



两性离子型聚合物絮凝剂的制备及性能评价

李 强,付 鉴,苏 楠,李 为,罗 翔

(中国石油天然气股份有限公司青海油田钻采工艺研究院,甘肃敦煌 736202)

[摘要] 海上油田含油污水具有矿化度高、成分复杂以及稳定性强的特点,使用常规的聚丙烯酰胺类絮凝剂处理效果较差,以丙烯酰胺(AM)、丙烯酸(AA)、丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)和有机硅单体(KS-10)为原料合成制备了一种新型两性离子型聚合物絮凝剂 PAM-D11,并对其分子结构进行了红外光谱和核磁共振谱图表征分析,结果表明各种单体均参与了聚合反应。PAM-D11 对目标含油污水具有较好的除油效果,当其投加量为 100 mg/L 时,除油率可以达到 96% 以上;并且含油污水的矿化度越高,PAM-D11 的除油效果越好;当含油污水的 pH 处于 6~8 之间时,PAM-D11 的除油效果相对较好;随着污水中含油量的不断升高,PAM-D11 的除油率稍有降低,但降低幅度较小;另外,在相同的实验条件下,PAM-D11 的除油效果明显优于其他市售的无机絮凝剂和有机絮凝剂,说明 PAM-D11 能够应用于高矿化度含油污水的絮凝处理中。

[关键词] 两性离子型聚合物;结构表征;絮凝剂;含油污水;除油效果

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0062-06

Preparation and performance evaluation of zwitterionic polymer flocculant

LI Qiang, FU Jian, SU Nan, LI Wei, LUO Xiang

(Drilling and Production Technology Research Institute of CNPC Qinghai Oilfield, Dunhuang 736202, China)

Abstract: The oily wastewater from offshore oilfield has the characteristics of high salinity, complex composition, and strong stability, so it is hard to be treated by the conventional polyacrylamide flocculants. A new zwitterionic polymer flocculant PAM-D11 was synthesized from acrylamide(AM), acrylic acid(AA), acryloxyethyl trimethylammonium chloride (DAC) and silicone monomer(KS-10), The molecular structure was characterized by IR and NMR. The results showed that various monomers were involved in the polymerization. Flocculant PAM-D11 had good oil removal effect on target oily wastewater. When its dosage was 100 mg/L, the oil removal rate could reach more than 96%. The higher the salinity of oily wastewater, the better the oil removal effect of PAM-D11. When the pH value of oily wastewater was between 6 and 8, the oil removal effect of PAM-D11 was quite well. With the continuous increase of oil content in sewage, the oil removal rate of PAM-D11 decreased slightly, but the decrease range was small. In addition, under the same experimental conditions, the oil removal effect of flocculant PAM-D11 was significantly better than other commercially available inorganic and organic flocculants. It indicated that the developed zwitterionic polymer flocculant PAM-D11 could be applied in the flocculation treatment of high salinity oily wastewater.

Key words: zwitterionic polymer; structural characterization; flocculant; oily sewage; oil removal effect

在石油工业的勘探开发、生产运输、加工炼制以及储存过程中都会产生大量的含油污水,近年来,全球含油污水的总产量呈现出持续增加的趋势。含油污水中通常包含大量的浮油、乳化油以及溶解油等石油类物质,还含有一定量的酮类、酚类以及芳香烃类等有毒有害化学物质,如果不对其进行合理的处

理就排放或者回收利用,将会对生态环境造成一定的污染,甚至威胁到人类的健康安全^[1-3]。因此,研究高效的含油污水处理技术具有十分重要的意义。

目前,针对含油污水常用的处理方法主要包括物理沉降法、膜分离法、生物处理法、电化学处理法以及化学混凝法等^[4-8],其中化学混凝法具有操作工

[基金项目] 国家科技重大专项(2017ZX05009)

艺简单、适应性强以及油水分离效率高的特点,往往只需在含油污水中加入絮凝剂等化学处理剂就可实现高效的油水分离,在含油污水的处理中得到了比较广泛的研究及应用^[9-11]。该方法的关键在于选择合适的絮凝剂。现阶段,常用的絮凝剂主要包括无机絮凝剂、有机高分子絮凝剂、微生物型絮凝剂以及复合型絮凝剂等^[12-15],其中各种改性聚丙烯酰胺类有机絮凝剂的研究及应用更为广泛,其对污水中的油类物质具有较强的去除效果^[16-18]。然而,针对某些矿化度较高、有机物含量高以及成分比较复杂的含油污水,使用常规的聚丙烯酰胺类絮凝剂往往无法达到较好的处理效果。两性离子型聚合物分子结构上同时含有阴、阳离子基团,能够表现出良好的反聚电解质效应,并且使其具备良好的耐温抗盐性能^[19-22]。因此,笔者针对海上油田某平台高矿化度含油污水处理困难的问题,以丙烯酰胺(AM)、丙烯酸(AA)、丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)和有机硅单体(KS-10)为聚合单体,制备了一种新型两性离子型聚合物絮凝剂PAM-D11,并评价了其对于海上油田含油污水的絮凝处理效果,以期为此类含油污水的高效合理处理提供一定的借鉴和参考。

1 实验部分

1.1 实验试剂及仪器

试剂:丙烯酸(AA)、丙烯酰胺(AM)、氢氧化钠、氯化钠,天津市福晨化学试剂厂,以上试剂均为分析纯;丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC),山东淄博益利化工新材料有限公司;有机硅单体(KS-10),实验室自制;偶氮二异丁腈,济南泉星新材料有限公司;聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铝(PAS),巩义市益民净水材料有限公司;阳离子型聚丙烯酰胺PAM-1#、阴离子型聚丙烯酰胺PAM-2#、非离子型聚丙烯酰胺PAM-3#,河南海韵环保科技有限公司;含油污水(含油质量浓度分别为581、2 057、5 936、10 260、13 840、28 750 mg/L,矿化度均为30 500 mg/L),取自海上油田某平台。

仪器:VECTOR32型傅里叶红外光谱仪,美国尼高仪器有限公司;AVANCE400型超导核磁共振仪,德国布鲁克公司;JC-OIL-6B型便携式红外测油仪,

华业分析仪器有限公司;HH-6单列数显恒温水浴锅,上海高致精密仪器有限公司;WY3000-6G型电动六联搅拌器,河北天检工程仪器有限公司。

1.2 两性离子型聚合物絮凝剂PAM-D11的制备

首先配制一定浓度的丙烯酸(AA)溶液,使用氢氧化钠滴定至中性,得到丙烯酸钠溶液,备用;然后按比例将丙烯酰胺(AM)、丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)和有机硅单体(KS-10)溶解于去离子水中,搅拌均匀使其充分溶解,再按比例将其加入到丙烯酸钠溶液中;通入氮气除氧,加热至一定温度后向混合液中滴加催化剂偶氮二异丁腈,保持温度反应5 h左右;将反应产物使用丙酮洗涤后抽滤,然后恒温干燥、粉碎即得到目标产物两性离子型聚合物絮凝剂PAM-D11。

1.3 实验方法

1.3.1 PAM-D11的结构表征

红外光谱:使用VECTOR32型傅里叶红外光谱仪对制备的PAM-D11进行结构分析,实验方法为溴化钾压片法,波数范围选择为500~4 000 cm^{-1} ,依据红外光谱中吸收峰的特征来分析产品的分子结构。

核磁共振:使用AVANCE400型超导核磁共振仪对制备的PAM-D11开展进一步的结构分析,使用 D_2O 为溶剂,测试样品的 ^1H NMR,根据谱图上共振峰的特征来分析产品的分子结构。

1.3.2 含油污水絮凝实验

含油污水絮凝处理实验方法参照石油与天然气行业标准SY/T 5796—2020《油田用絮凝剂评价方法》中的一次性加絮凝剂评价方法。具体实验步骤:(1)配制初始质量浓度为10 000 mg/L的聚合物溶液,备用;(2)用量筒量取1 000 mL的含油污水样品于烧杯中,将烧杯放入恒温水浴锅中,加热至60 $^{\circ}\text{C}$;(3)在120 r/min的搅拌速度下搅拌0.5 min后,按设计浓度加入一定量配制好的聚合物溶液,然后在120 r/min下继续搅拌1 min,再降低转速至60 r/min,继续搅拌10 min后,停止搅拌,在60 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温放置30 min;(4)除去漂浮的絮体后,使用注射器在上层液体中间处移取150 mL左右的水样,然后使用便携式红外测油仪测定絮凝处理后水样中的含油质量浓度;(5)再根据含油污水中初始含油质量浓度的大小

计算聚合物絮凝实验的除油率,以此评价聚合物的絮凝效果。

2 结果与讨论

2.1 PAM-D11的结构表征

2.1.1 红外光谱

PAM-D11的红外光谱分析结果见图1。

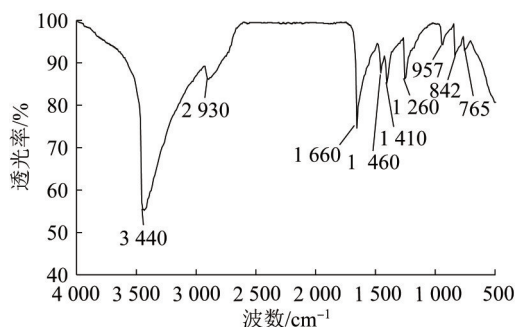


图1 PAM-D11的红外光谱

Fig. 1 Infrared spectra of polymer PAM-D11

由图1可知,3440 cm^{-1} 处为酰胺基团中N—H的伸缩振动吸收峰;2930 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 的伸缩振动吸收峰;1660 cm^{-1} 处为酰胺基团中C=O的伸缩振动吸收峰;1460 cm^{-1} 处为DAC中 $-\text{CH}_2-\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$ 的弯曲振动吸收峰;1410 cm^{-1} 处为 COO^- 基团的伸缩振动吸收峰;957 cm^{-1} 处为DAC中C—N的伸缩振动吸收峰;1260 cm^{-1} 、842 cm^{-1} 和765 cm^{-1} 处为 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 的特征吸收峰。以上分析结果表明合成的产物为目标产物两性离子型聚合物PAM-D11。

2.1.2 核磁共振谱

PAM-D11的 ^1H NMR分析结果见图2。

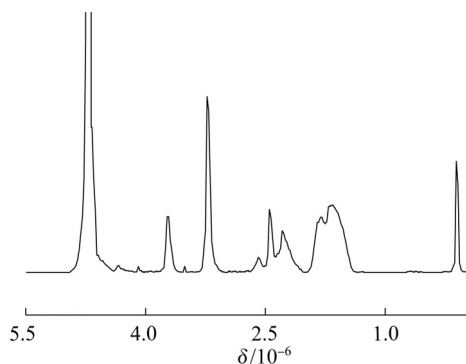


图2 PAM-D11的 ^1H NMR

Fig. 2 ^1H NMR spectra of polymer PAM-D11

由图2可知,化学位移在 1.65×10^{-6} 的质子峰为合成产物中 $\text{C}=\text{C}$ 打开后的氢原子吸收峰;在 $2.26 \times$

10^{-6} 处的化学位移对应的是聚丙烯酰胺中 $-\text{CH}-$ 的质子峰;在 2.46×10^{-6} 处的化学位移对应的是DAC中 $-\text{CH}-$ 的质子峰;在 3.24×10^{-6} 处的化学位移对应的是DAC中与氮原子相连的3个 $-\text{CH}_3$ 的质子峰;在 3.72×10^{-6} 和 4.38×10^{-6} 处的2个化学位移分别对应的是DAC中分别与氮原子和氧原子相连的两个 $-\text{CH}_2-$ 的质子峰;在 0.12×10^{-6} 处的化学位移对应的是 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 的质子峰。

2.2 含油污水絮凝处理实验结果

2.2.1 PAM-D11投加量对絮凝效果的影响

在含油污水pH为7,含油污水矿化度为30500 mg/L,含油质量浓度均为13840 mg/L的条件下,考察PAM-D11投加量对含油污水絮凝效果的影响,结果见图3。

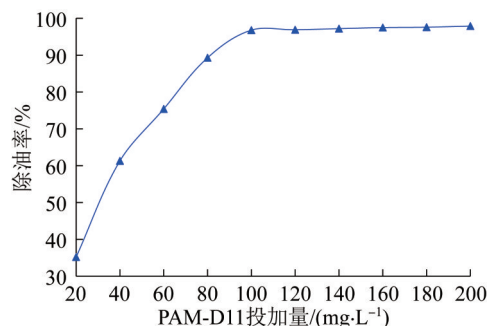


图3 PAM-D11投加量对除油率的影响

Fig. 3 Effect of flocculant PAM-D11 concentration on oil removal rate

由图3可知,随着PAM-D11投加量的不断增大,含油污水絮凝实验的除油率呈现出先增大后平稳的趋势,当PAM-D11投加量为100 mg/L时,除油率可以达到96%以上,再继续增大絮凝剂投加量,除油率基本不再变化。这是由于随着PAM-D11投加量的增大,含油污水中的胶粒与絮凝剂分子之间的电中和作用以及吸附架桥作用会逐渐增大,有利于形成稳定的絮体,从而使除油效率不断增大;而当絮凝剂浓度达到一定值后,其与含油污水中胶粒的作用力会逐渐达到饱和,进而可能出现相同电荷互相排斥的现象,会对絮凝效果产生一定的影响。因此,絮凝剂投加量过大并不能进一步地提高絮凝效果,PAM-D11在该含油污水絮凝实验中的最佳投加量为100 mg/L。

2.2.2 含油污水 pH 对絮凝效果的影响

在PAM-D11投加量为 100 mg/L,含油污水矿化度为 30 500 mg/L,含油质量浓度均为 13 840 mg/L的条件下,考察含油污水 pH 对絮凝效果的影响,结果见图 4。

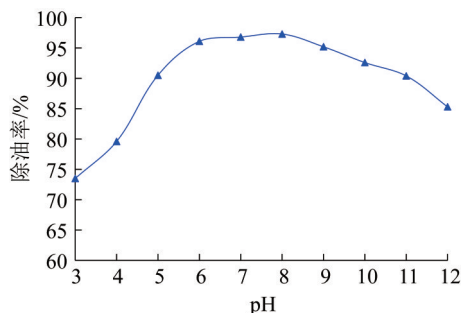


图4 含油污水 pH 对除油率的影响

Fig. 4 Effect of pH value of oily wastewater on oil removal rate

由图 4 可知, pH 对含油污水絮凝实验除油率的影响较大,随着含油污水 pH 的逐渐升高,除油率呈现出先升高后降低的趋势,当 pH 处在 6~8 之间时,除油率均能达到 96% 以上,除油效果最佳。这是由于在较低的 pH 条件下, PAM-D11 中阳离子基团的解离会受到一定的抑制,并且水中大量的 H^+ 吸附在含油污水胶粒的表面会与絮凝剂中的阳离子基团之间产生一定的静电排斥作用,从而影响絮凝剂的絮凝效果;而当水溶液的 pH 过高时, PAM-D11 分子会出现一定的去质子化现象,其与含油污水中的胶粒之间又会产生新的静电斥力作用,导致絮凝效果下降。只有当 pH 处在 6~8 之间时,絮凝剂分子与含油污水中的胶粒之间才能在电性中和以及吸附破乳等作用下达到良好的絮凝效果。因此,当使用 PAM-D11 作为絮凝剂,而含油污水的 pH 为中性时,不需要刻意去调整其 pH。

2.2.3 含油污水矿化度对絮凝效果的影响

在PAM-D11投加量为 100 mg/L,含油污水 pH 为 7,含油质量浓度均为 13 840 mg/L的条件下,考察含油污水的矿化度对絮凝效果的影响,结果见图 5。

由图 5 可知,含油污水矿化度对絮凝实验除油率的影响相对较小,随着含油污水矿化度的逐渐升高,除油率呈现出小幅升高的趋势,当含油污水矿化度达到 122 000 mg/L 时,除油率达到了 98% 以上。这是由于 PAM-D11 的分子结构中同时含有阴离子

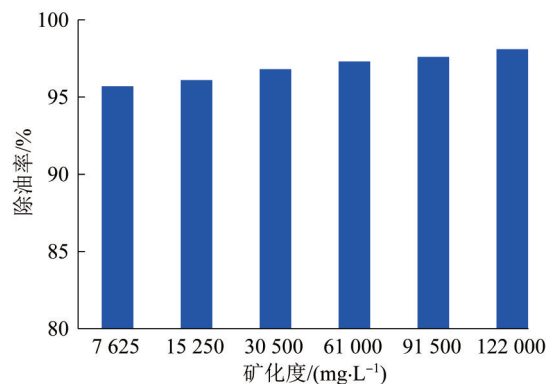


图5 含油污水矿化度对除油率的影响

Fig. 5 Effect of salinity of oily wastewater on oil removal rate

基团和阳离子基团,使其具有良好的“反聚电解质”性能,在高矿化度盐水中的溶解性能更好,分子结构更加舒展。因此,含油污水的矿化度越高, PAM-D11 越能更好地发挥其絮凝效果,说明 PAM-D11 具有良好的抗盐性能,能够满足高矿化度含油污水处理的需求。

2.2.4 污水中含油质量浓度对絮凝效果的影响

在PAM-D11投加量为 100 mg/L,含油污水 pH 为 7,含油污水矿化度为 30 500 mg/L的条件下,考察含油质量浓度对絮凝效果的影响,结果见图 6。

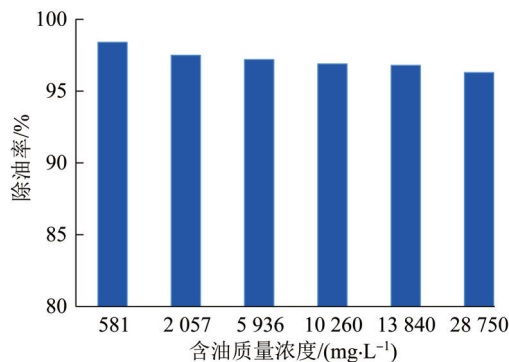


图6 污水中含油质量浓度对除油率的影响

Fig. 6 Effect of oil content in sewage on oil removal rate

由图 6 可知,当污水中含油质量浓度处在 581~28 750 mg/L 时,其对除油率的影响相对较小,随着污水中含油量的不断升高,除油率出现小幅的下降,但变化幅度不大,除油率均能达到 96% 以上,具有良好的除油效果。这是由于当污水中含油量处在一定范围时, PAM-D11 投加量达到 100 mg/L 即可使含油污水中的胶粒和聚合物絮凝剂形成比较稳定的絮体,从而可以发挥较强的絮凝作用,这说明 PAM-

D11能够满足高浓度含油污水处理的需求。

2.2.5 与其他常用絮凝剂的效果对比

在絮凝剂投加量均为 100 mg/L, 含油污水 pH 均为 7, 含油污水矿化度均为 30 500 mg/L, 含油质量浓度均为 13 840 mg/L 的条件下, 对比了 PAM-D11 与其他常用絮凝剂对目标含油污水的絮凝处理效果, 结果见图 7。

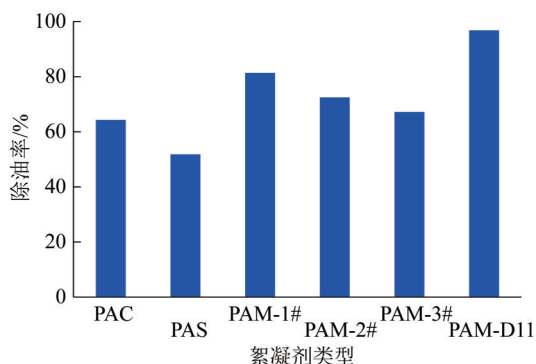


图7 不同类型絮凝剂的除油效果

Fig. 7 Oil removal effect of different types of flocculants

由图7可知,在相同的实验条件下,常用的无机絮凝剂 PAC 和 PAS 对目标含油污水的絮凝处理效果较差,除油率仅能达到 50%~60% 左右,常用的阳离子型、阴离子型以及非离子型聚丙烯酰胺絮凝剂对目标含油污水的絮凝处理效果比较一般,除油率也仅能达到 70%~80% 左右,而 PAM-D11 对目标含油污水的除油率则可以达到 96% 以上。就除油效果来看, PAM-D11 明显优于以上常用的絮凝剂,说明其能够较好地应用在海上油田高矿化度含油污水的处理中。

3 结论

(1) 以丙烯酰胺(AM)、丙烯酸(AA)、丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)和有机硅单体(KS-10)为原料,以偶氮二异丁腈为引发剂,制备了一种新型两性离子型聚合物絮凝剂 PAM-D11,并通过红外光谱和核磁共振对其分子结构进行了表征。

(2) PAM-D11 在含油污水絮凝处理中的应用结果表明,当其投加量为 100 mg/L 时,能使目标含油污水的除油率达到 96% 以上;当含油污水的 pH 处在 6~8 时,除油效果较好;含油污水的矿化度越高,除油效果越好;污水中含油质量浓度的大小对除油效

果的影响相对较小;此外,在相同的实验条件下,与其他常用的无机絮凝剂和聚丙烯酰胺类絮凝剂相比, PAM-D11 具有更加优良的除油效果。

参考文献

- [1] 王明友,王卓群,田明. 探讨含油污水的危害及有效处理[J]. 环境与发展, 2020, 32(5): 58-60.
WANG Mingyou, WANG Zhuoqun, TIAN Ming. Discussion on the harm and effective treatment of oily sewage[J]. Environment & Development, 2020, 32(5): 58-60.
- [2] 邱晓翠,刘立,屈撑围,等. 含油污水的处理方法[J]. 辽宁化工, 2013, 42(10): 1250-1252.
QIU Xiaocui, LIU Li, QU Chengtun, et al. Treatment methods of oily sewage[J]. Liaoning Chemical Industry, 2013, 42(10): 1250-1252.
- [3] 杨晓伟,汪洋,刘秀生,等. 含油污水处理技术研究进展[J]. 能源化工, 2016, 37(4): 83-88.
YANG Xiaowei, WANG Yang, LIU Xiusheng, et al. Research progress on the technologies of oily wastewater treatment[J]. Energy Chemical Industry, 2016, 37(4): 83-88.
- [4] 胡天佑,唐瑾,陈志莉. 石油工业含油废水处理进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(6): 12-17.
HU Tianyou, TANG Jin, CHEN Zhili. Progress of oily wastewater treatment in petroleum industry[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(6): 12-17.
- [5] 张诗洋,单历元,廖松义,等. 陶瓷膜在废水处理领域中的研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(4): 31-36.
ZHANG Shiyang, SHAN Liyuan, LIAO Songyi, et al. Research progress of ceramic membrane in wastewater treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(4): 31-36.
- [6] 李朝阳. 含油废水处理及综合利用技术探索与实践[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(3): 11-15.
LI Chaoyang. Exploration and practice of oily wastewater treatment and comprehensive utilization technology[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2021, 41(3): 11-15.
- [7] 宋雨. 油田含油污水处理技术研究现状及发展趋势[J]. 云南化工, 2021, 48(5): 22-23.
SONG Yu. Research status and development trend of oilfield oily wastewater treatment technology[J]. Yunnan Chemical Technology, 2021, 48(5): 22-23.
- [8] 周春于,汪燕秋,王俊. 油田采油废水处理技术的研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(2): 67-71.
ZHOU Chunyu, WANG Yanqiu, WANG Jun. Research progress on treatment technology for oilfield wastewater[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(2): 67-71.
- [9] 李佳,罗一菁,张忠智,等. 微生物絮凝剂对油田采出液污水絮

- 凝效果的研究[J]. 石油与天然气化工, 2012, 41(3): 341-345.
- LI Jia, LUO Yijing, ZHANG Zhongzhi, et al. Flocculating effect of microbial flocculant in the ASP produced water[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2012, 41(3): 341-345.
- [10] 刘祥义, 徐晓军. 疏水缔合淀粉的制备及其对含油污水絮凝研究[J]. 石油炼制与化工, 2006, 37(1): 51-54.
- LIU Xiangyi, XU Xiaojun. Preparation and application of hydrophobic associating starch for treating oily wastewater[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2006, 37(1): 51-54.
- [11] 付丽丽, 刘亚娜, 段奎全, 等. 高浓度含油乳化废水的絮凝复配研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(27): 8230-8232.
- FU Lili, LIU Yana, DUAN Kuiquan, et al. Study on compound flocculent of high concentration emulsifying oily wastewater[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(27): 8230-8232.
- [12] 吕景花, 袁振祥, 李婉婷, 等. 混凝沉淀法处理含油清洗废水中磷的实验研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(5): 37-41.
- LÜ Jinghua, YUAN Zhenxiang, LI Wanting, et al. Experimental study of phosphorus removal from oil-bearing cleaning wastewater by coagulation sedimentation[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(5): 37-41.
- [13] 游娜, 邓璟, 滕厚开, 等. P(AM-DBC)的制备及其絮凝性能研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(8): 73-76.
- YOU Na, DENG Jing, TENG Houkai, et al. Study on the preparation of P(AM-DBC) and its flocculating capacity[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(8): 73-76.
- [14] 马云贵, 董悦, 解永刚, 等. SHM气田含油污水处理药剂筛选[J]. 油田化学, 2018, 35(2): 362-365.
- MA Yungui, DONG Yue, XIE Yonggang, et al. Selection of additives for oily wastewater treatment in SHM gas field[J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(2): 362-365.
- [15] 李家俊, 齐玉. 一种油田清水剂的合成及应用研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(1): 66-68.
- LI Jiajun, QI Yu. Synthesis and application of a water clarifier for oilfield[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(1): 66-68.
- [16] 刘玉婷, 吴宏伟, 尹大伟. 含氟改性聚丙烯酰胺絮凝剂的合成及其絮凝性能[J]. 化工环保, 2010, 30(1): 81-84.
- LIU Yuting, WU Hongwei, YIN Dawei. Synthesis of fluorine-containing modified polyacrylamide and its flocculation capability[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2010, 30(1): 81-84.
- [17] 刘焕芳. 含有机硅功能基的聚丙烯酰胺类两亲聚合物的制备及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- LIU Huanfang. Synthesis and characterization of polyacrylamide amphiphilic polymers containing silicone functional groups[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017.
- [18] 施军. 疏水改性阳离子聚丙烯酰胺及其对含油废水絮凝研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
- SHI Jun. Study on hydrophobic modified cationic polyacrylamide synthesis and its flocculation performance of emulsified oil removal[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.
- [19] 翟磊, 王秀军, 靖波, 等. 两性清水剂处理聚合物驱含油污水[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(2): 98-102.
- ZHAI Lei, WANG Xiujun, JING Bo, et al. Treatment of oily wastewater produced from polymer flooding by amphoteric clarifier[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45(2): 98-102.
- [20] 尹晓康. 微交联两亲聚丙烯酰胺的合成及性能应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- YIN Xiaokang. Study on synthesis and performance application of microcrosslinked amphiphilic polyacrylamide[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
- [21] 闫君芝, 段林涛, 李瑞瑞, 等. 有机硅改性两性离子型聚丙烯酰胺的应用[J]. 工业催化, 2021, 29(6): 73-77.
- YAN Junzhi, DUAN Lintao, LI Ruirui, et al. Application of amphoteric polyacrylamide modified by organic silicon[J]. Industrial Catalysis, 2021, 29(6): 73-77.
- [22] 徐梓培, 王秀军, 靖波, 等. 两性离子絮凝剂聚合行为及性能评价[J]. 石油化工, 2019, 48(6): 589-595.
- XU Zipei, WANG Xiujun, JING Bo, et al. Polymerization behavior and performance evaluation of zwitterionic flocculant[J]. Petrochemical Technology, 2019, 48(6): 589-595.
- [作者简介] 李强(1988—), 硕士研究生, 工程师。电话: 15349777796, E-mail: liqiangzq@petro.com.cn。
- [收稿日期] 2022-11-18(修改稿)