

УДК 622.246

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛЕСТОЙКОГО ПОЛИМЕРА POLY(AM/NVP/APEG/DMAAC-18)

© 2023 г. Haiyang Tian^{1,2,*}, Jiapeng Zheng³, Tong Peng³, Xiaoping Qin^{1,2,**}¹ College of Chemical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, PR China² State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers (FuDan University), Shanghai 200438, PR China³ Drilling and Production Technology Research Institute, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, PR China

* E-mail: hytian0102@163.com

** E-mail: 948801727@qq.com

Поступила в редакцию 28 января 2022 г.

После доработки 2 ноября 2023 г.

Принята к публикации 19 февраля 2024 г.

Синтезирован солестойкий полимер на основе гидрофобно-ассоциирующих водорастворимых полимеров — 1-винил-2-пирролидона, аллилполиэтиленгликоля, акриламида и хлорида N,N'-диметилотдадецилаллиламмония. Изучено солевое загущение и реологические характеристики полимерных растворов. Полимерные растворы продемонстрировали превосходную способность к непрерывному загущению в широком диапазоне концентраций солей. При достижении концентраций NaCl и CaCl₂ 19.9 и 19.3% кажущаяся вязкость 1%-ного полимерного раствора увеличивалась до 660 и 330 мПа·с соответственно. В то же время полимерные растворы, содержащие высокие концентрации NaCl или CaCl₂, продемонстрировали хорошую вязкоупругость, сопротивление сдвигу и термостойкость. Сканирующая электронная микроскопия показала, что повышение концентрации соли увеличивает силу гидрофобной ассоциации полимерных растворов и плотность образующейся сетчатой структуры, что макроскопически проявляется в увеличении вязкости. Результаты этого исследования могут способствовать изучению и разработке полимеров, устойчивых к экстремальным концентрациям солей.

Ключевые слова: солестойкость; полимер; загущение; вязкость

DOI: 10.56304/S2414215823020090; EDN: IMGUYQ

Наряду с развитием разработки месторождений нефти быстро развивалась и технология ее добычи третичными методами. Сегодня основным направлением совершенствования этой технологии является полимерное заводнение, которое стало важным способом повышения нефтеотдачи и обеспечения стабильной добычи нефтяных месторождений [1–5]. Полимерное заводнение стимулирует увеличение добычи нефти за счет закачки полимеров в подземный нефтяной пласт. В основном это зависит от повышения вязкости и вязкоупругости вытесняющей жидкости и уменьшения соотношения подвижностей вытесняющей и вытесняемой жидкостей, что способствует расширению рабочего объема. Таким образом, вязкость и вязкоупругость полимера, используемого для вытеснения нефти, играют ключевую роль в эффекте вытеснения нефти [6, 7]. Кроме того, соли металлов (в том числе одно- и двухвалентные) оказывают важное влияние на

вязкость полимера, используемого для вытеснения нефти [8, 9].

В настоящее время распространенным полимером, применяемым для этой цели, является частично гидролизованый анионный полиакриламид (НРАМ), который в высокой степени подвержен адсорбции и удерживанию в пористой среде. Данный полимер также легко подвергается воздействию ионов кальция, магния, железа, серы и других двухвалентных ионов после попадания в нефтяной пласт, что приводит к ухудшению термо- и солестойкости и к ослаблению антиадсорбционной способности. Поэтому рабочая вязкость этого полимера существенно снижается, а эффект нефтевытеснения становится неудовлетворительным [10–12]. В настоящее время исследования нефтевытесняющих агентов сосредоточены в основном на амфифильных полимерах [13–16], причем в этой сфере достигнут определенный прогресс. Однако солестойкость полимеров

пока остается не слишком значительной, особенно при разработке нефтяных пластов с высокой соленостью [13, 17, 18]. В таких случаях вязкость полимерного раствора существенно падает, поэтому нефтewытесняющий эффект требует улучшения. В связи с этим существует острая необходимость в разработке нефтewытесняющих агентов, характеризующихся превосходной солестойкостью.

В настоящем исследовании для получения нового сополимера УРАМ в качестве мономеров были использованы акриламид (АМ), 1-винил-2-пирролидон (NVP), аллилполиэтиленгликоль (АРЕG) и хлорид N,N'-диметилдокадецилаллиламмония (DMAAC-18). Использование 1-винил-2-пирролидона с пятичленной кольцевой структурой могло бы повысить жесткость молекулярной цепи. Аллилполиэтиленгликоль со структурой этоксидных повторяющихся звеньев может взаимодействовать с ионами кальция, улучшая взаимодействие между молекулами полимера. Хлорид N,N'-диметилдокадецилаллиламмония, характеризующийся гидрофобной длинной цепью, может повысить солестойкость полимера за счет физического сшивания.

Полученный сополимер продемонстрировал превосходную солестойкость, а его кажущаяся вязкость могла увеличиваться с повышением концентрации соли, что указывает на хороший потенциал этого полимера для применения в пластах сверхвысокой солености.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы. Акриламид (АМ, аналитический реагент), хлорид натрия (NaCl, аналитический реагент), хлорид кальция (CaCl₂, аналитический реагент), 1-винил-2-пирролидон (NVP, 99%) и 2,2'-азобис(2-метилпропионамидин) дигидрохлорид (V50, 97%) были приобретены у компании Shanghai Macklin Biochemical Technology Co., Ltd. Хлорид N,N'-диметилдокадецилаллиламмония (DMAAC-18, 65%) был приобретен у компании Jiangsu Feixiang Chemical Group. Аллилполиэтиленгликоль (АРЕG-400, технический сорт) был приобретен на нефтехимическом заводе Jiangsu Hai'an Petrochemical Plant. Частично гидролизированный полиакриламид (НРАМ, средняя мол. масса ~22 млн) был приобретен у компании Henan Zhengjia Green Energy Co., Ltd.

Синтез сополимера УРАМ. Схема синтеза сополимера УРАМ показана на рис. 1. После растворения 1.28 г гидрофобного мономера DMAAC-18 в 62.32 г дистиллированной воды к раствору добавляли определенное количество АМ (13.82 г), АРЕG-400 (0.8 г) и NVP (0.13 г). Затем добавляли инициатор V50 и нагревали раствор в течение 7 ч при температуре 50°C до получения желеобразного продукта. Этот продукт разрезали на кусочки, трижды промывали безводным этанолом и сушили в течение 24 ч при температуре 45°C в сушильном шкафу с получением белого твердого полимера.

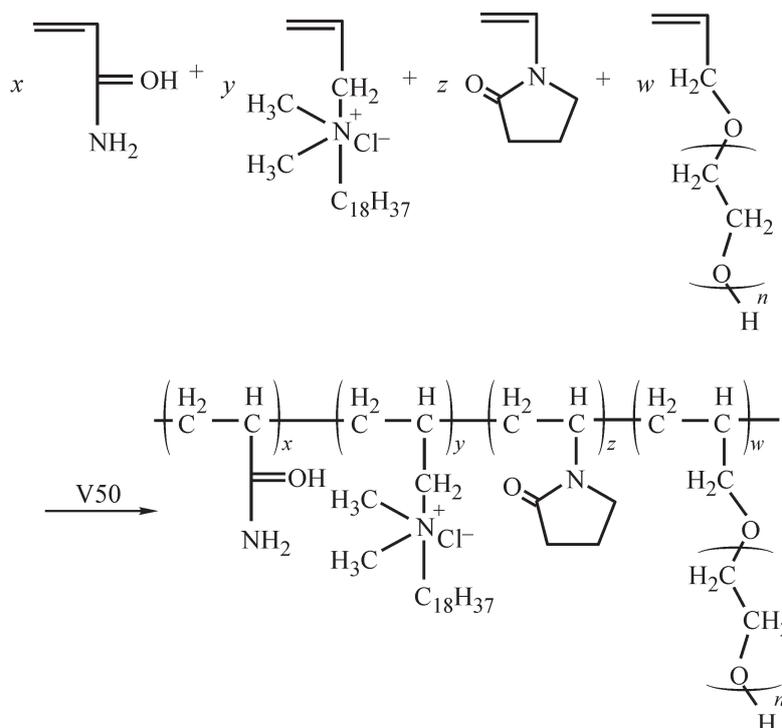


Рис. 1. Схема синтеза сополимера УРАМ.

Методы изучения структуры сополимера.

Спектральная характеристика. ИК-спектр с преобразованием Фурье (FTIR-спектр) сополимера УРАМ записывали с использованием спектрометра Perkin Elmer Frontier Near/Mid-IR Std (Массачусетс, США) и диска бромида калия. Спектр ¹H ядерного магнитного резонанса (¹H ЯМР) сополимера УРАМ в D₂O записывали на спектрометре Bruker AVANCE-600 (Германия).

Реологическая характеристика. Влияние NaCl и CaCl₂ на кажущуюся вязкость растворов сополимера УРАМ изучали при температуре 25°C с использованием шестискоростного ротационного вискозиметра ZNN-D6BH (Китай) со скоростью сдвига 100 об·мин⁻¹. Вязкоэластичность, устойчивость к сдвигу и термостойкость растворов сополимера УРАМ при высокой концентрации соли были протестированы с использованием реометра HAAK MARS III, США); уровень нагрузки при вязкоупругом испытании составлял 0.1 Па.

Измерения с помощью сканирующей электронной микроскопии. Микроструктуру сополимера УРАМ, полученного методом вакуумной сублимационной заморозки-сушки, изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Lambda 35 (компания TESCAN, Чехия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение характеристик сополимера УРАМ. FTIR-спектр сополимера УРАМ показан на рис. 2. В спектре присутствуют пики поглощения валентных колебаний следующих функциональных групп: метильной (2935 см⁻¹), метиленовой (2869 см⁻¹), пирролидинового кольца NVP (1412 и 1444 см⁻¹), связи C–N (1322 см⁻¹), –NH₂ (3428 см⁻¹), связи O–H (3190 см⁻¹), связи C–O (1120 см⁻¹) и C=O (1651 см⁻¹). Синтезированный продукт качественно можно идентифицировать как целевой продукт.

Спектр ¹H ЯМР сополимера УРАМ. ¹H ЯМР-спектр, полученный для дальнейшего уточнения структуры полимера, показан на рис. 3.

¹H ЯМР (600 МГц, D₂O): δ = 3.13 (f, h, –CH₂–, –CH₂–), δ = 1.62 (r, a, i, –CH–, –CH₂–, –CH₂–), δ = 2.03 (e, p, –CH–, O–CH₂–), δ = 1.49 (d, l, q, –CH₂–, –CH₂–, –CH₂–), δ = 3.49 (s, m, –CH₂–, –CH–N), δ = 1.02 (k, –CH₂–CH₃), δ = 3.30 (g, N–CH₃), δ = 1.35 (j, –(CH₂)₁₅–), δ = 2.20 (o, b, O=C–CH₂–, –CH–), δ = 3.55 (t, u, –CH₂–, –CH₂–).

Описанные выше характеристики подтвердили: продукты реакции в основном такие же, как и расчетные молекулы, что указывает на успешный синтез сополимера УРАМ.

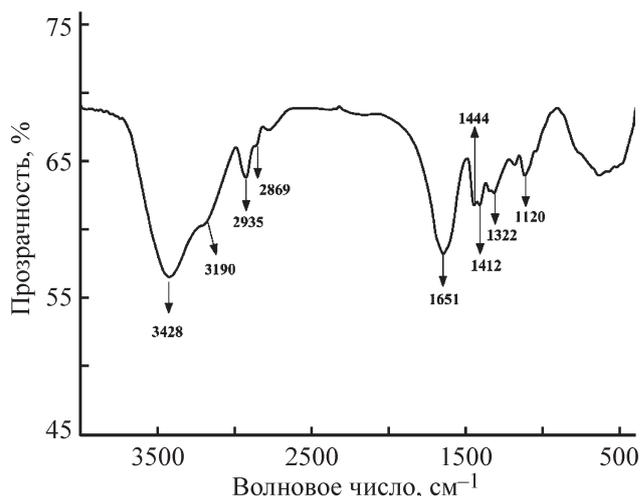


Рис. 2. FTIR-спектр сополимера УРАМ.

Молекулярная масса сополимера УРАМ. Среднечисленную (M_n) и средневесовую (M_w) мол. массы сополимера УРАМ измеряли с использованием гель-проникающего хроматографа Shimadzu Rid-20A (Япония). По результатам измерений (см. табл.) значения M_n и M_w низкими, что обеспечивало быстрое растворение сополимера УРАМ.

Солеустойкость сополимера УРАМ. Растворы сополимера УРАМ готовили путем растворения определенного количества сополимера в деионизированной воде с получением концентраций 0.8 и 1.0%.

В качестве эталонного раствора использовали 0.8%-ный раствор НРАМ (частично гидролизованного полиакриламида). К растворам сополимера УРАМ и полимера НРАМ добавляли различные количества NaCl или CaCl₂, чтобы оценить влияние этих солей на вязкость растворов сополимера УРАМ. Результаты эксперимента представлены на рис. 4 и 5.

Согласно рис. 4 и 5, кажущаяся вязкость 0.8 и 1%-ных растворов сополимера УРАМ постепенно увеличивается по мере повышения концентраций NaCl и CaCl₂, что указывает на превосходный эффект солевого загущения. Начальная вязкость раствора сополимера УРАМ была очень низкой. Например, при использовании 1%-ного раствора сопо-

Таблица. Молекулярные характеристики сополимера УРАМ

M _n (×10 ⁵)	M _w (×10 ⁵)	M _w /M _n
3.27362	9.25385	2.83

M_w/M_n — параметр, характеризующий ширину молекулярно-массового распределения (ММР).

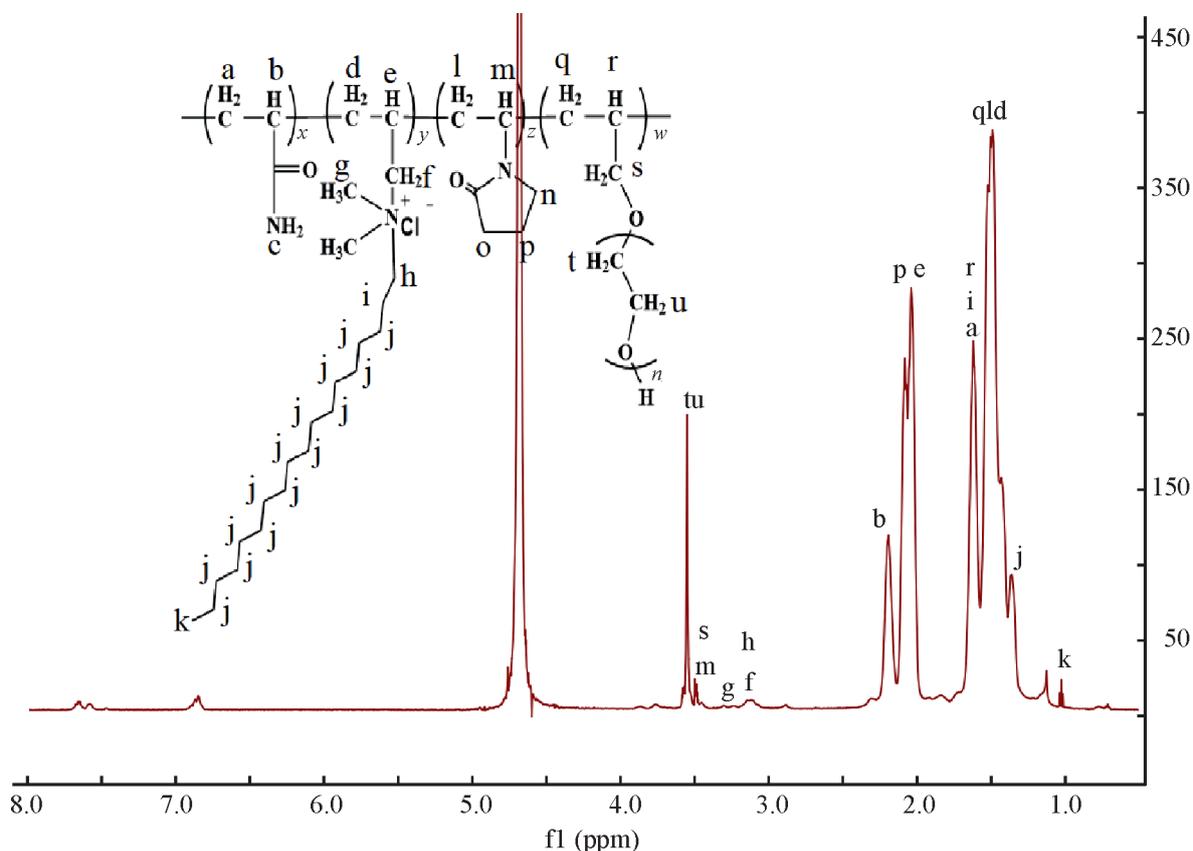


Рис. 3. Спектр ^1H ЯМР сополимера YRAM (600 МГц, D_2O).

лимера YRAM значение этого показателя составляло 6 мПа·с, что в значительной степени способствовало закачке раствора в нефтяной пласт. При достижении концентраций NaCl и CaCl_2 19.9 и 19.3%, вязкость 1%-ного раствора сополимера YRAM увеличивалась до 660 и 330 мПа·с соответственно.

Широко используемый коммерческий полимер, НРАМ показал высокую начальную вязкость (159 мПа·с) благодаря своей сверхвысокой мол. массе (22 млн Да). Однако способность раствора НРАМ противостоять воздействию NaCl и CaCl_2 низкая. В присутствии 2.4% NaCl или CaCl_2 вязкость рас-

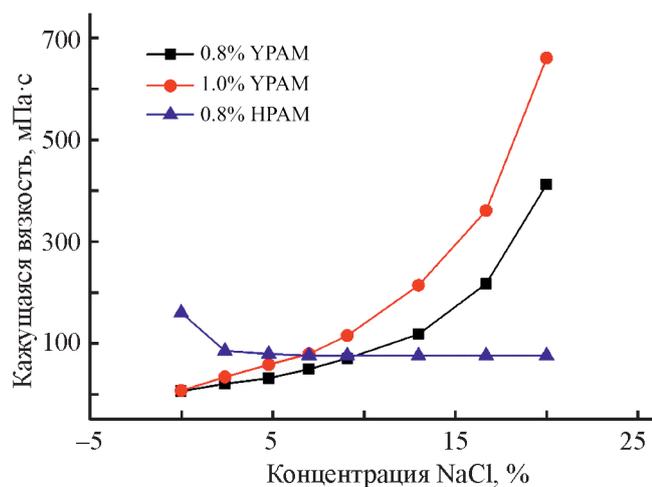


Рис. 4. Зависимость вязкости растворов сополимера YRAM различной концентрации от концентрации NaCl . В качестве эталонного образца использовали 0.8%-ный раствор НРАМ.

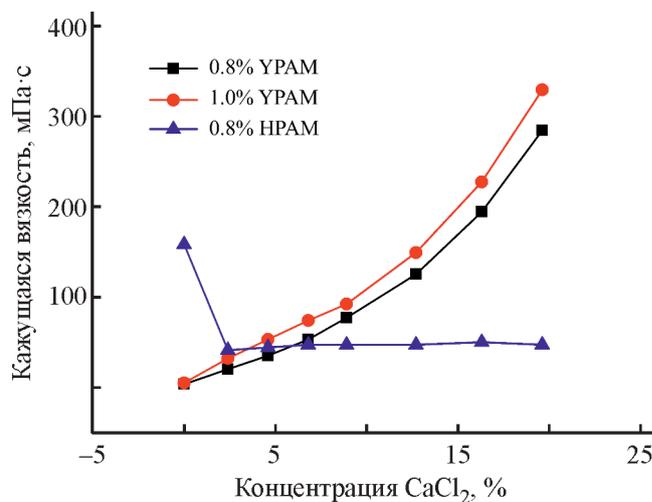


Рис. 5. Зависимость вязкости растворов сополимера YRAM различной концентрации от CaCl_2 . В качестве эталонного образца использовали 0.8%-ный раствор НРАМ.

твора полимера НРАМ быстро снижалась до 84 и 42 МПа·с соответственно. В то же время, растворы сополимера УРАМ показали превосходную устойчивость к высоким концентрациям солей; их устойчивость к хлориду натрия была выше, чем к хлориду кальция. Поскольку сополимер УРАМ продемонстрировал превосходную способность к солевому загущению, его можно использовать для приготовления нефтewытесняющих агентов для флюидов, добываемых на нефтяных месторождениях.

Пластовая вода нефтяных месторождений содержит большое количество катионов одно- и двухвалентных металлов. Использование такой воды для приготовления нефтewытесняющей жидкости на основе сополимера УРАМ было бы полезно для повышения вязкости нефтewытесняющего агента. Многократное повторное использование воды, производимой нефтяным пластом, будет не только способствовать кардинальному решению проблемы сброса сточных вод нефтепромыслов, загрязняющих окружающую среду, но и позволит снизить эксплуатационные затраты и повысить эффективность процесса. Учитывая способность сополимера УРАМ к загущению при различных концентрациях солей, количество этого полимера можно разумно регулировать в соответствии с требованиями к вязкости местного нефтewытесняющего агента и солёности образующихся сточных вод для удовлетворения действующих требований к характеристикам вытеснения."

Вязкоупругие свойства и сопротивление сдвигу соледержащего раствора сополимера УРАМ. В 1%-ный раствор сополимера УРАМ добавляли хлорид натрия или хлорид кальция для получения 1%-ных растворов сополимера УРАМ, содержащих 19.3% хлорида кальция или 19.9% хлорида натрия. Вязкоупругие свойства и сопротивление сдвигу полученных растворов измеряли реометром. Результаты эксперимента представлены на рис. 6, 7.

Согласно рис. 6, значения динамического модуля упругости и модуля потерь растворов сополимера УРАМ, содержащих 19.3% хлорида кальция или 19.9% хлорида натрия, увеличиваются с повышением частоты сканирования. На низких частотах динамический модуль упругости обоих растворов сополимера УРАМ был ниже модуля потерь, тогда как на высоких частотах ситуация была совершенно противоположной: динамический модуль упругости был выше модуля потерь, что соответствовало законам вязкоупругости. Однако частота сканирования раствора сополимера УРАМ, содержащего 19.9% хлорида натрия, при которой значение динамического модуля упругости было выше, чем значение модуля потерь, была ниже, чем у раствора

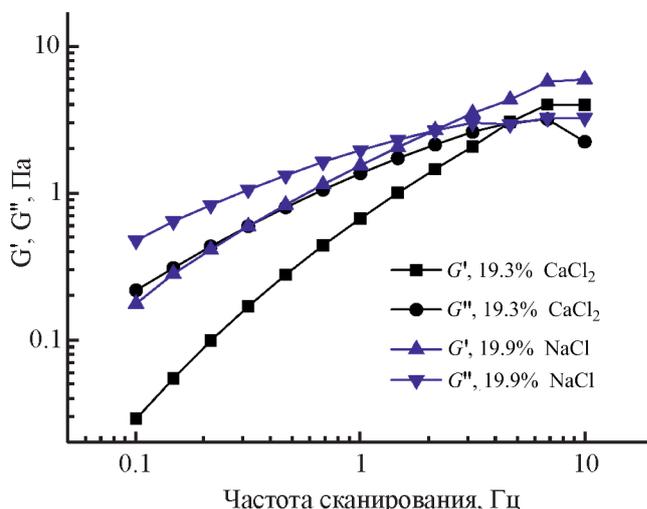


Рис. 6. Вязкоупругие свойства 1%-ных растворов сополимера УРАМ, содержащих различные соли.

сополимера УРАМ, содержащего 19.3% хлорида кальция, что показало более высокую упругость. Значения динамического модуля упругости и модуля потерь для раствора сополимера УРАМ, содержащего 19.9% хлорида натрия, были выше, чем для раствора сополимера УРАМ, содержащего 19.3% хлорида кальция. Таким образом, по сравнению с раствором сополимера УРАМ, содержащим 19.3% хлорида кальция, раствор сополимера УРАМ, содержащий 19.9% хлорида натрия, показал лучшую вязкоупругость, что согласуется с тем фактом, что стойкость сополимера УРАМ к хлориду натрия оказалась выше, чем к хлориду кальция.

Из рис. 7 видно, что по мере увеличения скорости сдвига вязкость раствора сополимера УРАМ, содержащего 19.9% хлорида натрия или 19.3% хлорида

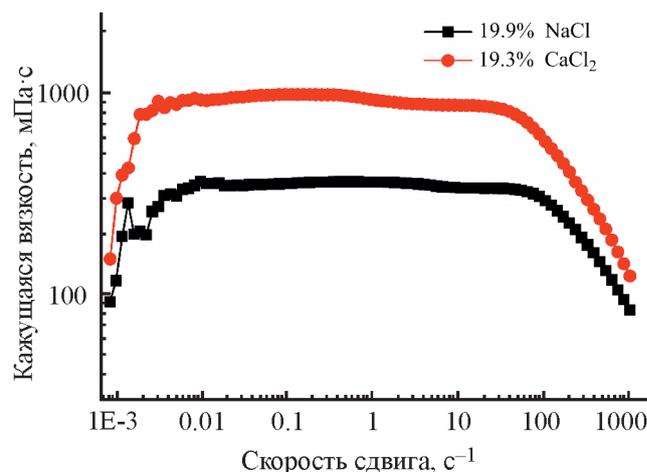


Рис. 7. Сопротивление сдвигу 1%-ных растворов сополимера УРАМ, содержащих различные соли.

рида кальция, сначала повышалась, затем стабилизировалась, а после этого уменьшалась. Когда скорость сдвига была менее $\sim 0.006 \text{ с}^{-1}$, вязкость растворов сополимера УРАМ и соли постепенно увеличивалась (явление загущения при сдвиге). Это можно объяснить тем, что сдвиг ослабляет внутримолекулярные связи и повышает возможность возникновения межмолекулярных связей, что приводит к увеличению вязкости [19, 20]. При увеличении скорости сдвига от 0.006 до 60 с^{-1} вязкость растворов солей сополимера УРАМ оставалась стабильной, поскольку под действием сопротивления сдвигу разрушение и обратимое восстановление физического сшивания гидрофобно-ассоциирующего полимера сохраняли динамическое равновесие, при этом макроскопическая вязкость оставалась стабильной. При увеличении скорости сдвига от 60 до 1000 с^{-1} вязкость растворов сополимера УРАМ постепенно уменьшалась в соответствии с законом разбавления при сдвиге. По сравнению с раствором сополимера УРАМ, содержащим хлорид кальция, раствор сополимера УРАМ с хлоридом натрия показал более сильное сопротивление сдвигу. При скорости сдвига 1000 с^{-1} кажущаяся вязкость растворов сополимера УРАМ, содержащих 19.9% хлорида натрия и 19.3% хлорида кальция, составила 124 и 84 мПа·с соответственно.

Термостойкость соледержащих растворов сополимера УРАМ. Методом экспериментальной реологии была исследована термостойкость 1%-ных растворов сополимера УРАМ, содержащих 19.3% хлорида кальция или 19.9% хлорида натрия; результаты показаны на рис. 8, 9.

На рис. 7, 8 показано, что кажущаяся вязкость растворов сополимера УРАМ снижается с повышением температуры. Кажущаяся вязкость 1%-ного раствора сополимера УРАМ, содержащего 19.9%

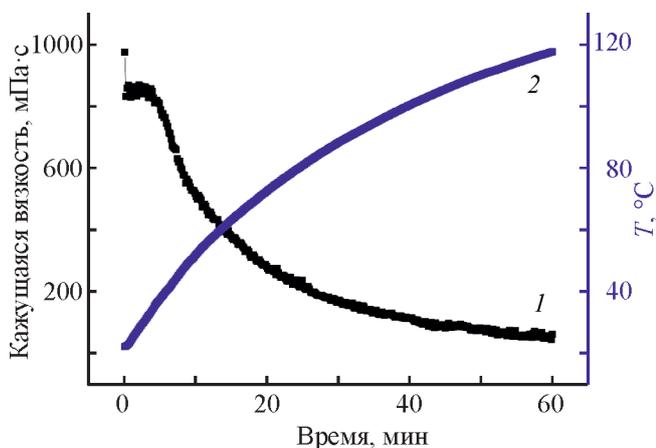


Рис. 8. Термостойкость 1%-ного раствора сополимера УРАМ с добавлением 19.9% NaCl (120°C , 170 с^{-1}).

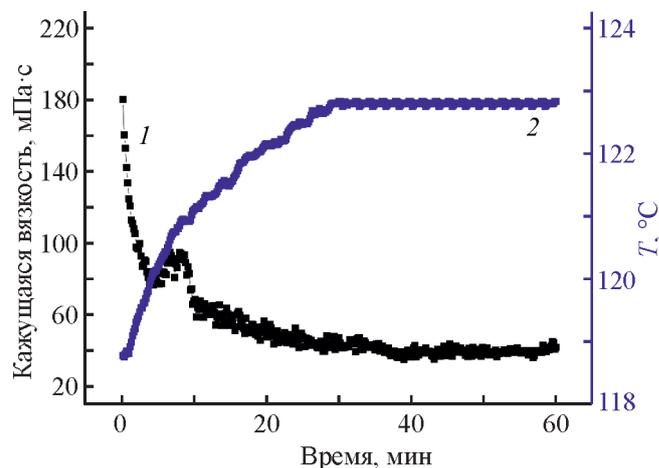


Рис. 9. Термостойкость 1%-ного раствора сополимера УРАМ с добавлением 19.3% NaCl (120°C , 170 с^{-1}).

хлорида натрия, составляла $\sim 60 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ при температуре 120°C и скорости сдвига 170 с^{-1} . Кажущаяся вязкость 1%-ного раствора сополимера УРАМ, содержащего 19.3% хлорида кальция, поддерживалась на уровне выше $40 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ после сдвига в течение 60 мин при температуре 120°C и скорости сдвига 170 с^{-1} . Растворы сополимера УРАМ, содержащие сверхвысокие концентрации хлорида натрия или хлорида кальция, продемонстрировали хорошую термостойкость даже при высокой концентрации хлорида кальция, что указывает на хорошую стойкость сополимера УРАМ к воздействию соли и температуры.

Исследование раствора сополимера УРАМ с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). В 1%-ный раствор сополимера УРАМ добавляли NaCl до концентрации соли, равной 4%. Микрофотография 1%-ного водного раствора сополимера УРАМ с 4% хлорида натрия и без него была проверена с помощью SEM. Результаты представлены на рис. 10.

Сетчатая структура бессолевого раствора сополимера УРАМ была разреженной и неплотной, а кажущаяся вязкость раствора — очень низкой. После добавления 4% хлорида натрия сетчатая структура раствора сополимера УРАМ стала более плотной. Основная цепь полимера прилипла к большому количеству молекул хлорида натрия, но сетчатый скелет молекул полимера все еще оставался четко видимым, что указывает на хорошую солейстойкость полимера. Таким образом, макроскопическое свойство проявляется очевидным возрастанием кажущейся вязкости. Это явление можно объяснить тем фактом, что добавление соли увеличивало полярность раствора сополимера УРАМ, за счет чего повышалась прочность гидрофобной длинноцепочеч-

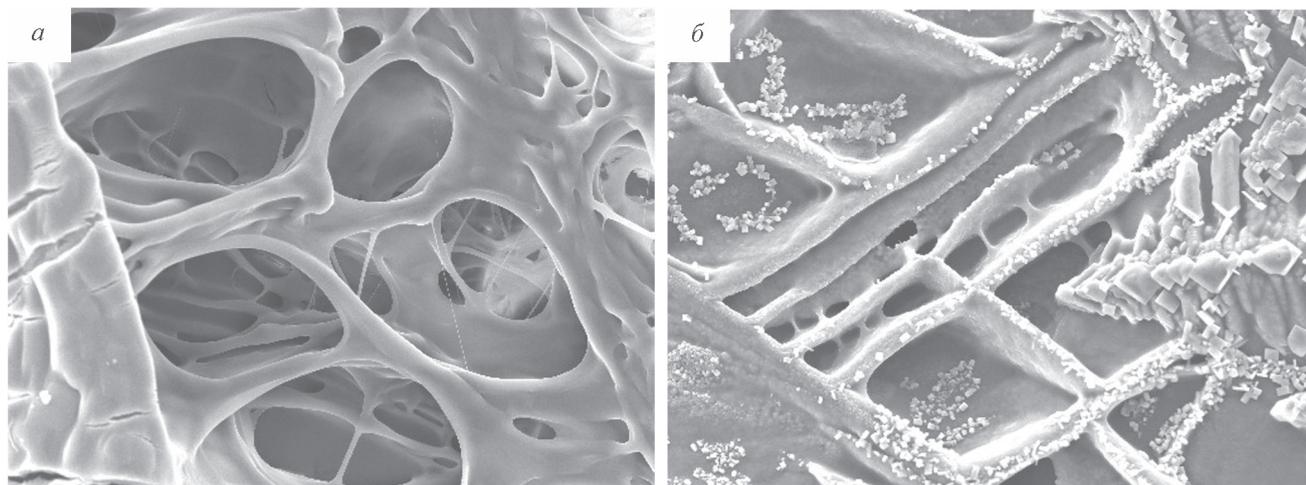


Рис. 10. Сканирующая электронная микроскопия 1%-ных растворов сополимера YRAM: *а* — водный раствор; *б* — водный раствор с добавкой 4% NaCl.

ной связи сополимера YRAM [21, 22] и возростала вязкость раствора.

ВЫВОДЫ

Синтезирован солейстойкий полимер (сополимер YRAM), содержащий AM, NVP, APEG-400 и DMAAC-18. Растворы сополимера YRAM продемонстрировали превосходную способность к солевому загущению в широком диапазоне вязкости (от очень низких до сверхвысоких значений). Кроме того, растворы сополимера YRAM, содержащие высокие концентрации хлорида натрия или хлорида кальция, показали хорошую устойчивость к сдвигу и вязкоупругость. Начальная вязкость 1%-ного раствора сополимера YRAM составляла 6 мПа·с, что было очень удобно для его закачки в нефтяной пласт. Когда концентрации NaCl или CaCl₂ достигали 19.9 и 19.3%, кажущаяся вязкость 1%-ного раствора сополимера YRAM увеличивалась до 660 и 330 мПа·с соответственно. Таким образом, раствор сополимера YRAM продемонстрировал превосходную устойчивость к высоким концентрациям NaCl и CaCl₂; кажущаяся вязкость 1%-ного раствора сополимера YRAM, содержащего 19.9% NaCl или 19.3% CaCl₂, измеренная при температуре 120°C и скорости сдвига 170 с⁻¹, составила ~60 и 40 мПа·с соответственно, что свидетельствует о хорошем потенциале применения этого полимера в растворах со сверхвысокой перминерализацией.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа была поддержана Фондом внедрения талантов Сычуаньского университета нау-

ки и техники (the Talent Introduction Foundation of the Sichuan University of Science and Engineering) (проекты № 2020RC04, 2020RC05) и Государственной ключевой лабораторией молекулярной инженерии полимеров Университета Фудань (the Opening Foundation of the State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers, FuDan University) (проекты № K2022-17, K2020-24).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Haiyang Tian

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6603-4949>

Jiapeng Zheng

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1786-0643>

Tong Peng

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5849-6841>

Xiaoping Qin

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5856-5448>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dai C. L., Zhao G., You Q., Zhao M. W.* The investigation of a new moderate water shutoff agent: Cationic polymer and anionic polymer // *J. Appl. Polym. Sci.* 2013. V. 131. ID 39462. <https://doi.org/10.1002/app.39462>
2. *Yang H. B., Shao S., Zhu T. Y., Chen C., Liu S. R., Zhou B. B., Hou X. Y., Zhang Y., Kang W. L.* Shear resistance performance of low elastic polymer

- microspheres used for conformance control treatment // *J. Ind. Eng. Chem.* 2019. V. 79. P. 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.07.005>
3. Yang H. B., Hu L. L., Chen C., Zhao H., Wang P. X., Zhu T. Y., Wang T. Y., Liang Z., Fan H. M., Kang W. L. Influence mechanism of fluorescent monomer on the performance of polymer microspheres // *J. Mol. Liq.* 2020. V. 308. ID 113081. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113081>
 4. Yang H. B., Zhou B. B., Zhu T. Y., Wang P. X., Zhang X. F., Wang T. Y., Wu F. P., Zhang L., Kang W. L., Ketova Y. A., Galkin S. V. Conformance control mechanism of low elastic polymer microspheres in porous medium // *J. Pet. Sci. Eng.* 2021. V. 196. ID 107708. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107708>
 5. Zhou W., Xin C. P., Chen S. N., Yu Q., Wang K. Polymer-enhanced foam flooding for improving heavy oil recovery in thin reservoirs // *Energy Fuels.* 2020. V. 34. P. 4116–4128. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04298>
 6. Santanna V. C., Curbelo F. D. S., Castro Dantas T. N., Dantas Neto A. A., Albuquerque H. S., Garnica A. I. C. Microemulsion flooding for enhanced oil recovery // *J. Pet. Sci. Eng.* 2009. V. 66. P. 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.01.009>
 7. Liu H., Xiong C. M., Tao Z., Fan Y. J., Tang X. F., Yang H. Y. Zwitterionic copolymer-based and hydrogen bonding-strengthened self-healing hydrogel // *RSC Adv.* 2015. V. 5. P. 33083–33088. <https://doi.org/10.1039/c4ra15003a>
 8. Zhu Z., Kang W. L., Yang H. B., Wang P. X., Zhang X. F., Yin X., Lashari Z. A. Study on salt thickening mechanism of the amphiphilic polymer with betaine zwitterionic group by beta-cyclodextrin inclusion method // *Colloid Polym. Sci.* 2017. V. 295. P. 1887–1895. <https://doi.org/10.1007/s00396-017-4169-7>
 9. Ye Z. B., Zhang X., Chen H., Han L. J., Jiang J. F., Song J. R., Yuan J. Y. Synthesis and evaluation of a class of sulfonic water soluble polymer with high content of nonionic surfmer units // *Colloid Polym. Sci.* 2015. V. 293. P. 2321–2330. <https://doi.org/10.1007/s00396-015-3609-5>
 10. Li X. E., Xu Z., Yin H. Y., Feng Y. J., Quan H. P. Comparative studies on enhanced oil recovery: Thermoviscosifying polymer versus polyacrylamide // *Energy Fuels.* 2017. V. 31. P. 2479–2487. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02653>
 11. Spildo K., Sae E. I. O. Effect of charge distribution on the viscosity and viscoelastic properties of partially hydrolyzed polyacrylamide // *Energy Fuels.* 2015. V. 29. P. 5609–5617. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01066>
 12. Samanta A., Bera A., Ojha K., Mandal A. Effects of alkali, salts, and surfactant on rheological behavior of partially hydrolyzed polyacrylamide solutions // *J. Chem. Eng. Data.* 2010. V. 55. P. 4315–4322. <https://doi.org/10.1021/je100458a>
 13. Liu L., Gou S. H., Zhang H. C., Zhou L. H., Tang L., Liu L. A zwitterionic polymer containing a hydrophobic group: enhanced rheological properties // *New J. Chem.* 2020. V. 44. P. 9703–9711. <https://doi.org/10.1039/d0nj01687j>
 14. Wu G., Yu L. M., Jiang X. H. Synthesis and properties of an acrylamide-based polymer for enhanced oil recovery: A preliminary study // *Adv. Polym. Technol.* 2018. V. 37. P. 2763–2773. <https://doi.org/10.1002/adv.21949>
 15. Kang W. L., Zhang H. W., Lu Y., Yang H. B., Zhu T. Y., Zhang X. F., Chen C., Sarsenbekuly B., Ospanova Z. B. Study on the enhanced viscosity mechanism of the cyclodextrin polymer and betaine-type amphiphilic polymer inclusion complex // *J. Mol. Liq.* 2019. V. 296. ID 111792. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111792>
 16. Tian S. J., Gao W., Liu Y. J., Kang W. L. Study on the stability of heavy crude oil-in-water emulsions stabilized by two different hydrophobic amphiphilic polymers // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2019. V. 572. P. 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.04.017>
 17. Wang D. P., Tan J. W., Han Y. H., Guo Y. M., An H. Y. Synthesis and properties of temperature-resistant and salt-tolerant tetra-acrylamide copolymer // *J. Macromol. Sci. A.* 2019. V. 56. P. 1148–1155. <https://doi.org/10.1080/10601325.2019.1664912>
 18. Li X. X., Sarsenbekuly B., Yang H. B., Huang Z. T., Jiang H. Z., Kang X., Li M. L., Kang W. L., Luo P. Rheological behavior of a wormlike micelle and an amphiphilic polymer combination for enhanced oil recovery // *Phys. Fluids.* 2020. V. 32. ID 073105. <https://doi.org/10.1063/5.0018211>
 19. Witten T. A., Cohen M. H. Crosslinking in shear-thickening ionomers // *Macromolecules.* 1985. V. 18. P. 1915–1918. <https://doi.org/10.1021/ma00152a019>
 20. Chang Y. H., McCormick C. L. Water-soluble copolymers: 57. Amphiphilic cyclocopolymers of diallylalkoxybenzyl-methylammonium chloride and diallyl-dimethylammonium chloride // *Polymer.* 1994. V. 35. P. 3503–3512. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(94\)90916-4](https://doi.org/10.1016/0032-3861(94)90916-4)
 21. Dai Y. H., Wu F. P., Li M. Z., Wang E. J. Properties and influence of hydrophobically associating polyacrylamide modified with 2-phenoxyethylacrylate // *Front. Mater. Sci. China.* 2008. V. 2. P. 113–118. <https://doi.org/10.1007/s11706-008-0020-x>
 22. Feng Y. J., Billon L., Grassl B., Bastiat G., Borisov O., François J. Hydrophobically associating polyacrylamides and their partially hydrolyzed derivatives prepared by post-modification. 2. Properties of non-hydrolyzed polymers in pure water and brine // *Polymer.* 2005. V. 46. P. 9283–9295. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.07.054>