水浊度要求提高的情况下,复合药剂依然可发挥好的作用.此外,从图2~4不难看出,若对沉淀池出水余浊提出更高的要求时,复合混凝剂尚可发挥更明显的作用潜力.因此,复合混凝剂作为深度处理的技术准备,对将来供水水质的发展也具有重要的意义.

4 结论

(1)对浊度为30~33 NTU,温度为28~30℃,藻含量为 2.6×10^7 个/L的太湖水,在与某水厂混凝强度相近的搅拌强度下,达到某水厂2 NTU沉淀出水的余浊的情况下,PAC需7.00 mg/L的投加量,PAC(以Al₂O₃计)/PDM复合比例为5:1、10:1、20:1的复合混凝剂所需PAC投加量随PDM特征粘度增加分别为3.00~2.83 mg/L、3.50~3.49 mg/L、5.37~4.67 mg/L,相对于PAC减少投加量57.14%~59.57%、

3 水质标准提高情况探讨

目前某市水厂实际生产中沉淀池出水浊度要求达到2~3 NTU,出水经后续工艺处理后基本能满足供水水质要求.而随着人们生活水平的不断提高,对生活用水水质也会提出更高要求,后续发展的深度处理技术可能会对沉淀池出水浊度提出更高的要求,比如降至1 NTU以下.从图2~4可看出,各药剂在达到一定加药量后,浊度下降趋势变得较为平缓,想再降低剩余浊度,则需要加入更大剂量的混凝药剂,因此要使沉淀出水浊度从2 NTU降至1 NTU,投入的药剂剂量将大大增加.在图2~4中,在剩余浊度为1 NTU处作平行于横轴的直线,与各药剂投加量-浊度折线相交,读取交点的横坐标值,可得到各药剂在剩余浊度达1NTU时所需的药剂投加量,见表3.

50%~50.14%、23.29%~33.29%.因此,PDM明显提高了PAC的混凝脱浊效果,且PAC/PDM复合配比越低,PDM特征粘度越高,脱浊效果与沉淀性能越好.

(2)PDM与PAC的复合大大增强了PAC的絮团沉淀性能,一方面可防止水量大时较轻矾花的上涌导致处理效果变差,另一方面可增大出水产量,提高生产效率,为水厂在现有工艺条件不变的情况下,提高供水产量提供一条可行的途径.

(3)可为将来深度处理作技术准备,沉淀出水浊度要求提高至1 NTU的情况下,复合药剂依然可发挥好的作用,复合混凝剂需8.33~3.91 mg/L的投加量,能比PAC减少投加量16.7%~60.9%.

参考文献:

[1] 陈卫,李圭白,邹浩春.高锰酸钾复合药剂去除太湖水中蓝藻的室内试验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,2001,34(3):72-74.
[2] 靳晓莉,高俊峰,赵广举.太湖流域近20年社会经济发展对水环境影响及发展趋势[J].长江流域资源与环境,2006,15(3):298-302.
[3] 范成新,羊向东,史龙新,等.江苏湖泊富营养化特征、成因及解决途径[J].长江流域资源与环境,2005,14(2):218-223.
[4] 朱威.太湖流域水质型缺水问题和对策[J].湖泊科学,2003,15(2):133-138.

[5] 石颖,马军,蔡伟民. 湖泊、水库水的强化混凝除藻的试验研究[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(2): 251-253.

[6] Gil G, Patrick W, Matthew M. Enhanced coagulation: Its effect on NOM removal and chemical costs[J]. J AWWA, 1995, **87**(1): 78-89.

[7] Yan M Q, Wang D S, You S J, *et al.* Enhanced coagulation in a typical North-China water treatment plant[J]. Water Research, 2006, **40**: 3621-3627.

[8] 刘海龙,王东升,汤鸿霄. 典型南方源水的有机高分子助凝研究[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(7): 1-4.

[9] 王东升,刘海龙,晏明全,等. 强化混凝与优化混凝: 必要性、研究进展和发展方向[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(4): 544-551.

[10] 汤鸿霄,栾兆坤. 聚合氯化铝与传统混凝剂的凝聚-絮凝行为差异[J]. 环境化学, 1997, **16**(6): 497-505.

[11] 谢磊,胡勇有,仲海涛. 聚合氯化铝与有机高分子复合絮凝剂形态分布研究[J]. 环境科学与技术, 2003, **26**(3): 15-16, 22.

[12] 石宝友,汤鸿霄. 聚合氯化铝与有机高分子复合絮凝剂的电荷特性及其絮凝作用[J]. 环境化学, 1999, **18**(4): 302-308.

[13] Wandrey C, Hernandez-Barajas J, Hunkeler D. Dialyldimethylammonium Chloride and its Polymers[J]. Adv Polym Sci, 1999, **145**: 123-182.

[14] 常青,陈野,韩相恩,等. 聚二甲基二烯丙基氯化铵的合成及水处理絮凝效能研究[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(2): 168-172.

[15] Hassick D E, Miknevič J P. Flocculation of suspended solid from aqueous solutions[P]. US: 4 800 039, 1989-04-24.

[16] Hoshina M, Tsugawa H, Okada M, *et al.* Treatment of algae-containing water with polyaluminum chloride and polydimethyldiallylammonium chloride [P]. JP 06182356 A2, 1994-07-05.

[17] Chang E, Chiang P, Tang W. Effects of polyelectrolytes on reduction of model compounds via coagulation[J]. Chemosphere, 2005, **58**(8): 1141-1150.

[18] Lindqvist N, Jokela J, Tuhkanen T. Enhancement of coagulation by using polyelectrolytes as coagulant or flocculant aids[A]. In: Hahn H H, Hoffmann E, Ødegaard H (eds). Chemical Water and Wastewater Treatment VII[M]. London: IWA Publishing, 2004. 161-169.

[19] Hasse R A. clarification of water and wastewater[P]. US: 6 120 690, 2000-12-19.

[20] 姚萱. HCA-1 阳离子净水剂处理巢湖高藻水[J]. 水处理技术, 2002, **28**(2): 120-121.

[21] 王桂荣,张杰. 强化混凝处理低温低浊水的研究[J]. 工业用水与废水, 2004, **35**(5): 20-22.

[22] 田秉晖,葛小鹏,潘纲,等. PDADMAC 强化絮凝去除腐殖质类天然有机污染物的研究[J]. 环境化学, 2007, **26**(1): 92-97.

[23] 尤作亮,张金松,梁明,等. 强化混凝提高水厂除藻效果的试验研究[J]. 净水技术, 2003, **22**(5): 9-12.

[24] 王燕,高宝玉,岳钦艳,等. 聚合铝基复合絮凝剂的特性[J]. 环境科学, 2004, **25**(增刊): 70-73.

[25] 高宝玉,王燕,岳钦艳,等. 聚合铝基复合絮凝剂的电荷特性及絮凝作用[J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 103-106.

[26] 岳钦艳,赵华章,高宝玉. 二甲基二烯丙基氯化铵聚合物的除浊性能研究[J]. 工业水处理, 2002, **22**(3): 26-31.