

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.016

基于双重梯度的絮凝剂制备及在太湖清淤中的应用

杨松¹, 赵丽娜¹, 王达道^{2,3}, 方章顺¹, 秦智峰³, 范子武²

(1. 中交<苏州>城市开发建设有限公司, 江苏 苏州 215000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 南京瑞迪高新技术有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要: 基于分子质量与电荷密度双重梯度协同絮凝原理,使用高电荷密度、中等分子质量的聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDA)与低电荷密度、高分子质量的阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)成功制备了一系列复合阳离子絮凝剂PDAC。在模拟试验中,确定PDAC-1为PDAC系列产品中的最佳絮凝剂,并将其应用于太湖清淤工程板框压滤试验,结果表明,当PDAC-1投加量为绝干泥的1.2%时,进料及压榨时间由常规聚合氯化铝(PAC)+CPAM方案的4 000 s+400 s缩短至1 500 s+100 s,泥饼含水率最低降至25.7%,施工效率达5.25 m³/min,为对比方案的3.28倍,且尾水中总氮、COD及絮凝剂残留方面效果更优。

关键词: 太湖底泥; 阳离子絮凝剂; 电荷密度; 分子质量梯度; 板框压滤; 含水率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0111-06

Preparation of Flocculant Based on Dual Gradient and Its Application in Taihu Lake Dredging

Yang Song¹, Zhao Lina¹, Wang Dadao^{2,3}, Fang Zhangshun¹, Qin Zhifeng³,
Fan Ziwu²

(1. CCCC <Suzhou> Urban Development and Construction Co. Ltd., Suzhou 215000, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Nanjing R&D Hi-Tech Co. Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the dual gradient synergistic flocculation principle with respect to molecular weight and charge density, a series of composite cationic flocculants, denoted as PDAC, were successfully prepared by combining poly dimethyldiallylammonium chloride (PDA), which possesses a high charge density and moderate molecular weight, with cationic polyacrylamide (CPAM), which features a low charge density and high molecular weight. Through simulation tests, PDAC-1 was identified as the optimal flocculant among the PDAC products and was subsequently applied in plate and frame filter press trials for the Taihu Lake dredging project. The results showed that at a PDAC-1 dosage of 1.2% (based on dry sludge mass), the feeding and pressing time was reduced from 4 000 s + 400 s with the conventional polyaluminum chloride (PAC) + CPAM scheme to 1 500 s + 100 s. The moisture content of the filter cake was lowered to a minimum of 25.7%, the operational efficiency reached 5.25 m³/min, which was 3.28 times that of the control scheme, and the PDAC-1 scheme exhibited superior performance in terms of total nitrogen, COD, and residual flocculant in the tail water.

Keywords: Taihu Lake sediment; cationic flocculant; charge density; molecular weight gradient; plate and frame filter press; moisture content

太湖流域经济快速发展导致污染与营养盐负荷长期超标^[1],威胁供水与生态安全。底泥疏浚是治理太湖富营养化的有效手段^[2],常采用板框压滤法与土工管袋法进行处理,但均需添加絮凝剂调理底泥,再经挤压形成泥饼进行后期处置。河湖清淤絮凝剂主要分为无机和有机两类。无机絮凝剂如聚合氯化铝(PAC)^[3],具有絮凝快、降浊好等特点,但助沉降作用有限,常与有机絮凝剂配合使用。有机絮凝剂中,阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)因含有分子链活性基团,使其具有絮凝突出、用量少等优点;聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDAA)^[4]兼具吸附架桥与电中和作用,已被广泛用于污泥脱水。

太湖底泥细颗粒含量高、胶体成分复杂,属于难脱水底泥。常规PAC+PAM工艺存在竞争吸附、絮体松散及抗干扰差等问题,且药剂投加量大、残留高、尾水浓度上升。简单复配虽能结合絮凝剂之间的优势,但忽略了分子质量与电荷密度梯度匹配^[5],长链分子抢占吸附位点,致使絮凝效果下降。同时,底泥中溶解性有机物(DOM)会消耗阳离子电荷,降低药效。本研究基于分子质量和电荷密度双重梯度协同原理,构建PDA与CPAM“分级捕获”机制,降低胶体与DOM对阳离子的无效消耗,提升复杂污泥体系脱水和施工效率,降低尾水污染,为太湖底泥高效处置提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

试验材料主要为PAC(Al_2O_3 含量为30%)、阴离子聚丙烯酰胺(APAM,分子质量为 1.200×10^4 ku)、阳离子聚丙烯酰胺(CPAM,分子质量为 1.200×10^4 ku)、二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC)、丙烯酰胺(AM)、过硫酸钾、氢氧化钠、盐酸。

试验设备主要包括拉曼光谱仪、三重四极杆质谱仪、pH计、色度仪、分光光度计、高压蒸汽灭菌器、分析天平、聚丙烯压滤机。

1.2 絮凝剂的制备

1.2.1 制备方法

按一定配比称取DMDAAC与AM加入带有搅拌器的四口烧瓶中,搅拌条件下通氮气脱氧30 min。

加入一定量的过硫酸钾引发剂溶液,调节滴加速度使引发剂在30 min内滴完。待引发剂滴完后停止通氮气,水浴升温至一定温度,反应2 h,升温到熟化温度(60℃)继续反应3 h,得到产物PDA胶体。将一定量的CPAM用去离子水稀释至含量为0.1%~0.3%的稀溶液,使CPAM分子链充分伸展。三阶段梯度混合工艺:第一阶段,取CPAM稀溶液总量的30%~40%加入PDA胶体中,控制搅拌速度为100~140 r/min,搅拌5~8 min,使CPAM在PDA基质中实现初步分散;第二阶段,加入剩余的CPAM稀溶液,降低搅拌速度至70~90 r/min,搅拌8~12 min,促进两种聚合物链段的均匀分布;第三阶段,停止加料,进一步降低搅拌速度至30~50 r/min,搅拌10~20 min,消除混合过程中产生的气泡并稳定体系结构。使用0.1 mol/L的NaOH或HCl溶液调节体系pH至7.0,在25℃下静置熟化3 h,使PDA与CPAM分子链达到平衡构象,得到稳定的复合絮凝剂PDAC系列产品,即PDAC-1、PDAC-2和PDAC-3。

1.2.2 分子质量与电荷密度的调控机制

PDA分子质量控制:主要通过调整引发剂(过硫酸钾)浓度和反应温度实现。PDAC-1采用较低的引发剂浓度(单体质量的0.05%)和较低的聚合温度(55℃);PDAC-2采用较高的引发剂浓度(单体质量的0.08%)和较低的聚合温度(55℃);PDAC-3略微提高引发剂用量(0.08%)和温度(60℃)。

电荷密度控制:主要通过微调初始单体配比(DMDAAC与AM的物质的量之比)实现。PDAC-1中DMDAAC投料比略高(DMDAAC:AM=1:2.5),PDAC-2中DMDAAC投料比为DMDAAC:AM=1:2.8,PDAC-3中DMDAAC比例略低(1:3.2)。

1.3 检测项目及方法

试验所用泥浆取自太湖某清淤工程施工区域。含水率按照《土壤 干物质和水分的测定 重量法》(HJ 613—2011)测定;尾水中的氨氮按照《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)测定;总氮按照《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)测定;COD按照《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—

2017)测定;总磷按照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB/T 11893—1989)测定;絮凝剂残留(丙烯酸胺单体)按照《水质 丙烯酰胺的测定 高效液相色谱-三重四极杆质谱法》(HJ 1418—2025)测定。

1.4 试验方法

模拟板框压滤试验:将PAC、PAM和PDAC系列产品分别溶解为10%、0.1%、10%的溶液,然后取适量污泥加入不同助凝剂+絮凝剂组合(PAC+PAM和PDAC系列产品)进行污泥调理,并使用小试板框压滤机进行进泥和压片试验,对比压滤前后泥饼含水率、泥饼厚度及压滤尾水的水质指标。

项目现场板框压滤试验:取泥浆样品,测定泥浆密度和泥浆含固量;将药剂进行溶解稀释,按照适当比例进行投加,并通过绝干泥的质量(泥浆密度 $\times$ 泥浆体积 $\times$ 含固率)计算药剂实际投加量;药剂加入泥浆后,搅拌10 min,随后泵送到板框压滤机;根据试验结果设定和调整进料时间及压滤时间,压滤结束后,测定泥饼含水率、泥饼厚度及压滤尾水的水质指标,并计算施工效率。

2 结果与分析

2.1 拉曼光谱分析

为了验证PDAC系列产品制备成功,对聚合产物进行了拉曼光谱分析,如图1所示。三种PDAC产品均在 $3\ 380\text{ cm}^{-1}$ 左右出现胺基($-\text{NH}_2$)伸缩振动吸收峰,这是AM单体的典型特征峰^[6], $1\ 490\text{ cm}^{-1}$ 左右出现的特征峰主要对应甲基($-\text{CH}_3$)和亚甲基($-\text{CH}_2-$)的弯曲振动,这是DMAAC的特征峰^[7]。

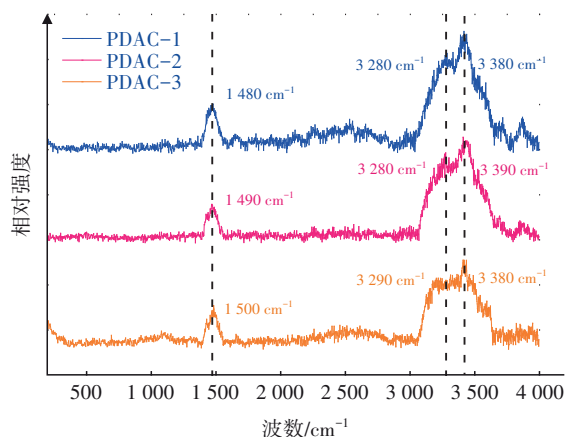


图1 PDAC系列产品的拉曼光谱

Fig.1 Raman spectra of PDAC series products

2.2 Zeta电位分析

PDAC-1及PDA+CPAM物理复配的Zeta电位如图2所示。可知,PDAC-1的Zeta电位显著高于简单混合物。简单混合物的Zeta电位在1 h后即趋于稳定,而PDAC-1需要3 h才能稳定,这一现象可归因于PDAC-1在特定三段式梯度混合工艺下发生了更为复杂的链间相互作用过程。Vitorazi等^[8]在研究PDADMAC与聚丙烯酸钠复合的热力学行为时发现,聚电解质复合并非瞬时完成,而是遵循“两步过程”:先形成高电荷的初级复合物,随后经历缓慢的构象重排和凝聚相形成过程,且混合路径对最终复合状态具有决定性影响,这解释了PDAC-1体系需要更长时间熟化才能达到热力学平衡构象的现象。同时,高宝玉等^[9]的研究表明,有机高分子与无机/有机组分通过静电相互作用复合时会发生超越简单物理混合的结构重组,复合体系的性质与物理混合物存在本质差异。因此,PDAC-1的Zeta电位显著高于简单混合物且熟化动力学存在显著差异,这证实了PDAC复合工艺并非简单的物理混合,而是发生了实质性的静电复合与链间缠绕。

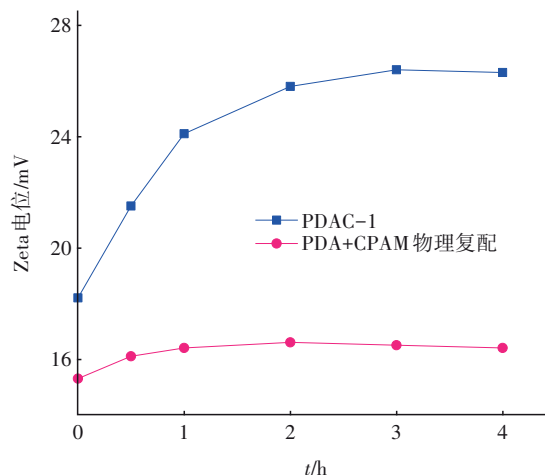


图2 PDAC-1和PDA+CPAM物理复配的Zeta电位

Fig.2 Zeta potential of PDAC-1 and physical mixture of PDA+CPAM

2.3 分子质量与电荷密度的测定

测定PDAC系列产品的分子质量和电荷密度,结果表明,PDAC-1、PDAC-2、PDAC-3中PDA与CPAM的分子质量分别为520和8 500、500和7 800、580和6 400 ku,证实存在分子质量梯度。三种PDAC产品中PDA与CPAM的电荷密度分别为4.6和2.1、4.3和2.1、3.8和2.1 mmol/g,PDA的电荷密

度约为 CPAM 的 1.81~2.19 倍,证实了 PDAC 在微观组成上构建了电荷密度梯度。

2.4 板框模拟进泥试验

PAC+APAM、PAC+CPAM 及三种 PDAC 方案的板框模拟进泥试验结果见表 1(污泥浓度均为 30%)。PDAC-1 和 PDAC-2 中高电荷密度的 PDA 和低电荷密度的 CPAM 形成了独特的骨架结构,能够有效调理底泥,进泥速率更优,总进泥量高于传统的 PAC+CPAM 方案,而 PDAC-3 的进泥量低于 PAC+APAM 方案,可能是因为 PDAC-3 中 CPAM 的分子质量和 PDA 的电荷密度较低,阳离子电荷较少致使胶体脱稳速率慢,底泥调理效果相对较差。

表 1 板框模拟进泥试验结果

Tab.1 Test data of plate and frame simulated sludge feeding

方案	助滤剂投加量/(kg/t)	絮凝剂投加量/(kg/t)	污泥量/g	总绝干进料量/g
PAC+APAM	6	1	1 000	220.52
PAC+CPAM	6	1	1 000	210.70
PDAC-1		1	1 000	245.25
PDAC-2		1	1 000	229.86
PDAC-3		1	1 000	218.64

2.5 模拟压片试验

模拟压片试验结果表明,PAC+APAM、PAC+CPAM、PDAC-1、PDAC-2 和 PDAC-3 各方案的泥饼质量分别为 70.46、69.87、75.97、73.79、70.78 g,泥饼厚度分别为 10.85、10.62、12.76、12.02、10.98

mm,泥饼含水率分别为 29.54%、30.13%、24.03%、26.21%、29.18%。可以看出,5 组试验方案中,PDAC-1 方案的泥饼质量和厚度均最高,且泥饼含水率最低,这表明 PDAC 具有较好的絮凝脱水能力。综上所述,选取脱水效果最好的 PDAC-1 进行现场应用试验。

2.6 现场工艺流程

现场清淤工艺流程如图 3 所示。疏浚船将太湖底泥抽取至船上进行泥沙筛分,将泥存储在储泥池;将储泥池的泥浆泵送至泥浆池,然后加入溶解好的絮凝剂进行搅拌和絮凝反应;将絮凝后的泥浆泵送至板框压滤机进行压滤;对压滤后的泥饼进行装船转运,收集尾水并输送至岸边进行深度处理。

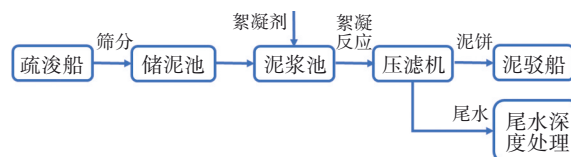


图 3 项目现场工艺流程

Fig.3 Process flow diagram of project site

2.7 现场板框压滤试验

现场板框压滤试验结果见表 2。可以看出,在 PDAC 投加量相同的情况下(绝干泥质量的 1.2%),三组 PDAC 试验泥饼均成型且紧实,泥饼厚度分别为 3.8、4.3、3.8 cm,优于 PAC+CPAM 方案(3.2 cm,泥饼中间略有夹心),含水率从 38.2% 最低降至 25.7%,展现出更好的絮凝脱水效果,这主要归因于分子质量和电荷密度双重梯度协同作用。

表 2 现场板框压滤试验结果

Tab.2 Test results of on-site plate and frame pressure filtration

方案	压滤机参数		密度/(g/cm ³)	进料及泥饼情况		
	进料时长/s	压榨时长/s		进料量/m ³	泥饼厚度/cm	含水率/%
PAC+CPAM	4 000	400	1.12	137.8	3.2	38.2
PADC-1(1)	2 400	200	1.15	224.8	3.8	26.1
PADC-1(2)	1 800	100	1.15	208.4	4.3	25.7
PADC-1(3)	1 500	100	1.15	208.3	3.8	26.7

第一阶段,高分子质量的 CPAM 在底泥中形成伸展分子网络,通过物理缠绕与范德华力优先吸附粗颗粒(>10 μm)并包裹部分 DOM,构建初级絮体骨架,由于其电荷密度低,与 DOM 的结合过程几乎不消耗阳离子;第二阶段,中等分子质量、高电荷密度的 PDA 能够穿透 CPAM 形成的初级絮体网络,通过电中和机制实现对细胶体颗粒(<10 μm)的充分聚

集,并有效拦截有机干扰物^[10];第三阶段,经电中和脱稳的细小颗粒受 PDA 的网捕卷扫作用^[11]并在 CPAM 长链的辅助下,形成密实、高强度的终态絮体,提高复合絮凝剂的絮凝效果。

2.8 效率分析

设定所有方案的卸泥时间均为 600 s,反吹、排空、卸荷等约为 180 s,PDAC-1 与 PAC+CPAM 方案

的施工效率见表3。可以看出,在PDAC-1投加量为1.2%的情况下,进料和压榨时间从2 400 s+200 s降低至1 500 s+100 s,三组试验进料量基本保持稳定。进料和压榨时间达到1 500 s+100 s时,泥饼厚度为3.8 cm、含水率为26.7%,施工效率最高(5.25 m³/

min),为PAC+CPAM方案的3.28倍。这是因为PDAC-1有效克服了传统药剂因无序吸附引起的结构疏松和抗剪切性弱的缺陷,形成的絮体致密且多孔,滤水通道畅通,降低了过滤阻力,表现出更好的絮凝脱水能力。

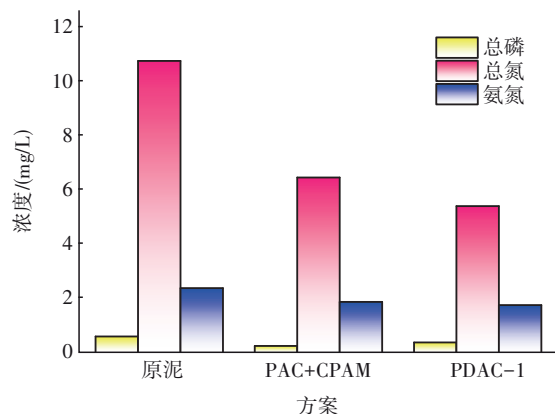
表3 PDAC-1与PAC+CPAM方案的施工效率

Tab.3 Construction efficiency of PDAC-1 and PAC+CPAM schemes

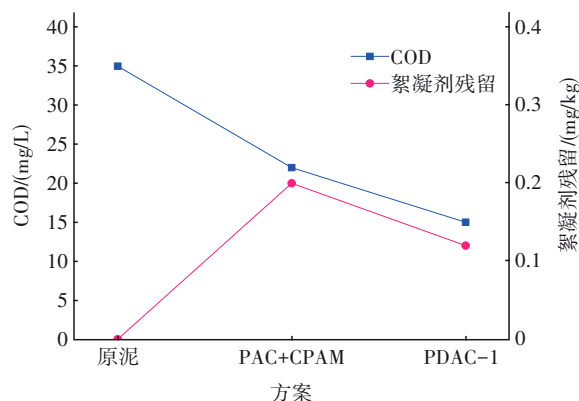
项目	进料时间/s	进料量/m ³	压榨时间/s	其余工序时间/s	单循环总时间/s	施工效率/(m ³ /min)
PAC+CPAM	4 000	137.8	400	780	5 180	1.60
PDAC-1(1)	2 400	224.8	200	780	3 380	3.99
PDAC-1(2)	1 800	208.4	100	780	2 680	4.67
PDAC-1(3)	1 500	208.3	100	780	2 380	5.25

2.9 尾水指标分析

原泥、PAC+CPAM和PDAC-1方案的尾水指标如图4所示。



a. 总磷、总氮和氨氮



b. COD和絮凝剂残留

图4 原泥、PAC+CPAM和PDAC-1方案的尾水指标

Fig.4 Effluent indicators for raw sludge, PAC+CPAM, and PDAC-1 schemes

从图4(a)可以看出,原泥的总磷偏低,即使PAC拥有较强的化学除磷能力也无法进一步发挥效果。PDAC-1对总氮的去除能力稍好于PAC+

CPAM方案,这是因为PDA和CPAM都具有带正电荷的活性基团,对底泥中NO₃⁻有较好的吸附作用。PDAC-1和PAC+CPAM对氨氮的去除效果不佳,表明这两种方案的电中和作用均无法有效捕获并沉淀氨氮。

从图4(b)可以看出,两种方案对COD均有一定的去除效果,这是因为CPAM的电中和及长分子链的吸附架桥作用。PDAC-1方案的絮凝剂(丙烯酰胺单体)残留量低于PAC+PAM方案,这是因为PDA与CPAM的协同效应有助于絮凝脱水,并可与污泥矾花相结合,使得尾水中的残留更少。

3 结论

① 成功合成了分子质量和电荷密度双重梯度的絮凝剂PDAC系列产品,其中PDAC-1的进泥速率、泥饼含水率和厚度均优于同系列其他PDAC产品及PAC+APAM和PAC+CPAM方案。因此,确定PDAC-1(PDA与CPAM的分子质量分别为520和8 500 ku、电荷密度分别为4.6和2.1 mmol/g)作为后续现场应用的絮凝剂。

② 项目现场板框压滤试验结果表明,PDAC-1方案可将进料和压榨时间从4 000 s+400 s降低至1 500 s+100 s,此时泥饼厚度为3.8 cm、含水率为26.7%,施工效率为5.25 m³/min,达到PAC+CPAM方案的3.28倍。

③ 项目现场试验尾水测定结果表明,原泥中总磷较低,对PDAC和PAC+CPAM方案的结果影响不大;两种方案对氨氮的去除效果均不佳;对于总氮、COD及絮凝剂(丙烯酰胺单体)残留而言,PDAC-1方案比PAC+CPAM方案有更好的去除效果。

参考文献:

- [1] 周荧. 太湖藻型湖区内源污染特征及其清淤控制研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2025.
- Zhou Ying. Characteristics of internal pollution and its dredging control in the algae-dominated zone of Lake Taihu [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2025(in Chinese).
- [2] Chen X, Wang Y H, Sun T, et al. Effects of sediment dredging on nutrient release and eutrophication in the gate-controlled estuary of northern Taihu Lake [J]. Journal of Chemistry, 2021(1):7451832.
- [3] 冯云刚,徐云辉,戴明华,等. 基于PAC+PAM调理的污泥深度脱水工程设计与运行[J]. 中国给水排水, 2020,36(8):96-100.
- Feng Yungang, Xu Yunhui, Dai Minghua, et al. Design and operation of sludge deep dewatering project based on PAC+PAM conditioning[J]. China Water & Wastewater, 2020,36(8):96-100(in Chinese).
- [4] 董明甫,孔海霞,聂守田,等. 聚二甲基二烯丙基氯化铵的合成及强化剩余污泥脱水效能[J]. 给水排水, 2025,51(2):77-82.
- Dong Mingfu, Kong Haixia, Nie Shoutian, et al. Synthesis of poly (dimethyldiallylammonium chloride) and enhanced dewatering efficiency of wasted sludge[J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51 (2) : 77-82 (in Chinese).
- [5] Hasan A, Fatehi P. Cationic kraft lignin-acrylamide copolymer as a flocculant for clay suspensions: (2) charge density effect [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 210: 963-972
- [6] Zhou Y H, Zheng H L, Wang Y L, et al. Enhanced municipal sludge dewaterability using an amphiphilic microblocked cationic polyacrylamide synthesized through ultrasonic-initiation: copolymerization and flocculation mechanisms[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 594: 124645.
- [7] 王陆军,闵凡飞,Nguyen A V,等. P(AM-DMDAAC)设计合成及其对微细高岭石颗粒絮凝性能研究[J]. 中国矿业大学学报,2025,54(2):458-470.
- Wang Lujun, Min Fanfan, Nguyen A V, et al. Study on the design and synthesis of P(AM-DMDAAC) and its flocculation properties on microfine kaolinite particles [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025,54(2):458-470(in Chinese).
- [8] Vitorazi L, Ould-Moussa N, Sekar S, et al. Evidence of a two-step process and pathway dependency in the thermodynamics of poly (diallyldimethylammonium chloride)/poly (sodium acrylate) complexation [J]. Soft Matter, 2014, 10(47):9496-9505.
- [9] 高宝玉,王燕,岳钦艳,等. PAC与PDMDAAC复合絮凝剂中铝的形态分布[J]. 中国环境科学, 2002, 22 (5):472-476.
- Gao Baoyu, Wang Yan, Yue Qinyan, et al. The distribution aluminum form in composite flocculant of polyaluminum chloride-polydimethyl diallylammonium chloride [J]. China Environmental Science, 2002, 22 (5): 472-476(in Chinese).
- [10] 王晓萌,王鑫,杨明辉,等. 铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较[J]. 环境科学, 2018, 39 (5):2274-2282.
- Wang Xiaomeng, Wang Xin, Yang Minghui, et al. Sludge conditioning performance of polyaluminum, polyferric, and titanium xerogel coagulants [J]. Environmental Science, 2018, 39 (5) : 2274-2282 (in Chinese).
- [11] 王晓萌. 乙酰丙酮凝胶化改性钛盐混凝剂的制备及复配优化[D]. 南京:南京大学,2018.
- Wang Xiaomeng. The fabrication and composite modification of titanium coagulants through gelation with acetylacetone [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018 (in Chinese).

作者简介:杨松(1986—),男,江苏淮安人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为生态环境修复。

E-mail:1159865710@qq.com

收稿日期:2026-03-16

修回日期:2026-05-13

(编辑:任莹莹)