

PDMDAAC 助凝 PAC 处理高浊度丙烯酸乳液废水

杨文杰¹, 齐建², 杨期勇¹, 王慧娟¹

(1. 九江学院资源环境学院, 江西九江 332005; 2. 九江市辐射环境监测站, 江西九江 332000)

[摘要] 聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDMDAAC)助凝剂主要用于低浊度天然水体的除浊,而很少用于高浓度的生产废水处理,为此,采用 PDMDAAC 助凝聚合氯化铝(PAC)处理高浓度丙烯酸乳液废水,考察了 PAC 投加量、 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 、初始 pH、沉淀时间对 PAC 混凝效果的影响,并分析了 PDMDAAC 的助凝机理。结果表明,PDMDAAC 助凝剂对高浓度丙烯酸乳液废水混凝的处理效果明显,可以高效地去除 COD 和浊度。其最优混凝条件: PAC 投加量为 350 mg/L, $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 为 2%、初始 pH=7.0, 沉降时间为 20 min。在最优混凝条件下进行中试混凝实验,废水 COD 由 11 396 mg/L 降为 417 mg/L, COD 去除率达到 96.3%, 浊度由 11 220 NTU 降为 39 NTU, 浊度去除率达到 99.6%。由激光粒度和 SEM 分析可知, PDMDAAC 助凝 PAC 的絮体粒径为 12.4 μm , PDMDAAC 助凝 PAC 的絮凝机理更趋向于吸附电中和作用,而吸附架桥作用较弱。

[关键词] 聚二甲基二烯丙基氯化铵;聚合氯化铝;丙烯酸乳液废水;助凝

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0102-06

Treatment of high turbidity acrylic emulsion wastewater by coagulation of poly aluminum chloride with poly dimethyl diallyl ammonium chloride

YANG Wenjie¹, QI Jian², YANG Qiyong¹, WANG Huijuan¹

(1. College of Resources & Environment, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;

2. Jiujiang Radiation Environment Monitoring Station, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Poly dimethyl diallyl ammonium chloride coagulant is mainly used for turbidity removal of low-turbidity natural water bodies, and is rarely used for the treatment of high-concentration production wastewater. Treatment of high turbidity acrylic emulsion wastewater by coagulation of poly aluminum chloride (PAC) with poly dimethyl diallyl ammonium chloride (PDMDAAC) was investigated. The effects of coagulant dosage, proportion, initial pH value and precipitation time on the coagulation effect were explored, and the flocculation mechanism of the composite coagulant was analyzed. The experiment results indicated that PDMDAAC coagulant worked for the removal of COD and turbidity from the high concentration acrylic emulsion wastewater. The optimal operating parameters were obtained such as the dosage of PAC (350 mg/L), proportion of $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ (2%), pH value (7.0) and settling time (20 min). Under the above conditions in pilot coagulation experiments, COD decreased from 11 396 to 417 mg/L with the removal rate of 96.3% and the turbidity drop from 11 220 to 39 NTU with the removal rate of 99.6%. The laser particle size and SEM analysis showed that PDMDAAC/PAC coagulation floc particle size was 12.4 μm , and the flocculation mechanism of PDMDAAC/PAC was mainly charge neutralization in treatment of acrylic emulsion wastewater, not adsorption bridging.

Key words: poly dimethyl diallyl ammonium chloride (PDMDAAC); poly aluminum chloride (PAC); acrylic emulsion wastewater; coagulation aid

[基金项目] 江西省科技厅重点研发计划项目(20181BBG70043); 2021 年江西省高等学校大学生创新训练项目(S118432021079)

丙烯酸类聚合物作为分散剂、增稠剂、涂层剂、吸水剂、洗涤剂广泛应用于纺织、印染、建材、涂料、塑料、电子等领域。在丙烯酸类聚合物生产和使用过程中,会产生高浓度的乳白色丙烯酸乳液废水。根据现有生产规模和乳液循环使用次数,一般来说,该类废水水量不大,但其具有COD浓度高、BOD₅/COD小、浊度大、稳定性好等特点,同时该废水中含有对微生物有害的物质,缺乏微生物生长需要的营养元素。如果直接排放,该废水将对生化处理系统造成严重影响。因此,在丙烯酸废水进入生化处理系统之前必须采取有效的预处理,如多相催化氧化^[1]、电催化还原^[2]、铁碳微电解^[3]、微生物絮凝^[4]等。但这些技术基本上还处于实验室研究或中试阶段,目前应用更多的预处理方法是混凝沉淀法。谷小凤等^[5]采用聚合氯化铝/聚丙烯酰胺(PAC-PAM)混凝沉淀法可使出水浊度从3 000 NTU左右降至1 NTU,但其COD去除率仅为6.8%。为此,向芷澄等^[6]增加了处理工序,采用混凝(PAC-PAM)破乳-Fenton氧化联合预处理工艺,COD从5 470 mg/L下降为190.3 mg/L,浊度从14 904.1 NTU下降为60 NTU,但其工艺较为复杂、耗能。因此,针对高浓度、高浊度丙烯酸乳液废水,有必要开发一种高效的絮凝剂。聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDMDAAC)是一种水溶性阳离子型有机高分子絮凝剂^[7-9],且易于和其他无机混凝剂(如PAC^[10]、PFC^[11]、PFS^[12]、硫酸铝^[13]等)制备复合混凝剂。但是目前PDMDAAC助凝剂主要用于低浊度天然水体的除浊^[14],很少用于高浓度工业生产废水处理。

因此,本研究发挥PDMDAAC吸附架桥强、投药量少、脱浊效率高的优点,充分结合PAC处理成本低、投药范围宽的特点,采用PDMDAAC助凝PAC处理高浓度丙烯酸乳液废水。探讨了PDMDAAC助凝工艺条件、助凝效果及絮凝机理,以期对相关高浓度生产废水的处理提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验水样

本实验水样取自江西省某电子层压材料厂清洗产品和设备的丙烯酸乳液废水,其外观为白色乳状

液体,水质指标见表1。

表1 丙烯酸乳液废水水质指标

Table 1 The quality of acrylic emulsion wastewater

水质指标	pH	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU
数值范围	6.8~8.0	11 043~35 941	850~2 390	9 360~34 820
烧杯实验	6.9	11 043	1 042	9 360
中试实验	7.5	11 396	932	11 220

1.2 实验方法

静态烧杯实验:取原水1 L,设置水力条件:在300 r/min的搅拌速度下搅拌30 s后投加混凝剂,然后在该搅拌速度下搅拌3 min,最后在80 r/min的搅拌速度下搅拌10 min;静置一定时间后,取液面下2 cm处的水样测其水质指标。

中试混凝实验:在静态烧杯实验得到的最佳混凝条件下,在中试实验装置上进行混凝实验。采用上海大有仪器设备有限公司的混凝沉淀实验装置,包括三级混凝池和斜板沉淀池,处理水量为10~12 L/h。

单一混凝剂的配制:10 g/L PAC溶液、10 g/L 硫酸铝溶液、10 g/L 氯化铁溶液、20 g/L PDMDAAC溶液(以PDMDAAC试剂中有效物质质量浓度计),即用即配。

PDMDAAC/PAC混凝剂的配制:根据实验获得最佳PAC投加量为350 mg/L,以有效成分Al₂O₃的质量浓度计为105 mg/L。以最佳PAC投加量为基础,配制 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 分别为0.5%、1%、2%、5%、10%、20%、30%的PDMDAAC/PAC混凝剂(按PDMDAAC试剂中有效物质质量和PAC中Al₂O₃的质量比计),配制好的PDMDAAC/PAC混凝剂存放时间不超过8 h。

1.3 分析仪器与试剂

分析仪器:WGZ-200型浊度计,上海昕瑞;BODTrak型BOD分析仪、DR1010型COD测定仪、DRB200型COD消解仪,美国哈希;MY3000-6M型六联混凝搅拌器,武汉梅宇;pHS-29A型数显酸度计;Mastersizer3000型超高速智能粒度分析仪,英国马尔文。

主要试剂:硫酸铝(氧化铝质量分数≥30%)、聚合氯化铝(PAC,氧化铝质量分数≥30%)、氯化铁(质

量分数 $\geq 99\%$),天津大茂化学试剂厂,化学纯;PDMDAAC,工业品,40%水溶液,黏度为1 000~3 000 mPa·s(25℃),聊城正阳净水原料有限公司。

2 结果与讨论

2.1 最佳混凝剂和投加量的选择

无机混凝剂处理成本低、投药范围宽,是目前处理高浊度废水的主要试剂,本实验选用PAC、硫酸铝、氯化铁这3种典型的无机混凝剂。混凝实验原水水质COD为11 043 mg/L、浊度为9 360 NTU、pH为6.8。经过预实验,发现3种混凝剂的最佳pH为6~8,所以本次实验不调节原水的pH,选择沉淀时间为60 min,考察混凝剂投加量对废水浊度和COD去除效果的影响,结果见图1。

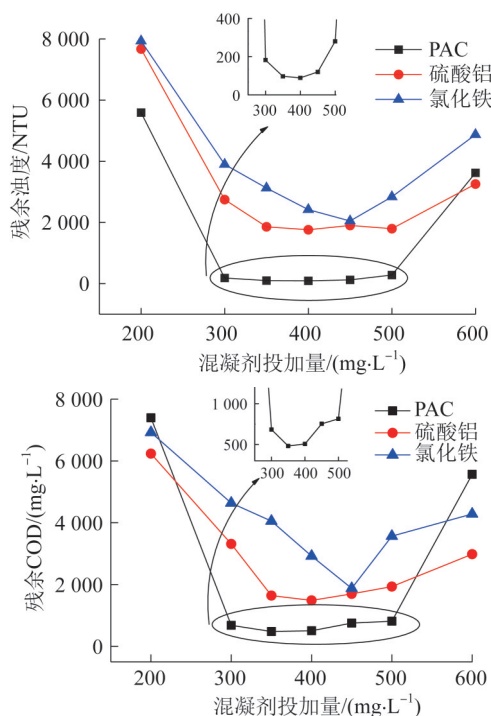


图1 混凝剂投加量对废水浊度和COD去除效果的影响

Fig. 1 Effect of coagulant dosages on the removal of turbidity and COD

由图1可知,3种混凝剂的投加量范围集中在300~500 mg/L,如果超过这个范围,则上清液的残余浊度和COD均增加,上清液的水质变差。PAC的最佳投加量为350 mg/L,混凝后上清液残余浊度和COD分别为97 NTU和481 mg/L;硫酸铝的最佳投加量为400 mg/L,混凝后上清液残余浊度和COD分别为

1 759 NTU和488 mg/L;氯化铁的最佳投加量为450 mg/L,混凝后上清液残余浊度和COD分别为2 047 NTU和1 876 mg/L。因此,PAC的混凝效果明显要好于氯化铁和硫酸铝,沉淀层堆积得更加紧密,其浊度和COD去除率分别达到99.1%和95.8%。PAC浊度去除效果与向芷澄等^[6]处理丙烯酸乳液废水的实验结果类似,但COD去除效果更佳。本实验选择PAC作为处理丙烯酸乳液废水的混凝剂,PAC投加量为350 mg/L。

2.2 PDMDAAC助凝PAC对混凝效果的影响

虽然PAC对丙烯酸废水起到了较好的混凝效果,但是废水残余浊度和COD仍然较高,所以本实验采用PDMDAAC助凝PAC以提升丙烯酸乳液废水的混凝效果。助凝剂投加量是影响废水混凝效果最重要的因素,在不调节原水pH和沉淀时间为10 min的条件下,考察了 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 对丙烯酸乳液废水处理效果的影响,结果见图2。

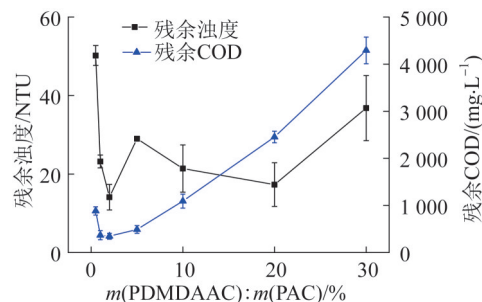


图2 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 对混凝效果的影响

Fig. 2 Effect of $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ on the removal of COD and turbidity

由图2可知,当 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 为2%时,废水残余浊度为14.1 NTU,残余COD为345 mg/L。此后,上清液残余浊度随着 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 的增大而缓慢上升到36.8 NTU,而上清液残余COD随着 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 的增大升高到4 291 mg/L。这是由于没有参与絮凝反应的PDMDAAC溶于水,造成上清液残余COD的增加。

初始pH是影响混凝效果的主要因素之一。在最佳 $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 为2%,沉淀时间为10 min的条件下,考察初始pH对丙烯酸乳液废水处理效果的影响,结果见图3。

由图3可知,复合混凝剂的最佳pH选择范围为

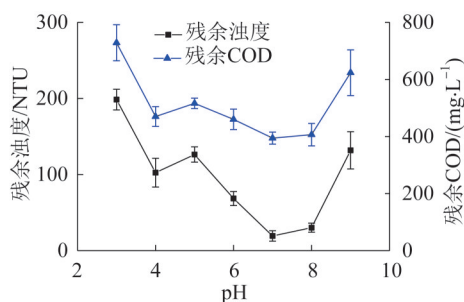


图3 初始pH对混凝效果的影响

Fig. 3 Effect of initial pH on the removal of COD and turbidity

7~8,废水最佳的初始pH为7,其最小残余COD和残余浊度分别为394 mg/L和19.3 NTU。

混凝过程中形成的絮体大小和密实程度对混凝效果产生一定的影响,要达到较好的混凝效果需要延长絮体沉淀时间,在PAC投加量为350 mg/L, $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})=2\%$,初始pH为7的条件下,考察沉淀时间对混凝效果的影响,结果见图4。

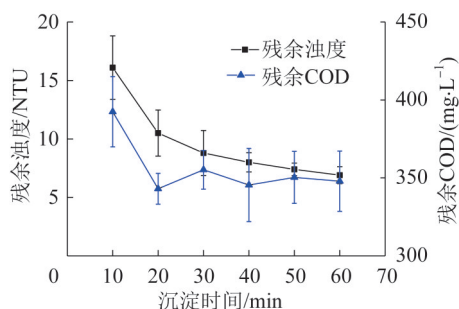


图4 沉淀时间对混凝效果的影响

Fig. 4 Effect of settling time on the removal of COD and turbidity

由图4可知,PDMDAAC助凝PAC的混凝絮体沉降20 min时,上清液残余COD为343 mg/L、残余浊度为10.5 NTU;60 min后,上清液残余COD为348 mg/L、残余浊度为6.9 NTU。PDMDAAC助凝PAC的沉淀时间远小于PAC单一混凝剂处理该废水的最佳沉淀时间(2 h)。因此,综合考虑浊度和COD,本实验PDMDAAC助凝PAC的最佳沉淀时间为20 min。

2.3 PDMDAAC助凝PAC的中试混凝效果及絮凝机理分析

由上述实验可得,PDMDAAC助凝PAC的最优混凝条件:PAC投加量为350 mg/L, $m(\text{PDMDAAC}):$

$m(\text{PAC})$ 为2%,初始pH=7,沉降时间20 min。在最优条件下对丙烯酸乳液废水进行中试混凝实验,其混凝效果见表2。

表2 不同混凝剂处理丙烯酸乳液废水的混凝效果

Table 2 Coagulation effect of acrylic emulsion wastewater by different coagulants

混凝剂	COD/(mg·L ⁻¹)			浊度/NTU		
	原水	残余	去除率/%	原水	残余	去除率/%
PAC	11 396	1 381	87.9	11 220	797	92.9
硫酸铝	11 396	1 893	83.3	11 220	2 367	78.9
氯化铁	11 396	2 872	74.8	11 220	3 256	70.1
PDMDAAC/PAC	11 396	417	96.3	11 220	39	99.6

由表2可知,相对于PAC、硫酸铝、氯化铁等单一混凝剂,PDMDAAC助凝剂的投加使PAC投加量减少,而浊度和COD去除效果更好,浊度和COD去除率分别达到99.6%和96.3%。而向芷澄等^[6]采用PAM-PAC混凝剂预处理丙烯酸乳液废水的COD去除率只有81.2%。PDMDAAC/PAC混凝絮体的沉降时间短,沉降20 min后,上清液高度与沉淀物的高度比达到80%。而PAC、氯化铁、硫酸铝等单一混凝剂的混凝絮体为棉花状,沉降2 h后,上清液高度与沉淀物的高度比仅为40%。

在混凝过程中,胶体颗粒的脱稳程度与混凝剂的荷电情况、胶体形态密切相关。众多学者从絮凝剂的电荷特性、分子结构、分子质量大小、絮体粒径及絮体结构等方面对PDMDAAC的絮凝机理进行了深入研究^[15-16]。本研究对混凝絮体进行了激光粒度分析和扫描电镜形貌分析,结果分别见图5、图6。

由图5可知,丙烯酸乳液废水悬浮颗粒的粒径

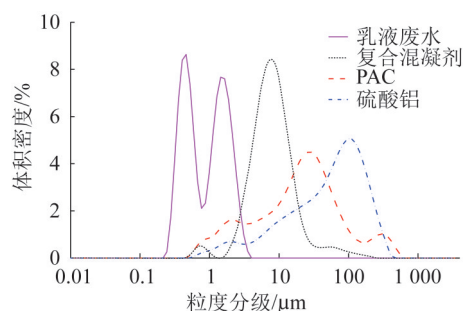


图5 不同混凝絮体的粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution of different coagulation flocs

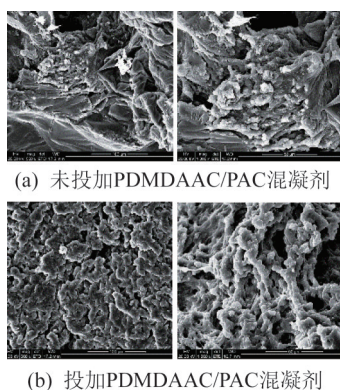


图6 丙烯酸乳液废水投加PDMDAAC/PAC
混凝剂前后絮体的SEM

Fig. 6 SEM picture of flocs before and after coagulation with PDMDAAC/PAC coagulant in acrylic emulsion wastewater

(体积加权平均粒径)为 $1.16\ \mu\text{m}$,PDMDAAC/PAC混凝絮体的粒径为 $12.4\ \mu\text{m}$,PAC混凝絮体的粒径为 $50.7\ \mu\text{m}$,硫酸铝混凝絮体的粒径为 $86.3\ \mu\text{m}$ 。PDMDAAC/PAC混凝絮体粒径小于PAC、硫酸铝的絮体粒径。但PDMDAAC/PAC混凝絮体的粒径分布基本呈正态分布。

由图6可知,未投加混凝剂的丙烯酸废水强力离心后得到的沉淀物形貌不规则,而PDMDAAC/PAC混凝絮体形貌规整、排列整齐、絮体密实。这是由于PDADMAC电荷密度高、分子质量小,主要通过吸附电中和作用形成的絮体更加密实,分维值较高^[17]。一方面,PDMDAAC与PAC复合后,在絮凝过程中产生重组,使PAC在水解反应中生成更多的多核羟基络合物,提高了产生混凝作用的有效成分和正电荷点位;另一方面,PDMDAAC聚合物自身具有极高的正电荷密度,PDMDAAC与PAC复合后,水解沉淀物的正Zeta电位明显升高,强化了对带负电荷胶体颗粒的电中和能力^[16],张爱文等^[18]研究发现PDMDAAC可增强PFS-PDMDAAC的电中和与吸附架桥能力,提高对有机物、浊度的去除效率。本实验采用的PDMDAAC助凝剂提高了PAC的电荷密度,使PAC对丙烯酸废水的絮凝主要是吸附电中和作用,而吸附架桥作用较弱。

3 结论

(1)PDMDAAC/PAC混凝剂对高浓度丙烯酸乳液废水混凝处理的效果明显,可以高效地去除COD

和浊度。经过混凝实验,获得最优混凝条件:PAC投加量为 $350\ \text{mg/L}$, $m(\text{PDMDAAC}):m(\text{PAC})$ 为2%,初始 $\text{pH}=7$,沉降时间为 $20\ \text{min}$ 。在最优混凝条件下,中试实验废水COD由 $11\ 396\ \text{mg/L}$ 降至 $417\ \text{mg/L}$,COD去除率达到96.3%;废水浊度由 $11\ 220\ \text{NTU}$ 降至 $39\ \text{NTU}$,浊度去除率达到99.6%。

(2)PDMDAAC/PAC混凝剂对高浓度丙烯酸乳液废水浊度和COD的去除效果优于PAC、硫酸铝、氯化铁等单一混凝剂以及PAM-PAC复合混凝剂。

(3)由激光粒度分析和扫描电镜形貌分析可知,PDMDAAC/PAC混凝絮体的粒径较小、沉降时间较短,显著提高了混凝效率。PDMDAAC/PAC混凝剂对高浓度丙烯酸乳液废水的絮凝机理更趋向于吸附电中和作用,而吸附架桥作用较弱。

参考文献

- [1] 姜晓峰,高明瑜,王诗涵,等.多相催化氧化-EGSB组合工艺处理丙烯酸废水研究[J].工业水处理,2021,41(2):92-96.
JIANG Xiaofeng, GAO Mingyu, WANG Shihan, et al. Acrylic acid wastewater treatment by combined process of heterogeneous catalytic oxidation-EGSB[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(2): 92-96.
- [2] 王红,宋玉栋,余丽娜,等.电催化还原脱毒预处理丙烯酸盐废水[J].环境科学研究,2016,29(4):573-578.
WANG Hong, SONG Yudong, YU Lina, et al. Detoxification pretreatment of acrylate wastewater by electrocatalytic reduction process [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(4): 573-578.
- [3] 孙丽华,骆坚平,董娜,等.铁碳微电解联合两相UASB处理丙烯酸废水[J].环境工程学报,2015,9(10):4817-4822.
SUN Lihua, LUO Jianping, DONG Na, et al. Treatment of acrylic acid wastewater by Fe/C micro-electrolysis and two-phase UASB [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 4817-4822.
- [4] 苏晓梅,张慧芳,申秀英,等.复合菌群产絮凝剂MAC37的特征及其在黏合剂废水中的应用[J].环境科学研究,2012,25(3):340-345.
SU Xiaomei, ZHANG Huifang, SHEN Xiuying, et al. Characteristics of MAC37 produced by multiple bioflocculant-producing microorganisms and its application in adhesive wastewater [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(3): 340-345.
- [5] 谷小凤,宋玉栋,周岳溪,等.混凝沉淀去除丙烯酸丁酯废水浊度物质[J].环境工程学报,2013,7(4):1319-1323.
GU Xiaofeng, SONG Yudong, ZHOU Yuexi, et al. Removal of turbidity

- from butyl-acrylate wastewater by coagulation-sedimentation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(4): 1319-1323.
- [6] 向芷澄,李晔,杨丹丹,等. 混凝破乳-Fenton 氧化法处理丙烯酸乳液废水的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(1): 70-75. XIANG Zhicheng, LI Ye, YANG Dandan, et al. Treatment of acrylic emulsion wastewater by combined coagulation and Fenton oxidation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(1): 70-75.
- [7] TIAN Binghui, LUAN Zhaokun, LI Mingming. Low-temperature synthesis of allyl dimethylamine by selective heating under microwave irradiation used for water treatment[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2005, 73(6): 328-333.
- [8] HAASE R A. Clarification of water and wastewater: US 6120690[P]. 2000-09-19.
- [9] 高宝玉,魏锦程,王燕,等. 聚合铁复合絮凝剂处理地表水的性能研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(7): 57-61. GAO Baoyu, WEI Jincheng, WANG Yan, et al. Study on polyferric-organic composite flocculants for treatment of surface water [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(7): 57-61.
- [10] 张跃军,李潇潇,赵晓蕾,等. PAC/PDM 复合混凝剂用于夏季太湖水混凝脱浊研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2195-2200. ZHANG Yuejun, LI Xiaoxiao, ZHAO Xiaolei, et al. Turbidity removal of summer high algae content Taihu Lake raw water using composite coagulants of polyaluminum chloride and polydimethyldiallylammonium chloride[J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2195-2200.
- [11] WANG Yan, GAO Baoyu, YUE Qinyan, et al. The characterization and flocculation efficiency of composite flocculant iron salts-polydimethyldiallylammonium chloride[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 142(2): 175-181.
- [12] 刘立华,龚竹青. 聚二甲基二烯丙基氯化铵与聚合硫酸铁复合絮凝剂的制备及絮凝性能研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(4): 90-94. LIU Lihua, GONG Zhuqing. Study on preparation and coagulation properties of poly(dimethyldiallylammonium chloride)-polyferric sulfate composite flocculant[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2005, 20(4): 90-94.
- [13] 李潇潇,张跃军,赵晓蕾,等. 硫酸铝/PDM 复合混凝剂对夏季太湖水的混凝脱浊[J]. 中国环境科学, 2008, 28(4): 294-298. LI Xiaoxiao, ZHANG Yuejun, ZHAO Xiaolei, et al. Turbidity removal of summer Taihu Lake raw water using composite coagulants of aluminum sulfate and polydimethyldiallylammonium chloride[J]. China Environmental Science, 2008, 28(4): 294-298.
- [14] 李谢玲. PAC-PDMDAAC 处理微污染水的絮凝特征研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(9): 58-62. LI Xieling. Study on flocculation characteristics of micro-polluted water treated by PAC-PDMDAAC [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(9): 58-62.
- [15] 田秉晖,栾兆坤,潘纲. 阳离子聚电解质聚二甲基二烯丙基氯化铵的絮凝机理初探[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1874-1880. TIAN Binghui, LUAN Zhaokun, PAN Gang. Flocculation mechanism of the cationic polyelectrolyte-polydiallyldimethylammonium chloride (PDADMAC) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(11): 1874-1880.
- [16] 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. GAO Baoyu, WANG Yan, YUE Qinyan, et al. Electrical charge and flocculation of composite flocculants made of polyaluminium [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24(1): 103-106.
- [17] 余剑锋,王东升,叶长青,等. 利用小角度激光光散射研究阳离子有机高分子絮凝剂的絮体粒径和絮体结构[J]. 环境科学学报, 2007, 27(5): 770-774. YU Jianfeng, WANG Dongsheng, YE Changqing, et al. Study on the floc size and structure of cationic organic polymers by using small-angle laser light scattering [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(5): 770-774.
- [18] 张爱文,种延竹,马桂香. PFS-PDMDAAC 絮凝剂对超滤膜污染的减缓作用[J]. 工业水处理, 2020, 40(8): 88-92. ZHANG Aiwen, CHONG Yanzhu, MA Guixiang. Mitigating ultra-filtration membrane fouling from composite flocculant PFS-PDMDAAC[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(8): 88-92.

[作者简介] 杨文杰(2001—), 本科。E-mail: 1814016477@qq.com。

通讯作者: 杨期勇, 博士, 教授。E-mail: yqy46901@163.com。

[收稿日期] 2022-11-11(修改稿)