

绿色环保型三元共聚物阻垢剂的合成及其性能研究

王明超¹, 王 鹏²

¹山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

²山东科技大学化学与生物工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2022年1月28日; 录用日期: 2022年2月22日; 发布日期: 2022年3月1日

摘 要

以衣康酸(IA)、丙烯酰胺(AM)和3-烯丙氧基-2-羟基-1-丙磺酸钠(AHPSE)为原料, 过硫酸钾($K_2S_2O_8$)为引发剂, 异丙醇为链转移剂, 通过水溶液自由基聚合的方法合成新型绿色无磷的三元共聚物阻垢剂 IA-AM-AHPSE。以碳酸钙阻垢率为评价标准, 利用单因素法讨论了聚合工艺条件对共聚物阻垢效果的影响, 得出最佳聚合工艺条件。结果表明, n (IA):n (AM):n (AHPSE)为5:0.6:1, 引发剂用量为10%, 反应时间为4 h, 链转移剂用量为9%, 反应温度为70°C, 合成的共聚物阻垢性能最佳, 在用量为120 mg/L时对碳酸钙的阻垢率能达到65%。通过X射线粉末衍射仪和电子扫描电镜对阻垢剂机理进行探究。结果表明, 合成的新型阻垢剂对水中碳酸钙垢的阻垢机理主要为晶格畸变作用减少晶体密集度, 从而使结垢松散, 不易聚集。

关键词

三元阻垢剂, 共聚物, 循环水处理, 晶格畸变阻垢

Study on Synthesis and Properties of Green Environmental Friendly Terpolymer Scale Inhibitor

Mingchao Wang¹, Peng Wang²

¹School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²School of Chemistry and Bioengineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Jan. 28th, 2022; accepted: Feb. 22nd, 2022; published: Mar. 1st, 2022

Abstract

A new green phosphorus free terpolymer scale inhibitor IA-AM-AHPSE was synthesized by aqueous radical polymerization with itaconic acid (IA), acrylamide (AM) and sodium 3-allyloxy-2-hydroxy-1-propanesulfonate (AHPSE) as raw materials, potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) as initiator and isopropanol as chain transfer agent. Taking the scale inhibition rate of calcium carbonate as the evaluation standard, the influence of polymerization process conditions on the scale inhibition effect of copolymer was discussed by single factor method, and the optimum polymerization process conditions were obtained. The results show that n (IA):n (AM):n (AHPSE) is 5:0.6:1, the amount of initiator is 10%, the reaction time is 4 hours, the amount of chain transfer agent is 9%, and the reaction temperature is 70°C. The scale inhibition performance of the synthesized copolymer is the best. When the amount is 120 mg/L, the scale inhibition rate of calcium carbonate can reach 65%. The mechanism of scale inhibitor was studied by X-ray powder diffractometer and electron scanning electron microscope. The results show that the scale inhibition mechanism of the synthesized new scale inhibitor on calcium carbonate scale in water is mainly lattice distortion, reducing crystal density, so that the scale is loose and not easy to aggregate.

Keywords

Ternary Scale Inhibitor, Copolymer, Circulating Water Treatment, Lattice Distortion Scale Inhibition

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水是人类生存不可缺少的自然资源, 水的污染和资源不足严重制约着工农业的发展, 影响人类社会的发展[1]。工业生产会产生大量废热, 使用冷却水将废热带离工业体系(水冷)是常用的传热方法, 在此过程中冷却水的循环和不断蒸发会导致钙镁等离子浓度增加导致水垢的产生, 根据水质不同会产生诸如碳酸钙、硫酸钙、碳酸镁等不同成分的水垢, 严重影响设备运行[2] [3]。例如, 高庆凯对寺河煤矿常店瓦斯抽采泵站循环水研究发现原水中总硬度、钙、镁、硫酸盐、溶解性总固体的超标, 循环水存在严重结垢现象[4]。管道循环水设备或管道内表面会水垢沉积物时, 不仅影响循环水的运行, 同时也会因水垢传热不佳, 降低循环冷却水的冷却效率, 影响设备的正常运行[5]。

为了减少水垢的不利影响, 研究人员已经研究化学和物理的方法来解决上述问题。物理处理方法主要包括电解法、电场法、超声波法等。该类方法成本低且无二次污染, 但需要定期停机维护且操作复杂, 一般仅能处理硬度较小的水质, 不适用于水垢成分复杂的工业循环冷却水处理[6]。化学方法包括酸化法, 石灰处理法和阻垢剂处理法。该类方法有设备简单, 适用的水质范围广的优点, 但是酸化法和石灰处理法具有酸消耗量大, 处理费用较高的弊端, 且带来离子强度的升高, 不利于某些工业场景的应用, 使用阻垢剂处理法则成为工业上重要的阻垢方法, 其原理一般是在冷却水处理过程中, 利用阻垢剂与金属离子的配位基团与钙、镁离子等产生螯合增溶、吸附作用。阻垢剂处理法具有加药设备简单; 运行维护方便, 兼有阻垢分散作用, 因此添加阻垢剂是目前最流行、最可靠的方法[7] [8] [9]。

阻垢剂经历了从无机到有机, 从天然到合成, 从高磷、低磷到无磷的发展历程, 其中从低磷到无磷

化的原因是磷系阻垢剂易引起水体富营养化和生态失衡,限制了含磷阻垢剂的应用[10][11][12]。聚合物阻垢剂是阻垢剂的研究热点,一般可分为天然聚合物、羧酸类聚合物、膦基聚羧酸类聚合物、磺酸类聚合物等,且大致经历了从单元(均聚物)到二元、三元共聚物的历程。天然高分子阻垢剂主要包括单宁、淀粉、木质素等,具有易于提取,且对环境友好的特点,但其成分不稳定、阻垢效率低而逐渐淡出人们的视野[13]。合成聚合物阻垢剂克服了天然聚合物阻垢剂的众多不足,其中聚羧酸类阻垢剂起作用的官能基团为羧基,在钙离子浓度过高的工况下易产生难溶钙凝胶[14]。膦基聚羧酸类聚合物是将羧基与膦基结合在同一个分子链上,羧基和膦基起到协同增效的作用,同时降低了阻垢剂中磷元素的含量,但磷系阻垢剂存在的问题同样也会在一定程度上出现[15]。无磷聚合物如聚天冬胺酸(PASP)和聚环氧琥珀酸(PESA)由于其环境效益近年来备受关注,这类阻垢剂在阻垢剂浓度 6 mg/L 时即可达到 90%的阻垢率,但原料价格昂贵限制了其工业应用[16]。近年来,既含弱酸基团又含强酸基团的二元、三元共聚物的研制尤为引人注目,并已有相关产品问世。水溶性的磺酸类阻垢剂既含弱酸基团(-COOH)、又含较强酸基团(-SO₃H),符合这种发展趋势,且具有以下特点:它受水中是否存在其它金属离子的影响小,对钙、镁等盐垢有良好的阻垢性能[17]。此外,相比于聚羧酸类阻垢剂,由于进一步导入了磺酸基团,使共聚物具有多功能性,可有效地防止难溶性聚合物钙盐凝胶的产生。因此,开发无磷的绿色环保型共聚物阻垢剂是水处理领域的重要研究方向[18][19][20]。

在本研究中,我们制备了一种无磷共聚物阻垢剂。以衣康酸(IA)、丙烯酰胺(AM)和 3-烯丙氧基-2-羟基-1-丙磺酸钠(AHPSE)为原料,其中 3-烯丙氧基-2-羟基-1-丙磺酸钠中的磺酸基是强酸性基团,有助于聚合物在水中的溶解,还可以有效地防止水中离子与共聚物中弱亲水性基团的反应,有效地提高了共聚物阻垢剂在高矿化度水中的阻垢效果;衣康酸中的亲水性极性基团羧基氧原子具有未共用电子对可以成为吸附中心,与水中的金属离子形成配位螯合物,吸附于金属表面上,形成保护膜,抑制水垢晶体的生长[18][19];丙烯酰胺中的酰胺基是可对碳酸盐特别是碳酸钙微粒产生吸附、分散作用,起到阻垢和分散的作用,通过水溶液自由基聚合合成 IA-AM-AHPSE 三元共聚物阻垢剂。我们合成的聚合物分子中同时引入酰胺、羧基、羟基、磺酸等多种官能团,提高了阻垢稳定性,提高了阻垢性能[21]。通过扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线粉末衍射(XRD)等技术研究了共聚物对 CaCO₃ 沉积物的形貌和晶体结构的影响,揭示了阻垢剂的阻垢机理,为共聚物阻垢剂的制备提供指导[22]。

2. 实验部分

2.1. 主要仪器与药品

仪器: DF-101Z 集热式恒温加热磁力搅拌器(河南省予华仪器有限公司), HH-8 型数显恒温水浴锅(常州金坛良友仪器有限公司), Nicolet iS50 FT-IR 傅里叶变换红外光谱仪(Thermo Fisher Scientific), DHG-9050A 电热恒温鼓风干燥箱(南京东迈科技仪器有限公司), TESCAN MIRA LMS 扫描电子显微镜(捷克 Tescan 公司)。

药品: 衣康酸, 过硫酸钾, 丙烯酰胺, 乙醇, 异丙醇, 乙二胺四乙酸钠及其它试剂均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 3-烯丙氧基-2-羟基-1-丙磺酸钠(AHPSE) 40% Wt 水溶液, 上海毕得医药科技股份有限公司。

2.2. IA-AM-AHPSE 三元共聚物的合成

氮气气氛下,在装有电动搅拌器、冷凝管、温度计以及恒压滴液漏斗的 100 mL 四口烧瓶中,先加入 3.56 g 的 IA、0.24 g 的 AM 和 10 mL 蒸馏水,70℃下加热溶解单体。再用 5 mL 蒸馏水将 0.45 g 的异丙醇和 1.19 g 的 AHPSE 配成混合溶液,用 5 mL 蒸馏水溶解 0.5 g 过硫酸钾。用恒压滴液漏斗同时滴加以上

两种溶液,控制滴加速度,45 min 内滴加完毕后,保温 4 h,取出冷却后即得阻垢剂水溶液。IA-AM-AHPSES 三种单体在水溶液中自由聚合的反应方程式如下图 1 所示:

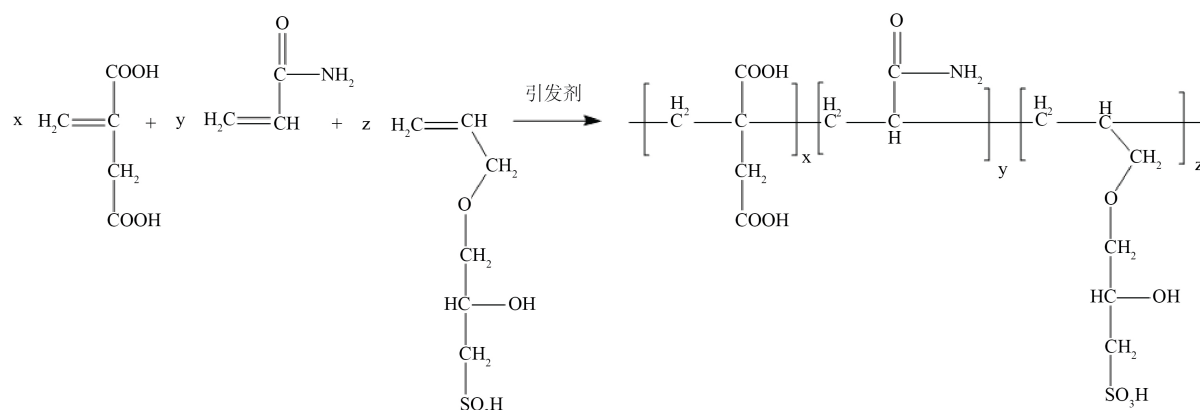


Figure 1. Synthesis reaction formula of IA-AM-AHPSES terpolymer
图 1. IA-AM-AHPSES 三元共聚物合成反应式

2.3. 共聚物的表征及性能测试

2.3.1. FT-IR 表征

取共聚产物,用 30%的 NaOH 调节 pH 为 7~8,无水乙醇溶液沉析,然后过滤、洗涤,在 60℃下鼓风干燥后得淡黄色固体。IA 聚合物、AM 聚合物及 AHPSE 聚合物合成条件及后处理与 IA-AM-AHPSE 共聚物相同。采用溴化钾压片法,利用傅里叶变换红外光谱仪分别对 IA-AM-AHPSE、IA 聚合物、AM 聚合物及 AHPSE 聚合物进行结构表征。

2.3.2. 阻碳酸钙垢率的测定

采用国家标准《GB/T16632-2008 水处理剂阻垢性能的测定-碳酸钙沉积法》中的实验方法评定阻垢剂的阻垢性能。主要过程是:0.5 L 的配置水样 Ca^{2+} (240 mg/L)和 HCO_3^- (732 mg/L)加入一定量的阻垢剂(非特别注明,实验中阻垢剂浓度均为 120 mg/L),在 80℃条件下保温 10 h。然后冷却、过滤,用钙离子浓度计测定滤液中钙离子的含量,按下式计算阻垢率 η :

$$\eta = (\rho_4 - \rho_3) / (0.240 - \rho_3) \quad (1)$$

(1)式中: ρ_4 ——加入水处理剂的试液试验后的钙离子浓度, mg/mL; ρ_3 ——未加水处理剂的空白试液试验后的钙离子浓度, mg/mL; 0.240——试验前配置好的试液中钙离子浓度的数值, mg/mL。

2.3.3. XRD 与 SEM 测试

上述实验条件下制得水样冷却至室温、过滤,取沉淀进行洗涤、干燥后制成 CaCO_3 垢样。X 射线粉末衍射仪的扫描范围 20°~60°,管电压和电流分别为 40 kV 和 50 mA。扫描速率 8°/min;将垢样喷金处理后,在 20 kV 加速电压下扫描电子显微镜下观测表面形貌。

3. 结果与讨论

3.1. 共聚物红外图谱分析

从共聚物的红外谱图 2 中可以看出:在 3454 cm^{-1} 处为羟基的-OH 伸缩振动吸收峰;1727.34 cm^{-1} 处为羧酸基中 C=O 的伸缩振动的强吸收峰;3400 cm^{-1} 为-NH₂ 的特征吸收峰,1672 cm^{-1} 为酰胺基中 C=O

的特征吸收峰; 1137.94 cm^{-1} 处为 $-\text{SO}_3^-$ 特征吸收峰, 622.79 cm^{-1} 处为 C-S 的伸缩振动吸收峰, 并且在 $1635\sim 1620\text{ cm}^{-1}$ 没有出现碳碳双键特征吸收峰, 表明单体充分进行了共聚反应。由以上吸收峰说明产物中含有氨基、磺酸基、羧基和羰基, 可以证实三种单体都参加了聚合反应。

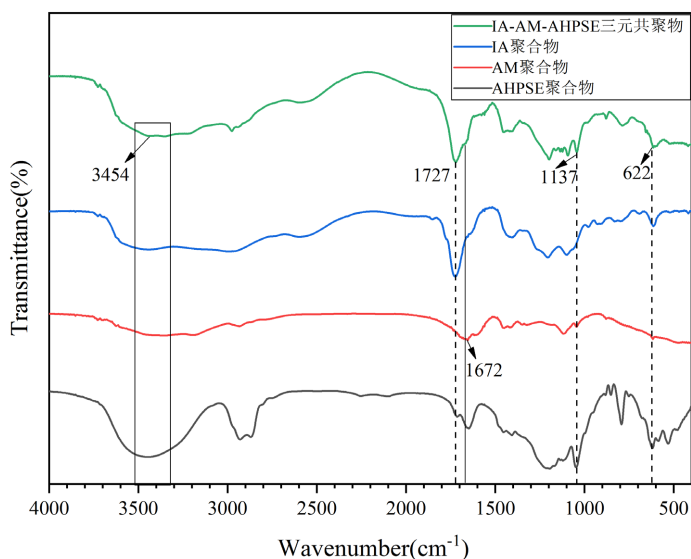


Figure 2. Infrared spectrum of IA-AM-AHPSE terpolymer
图 2. IA-AM-AHPSE 三元共聚物的红外光谱

3.2. 聚合工艺对共聚物阻垢性能的影响

3.2.1. 单体比对共聚物阻垢性能的影响

固定引发剂过硫酸钾用量为单体总质量的 10%, 链转移剂异丙醇用量为单体总质量的 9%, 在 70°C 下反应 4 h, 考察了单体比对共聚物阻垢性能的影响, 试验结果见图 3 和图 4。

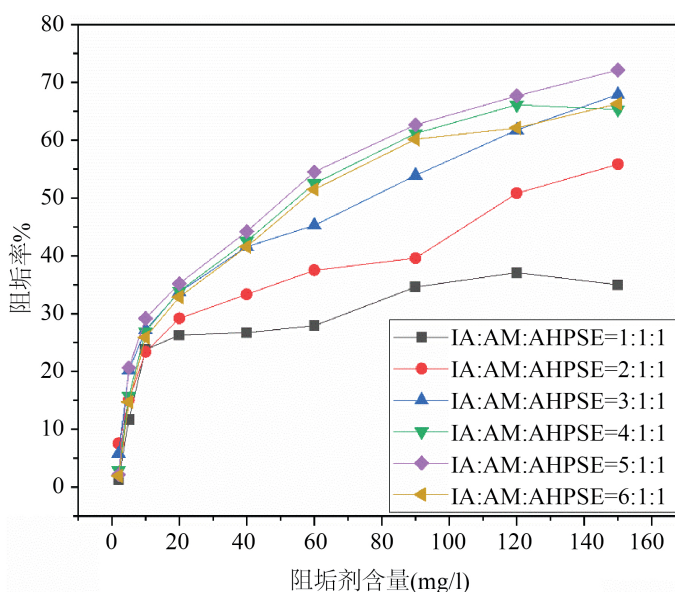


Figure 3. Effect of IA on scale inhibition rate of copolymer
图 3. IA 对共聚物阻垢率的影响

由图 3 可知, 保持共聚物中单体总量和 AM、AHPSE 的物质的量不变, 共聚物对碳酸钙的阻垢率随着单体 IA 比重增大先升高后降低, 因聚合物中羧基含量的增加有助研整合水中的钙离子, 提高阻垢率, 提高了阻垢稳定性, 但是当羧酸含量过高时, 羧基易与钙离子产生不溶物使阻垢率降低。当 $n(\text{IA}):n(\text{AM}):n(\text{AHPSE})$ 为 5:1:1 时, 共聚物对碳酸钙和磷酸钙的阻垢率可达到 65%。

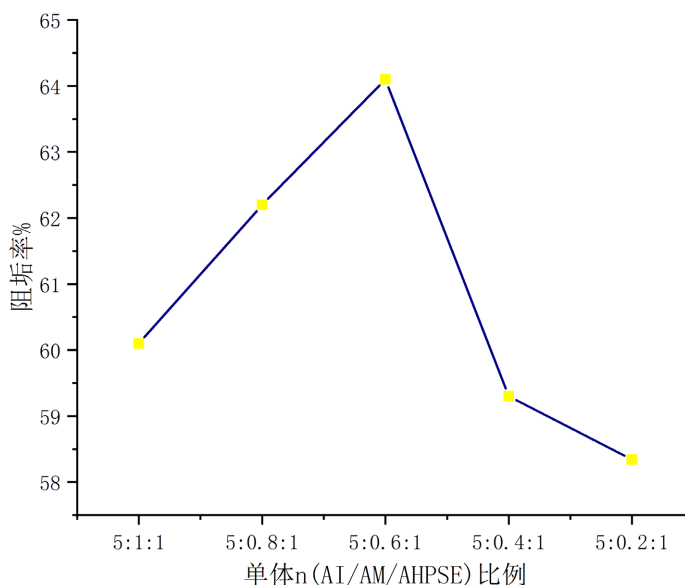


Figure 4. Effect of AM on scale inhibition rate of copolymer
图 4. AM 对共聚物阻垢率的影响

由图 4 可知, 保持共聚物中单体总量和 IA、AHPSE 的物质的量不变, 共聚物对碳酸钙的阻垢率随着单体 AM 比重增大先升高后降低, 因酰胺基可对碳酸盐特别是碳酸钙微粒产生吸附、分散作用, 起到阻垢和分散的作用, 有利于提高阻垢稳定性。当酰胺基占比较低时吸附分散碳酸钙微粒作用较弱, 阻垢率较低, 随着酰胺基所占比例的增加阻垢率增加, 当酰胺基所占比例超过最佳配比后阻垢率降低, 因各官能团相互之间具有协同增效的作用, 各官能团所占比例应在一定范围之类。从图 3 和图 4 中可以看出, 在两种单体所考察配比范围内, 聚合物的最佳配比为 $n(\text{IA}):n(\text{AM}):n(\text{AHPSE})$ 为 5:0.6:1 时, 共聚物对碳酸钙阻垢率最大。

3.2.2. 引发剂用量对共聚物阻垢性能影响

固定单体配比 $n(\text{IA}):n(\text{AM}):n(\text{AHPSE})$ 为 5:0.6:1 不变, 链转移剂用量为单体总质量的 9%, 在 70℃ 下反应 4 h, 引发剂用量对共聚物阻垢性能的影响如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 引发剂用量对共聚物阻垢性能的影响较大。所合成聚合物的阻碳酸钙垢性能随着引发剂用量的增加先增后减。引发剂用量较低时, 引发剂浓度低, 同时进行的链引发数量少, 聚合物相对分子质量大, 分子链长, 众多功能性官能被包裹在长链内, 不足以发挥其螯合、分散作用。引发剂用量太高的话, 聚合速度加快, 同时进行的链引发数量多, 且链终止也快, 导致聚合物的相对分子质量太小, 其官能团不能很好地吸附水中的金属离子形成稳定的螯合物, 阻垢率也相应降低。当引发剂用量为单体总质量的 10% 时, 共聚物的阻垢性能较好, 对碳酸钙的阻垢率可达 64.3%。

3.2.3. 链转移剂用量对共聚物阻垢性能影响

固定单体配比 $n(\text{IA}):n(\text{AM}):n(\text{AHPSE})$ 为 5:0.6:1 不变, 引发剂过硫酸钾用量为单体总质量的 10%,

在 70℃ 下反应 4 h, 分别做不同链转移剂用量的单因素试验, 对所得聚合物进行阻垢性能评定, 链转移剂用量对聚合物阻垢率的影响见图 6。

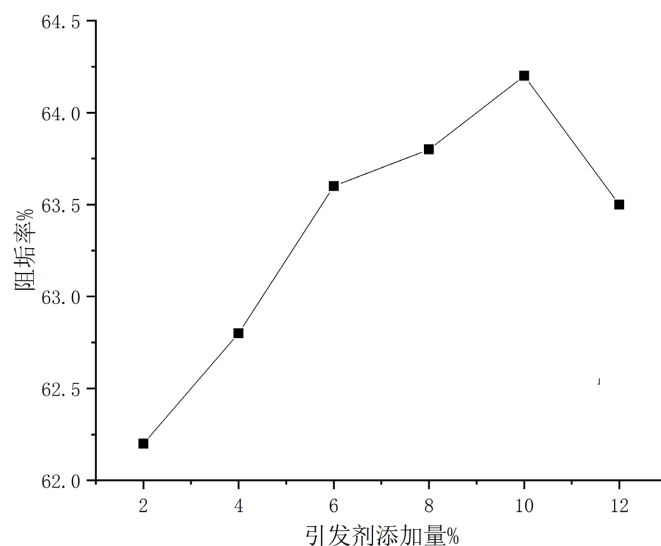


Figure 5. Effect of initiator on scale inhibition performance of copolymer

图 5. 引发剂对共聚物阻垢性能的影响

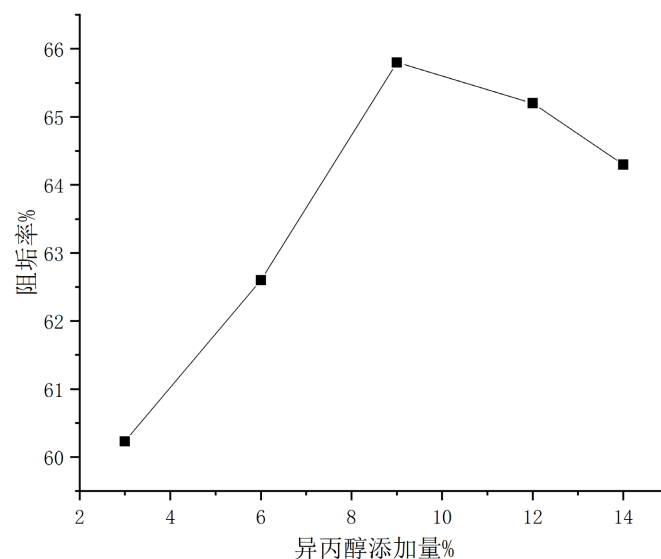


Figure 6. Effect of chain transfer agent on scale inhibition performance of copolymer

图 6. 链转移剂对共聚物阻垢性能的影响

当存在着链转移反应时, 每进行一次转移, 原有的链自由基消失形成一条大分子, 但同时却产生一个新的自由基, 它又继续引发单体聚合产生一条新的链自由基。因此, 链转移反应不影响动力学链长的大小, 但却使聚合度下降, 而聚合度的大小直接影响到共聚物分子量的高低。链转移剂量的只有在一个合理的范围内, 才能使共聚物发挥其较好的阻垢性能。从图可以看出, 链转移剂量占单体质量的 9% 时, 阻垢性能最好。

3.2.4. 反应温度共聚物阻垢性能影响

固定单体配比 $n(\text{IA}):n(\text{AM}):n(\text{AHPSE})$ 为 5:0.6:1 不变, 反应时间 4 h, 引发剂用量占单体质量比 10%, 链转移剂用量占单体质量比为 9%, 做不同反应温度的单因素试验, 考察反应温度与聚合物阻垢性能的关系。

自由基聚合对反应温度很敏感, 反应温度过低, 引发剂分解速率慢, 自由基少, 聚合反应不易发生或反应速度太慢; 温度过高, 引发剂分解速度快, 聚合反应热量不易散出, 易发生爆聚。从图 7 中可以看出, 在所考察温度范围内, 聚合物的阻垢率随聚合温度的升高而增加, 在 70℃ 时阻垢率达到最高。

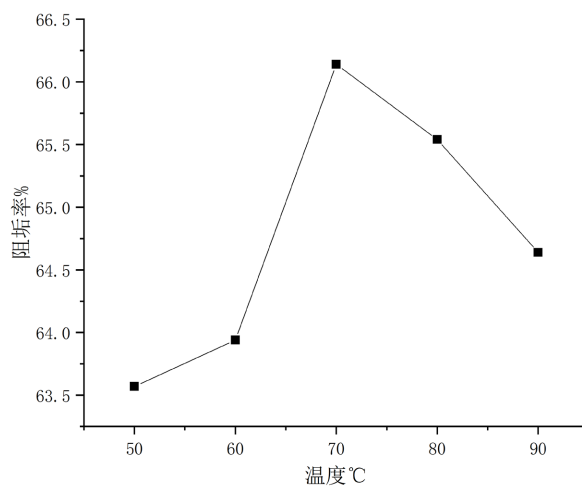


Figure 7. Effect of reaction temperature on scale inhibition performance of copolymer

图 7. 反应温度对共聚物阻垢性能的影响

3.2.5. 反应时间对共聚物阻垢性能影响

固定单体配比 $n(\text{IA}):n(\text{AM}):n(\text{AHPSE})$ 为 5:0.6:1, 在反应温度 70℃, 引发剂用量为 10%, 链转移剂用量为 9% 的条件下, 考察了反应时间对共聚物阻垢性能的影响, 结果如图 8 所示。

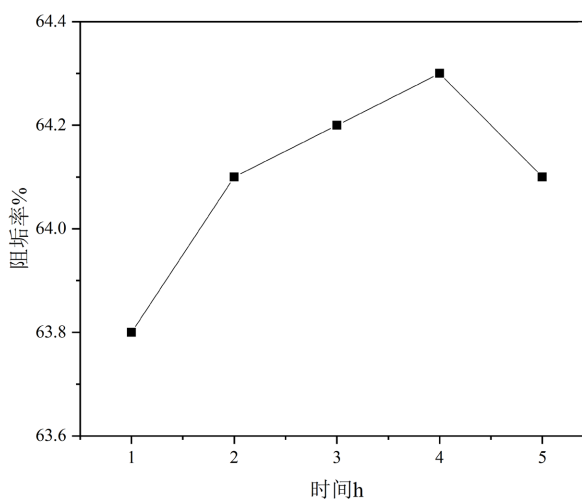


Figure 8. Effect of reaction time on scale inhibition performance of copolymer

图 8. 反应时间对共聚物阻垢性能的影响

从图 8 中可以看出, 随着反应时间的增加, 共聚物的阻垢率逐渐提高。说明适当的延长反应时间可使共聚反应充分进行, 有利于提高单体的转化率, 而提高共聚物的阻垢性能。当反应时间达到 4 h 时, 共聚物的阻垢率已达到较高水平。

3.3. Ca^{2+} 质量浓度对共聚物阻碳酸钙垢性能的影响

在 HCO_3^- 浓度为 732 mg/L, 共聚物用量 120 mg/L, 80℃ 恒温 10 h 所得钙离子浓度与共聚物阻垢率的关系曲线。

由图 9 可知, 共聚物阻垢率随钙离子浓度增加而呈下降趋势, 当成垢阳离子浓度增加时, 沉淀化学平衡向结垢方向移动, 阻垢率下降。当钙离子浓度为 420 mg/L 时阻垢率依然大于 50%, 具有较高的钙容忍度。

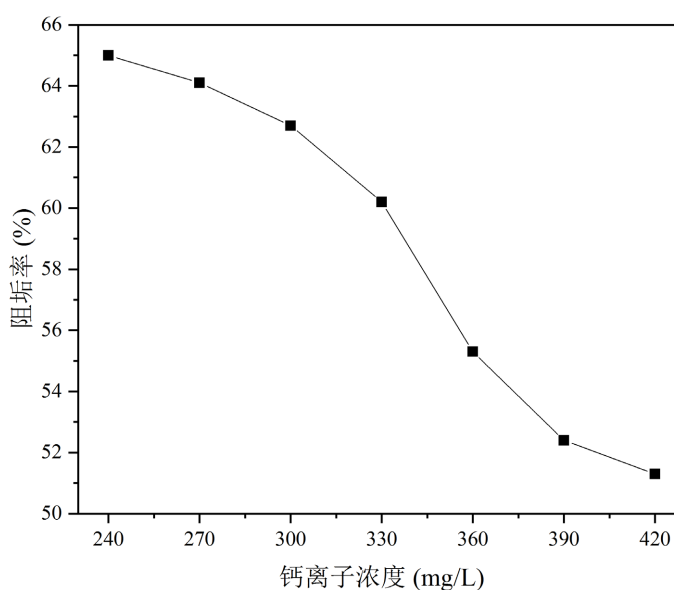


Figure 9. Effect of mass concentration of Ca^{2+} on carbon scale inhibition of copolymer

图 9. Ca^{2+} 质量浓度对共聚物阻碳酸钙垢性能的影响

3.4. 碳酸钙晶体的 XRD 分析

利用 XRD 研究了在不同阻垢剂浓度下形成的 CaCO_3 晶型。图 10 显示未添加阻垢剂的晶体中稳定的方解石晶体的强衍射峰, 表明空白组中 CaCO_3 晶体的结构主要是方解石。当添加不同浓度的阻垢剂时, 稳定的方解石晶体的衍射峰强度明显降低, 其表明阻垢剂的加入使得方解石的晶体化程度降低, 颗粒尺寸减小。这些实验结果表明, 三元共聚物阻垢剂可以改变 CaCO_3 晶体的形貌和结构, 阻垢剂可以抑制晶体正常或有序生长并扭曲晶格, 从而抑制和破坏晶体的形成。

3.5. 扫描电子显微镜(SEM)分析

通过对加入阻垢剂前后水样中分别生成的电镜扫描, 可以对阻垢剂作用机理的研究提供相关依据。

由图 11(a)和图 11(b)可看出, 在不加阻垢剂时, 碳酸钙垢表面光滑, 结构紧密, 形成六方晶型, 这种形状有利于晶胞堆积和晶体的进一步成长。图 11(c)和图 11(d)在添加了 20 mg/L 阻垢剂浓度下, 生成的碳酸钙垢电镜图, 水垢形状与结构都发生了明显的变化, 晶貌呈现不规则且粗糙, 结构松散, 晶体表面

出现许多裂纹, 其中还分布了一些细小的颗粒。可知, 添加阻垢剂可引起晶格畸变, 原来规则的六方晶型结构被破坏, 生长呈现混乱状态, 形成了小而不稳定的晶体, 抑制了垢层的形成和增长。

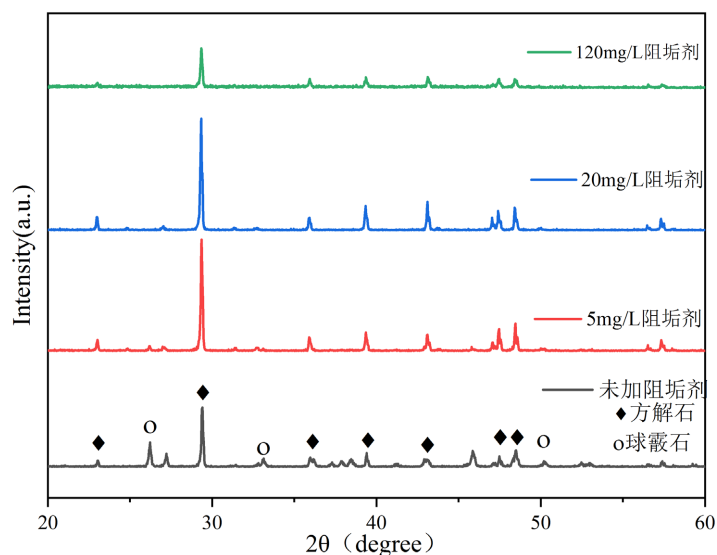


Figure 10. XRD analysis of calcium carbonate crystal
图 10. 碳酸钙晶体的 XRD 分析

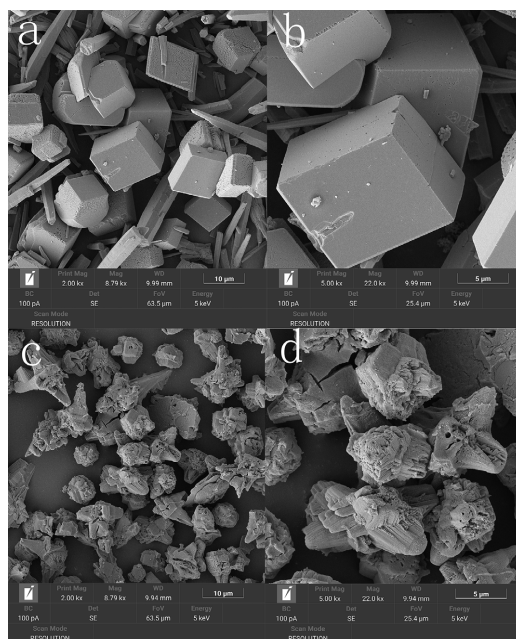


Figure 11. SEM image of CaCO_3 crystal without scale inhibitor (a) (b); SEM image of CaCO_3 crystal at the concentration of 20 mg/L scale inhibitor (c) (d)
图 11. 无阻垢剂 CaCO_3 晶体的 SEM 图像(a) (b); 20 mg/L 阻垢剂浓度下 CaCO_3 晶体的 SEM 图像(c) (d)

4. 结论

在以 IA、AM、AHPSE 作为单体、过硫酸钾作为引发剂, 通过自由基聚合合成了环保无磷的三元共

聚物 IA-AM-AHPSE, 其最佳合成条件 n (IA):n (AM):n (AHPSE)为 5:0.6:1, 引发剂用量为 10%, 反应时间为 4 h, 链转移剂用量为 9%, 反应温度为 70℃, 合成的共聚物阻垢性能最佳, 在用量为 120 mg/L 时对碳酸钙的阻垢率能达到 65%。X 射线衍射分析结果表明, IA-AM-AHPSE 加入使晶体晶型出现畸变、方解石的晶体化程度降低, 晶粒变小。通过 SEM 观察证明自制的 IA-AM-AHPSE 三元共聚物阻垢剂可以将碳酸钙垢的晶型从相对稳定的方解石转变为不稳定的块状球霏石结构, 从而达到较好的阻垢目的。

参考文献

- [1] 苏玉凤, 岳春妹, 金浩, 等. 电厂工业循环冷却水联合处理方案讨论[J]. 电力与能源, 2021, 42(6): 694-698.
- [2] 杨少才, 钟锐, 姚振刚. 电厂用循环冷却水阻垢剂性能研究与应用[J]. 化工管理, 2021(26): 23-24+26.
- [3] 李逢春. 工业循环水处理的机理与方法[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(4): 196-197.
- [4] 高庆凯. 寺河煤矿深井水处理工艺的优化创新[J]. 能源与节能, 2017(4): 136-137+139.
- [5] 周本省. 循环冷却水系统中的水垢及其控制[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(1): 26-31+37.
- [6] 池伸, 高强, 王欢, 等. 应用于油田注水系统的缓蚀阻垢剂的合成及其性能[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(10): 109-115.
- [7] 周晓东, 王卫, 王凤英. 工业缓蚀阻垢剂的应用研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(4): 152-156.
- [8] 胡乐, 秦冬玲, 杨刚. 端羧基超支化聚酯阻垢剂的制备及性能研究[J]. 应用化工, 2021, 50(11): 2946-2950.
- [9] 王洋洋, 刘庆旺, 范振忠, 等. 油田常用阻垢剂的研究进展[J]. 石油化工, 2021, 50(11): 1222-1228.
- [10] 万高杰, 潘顺龙, 韩旭, 等. 低磷阻垢剂在低温多效海水淡化过程中的应用[J]. 精细化工, 2018, 35(3): 469-473.
- [11] 王树学. 有机膦酸羧酸缓蚀阻垢剂的应用试验分析[J]. 清洗世界, 2020, 36(8): 37-38.
- [12] 吴小婷. 聚丙烯酸的合成及其在模拟压水堆核电站二回路水介质中的阻垢性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [13] 成晓敏, 王海芳, 刘桂桃, 等. 单宁酸在冷却水中的阻垢性能研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(3): 65-67.
- [14] 张安琪, 张光华, 魏辉, 等. 新型磺酸基聚合物阻垢剂的合成及性能[J]. 化工进展, 2011, 30(8): 1858-1861.
- [15] 张健. 有机膦酸型水质稳定剂的合成及其缓蚀阻垢性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2001.
- [16] 杨晋辉, 刘泰, 陈艳雪, 等. 聚天门冬氨酸/盐的合成、改性及应用研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(11): 1852-1862.
- [17] 张辉明, 魏麟杰, 周念涛, 等. IA-HPA-AMPS 三元聚合物的合成及其性能研究[J]. 新技术新工艺, 2021(3): 61-66.
- [18] 周箴, 李亚红, 赵小芳, 等. 聚合物类阻垢剂在海水中的可生物降解性[J]. 应用化工, 2020, 49(9): 2178-2181+2186.
- [19] 郭雅妮, 李璐明, 苏海雯. 三元阻垢剂 IA/AA/HEMA 的制备与性能[J]. 功能材料, 2020, 51(6): 6177-6185.
- [20] 宋娜, 牛利霞. 新型绿色阻垢剂 ESA-HAPS 共聚物的合成及性能评价[J]. 科学技术创新, 2021(36): 52-54.
- [21] 李秀峰. 环保型水处理剂的应用和展望[J]. 云南化工, 2020, 47(12): 127-129.
- [22] 李美兰, 贺子纯, 穆凯飞, 等. 端羧基超支化型绿色阻垢剂的制备及阻垢性能[J]. 中国塑料, 2020, 34(9): 38-45.