



竹浆纤维素基绿色混凝材料混凝标准 高岭土悬浊液的机理

胡雪怡¹, 来 雷², 梁福根², 杨 飞³, 张秀梅¹, 张 勇¹

(1. 浙江理工大学先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018;
2. 浙江传化华洋化工有限公司, 杭州 311231; 3. 浙江宇博新材料有限公司, 浙江台州 318000)

摘 要: 混凝是化学处理法处理印染废水过程中的重要环节, 研究混凝机理有助于进一步指导印染废水混凝过程混凝剂的开发与应用。将聚丙烯酰胺接枝到竹浆纤维素骨架上, 制备环境友好、安全高效的竹浆纤维素基绿色混凝材料(BPC-g-PAM), 然后利用 FESEM、FTIR、XRD、Zeta 电位仪对其进行物理特性和化学结构表征, 并将 BPC-g-PAM 应用到高岭土悬浊液的混凝处理过程, 重点考察其在不同 pH 条件下的混凝机理。结果表明: BPC-g-PAM 为阴离子型混凝材料, 在酸性条件下的主要机理为电中和作用, 在中性条件下的主要作用机理为静电簇作用, 在碱性条件下则以黏接架桥机理为主。该研究结果可为进一步减少 PAM 的使用和污水的后续处理等提供参考。

关键词: 竹浆纤维素; 纤维素基混凝材料; 印染废水; 混凝机理; 高岭土悬浊液

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 01-0016-07

Flocculation mechanism of a bamboo pulp cellulose-based flocculation material in standard kaolin suspension

HU Xueyi¹, LAI Lei², LIANG Fugen², YANG Fei³, ZHANG Xiumei¹, ZHANG Yong¹

(1. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Zhejiang Transfar Whyyon Chemical Co., Ltd., Hangzhou 311231, China;
3. Zhejiang Yubo New Material Co., Ltd., Taizhou 318000, China)

Abstract: Flocculation is an important link in the chemical treatment of printing and dyeing wastewater. To guide the development and application of flocculants in the flocculation process of printing and dyeing wastewater, its flocculation mechanism was investigated. In this work, a bamboo pulp cellulose-based flocculation material (BPC-g-PAM) was prepared by grafting polyacrylamide onto the bamboo pulp cellulose skeleton, which was eco-friendly, safe and efficient. Then FESEM, FTIR, XRD AND Zeta potentiometers were employed to characterize physical properties and chemical structure of BPC-g-PAM. Meanwhile, the as-prepared BPC-g-PAM was applied to the flocculation process of kaolin suspension, and its flocculation mechanism under different pH conditions was emphatically investigated. The results showed that the BPC-g-PAM was a kind of anionic flocculation material. The main flocculation mechanism was charge neutrality under acidic conditions; patching was the main mechanism under the neutral conditions bonding bridging is the main under alkaline condition. The research finding can provide

收稿日期: 2021-03-28 网络出版日期: 2021-05-18

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2020C04015, 2021C03160); 浙江省基础公益研究计划项目(LGF18C160002, LY19C160010); 杭州市农业与社会发展科研项目(20191203B28)

作者简介: 胡雪怡(1996—), 女, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制与治理方面的研究。

通信作者: 张 勇, E-mail: zhangyong@zstu.edu.cn

reference for further minimizing the use of PAM and subsequent treatment of sewage.

Key words: bamboo pulp cellulose; cellulose-based flocculation material; printing and dyeing wastewater; flocculation mechanism; kaolin suspension

0 引言

中国的纺织印染产业在扩大出口和提供就业方面发挥着重要作用。2008 年以来, 纺织印染行业收入在制造业总销售收入中所占比例一直保持在 6% 以上, 出口约占 25%^[1]。然而, 由于印染废水产生量大、浓度高、色度高、难降解, 印染产业已跻身重污染行业之列^[2]。随着国家对生态文明建设的日益重视, 印染废水的高效安全处理势在必行。混凝是印染废水首道且不可替代的重要工段^[3], 主要是将废水中不溶或微溶性污染物通过物理化学方式凝结去除^[4], 达到改善废水水质, 提高废水处理的整体效果, 确保整个处理系统稳定性^[5]。混凝剂及混凝效率是决定印染废水混凝工段污染物去除效果的关键因素。

聚丙烯酰胺(PAM)鉴于其生产工艺成熟、分子结构合理、混凝性能稳定等特点^[6-7], 是目前印染废水混凝工段使用最广泛的混凝剂^[8-9], 但存在丙烯酰胺(AM)单体来源依赖石化工业、废弃物不易分解进而造成二次污染等潜在的资源与环境隐患^[10]。将天然高分子材料接枝到 PAM 结构中, 可以在不降低其处理效果的情况下减少 PAM 的使用。纤维素是一种价格较低、功能性较强的可再生天然高分子材料。在前期的研究工作中, 本课题组专门针对传统 PAM 分子结构进行调整优化, 以竹浆纤维素分子为基本骨架, 侧链接枝 PAM, 构建了具有网状结构、可快速自然降解的竹浆纤维素基绿色混凝材料(BPC-g-PAM)^[11], 解决了 PAM 混凝剂原料紧缺、二次污染问题, 同时大幅提升了其混凝效率, 并已在造纸废水的混凝工段得到验证, 处理过程高效、安全、稳定。然而, BPC-g-PAM 在处理废水过程中的关键结构、作用基团、构效关系及捕获污染物方式等混凝机理仍不清楚, 有必要对其进行深入探究和揭示, 进而更为精准地对 BPC-g-PAM 系列产品的研发及其高效混凝工艺的优化提供理论指导。

本研究首先以竹浆纤维素(BPC)和 PAM 为基础原料, 根据前期开发的最优工艺制备得到 BPC-g-PAM 产品, 采用 FESEM、FTIR、XRD 对其物理性能和化学结构进行表征分析; 以标准高岭土悬浊液为处理对象, 通过研究在不同 pH 条件下 BPC-g-

PAM 投加量对其混凝性能的影响及混凝处理后上清液 Zeta 电位的变化情况, 分析其混凝性能与上清液 zeta 电位变化关系, 揭示 BPC-g-PAM 处理标准高岭土悬浊液的混凝机理, 为其系列产品研发和高效混凝印染废水应用提供理论数据支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料

尿素($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)、氢氧化钠(NaOH), 购自上海麦克林生化科技有限公司; 过硫酸铵($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$)、聚合氯化铝($\text{Al}_2\text{Cl}(\text{OH})_5$)、聚丙烯酰胺($(\text{C}_3\text{H}_5\text{NO})_n$), 购自上海阿拉丁化学试剂有限公司, 以上试剂均为分析纯; 毛竹浆板, 购自贵州赤天化纸业股份有限公司; 超细高岭土, 购自上海阿拉丁化学试剂有限公司; 盐酸(HCl , 浓度 36.6%), 购自杭州双林化工试剂有限公司; 2, 2'-偶氮双[2-(2-咪唑啉-2-基)丙烷]二盐酸盐($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{N}_6 \cdot 2\text{HCl}$), 购自上海阿拉丁化学试剂有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 BPC-g-PAM 的制备

将竹浆浆板剪碎, 利用微型植物粉碎机粉碎得到 BPC 粉末。将 1.000 g BPC 粉末溶于 20.000 g 氢氧化钠/尿素(质量分数比为 7:12)溶液中, $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 冷冻 1.5 h, 得到质量分数为 4% 纤维素溶液; 在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下搅拌并通入 N_2 30 min, 加入引发剂(0.125 g 过硫酸铵、0.125 g 2, 2'-偶氮双[2-(2-咪唑啉-2-基)丙烷]二盐酸盐和 4.000 g 氢氧化钠/尿素溶液), 反应 15 min; 最后加入 0.500 g PAM, 反应 90 min, 即得到胶状 BPC-g-PAM 产品。

1.2.2 高岭土悬浊液制备

将 200 mg 高岭土溶于 1 L 水中, 400 r/min 磁力搅拌 10 min 使其充分分散, 制成 200 mg/L 高岭土悬浊液。

1.2.3 BPC-g-PAM 混凝工艺

取 150 mL 高岭土悬浊液, 采用 0.1 mol/L 盐酸或者氢氧化钠溶液调节悬浊液 pH 值; 加入 4 mL 质量分数为 0.1% 聚合氯化铝溶液(PAC), 350 r/min 磁力搅拌 3 min, 加入质量分数为 1% BPC-g-PAM 溶液, 150 r/min 磁力搅拌 7 min, 静置 10 min, 取上清液测定浊度和 Zeta 电位。

1.3 测试与表征

1.3.1 BPC-g-PAM 的性能测试

将 BPC、溶解 BPC 和 BPC-g-PAM 样品置于导电胶上并镀金,工作电压 3 kV,通过 JSM-5610 FESEM 观察其表观形貌;采用 Nicolet 5700 FTIR 分析 BPC、PAM 和 BPC-g-PAM 的化学结构,扫描范围 4000~500 cm⁻¹,扫描次数 32 次,分辨率 4 cm⁻¹;取适量充分干燥的 BPC 和 BPC-g-PAM,利用 K-Alpha X 射线衍射仪分别对其进行测定,扫描速度 5 (°)/min,扫描角度 10°~35°;将 1.000 g BPC-g-PAM 加入 100 mL 预先加入一定量盐酸或氢氧化钠的水溶液中,磁力搅拌充分分散,测定 pH 值并在 Malvern Nano-ZS90 纳米粒径电位分析仪上测定其表面电荷。

1.3.2 BPC-g-PAM 的混凝性能表征

浊度去除率测定:利用 Turb 550 浊度仪对溶液初始浊度及混凝后上清液浊度进行测定,浊度去除率计算公式^[12]可以表示为:

$$\eta/\% = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

其中: η 为浊度去除率, C_0 为溶液初始浊度, C_1 为混凝后上清液浊度。

Zeta 电位测定:利用 Malvern Zetasizer Nano ZS90 纳米粒径电位分析仪对高岭土悬浊液混凝后上清液的 Zeta 电位进行测定。

2 结果与讨论

2.1 BPC-g-PAM 的形貌、结构和晶型分析

2.1.1 表观形貌分析

通过 FESEM 对 BPC、溶解 BPC 和 BPC-g-PAM 产品的表观形貌进行观察。如图 1(a)~(b)所示,BPC 表面附着一层胶质,相对平整;从图 1(c)~(d)中可以看出,BPC 经氢氧化钠/尿素溶液溶解 1.5 h,表面呈褶皱状,比表面积增大,有利于 PAM 接枝;图 1(e)~(f)为 BPC-g-PAM 产品,可以发现 BPC 与胶状物质紧密结合在一起,表面基本被胶状物质覆盖,这可能是因为 PAM 接枝到了纤维素上,使纤维素的形貌发生了明显改变^[13]。

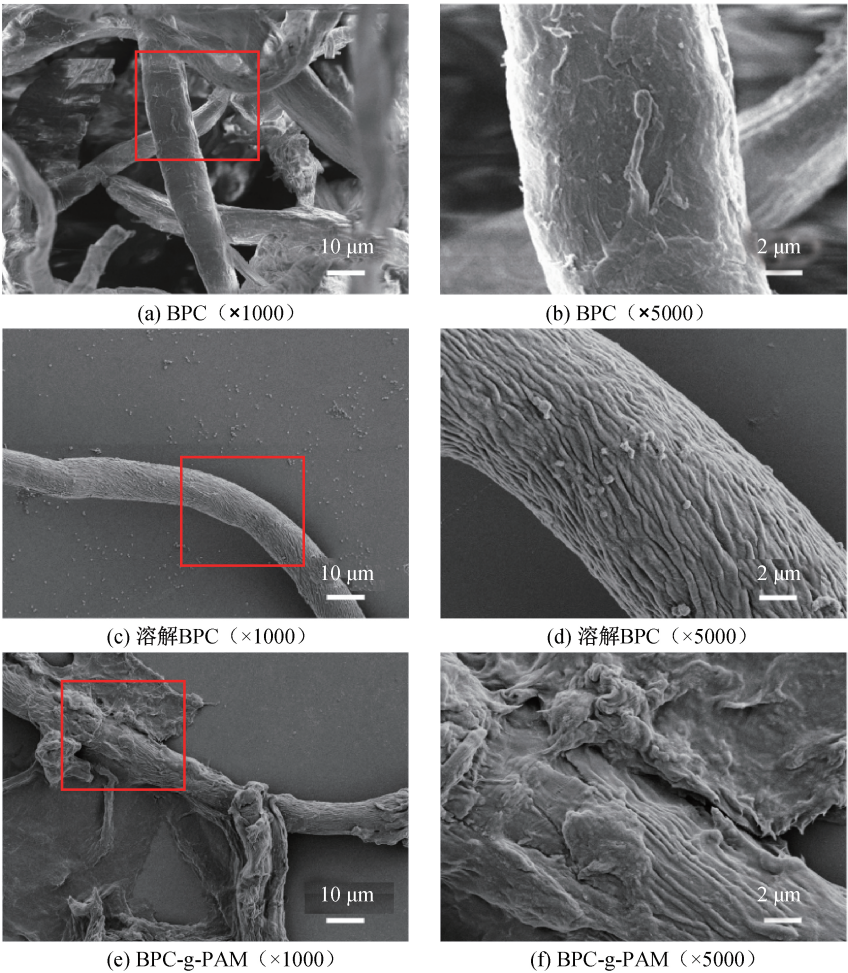


图 1 BPC、溶解 BPC 和 BPC-g-PAM 的 FESEM 图像

2.1.2 化学结构分析

BPC、PAM 和 BPC-g-PAM 产品的化学结构表征如图 3 所示。对于聚丙烯酰胺, 在 3470 cm^{-1} 和 3415 cm^{-1} 处存在酰胺基中的拉伸振动, 1640 cm^{-1} 出现的特征峰代表酰胺基中的羰基($\text{C}=\text{O}$)。对于 BPC-g-PAM 绿色混凝材料, 在 1660 cm^{-1} 处出现纤维素谱图上原本没有出现的羰基峰, 在 3440 cm^{-1} 处存在酰胺基中的 N-H 特征吸收峰, 这说明纤维素接枝共聚反应后引入了大量酰胺基团($-\text{CONH}-$)^[13]。此外, 由于纤维素中的羟基($-\text{OH}$)和聚丙烯酰胺中的氨基($-\text{NH}-$)的吸收峰重合, 使得在波长 3440 cm^{-1} 处的衍射峰强度明显增加。同时由于醚键($\text{C}-\text{O}-\text{C}$)的伸缩振动使得在波数 1050 cm^{-1} 处的峰值和峰形发生变化, 这表明在接枝过程中有更多的醚键($\text{C}-\text{O}-\text{C}$)产生, 由此也说明聚丙烯酰胺通过醚键连接在纤维素骨架上^[14]。

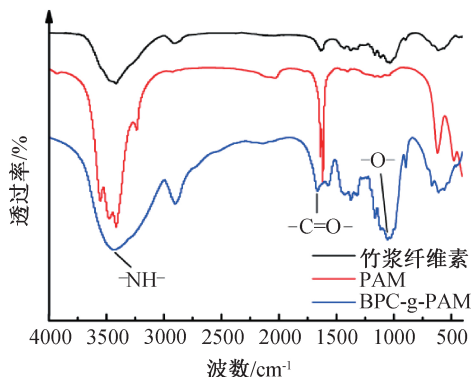


图 2 BPC、PAM 和 BPC-g-PAM 的 FTIR 谱图

2.1.3 晶型分析

对竹浆纤维素和 BPC-g-PAM 绿色混凝材料进行 XRD 分析, 结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 竹浆纤维素在 2θ 为 15.0° 、 16.3° 、 22.4° 处有明显的衍射峰, 分别对应纤维素的(1-10)、(110)和(002)结晶面, 峰型较为尖锐, 属于典型的纤维素 I 晶型结构^[15]。BPC-g-PAM 绿色混凝材料在 2θ 为 14.3° 、 20.0° 、 22.0° 处存在衍射峰, 符合纤维素 II 型各个晶面所对应的衍射峰特征^[16]。这是因为对竹浆纤维进行碱处理会使部分纤维素转化成碱纤维素, 导致其结晶结构转化为纤维素 II 型^[17]。接枝聚丙烯酰胺后, 竹浆纤维素在 15.0° 处和 16.3° 处晶面的峰相对强度明显减弱, 这一结果表明聚丙烯酰胺的存在使纤维素中(110)晶面的择优取向现象受到抑制^[18]。

2.2 BPC-g-PAM 的混凝机理探究

2.2.1 污染物和 BPC-g-PAM 的 Zeta 电位分析

图 4 为不同 pH 条件下, BPC-g-PAM、高岭土、

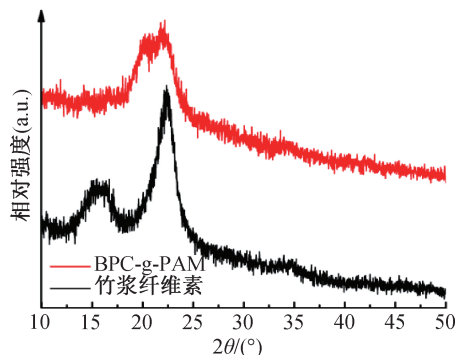


图 3 BPC 和 BPC-g-PAM 的 XRD 谱图

PAC 以及高岭土和 PAC 的混合溶液中颗粒的带电情况。在实际污水处理混凝过程中, 污染物表面会带有一定的电荷量, 混凝剂自身的带电量 and 污染物表面的带电量均对混凝效果以及混凝机理有较大的影响。因此, 本文对高岭土颗粒和混凝剂的 Zeta 电位进行了分析表征。从图 4(a)可以看出, 随着水体中氢氧根离子浓度逐渐增大, BPC-g-PAM 混凝剂和高岭土的 Zeta 电位都随 pH 的增加呈现逐渐下降的趋势。其中, 由于纤维素本身带负电, 接枝所用的聚丙烯酰胺为阴离子型, 所以在整个 pH 范围内, BPC-g-PAM 混凝剂表现出典型的阴离子聚电解质的特点, 这表明制备所得的混凝剂属于阴离子型混凝剂。而高岭土在整个 pH 测量范围内也呈负电性, 所以在混凝过程中需要借助阳离子助凝剂的帮助才能更好地完成污水处理。聚合氯化铝是一种应用十分广泛的阳离子型无机高分子混凝剂, 极易与水中的胶体和悬浮颗粒物发生电中和作用及黏结架桥作用^[19], 因此在本研究中被选作助凝剂。从图 4(b)中可以看到高岭土悬浊液在加入 PAC 后的 Zeta 电位变化情况, 在 $\text{pH}=10$ 附近, 混合溶液达到等电点; 当 $\text{pH}<10$ 时, 高岭土和聚合氯化铝的混合溶液呈正电性; 在 $\text{pH}>10$ 时混合溶液呈明显的负电性, 这些现象有利于后续混凝剂与高岭土颗粒之间的相互吸引作用, 从而达到良好的混凝效果。

2.2.2 BPC-g-PAM 的混凝性能分析

图 5 为不同 pH 条件下, BPC-g-PAM 的混凝性能随投加量的变化情况。从图 5(a)~(b)中可以看出, 在酸性条件下, BPC-g-PAM 的混凝性能随投加量呈先上升后下降的趋势, 而在中性条件下, BPC-g-PAM 的混凝性能在一定的投加范围内保持相对稳定, 最佳混凝投加量分别为 800 mg/L 和 100 mg/L , 其对应的浊度去除率分为 96.5% 和 96.7% 。通过对高岭土和混凝剂自身带电情况进行

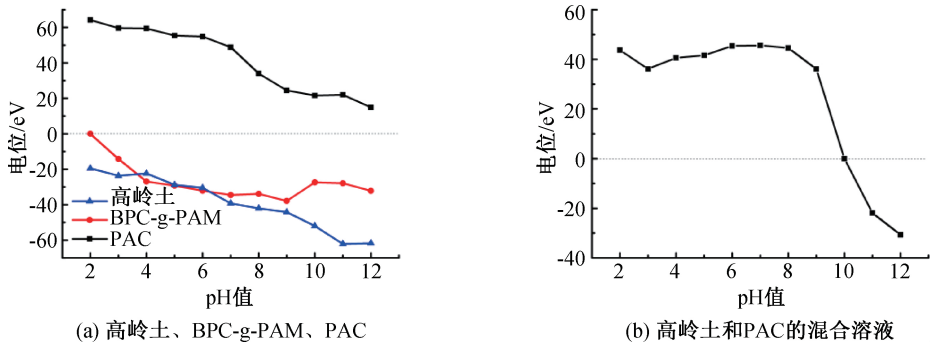


图4 不同 pH 值下高岭土、BPC-g-PAM、PAC 以及高岭土和 PAC 的混合溶液的 Zeta 电位变化情况

分析可知,在酸性和中性条件下,高岭土自身带负电荷,在加入助凝剂后所带电荷由负变正。此时加入一定量带负电性的混凝剂,使颗粒间的互斥作用降到最低,从而使颗粒发生聚集沉降,从而达到去除水体中胶体颗粒的效果。从图 4(a)中可知在酸性条件下 BPC-g-PAM 的带电量明显弱于中性条件下,所以,酸性条件下的最佳混凝投加量远高于中性条件下的最佳混凝投加量。从图 5(c)中可以看到在

碱性条件下,未投加混凝剂时 PAC 和高岭土已发生混凝作用,浊度去除率为 92.4%。且从图 6(c)中可以观察到,投加 PAC 前后混合悬浊液的 Zeta 电位未异号,这是因为高岭土和 PAC 之间存在静电簇作用^[20],从而达到混凝效果。投加混凝剂后,水中的污染物得到了进一步的去除,BPC-g-PAM 最佳混凝投加量为 10 mg/L,对应的浊度去除率高达 98.4%。

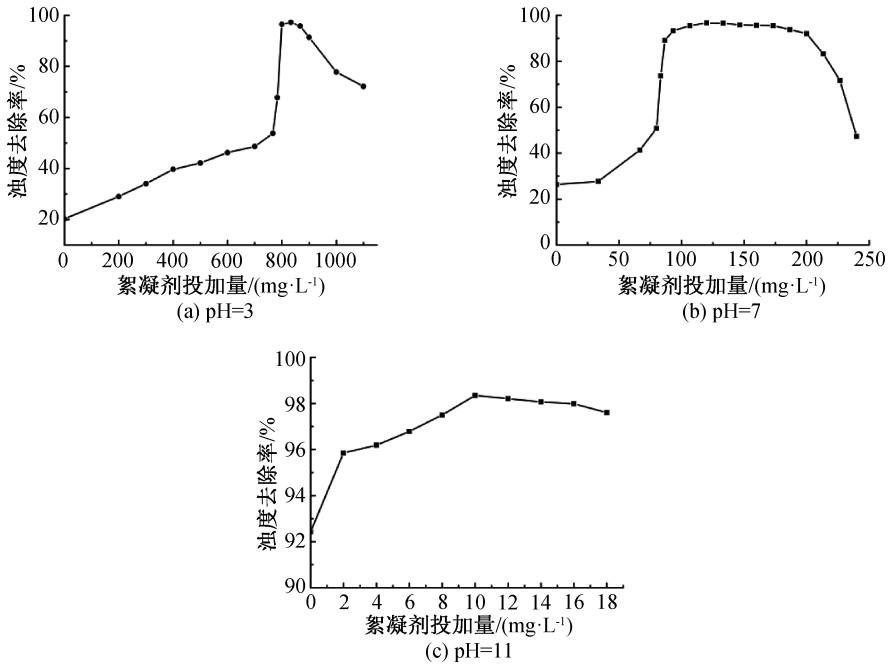


图5 不同 pH 值下 BPC-g-PAM 的浊度去除率随混凝剂投加量变化的曲线

2.2.3 BPC-g-PAM 的混凝机理探讨

图 6 为不同 pH 条件下,混凝后上清液电位随投加量的变化情况。如图 6(a)一(b)所示,在酸性下,混合悬浊液的 Zeta 电位呈正电性,当混凝剂的投加量达到最佳时,上清液的电位接近于 0。由前面的讨论已知,在酸性下,高岭土与 PAC 混溶后 Zeta 电位呈正电性,而 BPC-g-PAM 表面呈负电性,因此说明在该条件下 BPC-g-PAM 对高岭土悬浊液主要的混凝机理为电中和作用^[21]。当继续投加混凝剂时,混凝后上

清液的 Zeta 电位变号并保持明显的上升趋势,混凝能力呈先上升后下降趋势,这一现象也再次证明其混凝机理为电中和作用。而在中性条件下,最佳 BPC-g-PAM 投加量时,Zeta 电位不为 0,且随着投加量的增加,电位的上升 BPC-g-PAM 的混凝性能在较宽的一个范围内保持稳定,则说明中性条件下的主要作用机理为静电簇作用。如图 6(c)所示,在碱性条件下,高岭土与 PAC 混溶后电位呈负电性,当混凝剂投加量达到最佳时,混凝后上清液的 Zeta 电位值仍呈负

电性。当继续增加混凝剂的投加量时,混凝后上清液 Zeta 电位并未表现出明显的增长趋势,且在整个混凝

过程中未发生 Zeta 电位变号的现象。由此推测在碱性条件下混凝机理以黏接架桥作用为主导^[20]。

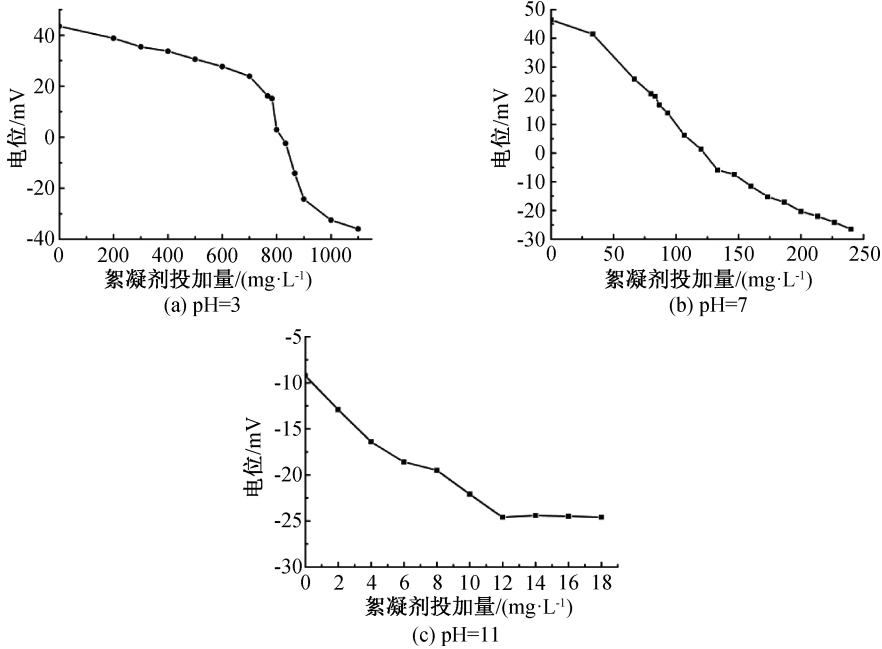


图 6 不同 pH 值下混凝后上清液 Zeta 电位随混凝剂投加量变化情况

3 结 论

本研究以毛竹为原料,经自由基引发接枝共聚聚丙烯酰胺,制备得到安全高效的 BPC-g-PAM 绿色混凝材料,将其应用于不同 pH 条件下水体悬浊颗粒物的去除,研究其混凝性能和机理,主要结论如下:

- a) BPC 和 BPC-g-PAM 的表现形貌和化学结构分析表明,聚丙烯酰胺已覆盖于纤维素表面,通过醚键成功接枝到纤维素骨架上。
- b) Zeta 电位分析表明 BPC-g-PAM 为阴离子混凝材料,在酸性、中性和碱性条件下,BPC-g-PAM 最佳混凝投加量分别为 800、100 mg/L 和 10 mg/L,对应的浊度去除率分为 96.5%、96.7%和 98.4%,均达到良好的混凝效果。
- c) BPC-g-PAM 在不同条件下的混凝机理不同:酸性混凝机理为电中和作用,中性条件下为静电簇作用,碱性条件下则以黏接架桥作用为主。

参考文献:

[1] Liu M D, Shadbegian R, Zhang B. Does environmental regulation affect labor demand in China? Evidence from the textile printing and dyeing industry[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017, 86: 277-294.

[2] Chen X. Evaluation of advanced treatment technology of dyeing wastewater based on analytic hierarchy process [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 508: 012020.

[3] 田洋名,姚菊明,张勇,等. 纤维素基絮凝-脱色复合功能材料制备及其处理染料溶液效果评价[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 35(3): 284-291.

[4] 鲁慧娟,张秀梅,刘胜,等. 两性生物基絮凝剂制备及其处理造纸废水性能评价[J]. 中国造纸, 2020,39(3): 22-28.

[5] Song Y F, Hu Q H, Sun Y K, et al. The feasibility of UF-RO integrated membrane system combined with coagulation/flocculation for hairwork dyeing effluent treatment [J]. Science of the Total Environment, 2019, 691: 45-54.

[6] Yang K, Chen J and Yao C. Cationic polyacrylamide emulsion with ultra-high concentration as a flocculant for paper mill wastewater treatment[J]. BioResources, 2020, 15(2): 3173-3189.

[7] Voronova M I, Surov O V, Afineevskii A V, et al. Properties of polyacrylamide composites reinforced by cellulose nanocrystals [J]. Heliyon, 2020, 6 (11): e05529.

[8] Nyss ölä A, Ahlgren J. Microbial degradation of polyacrylamide and the deamination product polyacrylate [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2019, 139: 24-33.

[9] Wu R N, Wang Q Y, Wang G S. Immobilized enzyme on

- pulp fiber through layer-by-layer technique using cationic polyacrylamide for whitewater treatment from papermaking [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2019, 42 (10): 1583-1589.
- [10] Bušová M, Bencko V, Veszelits Laktičová K, et al. Risk of exposure to acrylamide[J]. *Central European Journal of Public Health*, 2020, 28: S43-S46.
- [11] 刘虹奕. 纤维素基絮凝材料的合成及其性能评价[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015: 32.
- [12] 王卫杰, 张勇, 金旭, 等. 纤维素丝胶全降解绿色絮凝材料制备及其混凝性能评价[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(2): 157-162.
- [13] Yang X G, Chen K X, Zhang Y, et al. Polyacrylamide grafted cellulose as an eco-friendly flocculant: Efficient removal of organic dye from aqueous solution [J]. *Fibers and Polymers*, 2017, 18(9): 1652-1659.
- [14] Liu H Y, Yang X G, Zhang Y, et al. Flocculation characteristics of polyacrylamide grafted cellulose from *Phyllostachys heterocycla*: An efficient and eco-friendly flocculant[J]. *Water Research*, 2014, 59: 165-171.
- [15] 崔婷. 多种预处理方法对纤维素结晶结构的影响[J]. *中国造纸学报*, 2020, 35(2): 9-15.
- [16] Gong J, Li J, Xu J, et al. Research on cellulose nanocrystals produced from cellulose sources with various polymorphs[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(53): 33486-33493.
- [17] 刘建容, 张振宇. 漂白竹浆板制备纳米纤维素晶体及其表征[J]. *中国造纸学报*, 2020, 35(3): 9-14.
- [18] 张晶晶, 容建华, 李文迪, 等. 细菌纤维素/聚丙烯酰胺水凝胶的制备及性能表征[J]. *高分子学报*, 2011 (6): 602-607.
- [19] Faraji M, Ebrahimi A, Nourmoradi H, et al. Optimizing the removal of humic acid with polyaluminum chloride and polyaluminum ferric chloride as green coagulants using response surface methodology[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019, 139: 297-304.
- [20] Zhang S, Lü T, Qi D M, et al. Flocculation performance and mechanism of chitosan-based flocculants in the treatment of emulsified oily wastewater[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2017, 38(7): 1049-1054.
- [21] Wang F, Lü H, Wang X J, et al. Preparation of a selective flocculant for treatment of oily wastewater produced from polymer flooding and its flocculant mechanism[J]. *Water Science and Technology*, 2019, 79(9): 1648-1656.

(责任编辑:刘国金)