



绿锈-聚二甲基二烯丙基氯化铵絮凝剂的制备及应用

陆永生¹, 徐喜旺¹, 冯威¹, 陈晨¹, 万俊锋²

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444;

2. 郑州大学生态与环境学院, 河南郑州 450001)

[摘要] 利用绿锈(GR)和聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDM)为原料制备绿锈-聚二甲基二烯丙基氯化铵(GR-PDM)复合絮凝剂, 采用FT-IR、SEM、XRD表征, 考察制备过程中有机物比例及制备温度对絮凝性能的影响。以模拟含磷污水、实际印染废水为处理对象, 探究pH和投加量对絮凝效率的影响, 并使用Zeta电位、有效粒径分布验证其在不同pH下的絮体特征。结果表明, 制备最佳条件: PDM与GR体积比为0.3%, 温度为50℃; GR-PDM结构特征相较于GR, 更有利于发挥吸附架桥及电中和作用, 稳定性更强; pH为8、投加量为50 mg/L时, 处理模拟污水总磷去除率达90%以上; pH为7、投加量为120 mg/L时, 实际印染废水氨氮、总磷、COD去除率分别达38%、96%、56%。应用结果与絮体特征分布证明其在pH为7~9范围内的絮凝效果较优。

[关键词] 绿锈; 聚二甲基二烯丙基氯化铵; 复合絮凝剂; 除磷

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)05-0125-06

Preparation and application of green rust polydimethyldiallyl ammonium chloride (GR-PDM) composite flocculant

LU Yongsheng¹, XU Xiwang¹, FENG Wei¹, CHEN Chen¹, WAN Junfeng²

(1. School of Environment and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A composite flocculant (GR-PDM) was prepared by using green rust (GR) and polydimethyldiallyl ammonium chloride (PDM) as raw materials. Based on FT-IR, SEM and XRD analysis, the effects of organic matter ratio and preparation temperature on flocculation performance were investigated. The effects of pH and dosage on flocculation efficiencies were investigated in simulated phosphorus-containing wastewater and actual printing and dyeing wastewater treatment. The floc characteristics at different pH were verified by Zeta potential and effective particle size distribution. The results showed that the optimum preparation conditions were as follows: the proportion of PDM 0.3% and the temperature 50℃. Compared with GR, the stability of GR-PDM was stronger. The structural characteristics of GR-PDM were more favorable for adsorption bridging and electric neutralization. When the pH was 8 and the dosage was 50 mg/L, the total phosphorus removal efficiency of simulated wastewater was more than 90%. When the pH was 7 and the dosage was 120 mg/L, the removal efficiency of ammonia nitrogen, total phosphorus and COD in the actual printing and dyeing wastewater were 38%, 96% and 56%, respectively. The application results and floc characteristic distribution proved that the flocculation effect was better in the pH range of 7-9.

Key words: green rust; polydimethyldiallyl ammonium chloride; composite flocculant; phosphorus removal

相较于吸附^[1]、电化学氧化^[2]、离子交换^[3]、膜分离^[4]和微生物法^[5]等水处理工艺, 絮凝沉淀由于具有操作简便、成本低相对高效等优点, 被广泛应用于各种类型污水预处理及深度处理。其中絮凝剂的种类和性质是决定絮凝效率、出水质量和运行成本的

关键, 因此各类新型絮凝剂的开发研制变得十分有必要。

绿锈(GR)是具有氧化还原活性的层状双氢氧化物, 拥有较大的比表面积和较强的吸附络合能力, 能够处理难降解有机物^[6], 对硝基苯^[7]等含氮化合物

有较好的去除效果,还具备吸附某些重金属^[8]的能力,是潜在的高效无机絮凝材料,但其单独使用时絮凝效果不佳且易氧化;利用某些有机物聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDM)与其他材料聚合后能够增强材料絮凝表现和稳定性^[9]。单独使用时具有分子质量高、阳离子电荷密度高、静电中和及吸附架桥能力强^[10]等优点,但同时存在价格偏高、投药范围有限等缺点。鉴于这两种絮凝原料单独使用时的优势与不足,若将绿锈和PDM制备复合絮凝剂将有助于发挥二者协同作用。

因此,笔者配制腐殖酸-高岭土模拟水作为实验用水,以浊度、 UV_{254} 去除率作为评价指标,分析PDM与GR体积比和制备温度的影响,优化复合絮凝剂(GR-PDM)制备条件,并对其结构进行FT-IR、SEM、XRD表征。探究其在不同pH和投加量条件下对模拟含磷污水、实际印染废水等不同类型水样处理效果,考察GR-PDM在不同pH条件下Zeta电位和有效粒径等絮体特征,分析絮凝反应机理,为新型复合絮凝剂开发和实际应用提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

GR-PDM复合絮凝剂:在课题组研究基础上^[11]自制,称取一定量 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 和 $Fe_2(SO_4)_3$,分别溶于无氧去离子水;向硫酸亚铁溶液充入氮气,搅拌条件下加入适量PDM,缓慢滴加NaOH,同时加入硫酸铁溶液,使溶液pH保持在7左右,混合均匀,待硫酸铁滴加完毕后,调整pH为8~9,在50℃陈化2h后密封备用。

实验水样:腐殖酸-高岭土模拟水由腐殖酸、高岭土配制,浊度为 (35 ± 0.5) NTU, UV_{254} 为 0.5 ± 0.05 ;模拟含磷污水由磷酸二氢钾、羟基亚乙基二膦酸配制,控制无机磷、有机磷浓度比为3:1,总磷为2.5 mg/L;实际印染废水取自上海市嘉定区某印染厂,pH为6.5~7.3,COD为500~600 mg/L,总磷为2.5~5.0 mg/L,氨氮为100~150 mg/L。使用0.1 mol/L HCl和0.1 mol/L NaOH调节原水pH。

1.2 实验设计

选取腐殖酸-高岭土模拟水样 UV_{254} 去除率和剩余浊度为评价指标,调整PDM与GR体积比和制备温度,优化GR-PDM制备条件;以模拟含磷污水为处理对象,调整污水初始pH和GR-PDM投加量,分别测定总磷、

可溶性总磷、可溶性正磷酸盐;以实际印染废水为处理对象,调整污水初始pH和GR-PDM投加量,分别测定总磷、氨氮、COD。上述实验均使用ZR4-6搅拌机对各类型水样进行批次实验,首先于烧杯中加入原水500 mL,投加一定量的絮凝剂,快速搅拌2 min(300 r/min),慢速搅拌15 min(100 r/min),静置30 min,于上清液液面下2 cm处取样,测定处理污染物指标,计算去除率。

1.3 分析方法

COD由重铬酸钾法测定(HJ/T 399—2007);氨氮由纳氏试剂分光光度法测定(HJ 535—2009);总磷由过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定(GB/T 6913—2008);浊度由2100P浊度计(美国哈希公司)测定; UV_{254} 由P4紫外-分光光度计(上海美谱达仪器有限公司)测定;Zeta电位和絮体粒径由3000HS Zeta电位及粒度分析仪(英国马尔文公司)测定;pH由PHS-3C pH计测定;FT-IR、SEM、XRD表征均使用真空冷冻干燥机(北京四环公司)于-50℃干燥后研磨测试。

2 结果与讨论

2.1 GR-PDM复合絮凝剂制备

预实验发现,单独投加20 mg/L GR时,腐殖酸-高岭土模拟水样处理效果较好,故复合絮凝剂投加量选择为20 mg/L。PDM与GR体积比对腐殖酸-高岭土模拟水浊度、 UV_{254} 去除效果的影响见图1(a)。不同制备温度下得到的GR-PDM复合絮凝剂投加量为20 mg/L,PDM与GR体积比为0.3%时,对腐殖酸-高岭土模拟水浊度、 UV_{254} 去除效果见图1(b)。

由图1(a)可知,模拟废水的浊度、 UV_{254} 去除率均随着PDM与GR体积比的增加而升高,PDM与GR体积比为0.3%时,GR-PDM的处理效果最佳,剩余浊度降低至6 NTU, UV_{254} 去除率达76%,相较于单独GR处理时有较大提升。究其原因,主要由于在一定范围内增加PDM与GR体积比有利絮体吸附带负电污染物,同时通过架桥作用在颗粒间形成更大的絮体;而当PDM与GR体积比过高时,絮凝剂分子间相互作用力增加^[12],克服交联作用难度增加,从而导致GR-PDM中 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 水解不完全,降低絮凝效果。此外过量的PDM会出现反浑现象,主要由于过多正电荷导致絮体再稳定作用^[13],导致浊度、 UV_{254} 去除率有所下降。因此,制备GR-PDM时优选PDM与GR体积比为0.3%,有助于提高絮凝效果且节约

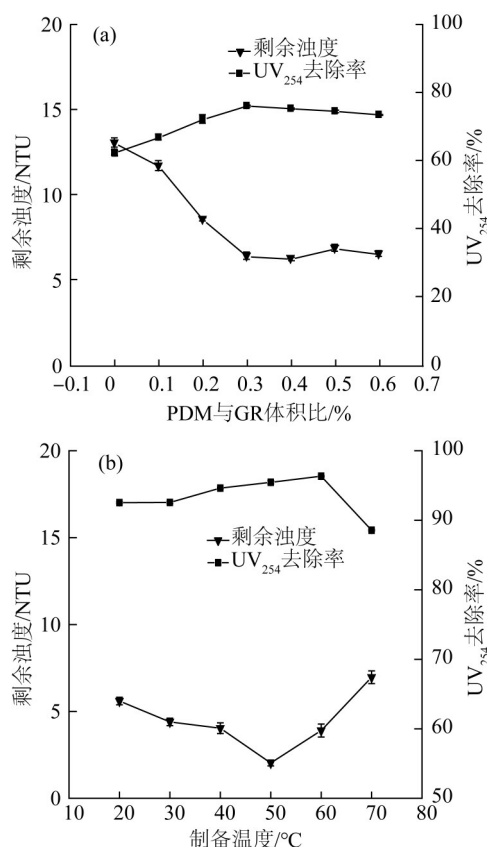


图1 不同PDM与GR体积比及制备温度的影响

Fig. 1 Effects of different proportion of PDM and preparation temperature

成本。

由图1(b)可知,GR-PDM复合絮凝剂对浊度和UV₂₅₄去除率随着制备温度的升高而增大,当制备温度为50℃时,去除效果最明显,剩余浊度降至2 NTU,UV₂₅₄去除率达96%以上,制备温度继续升高去除率稍有下降。这是由于温度升高PDM能够形成较多自由基,促进其与GR中Fe²⁺和Fe³⁺结合;但温度超过50℃后,过多的自由基产生可使均聚速率超过共聚速率^[14],也使链终止变得活跃。综合考虑,确定制备优化条件为PDM与GR体积比为0.3%,制备温度为50℃。

2.2 絮凝剂表征

鉴于絮凝剂形态结构随着存放时间的增加可能会发生变化,对GR和GR-PDM的新鲜样品和放置30 d后的样品进行稳定性对比分析,其FT-IR和XRD谱图见图2。

由图2(a)可知,GR-PDM在1 126、1 408 cm⁻¹处的吸收峰分别对应于C—N键的伸缩振动^[15],在2 870 cm⁻¹

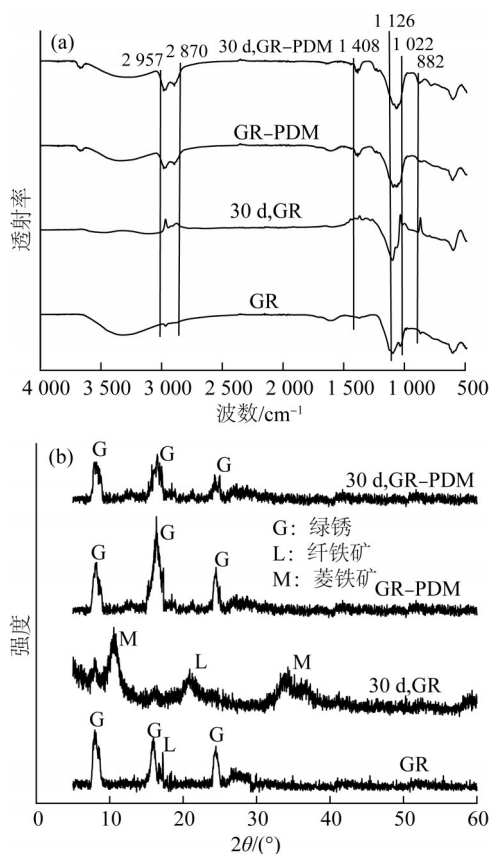


图2 絮凝剂的FT-IR及XRD

Fig. 2 FT-IR and XRD of flocculant

和2 957 cm⁻¹处分别对应—CH₄和—CH₂的拉伸振动吸收峰^[16],表明絮凝剂中存在PDM,并可能和GR产生了较强的结合作用。保存30 d后,GR在882 cm⁻¹和1 022 cm⁻¹处出现—OH弯曲振动^[17-18],推测可能由于接触氧气,GR中的二价铁部分氧化,结构发生变化;而GR-PDM在30 d后仍保留PDM特征峰且变化不明显,表明引入PDM有助于维持絮凝剂结构的稳定。

由图2(b)可知,保存30 d后,GR其物相晶型发生较大变化,几乎全部氧化成为其他铁化合物。GR-PDM在30 d后仍存在着绿锈的特征衍射峰,与利用甘油延缓氧化^[19]取得了类似的效果,PDM添加后在GR-PDM复合絮凝剂表面形成一层保护膜,抑制其被氧化并对其结构起到保护的作用。

冷冻干燥后GR和GR-PDM的SEM见图3。

由图3可知,GR为绿锈典型紧密片状结构,相对平整规则;PDM的引入使GR-PDM表面则相对不规则,凸起褶皱较多,有稀疏的孔隙分布,使得其具有更强的吸附能力,能有效发挥吸附架桥作用,提高混凝效果。

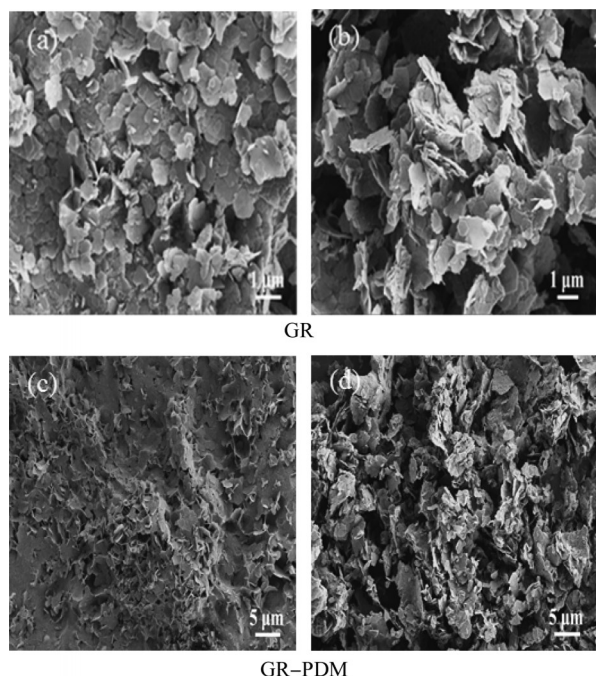


图3 GR和GR-PDM的SEM
Fig. 3 SEM of GR and GR-PDM

2.3 GR-PDM复合絮凝剂应用效果

2.3.1 模拟含磷污水

pH是影响絮凝剂除磷效果的重要操作参数,用GR-PDM处理不同初始pH的模拟含低浓度磷污水,不同形态磷的去除效果见图4(a)。控制污水初始pH为8,调整GR-PDM投加量处理模拟含磷污水,不同形态磷的去除效果见图4(b)。

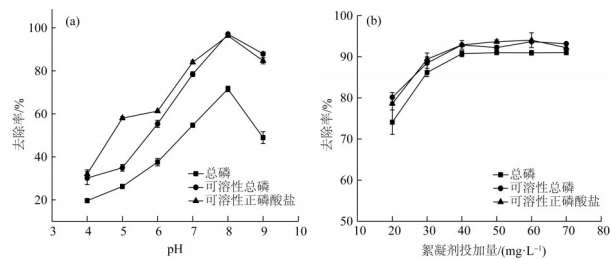


图4 模拟含磷污水在不同pH和投加量下的处理效果

Fig. 4 Treatment of phosphorus containing wastewater with different pH and dosage

由图4(a)可知,pH在4~8范围内,总磷、可溶性总磷、可溶性正磷酸盐的去除率均随pH增加而提高,总磷去除率最高达70%以上,可溶性总磷、可溶性正磷酸盐最高去除率在90%以上;pH超过8时,各种形态磷去除率有所降低。主要由于当模拟污水初始pH较低时,GR-PDM难以水解形成铁络合絮凝

体^[20],对污染物吸附架桥能力较弱;随着pH增加,在PDM架桥作用下铁聚合物水解形成高度聚合络合物以及磷酸盐形式转化为阴离子物质(H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 和 PO_4^{3-})^[21],且pH在8附近时生成的磷酸盐沉淀溶解度较低^[22-23],导致可溶性总磷和可溶性正磷酸盐去除率提高。因此最佳除磷pH选择为7~8。

由图4(b)可知,随GR-PDM投加量增加,总磷、可溶性总磷、可溶性正磷酸盐的去除程度亦不断增加而后稳定在90%以上。主要是因为磷酸盐与铁离子发生了化学沉淀,此外PDM也促进磷酸盐的吸附和沉淀,同时发现由于有机磷的结构和性质复杂,去除有机磷比去除无机磷更困难,需要增加絮凝剂的含量。

2.3.2 实际工业废水

印染废水色度和污染物浓度高,去除难度大,因此采用絮凝沉淀预处理以期减轻后续处理负荷。根据预实验确定GR-PDM投加量为80 mg/L,不同pH下絮凝处理实际印染废水见图5(a)。控制pH为7~8,调整GR-PDM投加量对实际印染废水处理结果见图5(b)。

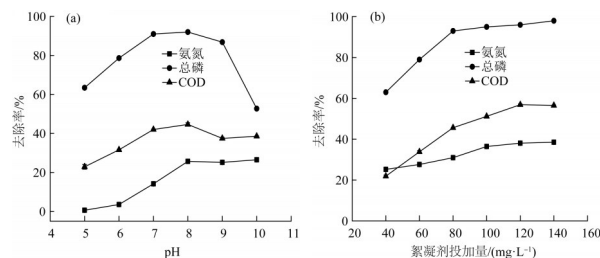


图5 实际印染废水在不同pH和投加量下的处理效果

Fig. 5 Treatment of actual printing and dyeing wastewater with different pH and dosages

由图5(a)可知,pH变化对GR-PDM絮凝效果影响较大。当pH<8时,随着pH升高,去除率逐渐增加;当pH=8时,此时氨氮、总磷、COD去除率最高分别为25%、92%、44%;当pH>8时,氨氮、总磷、COD去除率均有所下降。与模拟废水处理效果表现出类似规律,废水pH为7~9时,GR-PDM去除效果差异较小,絮凝效果较好。

由图5(b)可知,随着絮凝剂投加量增加,氨氮、总磷、COD去除率不断提高;当投加量为120 mg/L时,氨氮、总磷、COD去除率分别达38%、96%、56%;当絮凝剂投加量进一步增加时,效果稍有下降。这是由于随着絮凝剂投加量的增加,絮体体积和胶体浓度也随之增加,为捕获污染物颗粒提供了更多的

吸附位点,从而增强吸附架桥效应和沉淀网捕效应;但当絮凝剂浓度过高时,可能会导致絮体微粒的电荷反转,影响去除效果。经过 GR-PDM 絮凝预处理,污染物浓度均有一定程度的下降,能够减轻后续工艺负荷。

2.4 絮体特征分析

Zeta 电位是表征胶体稳定性和絮凝性能的重要手段。为了考察 GR-PDM 的电中和能力,对比了 GR 与 GR-PDM 在不同 pH 体系中的 Zeta 电位,结果见图 6(a)。絮体有效粒径基本公式: $D_m = (D_{16} + D_{50} + D_{84})/3$ 。其中, D_m 为絮体有效粒径数值, D_{16} 、 D_{50} 、 D_{84} 分别为累计体积百分比中小于 16%、50%、84% 的粒径^[25], GR-PDM 在不同 pH 下的有效粒径见图 6(b)。

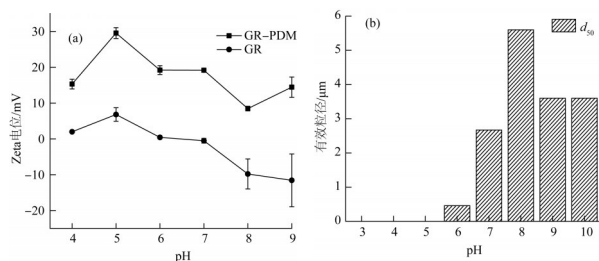


图 6 不同 pH 的 Zeta 电位和有效粒径

Fig. 6 Zeta potential and effective particle size at different pH

由图 6(a)可知, GR-PDM 复合絮凝剂的 Zeta 电位在不同 pH 下均大于 0 mV, 且高于单独 GR, 主要归因于阳离子 PDM 与 GR 结合后的复合絮凝剂携带正电, 增强了复合絮凝剂电中和性能。有研究表明, Zeta 电位过高时, 有效凝聚难以发生; Zeta 电位较低时, 颗粒间的斥力较小而使水样体系脱稳; 在接近等电点时, 颗粒间斥力最小, 最易形成絮体^[24]。当 pH 为 8 左右时, GR-PDM 较接近等电点, 有利于形成铁络合物絮体吸附污染物, 与上述应用研究结果一致。

由图 6(b)可知, pH 较低时, H^+ 浓度增加, 促进 GR-PDM 中 Fe^{2+} 的释放溶解, 对絮体形成有抑制作用。在 pH 为 3~10 范围内有效粒径最大值出现在 pH=8 处, 与 Zeta 电位分析结果基本一致, 此时有效粒径为 5 600 nm, 主要由于在中性或碱性条件下, GR-PDM 更易形成粒径相对较大的铁相混合物^[18], 促进污染物捕集去除。

3 结论

(1) 根据腐殖酸-高岭土模拟水样的处理效果,

确定 GR-PDM 制备的最佳条件: PDM 与 GR 体积比为 0.3%, 温度为 50 °C。

(2) FT-IR、SEM、XRD 结果证明 GR-PDM 相较于 GR 稳定性更强, 比表面积更大, 更易发生吸附架桥网捕作用。

(3) GR-PDM 在 pH 为 8、投加量为 50 mg/L 时, 模拟含磷污水总磷去除率达 90% 以上; 在 pH 为 7、投加量为 120 mg/L 时实际印染废水氨氮、总磷、COD 去除率分别达 38%、96%、56%, 能够有效降低污水处理负荷。

(4) Zeta 电位和有效粒径分布表明 GR-PDM 电中和能力较强, 在 pH 为 7~9 范围内更易形成较大絮体, 促进污染物去除。

参考文献

- [1] 罗书舟, 王东田, 魏杰. 改性净水污泥颗粒对水中氨氮的动态吸附研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(12): 66-71.
LUO Shuzhou, WANG Dongtian, WEI Jie. Dynamic adsorption of ammonia nitrogen in water by modified water treatment sludge[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(12): 66-71.
- [2] SHI Shihui, LIANG Yujie, JIAO Ning. Electrochemical oxidation induced selective C—C bond cleavage[J]. Chemical Reviews, 2021, 121(1): 485-505.
- [3] 赵可江, 王俊, 崔俊峰, 等. 絮凝沉淀法和离子交换法对比处理含钼地表水研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6): 109-114.
ZHAO Kejiang, WANG Jun, CUI Junfeng, et al. Comparison research on treatment of molybdenum contaminated surface water by flocculation precipitation and ion exchange method[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(6): 109-114.
- [4] SAMAEI S M, GATO-TRINIDAD S, ALTAE A. The application of pressure-driven ceramic membrane technology for the treatment of industrial wastewaters—A review[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 200: 198-220.
- [5] SHARMA P, TRIPATHI S, CHANDRA R. Metagenomic analysis for profiling of microbial communities and tolerance in metal-polluted pulp and paper industry wastewater[J]. Bioresource Technology, 2021, 324: 124681.
- [6] AI Jing, YIN Weizhao, HANSEN H C B. Fast dechlorination of chlorinated ethylenes by green rust in the presence of bone char[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2019, 6(3): 191-196.
- [7] HAN Ying, HUANG Junkai, LIU Hongyuan, et al. Abiotic reduction of *p*-chloronitrobenzene by sulfate green rust: Influence factors, products and mechanism[J]. RSC Advances, 2020, 10(33): 19247-19253.
- [8] PEREZ J P H, FREEMAN H M, BROWN A P, et al. Direct visualization of arsenic binding on green rust sulfate[J]. Environmental

- Science & Technology, 2020, 54(6): 3297-3305.
- [9] HAO Li, LIN Guanquan, LIAN Jiajia, et al. Carboxymethyl cellulose encapsulated zein as pesticide nano-delivery system for improving adhesion and anti-UV properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 231: 115725.
- [10] 李谢玲. PAC-PDMAAC 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-PDMAAC [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(9): 58-62.
- [11] LU Yongsheng, YANG Xingxing, WU Zulong, et al. A novel control strategy for N_2O formation by adjusting Eh in nitrite/Fe(II-III) carbonate green rust system [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 304: 579-586.
- [12] 任宏洋, 何敏, 王兵, 等. 复合混凝剂(PFC-PDMAAC)混凝性能与应用研究 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1761-1768.
- REN Hongyang, HE Min, WANG Bing, et al. Coagulating mechanisms and practical applications of a composite coagulant (PFC-PDMAAC) [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4): 1761-1768.
- [13] LIU Zhouzhou, WEI Hua, LI Aimin, et al. Evaluation of structural effects on the flocculation performance of a co-graft starch-based flocculant [J]. Water Research, 2017, 118: 160-166.
- [14] 徐斌, 陈程, 张毅敏, 等. 酸洗废液制备聚硅酸复合氯化铁絮凝剂的研究 [J]. 工业水处理, 2018, 38(9): 63-67.
- XU Bin, CHEN Cheng, ZHANG Yimin, et al. Research on the preparation of polysilicon acid ferric chloride flocculant from waste pickling liquor [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(9): 63-67.
- [15] 姚培, 李树白, 张启蒙, 等. 聚二甲基二烯丙基氯化铵/偶联剂改性膨润土对苯酚的吸附研究 [J]. 化工新型材料, 2022, 50(1): 207-210.
- YAO Pei, LI Shubai, ZHANG Qimeng, et al. Preparation of PDMAAC/KH550 modified bentonite and its adsorption to phenol [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(1): 207-210.
- [16] 朱天菊, 陈春燕, 来进和, 等. 纳米微孔链状PAS-PDMAAC 混凝剂制备条件的优化与表征 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(1): 16-23.
- ZHU Tianju, CHEN Chunyan, LAI Jinhe, et al. Optimization of the preparation conditions and characterization of PAS-PDMAAC coagulant with nano-microporous chain shape [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(1): 16-23.
- [17] 韩莹, 吴召, 刘宏远, 等. 绿锈吸附水中四环素的研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 121-126.
- HAN Ying, WU Zhao, LIU Hongyuan, et al. Study on adsorption of tetracycline in water by green rust [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 121-126.
- [18] 王小明, 彭晶, 徐欢欢, 等. As(V) 浓度和环境因子对硫酸盐绿锈转化的影响及其机制 [J]. 化学学报, 2017, 75(6): 608-616.
- Wang Xiaoming, Peng Jing, Xu Huanhuan, et al. Influences and mechanisms of As(V) concentration and environmental factors on hydrosulfate green rust transformation [J]. Acta Chimica Sinica, 2017, 75(6): 608-616.
- [19] TAHAWY R, DOUSTKHAH E, ABDEL-AAL E S A, et al. Exceptionally stable green rust, a mixed-valent iron-layered double hydroxide, as an efficient solar photocatalyst for H_2 production from ammonia borane [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 286: 119854.
- [20] SUN Wenquan, ZHOU Shengbao, SUN Yongjun, et al. Synthesis and evaluation of cationic flocculant P(DAC-PAPTAC-AM) for flocculation of coal chemical wastewater [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 99: 239-248.
- [21] REN Jie, LI Na, WEI Hua, et al. Efficient removal of phosphorus from turbid water using chemical sedimentation by $FeCl_3$ in conjunction with a starch-based flocculant [J]. Water Research, 2020, 170: 115361.
- [22] 吴昊, 黄进刚, 陈建军. 不同絮凝剂对淀粉废水除磷效果的研究 [J]. 工业水处理, 2014, 34(10): 56-59.
- WU Hao, HUANG Jingang, CHEN Jianjun. Research on the removing effect of phosphorus from starch wastewater by using different flocculants [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(10): 56-59.
- [23] FENG Qiyun, GAO Baoyu, YUE Qinyan, et al. Flocculation performance of papermaking sludge-based flocculants in different dye wastewater treatment: Comparison with commercial lignin and coagulants [J]. Chemosphere, 2021, 262: 128416.
- [24] PANDEY A, PATHAK V V, KOTHARI R, et al. Experimental studies on zeta potential of flocculants for harvesting of algae [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 562-569.
- [25] 海希, 邵宇阳, 张健玮. 动水条件下泥沙絮凝体粒径变化分析实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 262-266.
- HAI Xi, SHAO Yuyang, ZHANG Jianwei. Experimental study on change of sediment floc particle size under shear flow [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 262-266.
- [作者简介] 陆永生(1971—), 博士, 教授. luy7174@shu.edu.cn.
通讯作者: 万俊锋, 博士. E-mail: wanjunfeng@zzu.edu.cn.
[收稿日期] 2022-03-15(修改稿)