

新型衣康酸三元共聚阻垢剂性能研究

余 嵘,周欣桐*,苏玲莉,田 昭,吕芙蓉

(西安工程大学城市规划与市政工程学院,陕西 西安 710048)

摘要:利用自由基聚合合法合成了新型衣康酸三元共聚阻垢剂 IA-HEMA-AMPS,探究对共聚物阻垢性能的影响因素。结果表明,IA-HEMA-AMPS 共聚物中出现了羧基中—C=O 和—OH 的伸缩振动吸收峰,含有大量磺酸、酯基、羟基、酰胺基等官能团;当羧酸基和磺酸基比例相当、引发剂质量为单体总质量的 6%、引发温度为 80℃、反应时间为 2~2.5 h 时,合成的共聚物阻垢性能良好。IA-HEMA-AMPS 在 28 d 内降解性达到 53.8%,为易生物降解。当药剂质量浓度为 5 mg/L 时,测定其氧化铁透光率为 43.1%,表明共聚物有一定的分散氧化铁性能。SEM 分析表明,共聚物有效抑制了碳酸钙垢的生长。通过与市售阻垢剂进行各项指标对比可以看出,该三元共聚物的阻垢性能具有一定优势。

关键词:衣康酸;三元共聚物;阻垢性能;生物降解性;

中图分类号:X783

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)03-0156-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.03.035

Study on performance of novel itaconic acid terpolymer scale inhibitor

YU Rong, ZHOU Xin-tong*, SU Ling-li, TIAN Zhao, LV Fu-rong

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new type of itaconic acid terpolymer scale inhibitor IA-HEMA-AMPS is synthesized by free radical polymerization. The factors affecting the scale inhibition performance of terpolymer are studied. It is found that the stretching peaks of —C=O and —OH for the carboxyl group appear in the IA-HEMA-AMPS terpolymer, indicating that the terpolymer contains a large number of functional groups such as sulfonic acid, carboxyl group, ester group, hydroxyl group and amide group. The synthetic copolymer has good scale inhibition performance when the proportion of the carboxylic acid group is the same as that of the sulfonic acid group, the initiator dosage is 6% of the total dosage of monomers, the initiation temperature is set at 80℃, the reaction time is in the range of 2 h to 2.5 h. The degradation rate of IA-HEMA-AMPS can reach 53.8% in 28 days, representing it is biodegradable. The transmittance of iron oxide is detected as 43.1% when the terpolymer concentration is 5 mg·L⁻¹, indicating that this terpolymer has a certain dispersion of iron oxide performance. SEM analysis shows that IA-HEMA-AMPS can inhibit the growth of calcium carbonate scale. Through comparing with the commercially available scale inhibitor, the terpolymer has better dispersion capacity.

Key words: itaconic acid; terpolymer; scale inhibition performance; biodegradability

长期以来,人们对水垢的预防与形成进行了大量研究。水垢的形成源于晶体的析出和沉积。投加阻垢剂可在晶体析出过程中有效地抑制晶体的生成,得到广泛使用。

亚甲基丁二酸又称衣康酸,来源于生物发酵技术,生物降解能力强,分子中含有自由基聚合反应所需要的—CC—基团,且在双键的两侧分别连有一个—COOH,比目前广泛使用的丙烯酸能够更多地带入羧酸基团;分子中的不饱和双键与一个羧酸基团产生共轭,生成 α,β -不饱和酸,因此易与乙烯基单体进行共聚反应^[1]。同时衣康酸共聚物具有优良的负电分散性能以及与其他离子络合的能力,可用作良好的分散稳定剂、金属离子吸附剂和阻垢剂^[2]。

结合阻垢剂发展趋势,以衣康酸为主原料,通过改变羧酸类单体、引发剂或引入强酸基团等对共聚进行改性,以提高药剂的综合性能。选择甲基丙烯酸羟乙酯、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 2 种环境友好材料为共聚单体,采用自由基聚合方式制备 IA-HEMA-AMPS 三元共聚物阻垢剂。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

衣康酸、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸、过硫酸铵、叔丁醇、硼酸、无水 CaCl₂·FeSO₄·7H₂O、EDTA、KOH、NaHCO₃、NaSO₄、无水乙醇,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司生产;甲基丙烯酸羟乙酯,分析纯,上海柏胜化学技术有限公司生产。

收稿日期:2018-06-14;修回日期:2019-01-14

作者简介:余嵘(1969-),女,硕士,副教授,主要从事水处理药剂的研制与开发、建筑给排水节能与优化等研究,18729008199@163.com;周欣桐(1994-),女,硕士研究生,主要从事水处理药剂的研制与开发,通讯联系人,460163173@qq.com。

1.2 IA-HEMA-AMPS 共聚物的合成与提纯

将称好的衣康酸(IA)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)置于装有回流冷凝管、温度计的四口反应烧瓶中,加入200 mL蒸馏水,80~95℃下搅拌溶解。加入一定的叔丁醇,通氮气搅拌1 h,除去体系的氧气。待温度升高至指定温度时,在2只恒压滴液漏斗中分别开始滴加甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)和过硫酸铵(6%~12%)水溶液,控制过硫酸铵溶液在甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)滴加完毕后2 h内滴完,滴加的同时打开磁力搅拌。滴加完毕后,保温1.0~3.0 h,冷却,即可得到IA-HEMA-AMPS三元初级聚合物,为微黄色或深黄色的透明液体。在溶液中加入无水乙醇,静置沉析后过滤,得到烧杯下方黄色黏稠液体,在60℃下烘干,得到黄色固体,即IA-HEMA-AMPS共聚物。

1.3 共聚物的表征

1.3.1 红外光谱分析

对纯化共聚物采用KBr压片制样后,利用VECTOR-22型傅里叶红外光谱仪(德国Bruker公司生产)对IA-HEMA-AMPS共聚物样品进行红外光谱分析。取2 mg样品,碾钵研细,与100 mg KBr完全混合,烘干,压成KBr薄片,于4 000~500 cm⁻¹波长测定其红外光谱图。

1.3.2 静态阻垢率的测定

根据《GBT16632—2008 水处理剂阻垢性能的测定 碳酸钙沉积法》完成共聚产品对碳酸钙的阻垢性能测试。

1.3.3 分散氧化铁性能评定

主要试剂为16.6 g/L的CaCl₂溶液和2.780 3 g/L的FeSO₄·7H₂O。选取阻垢剂质量浓度(ρ)分别为0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/L,实验条件: $\rho(\text{Ca}^{2+})=200 \text{ mg/L}$ (以CaCO₃计), $\rho(\text{Fe}^{2+})=20 \text{ mg/L}$,pH=9(以15.2 g/L的四硼酸钠溶液调节);磁力搅拌15 min后于(80±1)℃的恒温水浴锅中放置5 h,冷却至(25±1)℃后过滤取上层清液,用分光光度计在420 nm下测定其透光率(T),以蒸馏水为空白。其透光率越小分散效果越好。

1.3.4 生物降解性能评价

以生物摇床法测定IA-HEMA-AMPS的生物降解性。将纯化共聚物IA-HEMA-AMPS配制成溶液。每1 000 mL溶液中添加营养盐:27.5 g/L的CaCl₂溶液1 mL,11.00 g/L的MgSO₄溶液1 mL,0.13 g/L的FeCl₃溶液4 mL,磷酸盐缓冲液(8.5 g/L的KH₂PO₄溶液、21.75 g/L K₂HPO₄溶液、33.4 g/L

的NO₂HPO₄·2H₂O溶液、1.70 g/L的NH₄Cl溶液)2 mL,接种物适量。另取蒸馏水,添加等量营养盐及接种物,做空白对照组。将上述配好的混合液分装于200 mL锥形瓶中,每瓶120 mL混合液,用棉花及纱布塞封口,扎紧后置于生物摇床内。在室温(20~22℃)、100 r/min的转速条件下培养,置于摇床上振荡28 d。在实验开始的1、7、14、21、28 d时,每个锥形瓶取出适量分别测定IA-HEMA-AMPS共聚物的化学耗氧量(COD):将混合液用定性滤纸过滤后,以高锰酸钾法测定滤出液的COD,以COD表征其中有机物含量,空白组操作同上。

降解率的计算式:

$$\text{降解率} = [1 - (C_t - C_t') / (C_0 - C_0')] \times 100\%$$

式中: C_t 为 t 时刻含有受试物接种反应液中实测COD质量浓度,mg/L; C_t' 为 t 时刻空白对照中实测的COD质量浓度,mg/L; C_0 为含有受试物的接种反应液中实测的COD初始质量浓度,mg/L; C_0' 为空白对照中实测的COD初始质量浓度,mg/L。

1.3.5 扫描电镜(SEM)分析

收集生成的沉淀粘于Cu导电胶上,喷金后置入电镜室,调节S-4800电子扫描显微镜(日本日立公司生产)的加速电压、放大倍数,分析碳酸钙垢样的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 IA-HEMA-AMPS 共聚物最佳合成条件的确定

固定链转移剂的质量占单体总质量为8%,在此基础上确定以 $n(\text{HEMA})/n(\text{IA})$ 、 $n(\text{HEMA})/n(\text{AMPS})$ 、引发剂质量分数(%)、反应温度(℃)及反应时间(h)(包括滴加时间2 h和保温时间)为实验影响因素,在四水平的基础上进行合成实验设计,以阻碳酸钙垢率为指标进行正交实验,正交实验的因素水平表如表1所示。

表1 阻垢剂合成实验考虑的因素和水平

水平	因素				
	A $n(\text{HEMA})/$ $n(\text{IA})$	B $n(\text{HEMA})/$ $n(\text{AMPS})$	C $w(\text{引发剂})/\%$	D 温度/ ℃	E 保温 时间/h
1	1:1	1:0.5	6	80	1.5
2	1:2	1:1.0	8	85	2.0
3	1:3	1:1.5	10	90	2.5
4	1:4	1:2.0	12	95	3.0

依据正交表按 $L_{16}(4^5)$ 进行 16 次条件合成实验,结果如表 2 所示。

表 2 正交实验结果

实验 编号	因素					阻垢率/ %
	A	B	C	D	E	
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁	94.42
2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂	96.77
3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃	E ₃	93.00
4	A ₁	B ₄	C ₄	D ₄	E ₄	89.00
5	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	E ₄	86.32
6	A ₂	B ₂	C ₁	D ₄	E ₃	93.72
7	A ₂	B ₃	C ₄	D ₁	E ₂	86.93
8	A ₂	B ₄	C ₃	D ₂	E ₁	83.84
9	A ₃	B ₁	C ₃	D ₄	E ₂	83.56
10	A ₃	B ₂	C ₄	D ₃	E ₁	89.58
11	A ₃	B ₃	C ₁	D ₂	E ₄	84.38
12	A ₃	B ₄	C ₂	D ₁	E ₃	82.16
13	A ₄	B ₁	C ₄	D ₂	E ₃	79.47
14	A ₄	B ₂	C ₃	D ₁	E ₄	86.02
15	A ₄	B ₃	C ₂	D ₄	E ₁	81.98
16	A ₄	B ₄	C ₁	D ₃	E ₂	80.07
K1	373.19	343.76	352.59	349.53	349.82	
K2	350.82	366.10	347.22	344.46	347.33	
K3	339.67	346.29	346.42	348.96	348.34	
K4	327.54	335.07	344.98	348.26	345.72	
k1	93.2973	85.9400	88.1487	87.3820	87.4562	1356.22
k2	87.7040	91.5200	86.8061	86.1162	86.8326	
k3	84.9183	86.5719	86.6041	87.2405	87.0860	
k4	81.8844	83.7675	86.2450	87.0651	86.4291	
R	11.4129	7.7600	1.9038	1.26585	1.0272	

由表 2 可以看出, $R_B > R_A > R_C > R_E > R_D$, 因此, 影响因素的主次顺序从大到小依次为 B、A、C、E、D, 即单体物质的量的比 $[n(\text{HEMA})/n(\text{AMPS})] >$ 单体物质的量的比 $[n(\text{HEMA})/n(\text{IA})] >$ 引发剂质量分数, 反应温度和反应时间影响较小。方案 $A_1B_2C_1D_4E_1$ 和 $A_1B_2C_1D_1E_3$ 阻垢效果相近, 比较两者合成条件发现, 从工业化生产经济和安全方面考虑, 后者反应温度较低, 反应时间适中, 因而选择最优方案为 $A_1B_2C_1D_1E_2$, 即 $n(\text{HEMA})/n(\text{IA}) = 1:1$, $n(\text{HEMA})/n(\text{AMPS}) = 1:1$, 引发剂质量为单体总质量的 6%, 反应温度为 80℃, 反应时间(滴加时间和保温反应时间)为 2 h 和 2.5 h。按照最佳反应条件进行验证实验, 并通过静态阻垢法测试, 合成的共聚物的阻垢率高达 97.1%, 具有良好的阻碳酸钙结垢效果。

由表 2 可以看出, 单体配比对共聚物的合成影响力最大。在保持单体物质的量的比 $[n(\text{HEMA})/n(\text{IA})]$ 不变情况下, 随着 AMPS 加入量的增大, 阻垢率先升高再下降。当 $[n(\text{HEMA})/n(\text{AMPS})] = 1:1$, 阻垢率达到最大值, 继续增大 AMPS 物质的量时, 单体的自由基聚合受到 AMPS 空间位阻效应和极性因素的限制, 加大聚合难度, 且 AMPS 发生自聚更加增大共聚物分子质量, 降低阻垢率; 当 AMPS 物质的量较低时, HEMA 较为稳定, IA 易发生链转移, 羧基的含量和共聚物的电荷密度较低, 吸附力较低, 共聚物的分子质量也均迅速下降, 故阻垢率较低。

在保持单体物质的量的比 $[n(\text{HEMA})/n(\text{AMPS})]$ 不变情况下, 随着单体 IA 投加量的增大, 阻垢率逐渐下降, 当 IA 物质的量较小时, 易生成分子质量较大的共聚物, 当 IA 单体物质的量较多时, 聚合略困难, IA 单体的转化效率并不高, 反而会析出未反应完全的单体衣康酸。

因此需要合成共聚物的单体物质的量的比适当, 分子链中羧基、酯基和磺酸基所占比例均衡, 共聚物才会发挥出良好的阻垢效果。

2.2 共聚物 IR 图谱解析

IA-HEMA-AMPS 的 FT-IR 分析结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 1 630 cm^{-1} 处 C=C 吸收峰的消失说明单体已经完全发生了聚合反应。3 112 cm^{-1} 处出现羟基(—OH)伸缩振动峰, 1 715 cm^{-1} 处出现羧基(C=O)伸缩振动峰, 说明共聚物中含有羧基团; 1 240 cm^{-1} 处为酯基中—C—O 的伸缩振动吸收峰, 由此峰与 1 715 cm^{-1} 处出现的羧基伸缩振动吸收峰可判断此化合物具有酯类结构; 3 401 cm^{-1} 处为酰胺基中—NH 的伸缩振动吸收峰, 1 634 cm^{-1} 处为酰胺基中—C=O 的伸缩振动吸收峰, 说明共聚物分子中含有酰胺基; 1 346 cm^{-1} 处为—SO 的不对称伸缩振动吸收峰, 1 158 cm^{-1} 处为—SO 的对称伸缩振动吸收峰, 730 ~ 590 cm^{-1} 是 C—S 伸缩振动吸收峰。说明共聚物分子中含有磺酸基团。由此可以看

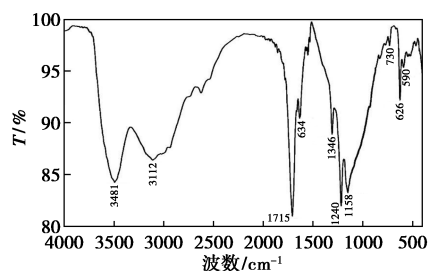


图 1 IA-HEMA-AMPS 的 FT-IR 光谱图

出,IA-HEMA-AMPS 共聚物中成功引入了磺酸、羧基、酯基、羟基、酰胺基。

2.3 IA-HEMA-AMPS 共聚物阻垢性能

选取最优方案 A₁B₂C₁D₂E₂ 下所得 IA-HEMA-AMPS 共聚物阻垢剂样品,与聚环氧琥珀酸(PESA)、聚丙烯酸(PAA)、聚天冬氨酸(PASP)、羟基乙叉二膦酸(HEDP)、二乙烯三胺五甲叉膦酸(DTPMPA)5种常见阻垢剂进行了阻碳酸钙垢性能的对比,结果如表3所示。

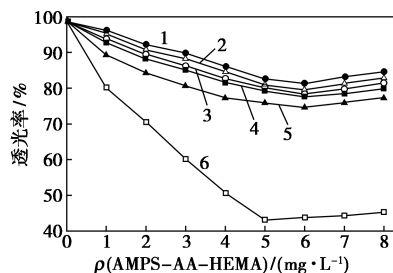
表3 IA-HEMA-AMPS 共聚物与市售抑制剂阻垢性能的比较结果

阻垢剂类型	PESA	PAA	PASP	HEDP	DTPMPA	IA-HEMA-AMPS
$\eta(\text{CaCO}_3)/\%$	64.42	60.77	73	69.39	68.32	97.1

由表3可以看出,在配制相同的硬水中均投加5 mg/L阻垢剂的情况下,5种商业阻垢剂的阻垢性能均低于自制的共聚物阻垢剂样品 IA-HEMA-AMPS。这是因为样品分子链上所含的官能团种类和数量明显多于其他阻垢剂,IA单体的引入,提高了羧酸基的质量分数,使聚合物的亲水性和螯和能力增大,高效地干扰无机盐晶格的正常生长。磺酸基对盐不敏感,具有良好的抗盐、抗温能力,酰胺基具有很强的吸附性,而 HEMA 的疏水性使得阻垢剂更易亲近垢粒。这些活性基团的增加,可在水垢生成过程中吸附于水垢结晶表面,一方面使微晶带同种电荷相互排斥,阻止晶核形成、降低晶体的增长速度;另一方面使微晶不能形成正常的水垢晶体而发生畸变,增加了 Ca²⁺ 的溶解,也阻止水垢的生成^[3-4]。从而使阻垢剂的综合性能优于单纯的羧酸基阻垢剂 PAA、PASP 等样品。

2.4 阻垢剂分散氧化铁性能评定

阻垢剂分散氧化铁性能评价结果如图2所示。



1—PESA;2—HEDP;3—PAA;4—DTPMPA;
5—PASP;6—AMPS-AA-HEMA

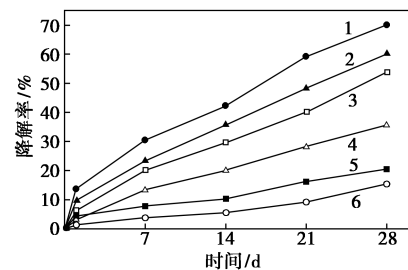
图2 IA-HEMA-AMPS 共聚物与市售抑制剂分散性能的比较结果

从图2中可以看出,阻垢剂在5 mg/L时对氧化铁便有较好的分散性能,并且存在最佳质量浓度5 mg/L,大于或小于这个浓度,分散能力都有所减弱。

当 IA-HEMA-AMPS 的质量浓度分别为 0、1.0 mg/L 时,水样中均有黄色颗粒状沉淀物,溶液基本澄清,透光率分别为 98.7%、80.1%;当阻垢剂质量浓度分别为 2、3 mg/L 时,水样中有黄色颗粒状沉淀,溶液为淡黄色略微浑浊,透光率分别为 70.5%、60.2%;当阻垢剂质量浓度分别为 4、5 mg/L 时,水样经恒温冷却后沉淀较少,透光率分别达到 50.6%、43.1%,水样呈橙黄色浑浊状悬浊液。与其他阻垢剂相比,IA-HEMA-AMPS 在质量浓度为 5 mg/L 时就已经具有很好的分散氧化铁的效果,主要是单体 AMPS 中引入了带有强电负性的磺酸基团,磺酸基团是抑制氧化铁沉积的特性基团^[5]。

2.5 生物降解性能评价

IA-HEMA-AMPS 共聚物的生物降解性能如图3所示。



1—PESA;2—PASP;3—IA-HEMA-AMPS;4—HEDP;
5—DTPMPA;6—PPA

图3 IA-HEMA-AMPS 共聚物的生物降解曲线

按照 OECD301B 标准方法中 10 d 生物降解率大于 10%、28 d 生物降解率大于 60% 为易生物降解的评价标准,从图3可看出,PESA、PASP 为易生物降解,IA-HEMA-AMPS、HEDP 为可生物降解,DTPMPA、PAA 较难降解。PESA 在 28 d 内降解率达到了 70% 以上,具有优良的降解性能,而引入磺酸基的 IA-HEMA-AMPS 共聚物的生物降解性能在 28 d 内达到 53.8%,比 PESA、PASP 明显降低,这是由于引入的磺酸基在生物降解过程中干扰了酶的聚集,造成降解过程的困难,但由于 IA 中羧基的促进,使得降解过程还是能发生。

2.6 阻垢剂晶格畸变效应

选取商业阻垢剂中阻垢效果最好的聚天冬氨酸(PASP)阻垢剂及自制的阻垢剂样品进行静态阻垢性能测定,收集实验后的碳酸钙垢,用 SEM 观察垢样形貌,结果如图4所示。

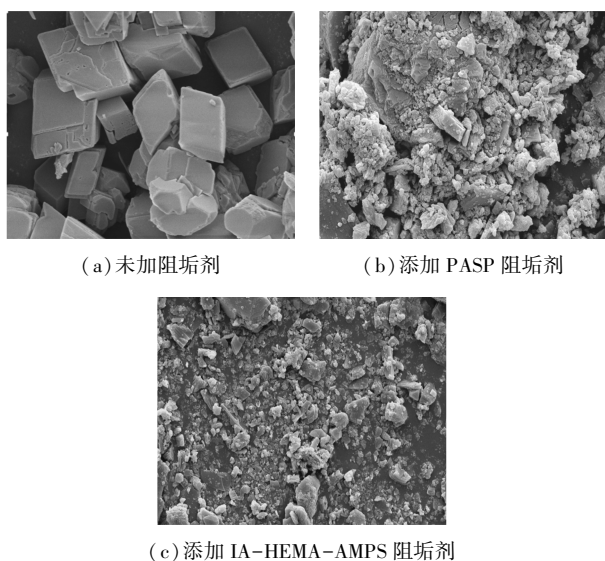


图 4 碳酸钙垢的扫描电镜图像

由图 4 可以看出,碳酸钙晶体呈现规则的立方体形状、纺锤形以及球形^[6-7],属于方解石晶型,晶体结构紧密、表面光滑、边界清晰,尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 。加入阻垢剂后,晶体外形遭受严重破坏,呈无定型的小颗粒态,共聚物吸附在晶体活性增长点上,使其变得不规则而无法增长^[8-10]。其中,聚天冬氨酸(PASP)阻垢剂使碳酸钙的晶型转变为形状不规则的球霏石晶型,IA-HEMA-AMPS 阻垢剂则使碳酸钙垢的晶型向文石的针状、叶状和块状晶体转变。

由图 4(c)中可以看出,晶体的立方体结构被破坏,观察到的垢样呈现量少且松散紊乱的现象,晶格畸变和扭曲的现象发生较少,因此,IA-HEMA-AMPS 晶格畸变效应不明显,主要体现的是吸附和分散效应。这是由于分子链上的羧酸基、酰胺基和磺酸基等活性基团作用于碳酸钙晶体表面,干扰了碳酸钙晶体的结晶取向及排列方式,其中 $-\text{COOH}$ 对 Ca^{2+} 离子起到很强的掺杂吸附作用,增高其微粒表面电荷密度,增大了微粒之间的排斥力,从而影响 CaCO_3 晶体的形态和晶格结构。从热力学观点来说,晶体生长可以降低表面能,从而促进其稳定性;IA-HEMA-AMPS 的加入可加快降低晶体表面能,使垢样在小颗粒状态就可以稳定存在,降低了他们的絮聚成垢趋势,这也改变了碳酸钙的晶体形貌。

3 结论

(1) 以衣康酸(IA)、甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)为单体,过硫酸铵为引发剂,通过水溶液自由基聚合法合

成了 IA-HEMA-AMPS 三元共聚物阻垢剂,FT-IR 图谱分析结果表明,共聚物分子中同时含有磺酸、羧基、酯基、羟基、酰胺基等阻垢分散基团,提升了阻垢和分散氧化铁的能力。

(2) 三元共聚物阻垢剂的最佳合成条件是:单体 $n(\text{HEMA}) : n(\text{IA}) : n(\text{AMPS}) = 1 : 1 : 1$,引发剂质量为单体总质量的 6%,反应温度为 80°C ,反应时间(滴加时间和保温反应时间)为 2 h 和 2.5 h。最佳工艺条件下,合成的共聚物的阻垢率高达 97.1%。

(3) IA-HEMA-AMPS 共聚物阻垢剂阻垢性能优于 PESA、PAA、PASP、HEDP、DTPMPA 等多种商业阻垢剂产品,具有优良的阻碳酸钙效果。

(4) 引入磺酸基的 IA-HEMA-AMPS 共聚物的生物降解性能在 28 d 内达到 53.8%,比 PESA、PASP 明显降低,属于可生物降解水处理剂。

(5) SEM 分析结果表明,该共聚物可将碳酸钙的晶型由稳定的正六面体型方解石转化为不稳定的片状、针状、块状文石,垢样松散,易于冲刷,从而达到优良的阻碳酸钙效果。

参考文献

- [1] 陈冠荣,时钧,朱亚杰,等.化工百科全书(第 18 卷)[M].北京:化学工业出版社,1995:314.
- [2] 张兴民,冯恩娟,徐正华,等.聚羧酸类减水剂的分子设计与结构性能关系[J].化工进展,2008,27(6):913-916.
- [3] 王世娟,符嫦娥,杨维本.含聚乙二醇长侧链的无磷阻垢剂合成与阻磷酸钙性能[J].精细化工,2011,28(12):1209-1213.
- [4] Zhou Xiaohui, Sun Yonghong, Wang Yingzhan. Inhibition and dispersion of polyepoxysuccinate as a scale inhibitor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(S0): 159-161.
- [5] 林宁宁,聂宗利,武玉民. IA-SSS-MA 三元共聚物的阻垢性能研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 11(9): 3134-3137.
- [6] Shen Zhanhui, Li Jiansheng, Xu Ke, et al. The effect of synthesized hydrolyzed polymaleic anhydride (HPMA) on the crystal calcium carbonate[J]. Desalination, 2012, 284: 238-244.
- [7] Shakkthivel P, Vasudevan T. Acrylic acid-diphenylamine sulphonic acid copolymer threshold inhibitor for sulphate and carbonate scales in cooling water systems[J]. Desalination, 2006, 197(1-3): 179-189.
- [8] 叶天旭,刘延卫,李孟,等.新型马来酸酐-丙烯酰胺-丙烯酸甲酯共聚物的阻垢特性研究[J].应用化工,2011,40(12):2067-2070.
- [9] Wang H, Zhou Y, Yao Q, et al. Synthesis of fluorescently tagged scale inhibitor and evaluation of its calcium carbonate precipitation performance[J]. Desalination, 2014, 340: 1-10.
- [10] Hasson D, Shemer H, Sher A. State of the art of friendly "green" scale control inhibitors: A review article [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(12): 7601-7607. ■