

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.017



# 紫外光引发聚合 P(AM-MAPTAC) 及其响应面优化制备

郑怀礼<sup>a,b</sup>, 寿倩影<sup>a,b</sup>, 李香<sup>a,b</sup>, 刘冰枝<sup>a,b</sup>, 郑欣钰<sup>a</sup>, 梁逸舟<sup>a</sup>, 周于皓<sup>a,b</sup>, 郭洪茹<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 重庆市水处理混凝剂工程技术研究中心, 重庆 400045)

**摘要:**以丙烯酰胺(AM)与甲基丙烯酰胺丙基三甲基氯化铵(MAPTAC)为共聚单体,通过紫外光引发聚合法制备阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂 P(AM-MAPTAC)。通过红外光谱(IR)与差热-热重分析(TG/DSC)分别对 P(AM-MAPTAC)进行结构表征与热稳定性分析,并采用响应曲面法得到优化制备条件:反应体系 pH 为 4.75,引发剂 v-044 质量分数为 0.07%,EDTA-2Na 质量分数为 0.20%, $n(\text{MAPTAC})/n(\text{AM})$ 为 0.33,光照时间为 60 min。在优化条件下制备 P(AM-MAPTAC)絮凝剂,特性粘度可达 14.72 dL/g,通过污泥脱水实验可验证该特性粘度下的污泥脱水效果最好,滤饼含水率(FCMC)达 70%,污泥比阻(SRF)达  $6.94 \times 10^{12}$  m/kg,上清液剩余浊度达 9.70 NTU,污泥脱水效果优于市售常用絮凝剂。

**关键词:**水处理材料;絮凝剂;制备;水处理;阳离子聚丙烯酰胺

中图分类号:TQ316.3;TU991.22 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2017)01-0118-07

## Ultraviolet-initiated synthesis of P(AM-MAPTAC) and optimization of preparation conditions with response surface method

Zheng Huaili<sup>a,b</sup>, Shou Qianying<sup>a,b</sup>, Li Xiang<sup>a,b</sup>, Liu Bingzhi<sup>a,b</sup>,

Zheng Xinyu<sup>a</sup>, Liang Yizhou<sup>a</sup>, Zhou Yuhao<sup>a,b</sup>, Guo Hongru<sup>a</sup>

(a. School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

b. Chongqing Engineering Research Center of Water Treatment Coagulant, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The cationic polyacrylamide flocculant P(AM-MAPTAC) was prepared by polymerizing acrylamide (AM) and methacrylamide propyl trimethyl ammonium chloride (MAPTAC) under UV irradiation conditions. Determination the structural features and thermal stability of P(AM-MAPTAC) by IR and TG/DSC. The Response Surface Method was used to obtain the optimum preparation conditions: pH 4.75, initiator mass fraction 0.07%, EDTA-2Na mass fraction 0.20%, MAPTAC/AM molar ratio 0.33, illumination time 60min. Under optimal conditions, the intrinsic viscosity of P(AM-MAPTAC) reached 14.72dL/g, under this condition, P(AM-MAPTAC) showed the best effect of sludge dewatering.

收稿日期:2016-05-06

基金项目:国家自然科学基金(21477010,21677020)

作者简介:郑怀礼(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事水处理絮凝剂的开发与应用研究,(E-mail)1223243605@qq.com。

Received:2016-05-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 21477010,21677020)

Author brief: Zheng Huaili (1957-), professor, doctoral supervisor, main research interest: development and application of water treatment flocculant, (E-mail) 1223243605@qq.com.

FCCM 70%, SRF  $6.94 \times 10^{12}$  m/kg, turbidity 9.70 NTU.

**Keywords:** watertreatment materials; flocculant; synthesis; watertreatment; cationic polyacrylamide

近年来,随着城市化进程的不断加快,污水排放量与污泥产量逐年递增。作为污水处理的副产物,污泥具有含水率极高、有毒有害物质浓度高、危害性大等特点<sup>[1]</sup>,对环境产生潜在危害。此外,污泥颗粒细小,呈絮状及胶状结构,不易沉降、压实,因此,在污泥进行机械脱水前,通常采用絮凝法进行预处理,从而改善污泥脱水性能,使其达到减量化、稳定化、无害化的要求<sup>[2]</sup>。阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)作为一种新型有机高分子絮凝剂,具有投加量少、分子量高、适用范围广、成本低廉等特点<sup>[3-4]</sup>,能有效应用于污泥脱水处理中,但目前中国市售的 CPAM 存在功能单一、品种少、价格高、絮凝效果差、生产工序复杂等缺点,因此,研究开发性能优良的阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂,能够提高污泥絮凝处理效果,降低絮凝成本,具有良好的应用前景。

响应面分析法(RSM)是一种综合工艺设计与参数优化的统计学方法<sup>[4]</sup>。该方法能直观体现影响反应过程的各因素及其交互作用确定最佳实验条件。笔者采用响应面法对 P(AM-MAPTAC)絮凝剂的制备条件进行优化。

目前,采用丙烯酰胺(AM)与甲基丙烯酰胺丙基三甲基氯化铵(MAPTAC)单体制备 P(AM-MAPTAC)絮凝剂的相关研究还不常见,且紫外光引发聚合合法合成阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂具有转化率高、单体残留少、毒性低等特点。以 AM 与 MAPTAC 为共聚单体,在紫外光引发条件下,采用响应面分析法,通过建立 BOX-Behnken 数学模型,分析反应体系 pH 值、引发剂 v-044 质量分数、EDTA-2Na 质量分数、 $n(\text{MAPTAC})/n(\text{AM})$ 、光照时间 5 个因素对 P(AM-MAPTAC)絮凝剂特性粘度的影响,并分析实验指标与多个因素之间的回归关系,确定优化制备条件,得到优化水处理絮凝剂,并对其结构表征与热稳定性分析,将其应用于城市污水厂二沉池污泥的脱水处理中,研究其污泥脱水絮凝性能。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料和仪器

丙烯酰胺(AM)(工业级);甲基丙烯酰胺丙基三甲基氯化铵(MAPTAC)(50%水溶液,工业级);v-044 引发剂、尿素、无水乙醇、丙酮、氯化钠(2 mol/L),以

上试剂均为分析纯;高纯氮气。紫外灯装置,上海季光特种照明电器厂;pH 计,美国哈希公司;电热恒温干燥器,上海东星试验设备有限公司;电热恒温水浴锅,超级恒温水槽,非稀释型乌氏粘度计,上海精宏实验设备有限公司;玻璃砂芯漏斗,长春市玻璃仪器厂。

### 1.2 P(AM-MAPTAC)的制备

将一定量的 AM、MAPTAC 单体、蒸馏水依次加入透明玻璃广口瓶中,搅拌均匀,加入一定量 EDTA-2Na 溶液以去除溶液中金属离子的干扰,随后调节反应体系 pH 值,通氮气 15 min 后加入一定量 v-044 引发剂,继续通氮气 15 min 后密封玻璃瓶。将玻璃瓶放至紫外灯反应装置中进行聚合反应,反应一定时间后关闭紫外灯,静置熟化 2 h 后可得无色透明的凝胶状聚合产物。剪取适量聚合产物放入烧杯中,用丙酮和无水乙醇交替反复浸泡 2 d 后得到白色块状固体,置于 60 °C 的电热干燥箱内,烘干粉碎后即可得到白色粉末状的 P(AM-MAPTAC)絮凝剂。

### 1.3 P(AM-MAPTAC)特性粘度测定

剪取 0.1~0.2 g 胶体状聚合产物置于烧杯中,在 35 °C 的摇床中振荡溶解完全。根据 GB 1200.5.1-89,在 1 mol/L 的 NaCl 水溶液条件下,用一点法测定待测溶液的特性粘度<sup>[5]</sup>。

### 1.4 P(AM-MAPTAC)的表征

红外光谱(IR)表征与差热-热重分析(TG-DSC)分别采用日本 SHIMADZU 公司的 IRPrestige-21 型红外光谱仪与日本岛津公司的 DTG-60H 差热-热重分析仪进行分析测定,其中红外光谱测定范围为  $400 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ ,差热-热重分析在氮气气氛下,以 10 °C/min 的升温速度测定 20~600 °C 范围内 P(AM-MAPTAC)的热稳定性<sup>[6]</sup>。

### 1.5 响应面法优化实验

以单因素实验为基础,根据响应曲面法设计原理,采用 Design Expert 8.0 软件,对 P(AM-MAPTAC)絮凝剂的制备条件进行五因素三水平的实验设计<sup>[7]</sup>,以反应体系 pH 值(A)、v-044 质量分数(B)、EDTA-2Na 质量分数(C)、 $n(\text{MAPTAC})/n(\text{AM})$ (D)、光照时间(E)为考察对象,以聚合产物特性粘度为响应值,建立数学回归模型,见表 1。

表 1 响应面分析因素及水平

Table 1 Analytical factors and levels for RSA

因素	编码	水平		
		-1	0	1
pH	A	3.00	4.75	6.5
v-044/%	B	0.02	0.07	0.12
EDTA-2Na/%	C	0.10	0.20	0.30
n(MATPAC)/n(AM)	D	0.15	0.33	0.5
t/min	E	30.00	60.00	90.00

## 1.6 污泥脱水实验

将制备的 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂配制成 1 g/L 的溶液备用。将 100 mL 污泥加入 250 mL 烧杯中,量取一定量的絮凝剂溶液加入其中,用玻璃棒快速搅拌 15 次,再慢速搅拌 30 次,静置 10 min。随后对污泥进行真空抽滤实验,测定滤饼的含水率、污泥比阻和上清液剩余浊度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型建立与方差分析

根据响应曲面法设计原理,对 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂的制备条件进行五因素三水平的实验设计,并对实验数据进行回归分析,得到反应体系 pH 值、v-044 质量分数、EDTA-2Na 质量分数、n(MATPAC)/n(AM)、光照时间 5 个因素(分别用变量 A、B、C、D、E 表示)与 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂特性粘度之间的回归方程,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \text{Intrinsicviscosity} = & 14.06 + 0.59A + 0.57B - \\ & 0.034C + 0.49D + 0.80E + 0.71AB + 0.33AC + \\ & 0.31AD + 0.51AE - 0.13BC + 0.36BD + 0.38BE + \\ & 0.31CD + 0.13CE - 0.19DE - 1.46A^2 - \\ & 1.86B^2 - 0.63C^2 - 0.95D^2 - 2.32E^2 \quad (1) \end{aligned}$$

回归方程的方差分析如表 2 所示。由表 2 可知,该模型具有较高的显著性,其显著性影响依次是光照时间、反应体系 pH 值、引发剂 v-044 质量分数、n(MATPAC)/n(AM)、EDTA-2Na 质量分数,而交互作用中只有反应体系 pH 值与 v-044 质量分数的交互作用对特性粘度有显著的影响,其它交互作用不显著。此外,该模型的失拟项不显著,且  $R^2 = 0.925 2$ ,说明实际值与预测值有很好的-一致性<sup>[8]</sup>,因此,该回归方程能较好地表现预测值与实测值的相关性,可用该模型对 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂的优化制备条件进行分析和预测。

表 2 回归模型的方差分析

Table 2 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P 值
模型	96.10	20	4.81	11.63	<0.000 1
A	5.62	1	5.62	13.60	0.001 1
B	5.18	1	5.18	12.52	0.001 6
C	0.018	1	0.018	0.044	0.835 1
D	3.78	1	3.78	9.15	0.005 7
E	10.36	1	10.36	25.06	<0.000 1
AB	2.01	1	2.01	4.86	0.037 0
AC	0.42	1	0.42	1.02	0.321 7
AD	0.37	1	0.37	0.90	0.350 8
AE	1.03	1	1.03	2.49	0.127 0
BC	0.065	1	0.065	0.16	0.695 6
BD	0.51	1	0.51	1.24	0.276 0
BE	0.58	1	0.58	1.40	0.247 4
CD	0.38	1	0.38	0.93	0.344 1
CE	0.071	1	0.071	0.17	0.681 5
DE	0.14	1	0.14	0.34	0.562 4
A <sup>2</sup>	18.68	1	18.68	45.19	<0.000 1
B <sup>2</sup>	30.13	1	30.13	72.90	<0.000 1
C <sup>2</sup>	3.43	1	3.43	8.29	0.008 1
D <sup>2</sup>	7.95	1	7.95	19.23	0.000 2
E <sup>2</sup>	46.79	1	46.79	113.20	<0.000 1
残差	10.33	25	0.41		
拟合不足	9.40	20	0.47	2.53	0.154 0
纯误差	0.93	5	0.19		
总误差	106.43	45			

### 2.2 响应面分析

为了考察各因素及其交互作用对 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂特性粘度的影响,采用 Design Expert 8.0 软件辅助分析,得到一组响应曲面图与等高线图,选取其中部分图进行分析。响应曲面的坡度与等高线形状分别反应出各因素及其交互作用对 P(AM-MAPTAC) 特性粘度的作用强弱,等高线的形状越趋于椭圆,表示交互作用对响应值的影响越大<sup>[9]</sup>。由图 1(a)~(c) 图可知,各单项因素对 P(AM-MAPTAC) 特性粘度的影响显著性依次是光照时间 > 反应体系 pH 值 > v-044 质量分数,而由

(d)~(f)等高线图可以看出,只有反应体系 pH 值与  $v$ -044 质量分数的交互作用对特性粘度有较显著影响,其他两项交互作用不显著。同样,通过分析剩余因素与交互作用对特性粘度的影响,可以得出与表 2 中的方差分析结果相一致的结论。

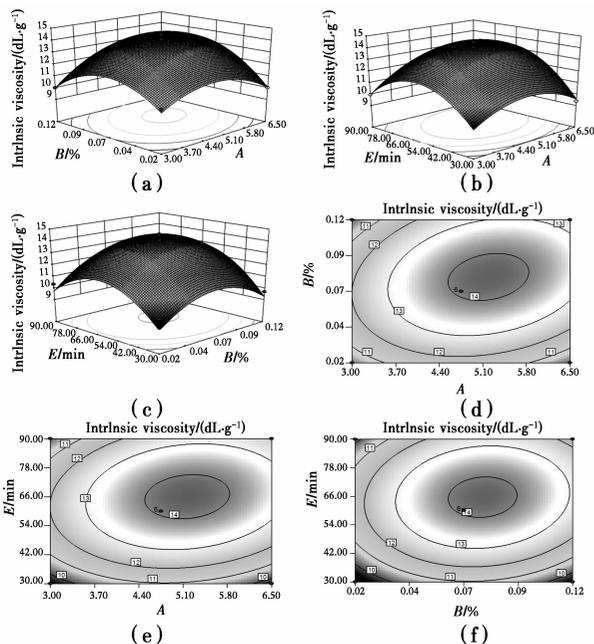


图 1 不同因素交互影响 P(AM-MAPTAC) 特性粘度的响应面图

Fig. 1 Response surfaces showing reciprocal effects of different parameters on intrinsic viscosity of P(AM-MAPTAC)

### 2.3 模型的验证

为了得到 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂的优化制备条件,对式(1)所示的回归方程分析求解可得到 P(AM-MAPTAC) 的最佳制备条件为反应体系 pH 值 4.75、 $v$ -044 质量分数 0.07%、EDTA-2Na 质量分数 0.20%、 $n(\text{MAPTAC})/n(\text{AM})$  为 0.33、光照时间 60 min,在此条件下,P(AM-MAPTAC) 特性粘度预测值为 14.59 dL/g。为了验证模型的准确性,在最佳制备条件下,进行 3 组平行验证实验,分别得到 P(AM-MAPTAC) 特性粘度值为 13.51、14.72、15.11 dL/g,平均值为 14.45 dL/g,实验值与预测值的相对误差仅为 0.96%,证明该模型能较好地反映出 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂的制备条件,在最佳制备条件下合成的 P(AM-MAPTAC),通过测定残留 AM 单体浓度可测得其转化率高达 99.2%,表明合成的 P(AM-MAPTAC) 转化率高、残留毒性低,通过后续污泥脱水实验也可验证优化条件下制备的 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂有良好的絮凝性能。

### 2.4 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂的特征

2.4.1 红外光谱表征 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂的红外光谱图如图 2 所示。由图 2 可知,3 435  $\text{cm}^{-1}$  处对应的是酰胺基中  $-\text{NH}_2$  的伸缩振动吸收峰,1 669  $\text{cm}^{-1}$  处对应的是酰胺基中羰基  $\text{C}=\text{O}$  的伸缩振动吸收峰,这两处吸收峰对应于 AM 单体中的  $-\text{NH}_2$  与  $\text{C}=\text{O}$ <sup>[10]</sup>。3 743  $\text{cm}^{-1}$  处对应的是  $\text{N}-\text{H}$  的伸缩振动吸收峰<sup>[11]</sup>,2 945  $\text{cm}^{-1}$  与 2 836  $\text{cm}^{-1}$  处分别对应的是甲基  $-\text{CH}_3$  与亚甲基  $-\text{CH}_2$  的不对称伸缩振动峰<sup>[12]</sup>,在 1 533  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰对应的是单取代铵上的  $\text{N}-\text{H}$  变形振动,在 1 492  $\text{cm}^{-1}$  与 1 451  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰分别对应的是季铵甲基与 MAPTAC 分子中亚甲基的变形振动,而 971  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰对应于  $\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$  的伸缩振动。通过分析上述各吸收峰可知,P(AM-MAPTAC) 聚合产物分子中含有 AM 与 MAPTAC 的链节,表明 AM 与 MAPTAC 单体成功发生了聚合反应。

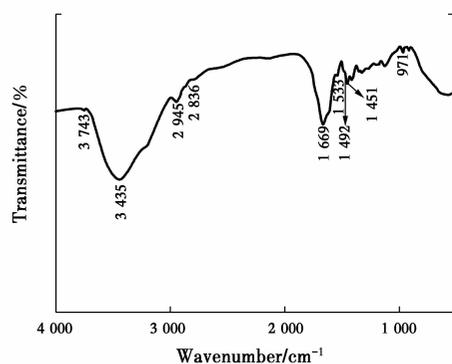


图 2 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectrum of P(AM-MAPTAC) flocculant

2.4.2 差热-热重分析 由图 3 可知,聚合产物的失重过程分为 3 个阶段。第 1 阶段是温度在 35~250  $^{\circ}\text{C}$  内,由于聚合产物中的亲水基团导致其具有吸湿性,在温度升高时,水分子蒸发导致聚合产物重量降低,失重率约为 14.9%,与差热图中 61.7  $^{\circ}\text{C}$  处的吸热峰相对应<sup>[13]</sup>;第 2 阶段是温度在 250~350  $^{\circ}\text{C}$  内,由于聚合产物侧链上的酯基 ( $-\text{COO}-$ )、酰胺基 ( $-\text{CO}-\text{NH}-$ ) 等基团受热分解导致失重<sup>[14]</sup>,失重率约为 29.0%,与差热图中 282.1  $^{\circ}\text{C}$  处的吸热峰相对应;第 3 阶段是温度在 350~500  $^{\circ}\text{C}$  内,聚合产物主链受高温作用断裂分解产生失重,失重率约为 43.9%,与差热图中 347.3  $^{\circ}\text{C}$  与 433.7  $^{\circ}\text{C}$  处的吸热峰相对应。由上述分析可知,聚合产物 P(AM-MAPTAC) 具有良好的热稳定性<sup>[16]</sup>。

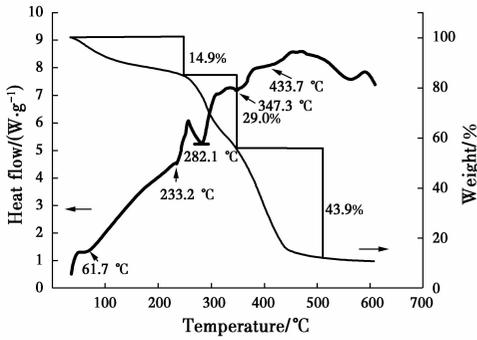


图 3 P(AM-MAPTAC)絮凝剂的差热-热重分析图

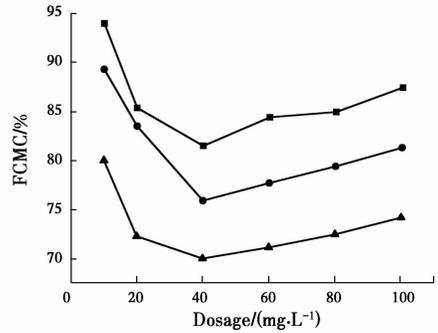
Fig. 3 TG/DSC of P(AM-MAPTAC) flocculant

## 2.5 P(AM-MAPTAC)絮凝效果分析

采用自制的 P(AM-MAPTAC)絮凝剂进行污泥脱水实验,分析絮凝剂特性粘度、pH 值对絮凝性能的影响,并与市售的常用絮凝剂进行比较。实验所用活性污泥均取自重庆市大渡口区污水处理厂二沉池,黑色、恶臭且污泥颗粒均匀稳定,含水率 98.3%,浊度 120.2 NTU, pH 6.0。

**2.5.1 特性粘度对污泥脱水性能的影响** 由于 P(AM-MAPTAC)(简称 PAMA)的优化制备条件主要通过其特性粘度来体现,因此,选取特性粘度为 9.68、12.60、14.72 dL/g(优化制备条件下合成的絮凝剂),阳离子度为 25 mol%的自制絮凝剂,污泥 pH 值为 6.5,研究 PAMA 特性粘度对滤饼含水率、污泥比阻和上清液剩余浊度的影响。由图 4~6 可知,3 种 PAMA 在进行污泥脱水处理时,在相同的投加量条件下,随着 PAMA 特性粘度的增大,污泥的滤饼含水率、污泥比阻和上清液剩余浊度均大幅降低,这是因为当 PAMA 特性粘度增加时,PAMA 线型高分子链得到增长,有利于絮凝剂与污泥颗粒的有效碰撞,从而更利于发挥絮凝剂的吸附架桥作用<sup>[16]</sup>。但当絮凝剂的特性粘度过高时,絮凝剂与污泥的混合不易均匀,导致应用难度加大,因此,絮凝剂特性粘度的选用应综合考虑各方面因素,在本实验中,综合考虑各项指标,3 种絮凝剂絮凝性能为: PAMA-25-9.68 < PAMA-25-12.60 < PAMA-25-14.72,这也体现出优化模型的可靠性。

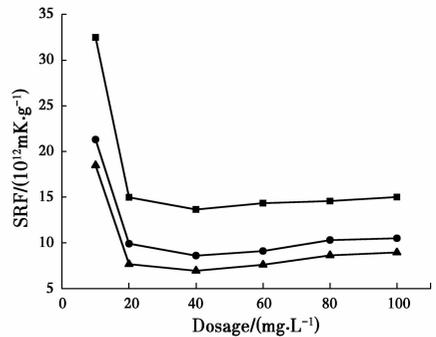
**2.5.2 pH 值对污泥脱水性能的影响** pH 值对污泥脱水效果起到直接影响作用。由于各污水处理厂水质条件不同,污泥 pH 值也有明显差异,因此,探讨 pH 值对污泥脱水效果的影响十分必要。实验选取特性粘度相近的 PAMA-25-14.72(优化条件下合成)与市售常用絮凝剂 CPAM-25-15,以上清



注: —■— PAMA-25-9.68 —●— CPAM-25-12.60 —▲— PAMA-25-14.72

图 4 P(AM-MAPTAC)特性粘度对滤饼含水率的影响

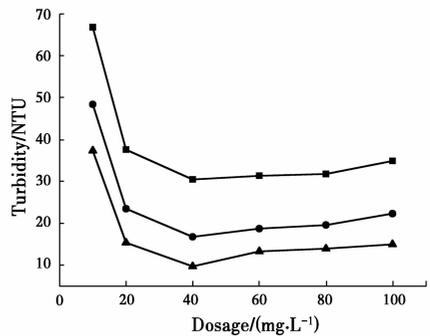
Fig. 4 The influence of P(AM-MAPTAC) intrinsic viscosity on FCMC



注: —■— PAMA-25-9.68 —●— CPAM-25-12.60 —▲— PAMA-25-14.72

图 5 P(AM-MAPTAC)特性粘度对污泥比阻的影响

Fig. 5 The influence of P(AM-MAPTAC) intrinsic viscosity on SRF



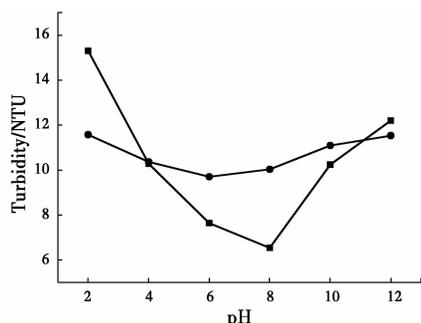
注: —■— PAMA-25-9.68 —●— CPAM-25-12.60 —▲— PAMA-25-14.72

图 6 P(AM-MAPTAC)特性粘度对上清液剩余浊度的影响

Fig. 6 The influence of P(AM-MAPTAC) intrinsic viscosity on turbidity

液剩余浊度和滤饼含水率为例,讨论 pH 值对絮凝剂污泥脱水性能的影响。由图 7、8 可知,随着 pH 值的升高,两种絮凝剂处理污泥后上清液剩余浊度和滤饼含水率都呈现出先减小后增大的趋势,且都有最佳 pH 值。尽管在 pH=4.0~11.0 时,PAMA-25-14.72 处理污泥后上清液剩余浊度比 CPAM-25-15 处理后高,但从滤饼含水率这一指标可以看出,

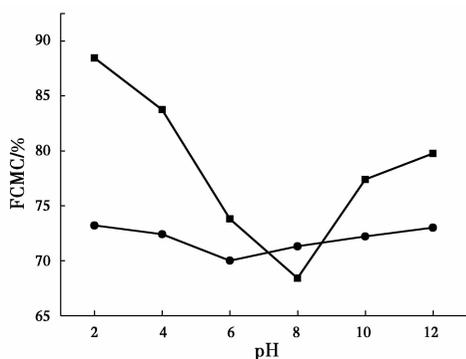
PAMA-25-14.72 的处理效果更好,且从图 7、8 可知, PAMA-25-14.72 絮凝效果对 pH 值的适应性要远远高于 CPAM-25-15,这是由于市售常用阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂多采用 DAC、DMC 等阳离子单体,由于其结构中存在酯基,在 pH 值较高时,容易发生水解而使絮凝剂分子链断裂,导致絮凝效果变差,而实验中选用的阳离子单体为 MAPTAC,其结构中的酰胺基代替了酰氧基,因此,在 pH 值较高时不易发生水解,仍然能表现出良好的絮凝性能。在最佳条件下, PAMA-25-14.72 处理污泥后,上清液剩余浊度最低可达 9.5 NTU,滤饼含水率最低可达 70%。由此可见,在优化条件下制备的 P(AM-MAPTAC)在絮凝效果、pH 适用范围等方面都表现出良好的絮凝性能,具有潜在的应用前景。



注: ●—PAMA-25-14.72 ■—CPAM-25-15

图 7 污泥 pH 值对上清液剩余浊度的影响

Fig. 7 The influence of sludge pH on turbidity



注: ●—PAMA-25-14.72 ■—CPAM-25-15

图 8 污泥 pH 值对滤饼含水率的影响

Fig. 8 The influence of sludge pH on FCMC

### 3 结论

1) 反应体系 pH 值、引发剂 v-044 质量分数、EDTA-2Na 质量分数、单体摩尔比、光照时间对 P(AM-MAPTAC) 特性粘度的影响显著性依次为光照时间 > 反应体系 pH 值 > 引发剂 v-044 质量分数 >  $n(\text{MATPAC})/n(\text{AM})$  > EDTA-2Na 质量分

数。运用响应面法优化制备 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂可行,并得出最佳制备条件为:反应体系 pH 值 4.75、v-044 质量分数 0.07%、EDTA-2Na 质量分数 0.20%、 $n(\text{MATPAC})/n(\text{AM})$  为 0.33、光照时间 60 min。该条件下制备得到的聚合产物特性粘度平均值为 14.45 dL/g,且单体转化率高,残留毒性低。

2) 红外光谱分析表明,AM 与 MAPTAC 单体成功发生了聚合反应,聚合产物为 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂,差热-热重分析表明,P(AM-MAPTAC) 聚合产物具有良好的热稳定性。

3) 当自制 P(AM-MAPTAC) 絮凝剂应用于污泥脱水处理时,表现出良好的絮凝效果,从一定意义上验证了优化模型的合理性,pH 适应性优于一些市售常用絮凝剂。

### 参考文献:

- [1] RUIZ-HERNANDO M, MARTINEZ-ELORZA G, LABANDA J, et al. Dewaterability of sewage sludge by ultrasonic, thermal and chemical treatments [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 230 (16): 102-110.
- [2] ZHANG W J, XIAO P, LIU Y Y, et al. Understanding the impact of chemical conditioning with inorganic polymer flocculants on soluble extracellular polymeric substances in relation to the sludge dewaterability [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 132: 430-437.
- [3] ZHENG H L, SUN Y J, TANG X M, et al. UV-initiated polymerization of cationic polyacrylamide: synthesis, characterization, and sludge dewatering performance [J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013(11): 937932-937937.
- [4] 李莉,张赛,樊磊磊,等. 响应面法优化电解芬顿协同法深度处理老龄垃圾渗滤液[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37(3): 134-141.  
LI L, ZHANG S, FAN L L, et al. Optimization of electro-fenton process for advanced treatment of mature landfill leachate with response surface methodology [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015, 37(3): 134-141. (in Chinese)
- [5] LIAO Y, ZHENG H L, QIAN L, et al. UV-initiated polymerization of hydrophobically associating cationic polyacrylamide modified by a surface-active monomer: A comparative study of synthesis, characterization, and sludge dewatering performance [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(27): 11193-11203.

- [6] 曹建苹,张胜,韩宝丽. 阳离子型聚丙烯酰胺絮凝剂的合成与表征[J]. 北京化工大学学报, 2011, 38(4): 52-57.  
CAO J P, ZHANG S, HAN B L. Synthesis and characterization of a cationic polyacrylamide flocculant [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2011, 38(4):52-57. (in Chinese)
- [7] 蒋绍阶,冯欣蕊,李晓恩,等. 响应面法优化制备 PAC-PDMAAC 杂化絮凝剂及其表征[J]. 化工学报, 2014, 6(2):731-736.  
JIANG S J, FENG X R, LI X E, et al. Preparation of PAC-PDMAAC hybrid flocculant by response surface method and its characterization [J]. CIESC Journal, 2014, 6(2): 731-736. (in Chinese)
- [8] PALANIKUMAR K. Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology [J]. Materials & Design, 2007, 28(10): 2611-2618.
- [9] 袁群,葛红花,蒋以奎,等. 模拟冷却水中  $Al_2O_3$  纳米颗粒分散条件的优化[J]. 功能材料, 2015, 46(37): 23101-23105.  
YUAN Q, GE H H, JIANG Y K, et al. Optimization of dispersion conditions of  $Al_2O_3$  nanoparticles in simulated cooling water [J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(37): 23101-23105. (in Chinese)
- [10] WANG X, YUE Q, GAO B, et al. Dispersion copolymerization of acrylamide and dimethyl diallyl ammonium chloride in ethanol-water solution [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(3): 1496-1502.
- [11] POURJAVADI A, FAKOORPOOR S M, HOSSEINI S H. Novel cationic-modified salep as an efficient flocculating agent for settling of cement slurries [J]. Carbohydr Polym, 2013, 93(2): 506-511.
- [12] ZHENG H L, LIAO Y, ZHENG M Z, et al. Photoinitiated polymerization of cationic acrylamide in aqueous solution: Synthesis, characterization, and sludge dewatering performance [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(11): 10-23.
- [13] YANG Z L, GAO B Y, LI C X, et al. Synthesis and characterization of hydrophobically associating cationic polyacrylamide [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 161(1): 27-33.
- [14] GHIMICI L, DRANCA I, DRAGAN S, et al. Hydrophobically modified cationic polyelectrolytes [J]. European Polymer Journal, 2001, 37: 227-231.
- [15] GUAN Q Q, ZHENG H L, ZHAI J, et al. Effect of template on structure and properties of cationic polyacrylamide: Characterization and mechanism [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(14): 5624-5635.
- [16] HJORTH M, JORGENSEN B U. Polymer flocculation mechanism in animal slurry established by charge neutralization [J]. Water Research, 2012, 46(4): 1045-1051.

(编辑 胡英奎)