

PAM复配混凝剂对高岭土体系混凝过程的影响

苏航¹ 徐慧^{2,*} 王东升² 段晋明¹

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

摘要 为了解决无机混凝剂在混凝过程中的不足, 选用 AlCl_3 及其与 2 种不同阴离子度的 PAM 复配的混凝剂对高岭土体系进行混凝实验研究。结果表明: 使用 AlCl_3 做混凝剂, 当投加量 (以 Al 计) 为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 剩余浊度达到最低; 平衡时粒径达到 $700 \mu\text{m}$, 且随着破碎时间的延长, 絮体再生长结束后的粒径逐渐减小, 在破碎时间为 6.0 min 时, 絮体粒径最终能恢复到 $300 \mu\text{m}$ 左右。以 PAM-1 复配的 AlCl_3 为混凝剂, 在投加量为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 剩余浊度最低; 经慢速搅拌 10 min , 絮体平衡时的粒径较使用 AlCl_3 作混凝剂时略小, 但随着 PAM-1 浓度的增大, 絮体破碎后的恢复能力逐渐增大。当 PAM-1 与 Al 的比例为 10% , 破碎 1.0 min 时, 絮体粒径最终可以恢复到 $600 \mu\text{m}$ 左右。以 PAM-2 复配的 AlCl_3 为混凝剂时, 由于 PAM-2 的阴离子度过高, 需要更多的混凝剂中和体系中存在的负电荷, 所以在混凝剂浓度为 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 剩余浊度才达到最低。

关键词 混凝; PAM; 强度因子; 恢复因子; 颗粒粒径

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)03-4431-06 DOI 10.12030/j.cjee.201511194

Effects of PAM on coagulation process in kaolin system using composite coagulants

SU Hang¹ XU Hui^{2,*} WANG Dongsheng² DUAN Jinming¹

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract To improve the coagulation performance of kaolin systems, AlCl_3 and two composite coagulants were selected as coagulants. The results indicated that the residual turbidity decreased to the minimum when the coagulant dosage was $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (calculated as Al) using AlCl_3 as coagulant. The floc size was $700 \mu\text{m}$ after the growth period, and the floc size after the regrowth period decreased as the breakage period was prolonged. When the breakage period was 6.0 min , the floc size after regrowth was approximately $300 \mu\text{m}$. When using the composite coagulants prepared by dissolving PAM-1 in AlCl_3 solution, the residual turbidity also decreased to the minimum when the coagulant dosage was $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. The recovery factor increased with the concentration of PAM-1. When the ratio of PAM-1 to Al was 10% , the floc size after regrowth reached approximately $600 \mu\text{m}$. When using the composite coagulants prepared by dissolving PAM-2 into AlCl_3 solution, the optimum dosage was approximately $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ due to the larger amount of negative charge.

Key words coagulation; PAM; strength factor; recovery factor; particle size

由于成本低、操作简便, 混凝仍然是水处理中应用最为广泛的技术, 其作用机理主要包括: 压缩双电层、电中和以及架桥网捕等^[1-3]。原水通过以上几种作用形成肉眼可见的絮体, 进而在沉淀池中得到分

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51608515); 国家自然科学基金资助重点项目(51338010)

收稿日期: 2015-11-26; 录用日期: 2016-01-15

第一作者: 苏航(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 饮用水处理。E-mail: dacyianyin@163.com

* 通信作者, E-mail: huixu@rcees.ac.cn

离,使水质得到净化。铝系混凝剂具有混凝效果受水质(pH值、浊度等)影响较小、投药量较少、沉后水浊度低等优点^[4-5]。但与有机絮凝剂相比,无机混凝剂的某些絮凝特性(如架桥能力)仍有明显的不足,导致在某些水质条件(低温低浊、pH值过高或过低)下混凝效果不佳,出水水质较差^[6-8]。根据有机絮凝剂的来源,其可分为人工合成类和天然类2种,合成类有机高分子絮凝剂具有分子质量大、分子链长、官能团多的结构特点^[9-10]。聚丙烯酰胺(PAM)及其衍生物是目前应用最为广泛的人工合成类有机絮凝剂,分子质量为150万~2300万Da,对水中的胶体具有强烈的吸附作用,可在胶体颗粒之间形成架桥。天然有机高分子絮凝剂是以天然高分子如淀粉、纤维素等为原料制得的一类有机高分子絮凝剂,主要包括淀粉类、纤维素衍生物类、微生物多糖类等。天然有机高分子絮凝剂具有分子质量分布广、活性基团多、易于生物降解,对环境具有较少影响的特点^[11-12]。

在水处理过程中,絮体粒径的大小、絮体的分形维数都会影响后续的固液分离过程。絮体生长越快,需要的水力停留时间越短,在相同时间内可以明显提高产水量。通过比较不同条件下絮体的生长速度和平衡时絮体的粒径,可以了解混凝剂的作用机理,评价混凝效果。在水处理过程中,絮体会在较大的水力条件下发生一定程度的破碎,当破碎强度下降后,絮体会发生一定程度的再生长,絮体粒径恢复能力的强弱会直接影响沉淀池中固液分离的效果。综上所述,研究混凝过程中絮体的物理特性对探讨混凝机理具有重要的意义。

为了解决铝系混凝剂在水处理过程中存在的不足,本文研究了氯化铝-聚丙烯酰胺(PAM)复合絮凝剂处理高岭土体系的混凝过程,主要考察了不同投药量下剩余浊度、混凝过程中絮体的粒径,并分析了混凝过程中絮体的强度因子、恢复因子以及分形维数,以期为水厂更好的应用复合絮凝剂,提高混凝效果提供指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 高岭土储备液的配制

称取适量高岭土颗粒,以少量去离子水调和,并用NaOH溶液调节pH值为弱碱性(pH 7.5)。在高剪切条件下搅拌30 min,静置3.0 h,虹吸法取其上半部分。

1.1.2 有机助凝剂的选择与复配药剂的配制

为了考察阴离子度以及助凝剂分子质量对复配药剂混凝过程的影响,实验开始前选择了4种阴离子型的PAM,其阴离子度以及分子质量分别为5%、1400万Da,5%、1600万Da,10%、1400万Da,35%、1600万Da。分别称取1.0 g的2种PAM固体溶解于1.0 L的去离子水中,快速搅拌24 h进行溶解。分别移取10.8、27.0、54.0 mL的有机助凝剂储备液,在不断搅拌条件下将其溶解于100 mL浓度为0.2 mol·L⁻¹的AlCl₃溶液中,用去离子水稀释至200 mL,快速搅拌24 h,分别得到PAM与Al质量比为2%、5%、10%的复配药剂储备液^[13]。搅拌24 h后发现,分子质量达到1600万Da的PAM与AlCl₃复配药剂出现絮状沉淀,分析原因可能是由于大分子中含有较多的官能团,在与Al系混凝剂复配的过程中会发生一定的团聚。故在实验过程中选择了2种具有不同阴离子度的PAM进行复配实验,2种PAM的阴离子度分别是:PAM-1为5%,PAM-2为10%,分子质量均为1400万Da。

1.2 混凝剂铝形态分析

利用Ferron法对实验所用的混凝剂进行铝形态分析,实验结果见表1。

由表1的结果可以发现,将无机混凝剂与PAM复配之后,无机混凝剂的铝形态分布发生明显的变化。对于PAM-1,复配药剂中Al_a的含量较AlCl₃有

表1 实验所用混凝剂铝形态分析

| Table 1 Al species in coagulants % | | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 铝形态 | Al _a | Al _b | Al _c |
| AlCl ₃ | 88.02 | 10.18 | 1.80 |
| PAM-1-2% | 74.19 | 15.06 | 10.75 |
| PAM-1-5% | 73.63 | 17.58 | 8.79 |
| PAM-1-10% | 68.75 | 14.58 | 16.67 |
| PAM-2-2% | 80.11 | 18.91 | 0.98 |
| PAM-2-5% | 80.76 | 17.93 | 1.31 |
| PAM-2-10% | 80.76 | 18.10 | 1.14 |

明显降低,且随着 PAM 浓度的升高逐渐减小; Al_b 、 Al_c 的含量较 $AlCl_3$ 溶液则有明显的升高,但随着 PAM 浓度的进一步增大, Al_b 基本保持不变, Al_c 含量呈逐渐增大的趋势。对于 PAM-2,复配混凝剂中 Al_a 的含量较 $AlCl_3$ 中 Al_a 的含量有明显的降低, Al_b 含量相比于 $AlCl_3$ 有明显的升高,但 PAM-2 的浓度对复配药剂的铝形态分布无明显的影响。

1.3 混凝水样的配置

取混合均匀的高岭土储备液 4 mL 于 3.0 L 的烧杯中,分别加入 15 mL 的 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $NaNO_3$ 溶液和 15 mL 的 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $NaHCO_3$ 提供离子强度和碱度,用去离子水稀释至 3.0 L。不调节 pH 值,浊度为 5.80 NTU。

1.4 混凝实验条件

利用六联搅拌装置进行混凝实验,混凝搅拌程序如表 2 所示。

经过 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 0.5 min 快搅,使水样混合均匀后,分别加入不同剂量的混凝剂,慢速搅拌 10 min 形成絮体,自然沉降 30 min 后,取上清液(液面下 2.0 cm 处)测定浊度。

1.5 絮体强度因子、恢复因子以及分形维数

采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)监测混凝过程中絮体粒径,测定强度因子、恢复因子以及分形维数^[14-15]。絮体强度因子、恢复因子的测定:在相同的慢速搅拌条件($40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min)下形成絮体,然后经不同时间的破碎($200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 和 6.0 min),破碎后的絮体在 $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速下进行絮体的恢复。分形维数(D_f)反映絮体形态及形成机制,絮体的密实程度、沉降速度等参数都与其有着密切的关系,测定方法参考组内之前的研究^[1]。

2 结果与讨论

2.1 混凝剂投加量对剩余浊度的影响

实验过程中调节混凝剂的投加量(以 Al 计)由 $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $0.40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,测定混凝结束之后的剩余浊度,混凝程序如表 1 所述,实验结果见图 1。

由图 1 可以发现,随着混凝剂投加量的增加,剩余浊度呈现逐渐下降的趋势。对于 $AlCl_3$ 及经过 PAM-1 复配的 $AlCl_3$,当混凝剂投加量达到 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,剩余浊度达到最低,继续增加混凝剂投加量,由于反浊现象(混凝剂投加量过高时,絮体由于带有过多正电荷而互相排斥)的存在,使得沉后水浊度略有升高。对于经过 PAM-2 复配的 $AlCl_3$,在混凝剂投加量达到 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,沉后水浊度才达到最低。PAM-2 复配药剂投药量偏大的原因可能是由于高岭土颗粒本身带负电荷,PAM-2 的阴离子度高,带有更多同性电荷的 PAM 会增加体系中高岭土颗粒的稳定性,且经过复配之后,无机混凝剂中的铝盐可能由于与带负电的 PAM 发生了电中和作用,降低了无机药剂的电中和能力,故需要更多的无机混凝剂($AlCl_3$)中和颗粒表面的负电荷。此外,由表 1 可以发现,经过 PAM-1 复配的混凝剂 Al_a 含量较低,混凝剂中的铝更多的是以聚合态的形式存在。相比于单体态的混凝剂,聚合态存在的铝具有更强的电中和能力,故其在达到最优混凝效果时需要的混凝剂的投加量较低($0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)。

表 2 实验混凝程序

Table 2 Coagulation procedure used in experiment period

| 转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) | 时间/min |
|---|--------|
| 250 | 0.5 |
| 200 | 1.5 |
| 40 | 10 |
| 0 | 30 |

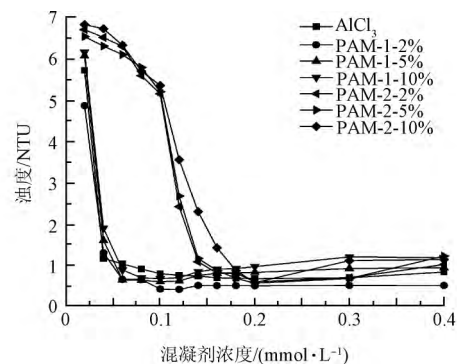


图 1 混凝剂投加量对剩余浊度的影响

Fig. 1 Effects of coagulant dosage on residual turbidity

2.2 不同混凝条件下絮体破碎再生长研究

实验选用 $AlCl_3$ 及其与 PAM 复配的另外 6 种药剂作为混凝剂在相同条件下进行混凝实验,絮体破碎时间设定为 1.0 ~ 6.0 min,混凝剂投加量为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。利用马尔文激光粒度仪测定混凝过程中絮体的粒径,实验结果见图 2。

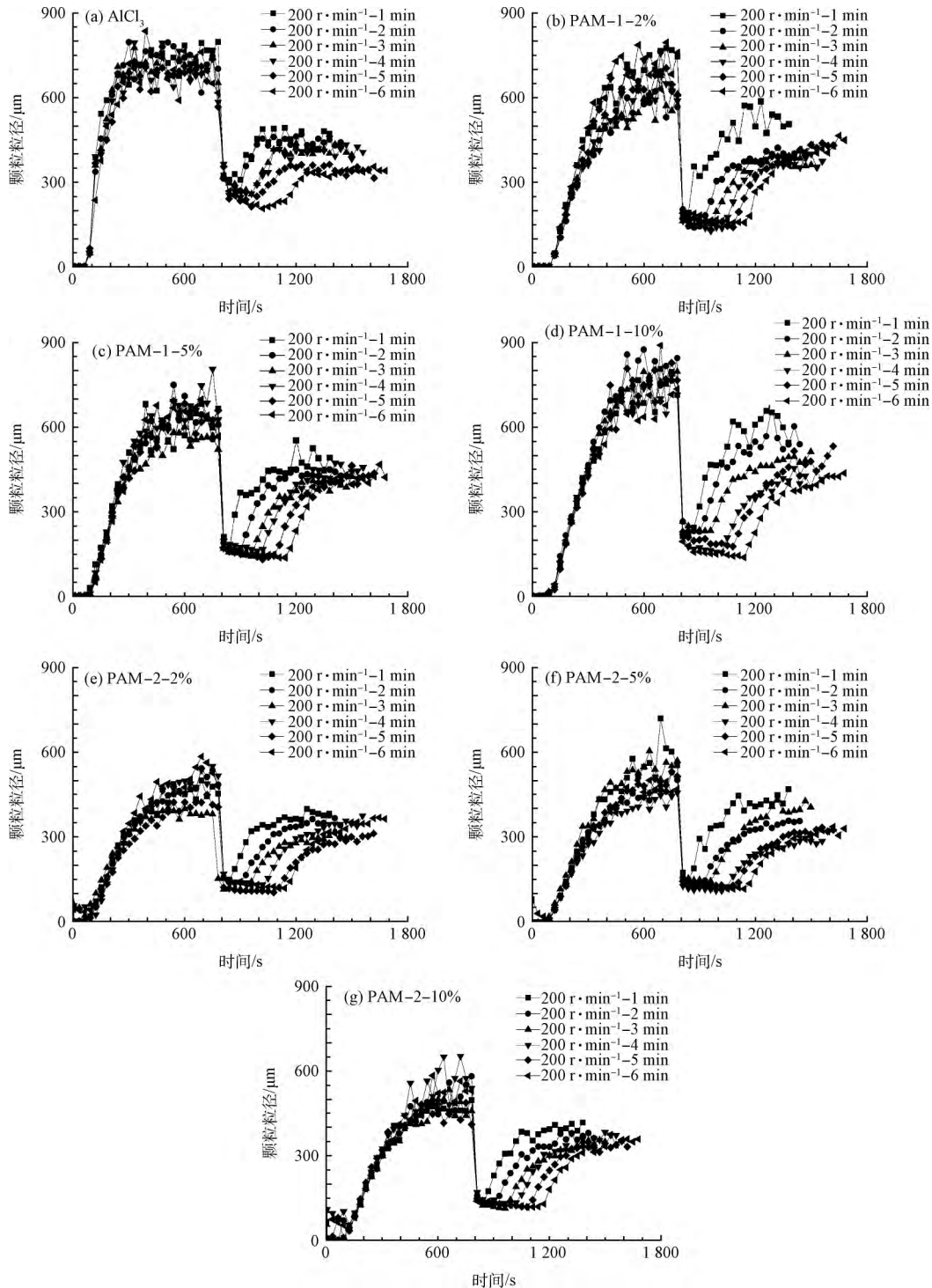


图 2 实验过程中絮体粒径的变化

Fig. 2 Change of floc size in coagulation process

实验结果(图 2(a))表明,当使用 $AlCl_3$ 做混凝剂时,平衡时絮体粒径能够达到 $700 \mu\text{m}$,破碎后絮体经

过再生长阶段,絮体颗粒粒径可以恢复到 400 μm 左右。随着破碎时间的延长,再生长结束后絮体粒径逐渐减小,当破碎时间达到 6.0 min 时,颗粒粒径最终可以恢复到 300 μm 。先前的研究也指出,在不继续投加混凝剂的条件下,絮体的破碎是不可逆的,即破碎后的絮体无法再恢复到破碎前的大小,且随着破碎时间的增加,絮体的再生长能力也逐渐降低^[1,3]。

对比图 2 中的 (a)、(b)、(c)、(d) 可以发现,虽然添加了 PAM-1 的 AlCl_3 复配混凝剂较单独的 AlCl_3 对促进高岭土体系中絮体粒径的增长作用略差,但随着 AlCl_3 中 PAM 浓度的升高,破碎后絮体的恢复能力越来越高,在以 PAM-1-10% 为混凝剂的实验中,破碎时间为 1.0 min 时,絮体粒径最终能恢复到破碎前的 80%,即 600 μm 左右。即使在破碎时间达到 6.0 min 时,絮体粒径最终也能够恢复到 400 μm 左右。产生这种现象的原因可能是由于 PAM 本身具有极性基因——酰胺基,易于借其氢键的作用吸附在高岭土颗粒表面,又因其有很长的分子链,长链在水中有巨大的吸附表面积,能利用长链在颗粒之间形成架桥作用,从而形成颗粒粒度较大的絮体。

对于 PAM-2 复配的混凝剂而言,图 2(e)、(f)、(g) 的实验结果表明,经过 10 min 的慢速搅拌后颗粒的平均粒径仅仅增长到了 500 μm ,明显低于在相同条件下以单独的 AlCl_3 或添加有 PAM-1 的 AlCl_3 复配药剂作为混凝剂时絮体颗粒所能够达到的尺寸。随着 PAM-2 浓度的增大,絮体经快速搅拌破碎之后的恢复能力基本没有变化,这也正好印证了表 1 中 PAM-2 的 3 种混凝剂铝形态分布基本一致的现象。絮体颗粒最终的恢复粒径仅有 350 μm 左右,明显小于经 PAM-1 复配的 AlCl_3 。分析这一结果的原因可能是由于 PAM-2 的阴离子度过高,增强了带负电荷的高岭土体系的稳定性,因而需要大量的混凝剂中和体系负电荷,形成的絮体颗粒粒径远小于前者,与 2.1 中的结论一致。

2.3 不同混凝条件下絮体强度因子、恢复因子研究

絮体的强度因子、恢复因子见表 3。

表 3 混凝过程中的强度因子与恢复因子

Table 3 Strength factor and recovery factor in coagulation process

| 破碎 时间/ min | AlCl_3 | | PAM-1-2% | | PAM-1-5% | | PAM-1-10% | | PAM-2-2% | | PAM-2-5% | | PAM-2-10% | |
|------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 强度 因子/% | 恢复 因子/% | 强度 因子/% | 恢复 因子/% | 强度 因子/% | 恢复 因子/% | 强度 因子/% | 恢复 因子/% | 强度 因子/% | 恢复 因子/% | 强度 因子/% | 恢复 因子/% | 强度 因子/% | 恢复 因子/% |
| 1 | 40.79 | 38.78 | 25.60 | 51.61 | 25.69 | 81.37 | 28.16 | 79.85 | 32.90 | 72.76 | 25.00 | 62.22 | 28.02 | 90.72 |
| 2 | 41.91 | 36.32 | 23.02 | 62.89 | 25.43 | 65.7 | 27.71 | 55.00 | 28.63 | 68.60 | 26.88 | 70.59 | 26.08 | 65.52 |
| 3 | 41.14 | 35.8 | 24.67 | 63.36 | 25.61 | 62.97 | 30.13 | 48.63 | 30.26 | 80.00 | 25.54 | 68.82 | 24.08 | 65.06 |
| 4 | 40.06 | 34.15 | 23.93 | 70.15 | 23.53 | 54.81 | 23.08 | 50.55 | 26.12 | 62.71 | 24.89 | 55.62 | 23.13 | 56.79 |
| 5 | 38.97 | 22.89 | 23.54 | 41.65 | 20.95 | 59.24 | 23.38 | 53.39 | 25.24 | 67.20 | 26.00 | 55.41 | 27.11 | 68.60 |
| 6 | 38.46 | 22.50 | 26.91 | 31.59 | 21.41 | 56.66 | 28.16 | 79.85 | 23.20 | 64.32 | 24.00 | 55.26 | 22.64 | 56.34 |

实验结果(表 3)表明,经 PAM 复配的混凝剂形成絮体的强度因子明显小于 AlCl_3 所形成絮体的强度因子,但其恢复因子却远大于 AlCl_3 所形成的絮体。产生这一结果的原因可能是由于 PAM 桥联作用力较弱,虽然在絮体形成阶段(慢速搅拌)可以形成明显的絮体,但相比于单独使用 AlCl_3 做混凝剂时形成的絮体,此桥连作用更易被破坏,所以强度因子偏小;在絮体恢复阶段,PAM 的桥联作用有助于絮体粒径的恢复,使得絮体恢复因子远大于 AlCl_3 所形成的絮体。对比 2 种具有不同阴离子度的 PAM 改性混凝剂的实验结果可以发现,阴离子度较大的 PAM 改性混凝剂形成的絮体具有较大的恢复因子,而阴离子度的增大说明了 PAM 分子中带负电的官能团的增多,证实了 PAM 分子中的官能团在絮体形成、破碎、再生长的过程中具有重要的作用。

2.4 不同混凝条件下絮体分形维数

测定平衡时絮体的分形维数,实验结果见图 3。

实验结果表明,经过 PAM 复配的混凝剂所形成的絮体分形维数明显小于使用 AlCl_3 做混凝剂时形成

的絮体,当 PAM 的阴离子度较低 (5.0%) 时,粒径达到平衡时絮体的分形维数与 PAM 的浓度无明显相关性。但是当 PAM 的阴离子度较高 (10.0%) 时,平衡时絮体的分形维数随着 PAM 浓度的增加而呈现下降的趋势。以上结果表明,混凝剂中存在的 PAM 对絮体分形维数的影响包括 2 个方面的因素: PAM 的浓度和 PAM 的离子度。

3 结论

针对无机混凝剂在使用过程中存在的问题,本研究使用 $AlCl_3$ 及其与 2 种不同阴离子度的 PAM 复配产生的混凝剂处理高岭土水样,监测不同投药量下的剩余浊度及不同破碎时间条件下絮体颗粒粒径、分形维数的变化,结果表明:

1) $AlCl_3$ 做混凝剂时,当混凝剂浓度为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,高岭土体系混凝后的剩余浊度达到最低;在经初始慢速搅拌之后,颗粒粒径达到 $700 \mu\text{m}$,随着破碎时间的延长,颗粒最终能够恢复到的粒径逐渐减小,在破碎时间为 6 min 时,颗粒粒径最终能恢复到 $300 \mu\text{m}$ 左右。

2) 以 PAM-1 复配的 $AlCl_3$ 为混凝剂,在混凝剂浓度为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,剩余浊度最低;经慢速搅拌 10 min 后,絮体颗粒形成的粒径较单独的 $AlCl_3$ 略小,但随着 PAM 浓度的增大,絮体破碎后能恢复到的粒径逐渐增大,其恢复因子远大于 $AlCl_3$ 。当复配混凝剂 PAM 与 $AlCl_3$ 的成分配比为 10% 时,破碎 1.0 min,颗粒粒径最终可以恢复到 $600 \mu\text{m}$ 左右。

3) 以 PAM-2 复配的 $AlCl_3$ 为混凝剂,由于其阴离子度过高,需要大量的混凝剂中和体系负电荷,因而在混凝剂浓度为 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,剩余浊度才达到最低;其形成的絮体粒径也远小于 $AlCl_3$ 及 PAM-1 复配的 $AlCl_3$,但由于 PAM 本身具有桥联作用,在絮体破碎后有助于絮体的再恢复,因而其恢复因子远大于 $AlCl_3$ 。

参考文献

- [1] XU Hui, XIAO Feng, WANG Dongsheng. Effects of Al_2O_3 and TiO_2 on the coagulation process by $Al_2(SO_4)_3$ (AS) and poly-aluminum chloride (PACl) in kaolin suspension [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 124: 9-17
- [2] XU Hui, JIAO Ruyuan, XIAO Feng, et al. Relative importance of hydrolyzed Al species (Al_3 , Al_6 , Al_9) on residual Al and effects of nano-particles (Fe-surface modified TiO_2 and Al_2O_3) on coagulation process [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 446: 139-150
- [3] XU Hui, JIAO Ruyuan, XIAO Feng, et al. Effects of different coagulants in treatment of TiO_2 -humic acid water and the aggregate characterization in different conditions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 446: 213-223
- [4] YAN Mingquan, WANG Dongsheng, QU Jiuhui, et al. Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization [J]. Water Research, 2008, 42(8/9): 2278-2286
- [5] VAN BENSCHOTEN J E, EDZWALD J K. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts-I. Hydrolytic reactions of aluminum and polyaluminum chloride [J]. Water Research, 1990, 24(12): 1519-1526
- [6] 李为兵,金雪中,张红春,等. 处理低温低浊水的混凝剂优选 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(13): 49-52
- [7] 黄廷林,栾新晓,解岳,等. 增效澄清池处理低温低浊水的中试研究 [J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 78-81
- [8] 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
- [9] 孟勇,赵海红,李明,等. 无机-两性聚丙烯酰胺混凝脱除有机废水中的磷 [J]. 工业水处理, 2011, 31(10): 35-38
- [10] 范敏,周迟骏. 聚丙烯酰胺类混凝剂的制备及应用 [J]. 工业水处理, 2004, 24(11): 33-35
- [11] 王显蕾,杨亚提,张瑞,等. 不同改性玉米淀粉絮凝剂的制备及其应用初步研究 [J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 83-87
- [12] 李孟,陆谢娟. 改性淀粉在水和废水处理中的应用研究 [J]. 净水技术, 2004, 23(5): 24-27
- [13] SUN Cuizhen, YUE Qinyan, GAO Baoyu, et al. Effect of pH and shear force on flocs characteristics for humic acid removal using polyferric aluminum chloride-organic polymer dual-coagulants [J]. Desalination, 2011, 281: 243-247
- [14] XU Weiyang, GAO Baoyu, WANG Yan, et al. Role of Al_{13} species in removal of natural organic matter from low specific UV absorbance surface water and the aggregates characterization [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(3): 926-934
- [15] XU Hui, XIAO Feng, WANG Dongsheng, et al. Survey of treatment process in water treatment plant and the characteristics of flocs formed by two new coagulants [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 456: 211-221

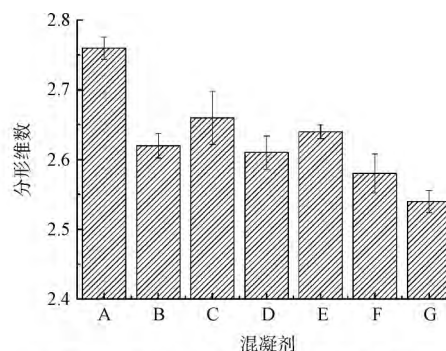


图 3 慢速搅拌结束时絮体的分形维数

Fig. 3 Fractal dimensions after slow mixing period