

引用格式:唐晓东,凌思豪,李晶晶,等.固体杂盐制备纳米流体驱油剂[J].油气地质与采收率,2023,30(4):116-122.
TANG Xiaodong, LING Sihao, LI Jingjing, et al.Preparation of nano-fluids oil displacement agent from solid mixed salts[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2023,30(4):116-122.

固体杂盐制备纳米流体驱油剂

唐晓东,凌思豪,李晶晶,毛乾斌,汪芳
(西南石油大学 化学化工学院,四川 成都 610500)

摘要:针对固体杂盐难处理、纳米颗粒制备成本高的问题,提出了以固体杂盐为原料合成纳米碳酸钙颗粒,再将其应用到纳米流体驱作为三次采油技术来提高采收率。以西南油气田川中油气矿水处理厂所提供的富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的固体杂盐为原料,在泡沫氛体系下合成了碳酸钙、碳酸镁混合纳米颗粒,将该纳米颗粒分散于聚丙烯酰胺溶液中形成纳米流体驱油剂并研究其驱油效果。实验结果表明:合成颗粒的平均粒径为120.9 nm、峰值粒径为111.7 nm、粒径分布为28.87~638.78 nm,颗粒表面吸附硫酸烷基侧链,接触角为 93.570° ;将1 g合成纳米颗粒分散于聚丙烯酰胺溶液,该纳米流体驱油剂的稳定时间大于24 h。驱替实验结果显示,当水驱含水率达80%时转注纳米流体驱油剂,此时整个体系能够形成约3 MPa的稳定驱替压差,纳米流体驱油剂的采出程度由水驱时的46.67%增至88.66%,增幅达41.99%,说明该纳米流体驱油剂具有良好的驱油性能。

关键词:固体杂盐;纳米颗粒;纳米流体;提高采收率;驱替实验

文章编号:1009-9603(2023)04-0116-07

DOI:10.13673/j.pgre.202212033

中图分类号:TE357.43

文献标识码:A

Preparation of nano-fluids oil displacement agent from solid mixed salts

TANG Xiaodong, LING Sihao, LI Jingjing, MAO Qianbin, WANG Fang

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China)

Abstract: The nanoparticles of calcium carbonate were synthesized from solid mixed salts to tackle the problems of difficult treatment of solid mixed salts and high preparation costs of nanoparticles, which were applied in nano-fluid flooding as the tertiary oil recovery technique to enhance oil recovery. Under the foam atmosphere system, calcium carbonate and magnesium carbonate mixed nanoparticles were synthesized from the solid mixed salts rich in Ca^{2+} and Mg^{2+} provided by the oil and gas mine water treatment plant in southwest Sichuan. The nanoparticles were dispersed in the polyacrylamide solution to form a nano-fluid flooding system, and the oil displacement effect was studied. The results show that the synthetic particles have an average particle size of 120.9 nm, a peak particle size of 111.7 nm, and a particle size distribution range of 28.87-638.78 nm. The particle surface adsorbs the side chain of alkyl sulfate, and the contact angle is 93.570° . When 1 g of synthetic nanoparticles are dispersed in the polyacrylamide solution, the nano-fluids can maintain stability for more than 24 h. In addition, displacement experiments show that when the nano-fluids are injected at a water cut of 80%, the nano-fluid flooding can form a stable displacement pressure difference of about 3 MPa. The oil recovery under the nano-fluid flooding increases to 88.66% from 46.67% under water flooding, with an increase of 41.99%, which indicates that the nano-fluid system has good oil displacement performance.

Key words: solid mixed salt; nano-particles; nano-fluids; enhanced oil recovery; displacement experiment

随着社会经济迅速发展,对资源的消耗也越来越大,日益增长的生产带来的是固体废物的迅速增加,环境问题变得愈发严重^[1-2]。固体废物的物态决定了其无法自发的可扩散的特性,若不进行任

收稿日期:2022-12-17。

作者简介:唐晓东(1963—),男,四川巴中人,教授,硕士,从事石油天然气加工、稠油降黏与提高采收率等领域的基础理论及应用技术研究。
E-mail:txd3079@163.com。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项课题“深层稠油经济有效动用技术攻关研究”(2012E-34-06)。

何处理,固体废物不可能自行分解而转化为无害的物质,只能堆存在原地,其化学性质使得在堆放过程中会对环境造成危害^[3]。传统对固体废物的处理方法有:填埋法^[4]、焚烧法^[5]、生物降解法^[6]等,但传统方法在处理固体废物时存在一定局限性,如填埋法会占用大量土地资源、焚烧法会造成二次污染等。因此,对固体废物的无害化、资源化的处理方式是当前的研究热点^[7]。

随着原油开采的不断深入,常规原油资源正在逐渐枯竭^[8]。稠油作为重要的非常规油气资源,其储量丰富,将会是未来日益枯竭的常规油气资源的重要替代能源,具有广阔的发展前景。然而,当油田开发进入特高含水期后^[9],由于油水黏度差异、地层渗透率非均质性、水驱通道形成优势等问题,驱替时会出现严重的注入水黏性指进现象。此时,水驱波及范围会大幅减少,采出井大量出水,水驱效率严重下降。因此,在水驱后期通过更换驱替介质来提高采收率^[10]。目前热门的方法有聚合物驱^[11]、表面活性剂驱^[12]、泡沫驱^[13]、蒸汽驱^[14]、纳米流体驱^[15-16]等。其中,纳米颗粒分散到溶剂中形成纳米流体,可以较大程度地降低油水界面张力,使得黏附在孔道壁面上的原油更容易被剥离,从而提高驱替效率^[17-19]。但由于纳米颗粒的制备繁琐、价格昂贵等原因,限制了其在提高采收率方面的广泛应用。为此,笔者针对固体杂盐难处理、难利用及纳米颗粒成本高等问题,提出了将钙镁离子含量高的固体杂盐作为原料,用以合成纳米颗粒,再将其分散于聚丙烯酰胺溶液中得到纳米流体制备出一种新型的纳米流体驱油剂,从而提高采收率^[24-25]。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验材料 实验材料主要包括:工业废盐,由西南油气田川中油气矿水处理厂提供,主要离子组成为: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 Cl^- , 其质量分数分别为 12.3%, 14.02%, 16.48%, 7.44% 和 47.33%, 剩余少量离子有 HCO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Pb^{2+} 等; 起泡剂 HX-1 和控制剂 HX-2, 工业级, 由广汉市华星新技术开发研究所提供; 碳酸钠和无水乙醇, 分析级, 由成都科龙化工试剂厂提供; 非离子型聚丙烯酰胺(相对分子质量为 $1\ 400 \times 10^5$), 工业级, 由成都科龙化工试剂厂提供; 旅大 6-2 油田稠油 50 °C 时黏度为 427 mPa·s; 人造岩心, 长度为 50 cm, 直径为 2.5 cm, 实验温度为 60 °C。岩心驱替实验设备见文献[20-21]。

实验仪器 实验仪器主要包括: JJ-2 搅拌发泡机, 由上海威宇机械电子有限公司生产; TDZ4-WS

台式离心机, 由湖南湘仪实验室仪器开发有限公司生产; BI-200SM 广角激光粒度仪, 由美国布鲁克海文仪器公司生产; CSCDIC100 全自动接触角测定仪, 由晟鼎精密仪器公司生产; WQF-520 型傅里叶红外光谱仪, 由北京瑞利分析仪器有限公司生产; ZEISS EVO/MA 15 扫描电子显微镜, 由德国卡尔蔡司公司生产; 稠油热采物理模拟实验装置, 由江苏友联科技有限公司生产。

1.2 实验方法

杂盐中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的浓度是影响颗粒性质的主要因素。实验前已将易吸水的杂盐充分干燥, 后续所有实验均以干燥后的杂盐为准。根据杂盐离子浓度及前期实验测得 1.06 g Na_2CO_3 恰好沉淀 1.1 g 的杂盐, 合成 1 g 左右颗粒。实验条件为: 温度为 60 °C, pH 值为 8, HX-1 和 HX-2 的质量分数分别为 0.2% 和 0.3%, 杂盐质量浓度由 0.2 g/100 mL 依次递增至 1.4 g/100 mL。

除了合成颗粒的杂盐质量浓度外, 表面活性剂质量分数对合成颗粒的尺寸也有较大影响。实验合成颗粒之所以选用 2 种表面活性剂复配体系, 主要是因为杂盐中含有的金属阳离子对 HX-2 的发泡性能影响较大, 也间接影响了合成颗粒的性能, 而两性离子表面活性剂 HX-1 有较好的耐盐性, 这保证了整个体系在高盐度条件下也具有较好的发泡性能。具体实验条件为: 温度为 60 °C, pH 值为 8, 杂盐质量浓度为 1.0 g/100 mL。

pH 值是影响晶体的成核、生长的主要因素, 需进一步研究其与合成颗粒之间的关系。实验条件为: 表面活性剂 HX-1 (0.2%) 和 HX-2 (0.3%) 的复配, 杂盐质量浓度为 1.0 g/100 mL, 温度为 60 °C, pH 值由 8 依次递增至 13。

制备方法 实验组的制备步骤主要包括: ①配制系列浓度的 Na_2CO_3 溶液各 90 mL, 并根据不同实验条件向其中加入一定量的控制剂 HX-2, 记作溶液 A。②配制与溶液 A 对应的系列浓度梯度的杂盐溶液各 10 mL, 并根据不同实验条件向其中加入一定量的起泡剂 HX-1, 记为溶液 B。③将溶液 A 倒入发泡装置, 待发泡 1 min 产生绵密泡沫后, 以注射器的形式把溶液 B 以 2 mL/min 的速度注入工作中的 JJ-2 搅拌发泡机中。④将反应后的泡沫静置 6 h 完全消泡, 高速离心分离样品, 得到所需颗粒。⑤使用纯水、无水乙醇交替洗涤颗粒 2 次。⑥将洗涤后的颗粒在 80 °C 烘箱中干燥 6 h 得到颗粒。

空白组的制备步骤主要包括: ①配制系列浓度的 Na_2CO_3 溶液各 90 mL。②配制与 Na_2CO_3 溶液对应的系列浓度梯度的杂盐溶液各 10 mL。③将 Na_2CO_3 溶液倒入发泡装置, 待发泡 1 min 产生绵密

泡沫后,以注射器的形式把杂盐溶液以2 mL/min的速度注入工作中的JJ-2搅拌发泡机中。④将反应后的泡沫静置6 h完全消泡,高速离心分离样品,得到所需颗粒。⑤使用纯水、无水乙醇交替洗涤颗粒2次。⑥将洗涤完成的颗粒在80 °C烘箱中干燥6 h得到颗粒。

表征方法 洗涤、干燥后的纳米颗粒采用动态光散射(DLS)、红外光谱(FT-IR)、扫描电镜(SEM)和接触角(CA)等表征手段分析,操作条件主要包括:①DLS。将纳米颗粒以0.1 g/10 mL的质量浓度分散到无水乙醇中,超声30 min保证分散均一。将分散液装入样品池,置于BI-200SM广角激光粒度仪中,通过动态光散射的方法测量纳米颗粒的平均粒径、峰值粒径与粒径分布。②FT-IR。用溴化钾(KBr)与纳米颗粒混合压制晶片,将制得的样品放入WQF-520型傅里叶红外光谱仪中测定其特征官能团,每次测定的总扫描次数为16次。③SEM。在ZEISS EVO/MA15扫描电子显微镜中对纳米颗粒进行扫描电镜分析,获取其微观形貌数据。④CA。将合成颗粒在压制成样品薄片,接着将样品薄片放置于CSCDIC100全自动接触角测定仪上,通过悬滴法测定纯水在样品薄片上的接触角。

2 实验结果与分析

2.1 杂盐质量浓度对颗粒粒径的影响

从不同杂盐质量浓度的影响(图1)可以看出,随着杂盐质量浓度的增加,合成的颗粒粒径先是逐渐减小,杂盐质量浓度为1.0 g/100 mL时,合成颗粒的平均粒径最小为120.7 nm。当杂盐质量浓度继续增加,合成的颗粒粒径反而开始增大,这是因为杂盐质量浓度过高会影响表面活性剂的发泡效果,使得反应中泡沫体积减小,影响成核位点的数量。杂盐质量浓度较低时颗粒粒径会因小颗粒团聚在一起形成团簇而导致粒径变大。研究表明,当杂盐质量浓度为1.0 g/100 mL时,无论是平均粒径还是峰值粒

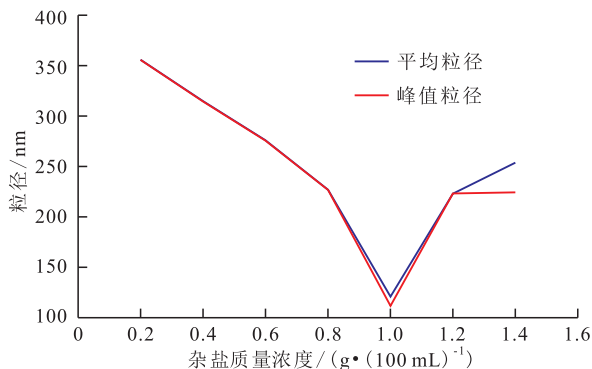


图1 不同杂盐质量浓度对颗粒粒径的影响

Fig.1 Effect of different mass concentrations of mixed salts

径均为最小,因此合成的杂盐质量浓度为1.0 g/100 mL。

2.2 表面活性剂组成对颗粒粒径的影响

因选取的2种表面活性剂均对颗粒尺寸有影响,故将HX-1和HX-2的总质量分数定为0.5%,HX-1用量从0.1%逐渐增大到0.4%,HX-2随之相应减少(图2)。

由图2中可以看出,不同表面活性剂质量分数下合成的颗粒粒径有明显差异。HX-1的质量分数从0.1%增加至0.4%过程中,颗粒的平均粒径、峰值粒径整体均呈先减小后增大的趋势。当HX-1质量分数为0.1%、HX-2质量分数为0.4%时,平均粒径为393.8 nm;当HX-1质量分数为0.4%、HX-2质量分数为0.1%时,平均粒径为534.6 nm;最小颗粒平均粒径为127.2 nm,此时HX-1的质量分数为0.2%,HX-2的质量分数为0.3%。查询文献[22]可知,HX-2在60 °C时的临界胶束浓度为0.28 g/100 mL,此时其表面活性最强,能产生最多泡沫。研究表明,表面活性剂的浓度首先影响泡沫体积,越多的泡沫能提供更多的成核位点,合成的颗粒也越小。除此之外,杂盐中的其他盐会影响临界胶束浓度,在实际合成时,HX-2的质量分数应比其临界胶束略大,最终HX-2质量分数选择为0.3%,HX-1质量分数为0.2%。

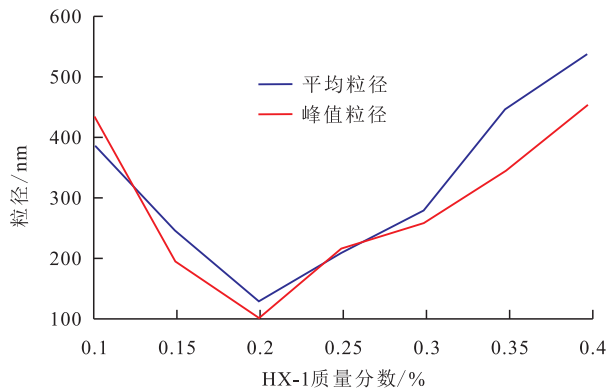


图2 表面活性剂组成对颗粒粒径的影响

Fig.2 Effect of surfactant composition

2.3 温度对颗粒粒径的影响

在结晶的过程中,温度是主要影响因素。实验条件为:pH值为8,杂盐质量浓度为1.0 g/100 mL,表面活性剂为HX-1(0.2%)和HX-2(0.3%)的复配,温度由20 °C依次递增至80 °C(图3)。由图3可以看出,随着温度的增加,合成颗粒的平均粒径与峰值粒径均逐渐减小。当温度低于50 °C时,粒径均大于200 nm,且粒径随温度变化的幅度较大;当温度增加到50 °C以上时,粒径曲线开始趋于平缓,粒径随温度变化的幅度变小;温度到达80 °C时,粒径达到最小,平均粒径约为100 nm。当温度升高,分子运动加剧,有效促进新晶核的出现并抑制晶核的成长变

大,使得颗粒粒径变小;当温度过高时,会加速合成时的泡沫排液破裂,使得晶核生成场所减少,颗粒粒径随温度变化较小。总之,在温度达到60℃之前,颗粒粒径和温度基本呈线性下降关系;温度超过60℃后,随着温度的升高,对粒径的影响甚微,故选择60℃作为最佳合成温度。

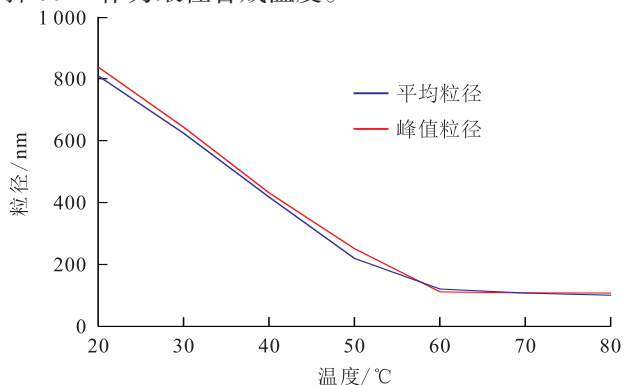


图3 温度对颗粒粒径的影响
Fig.3 Effect of temperature

2.4 pH值对颗粒粒径的影响

从pH值对颗粒粒径的影响(图4)可以看出,随着pH值的增大,颗粒的平均粒径和峰值粒径逐渐增大,在pH值为13时,颗粒粒径大于1 000 nm;在pH值为8时,合成颗粒的粒径最小为128.3 nm。由文献[23]可知,pH值影响溶液中碳酸根和碳酸氢根的水解,当pH值较高时,溶液中的碳酸根大量存在,会导致钙镁离子和碳酸根剧烈反应,使得颗粒晶核快速成长,所以pH值高时颗粒粒径较大;当pH值接近8时,溶液中碳酸根大部分水解成碳酸氢根,少部分碳酸根会先与钙镁离子反应,形成的晶核较小且不会快速成长变大,然后根据水解平衡,碳酸氢根会逐步转化成碳酸根,再进行合成,使得整体反应情况平缓,最终合成颗粒平均粒径更小,故选择pH值为8作为最佳合成条件。

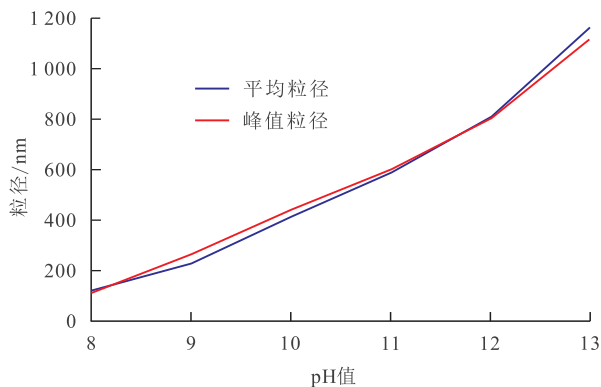


图4 pH值对颗粒粒径的影响
Fig.4 Effect of pH on particle size

2.5 纳米颗粒表征分析

颗粒粒径 由实验组和空白组合成颗粒的粒径分布曲线(图5)可以看出,实验组合成颗粒的平均

粒径为120.9 nm,峰值粒径为111.7 nm,粒径分布为28.87~638.78 nm;空白组合成颗粒的平均粒径为1 284.6 nm,峰值粒径为1 250.5 nm,粒径分布为641.1~4 147.1 nm。研究表明,在起泡剂HX-1与控制剂HX-2的作用下,实验组合成颗粒在平均粒径、峰值粒径上远小于空白组颗粒,除此之外,实验组的颗粒粒径分布范围更集中,实验组颗粒整体呈纳米级,粒径也更统一。

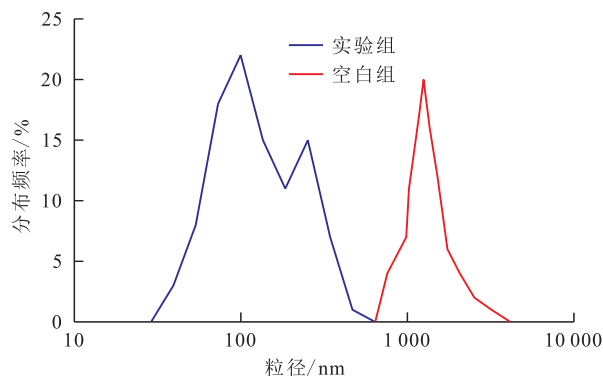


图5 实验组和空白组合成颗粒的粒径分布曲线

Fig.5 Size distribution of synthetic particles in experiment group and blank group

红外光谱 由实验组和空白组合成颗粒的红外光谱(图6)可以看出,空白组颗粒在712, 875, 1 415和1 792 cm^{-1} 等4处出现明显峰值,分别为碳酸根中C-O,C=O的特征峰;实验组颗粒除上述4处峰值外,在2 850,2 917和2 954 cm^{-1} 等3处出现烷基、亚甲基的伸缩振动峰显著增强,同时在844,1 100和1 245 cm^{-1} 等3处出现硫酸酯基中S=O,S-O的伸缩振动峰,这是HX-2中的硫酸烷基侧链在颗粒表面吸附所致。研究表明,吸附的烷基侧链不仅可以防止颗粒团聚长大、控制粒径,也可以使得合成颗粒部分表面改性,具有更好的分散性能。

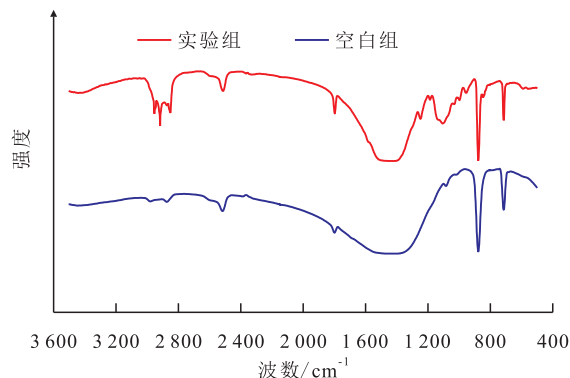


图6 实验组和空白组合成颗粒的红外光谱

Fig.6 Infrared spectra of particles in experiment group and blank group

接触角 由实验组和空白组合成颗粒的接触角测试结果(图7)可以看出,空白组合成颗粒接触角为28.955°,实验组合成颗粒接触角为93.570°,起泡

剂HX-1与控制剂HX-2存在时,合成颗粒的接触角明显增大,由极度亲水逐渐向既亲油又亲水转变,证明颗粒表面的润湿性发生了改变。这与上述红外光谱的实验结果一致,再次证明了控制剂HX-2在碳酸钙颗粒表面发生了吸附。

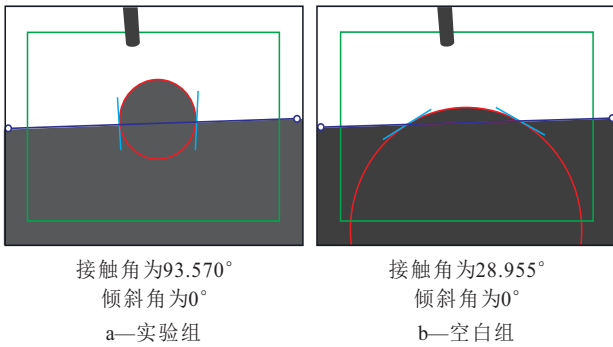


图7 实验组和空白组合成颗粒的接触角

Fig.7 Contact angle of synthetic particles in experiment group and blank group

扫描电镜 由实验组和空白组合成颗粒的SEM图(图8)可以看出,空白组合成颗粒粒径较大,平均约为1 μm;实验组合成颗粒粒径远小于空白组的,平均略大于100 nm,这与激光粒度仪所得的结果相符,且合成颗粒形貌主要呈方形,推断为碳酸钙和碳酸镁的方解石晶型。对比两者可以看出,合成颗粒为纳米级时,以团簇的形态存在;合成颗粒为微米级时,则以单个的颗粒存在,这可能是纳米颗粒的团聚效应引起的。

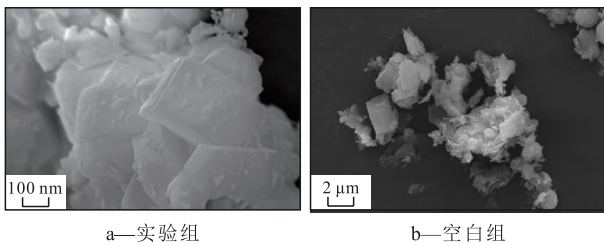


图8 实验组和空白组合成颗粒的SEM图

Fig.8 SEM images of synthetic particles in experiment group and blank group

2.6 纳米流体稳定性实验

纳米颗粒可以分散到溶剂中形成纳米流体,纳

米流体又可较大程度降低油水界面张力,使黏附在孔壁的原油更易被驱替,从而提高驱替效率。实验选用聚丙烯酰胺(相对分子质量为 $1\ 400 \times 10^5$)来制备纳米颗粒分散溶液。将0.3 g纳米颗粒分散到不同浓度的聚丙烯酰胺溶液(PAM)中,搅拌分散均匀后,观察并记录颗粒沉降时间(图9)。从图9中可以看出,PAM在0.16%质量分数下,颗粒在24 h时已经有明显沉降;PAM质量分数为0.18%和0.2%时,颗粒分散均匀后,整个体系在0,6,12,18和24 h基本不变,到48 h后颗粒才沉降。研究分析,选择PAM最佳溶液质量分数为0.18%。

2.7 驱替实验

将合成的纳米流体和相同浓度的PAM溶液作为驱油剂,用于驱替实验。纳米流体驱替实验的填砂管参数主要包括:孔隙度为20.37%,水测渗透率为1 453 mD,含油饱和度为90%。PAM聚合物驱替实验的填砂管参数主要包括:孔隙度为21.59%,水测渗透率为1 505 mD,含油饱和度为90.57%。2组驱替实验皆在含水率为80%时转注,纳米流体驱替实验转注时采出程度为46.67%,最终采出程度为88.66%;PAM聚合物驱替实验转注时采出程度为46.31%,最终采出程度为80.56%。

由纳米流体和PAM聚合物2种驱油剂的驱替实验结果所绘制的压差变化曲线(图10)可以看出,在转注驱替介质之前,聚合物驱和纳米流体驱的驱替压差均约为1 MPa,此时压差的差异是填砂管局部非均质性差异所导致的。当含水率达到80%,注入量达到1.51 PV时转注,转注后,随着驱替介质的注入,聚合物驱的压差仍约为1 MPa,而纳米流体驱的压差开始增大,说明纳米流体驱对注入量有较快的响应。待注入量达到3.5 PV时,聚合物驱的压差持续波动,但驱替压差基本稳定在1.5 MPa左右,而纳米流体驱的驱替压差达到3 MPa左右。

由纳米流体和PAM聚合物2种的驱替实验结果所绘制的采出程度和含水率变化曲线(图11)可以看出,在转注驱替介质后,聚合物驱的采出程度由水驱

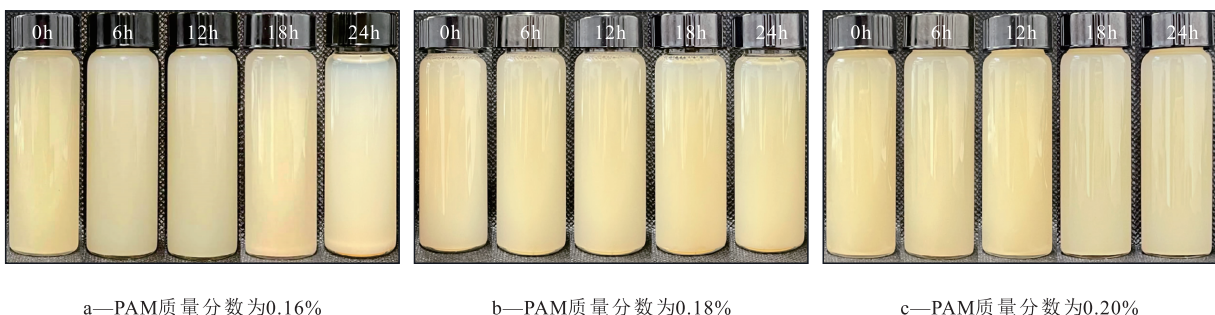


图9 纳米颗粒稳定性实验

Fig.9 Stability experiment of nanoparticles

时的46.31%增至80.56%,增幅达34.25%;纳米流体驱的采出程度由水驱时的46.67%增加至88.66%,增幅达41.99%。实验结果表明,由纳米颗粒所制备的纳米流体驱油剂在提高采出程度方面有明显效果。由图11中含水率的变化曲线可知,水驱结束转注驱油剂后,在注入量为2.4 PV左右时,纳米流体驱的含水率先于聚合物驱下降,且下降幅度更大,当注入量为3.0 PV时,纳米流体驱含水率达到最低40%,可以明显看出纳米流体驱对注入量的响应是明显快于聚合物驱的。

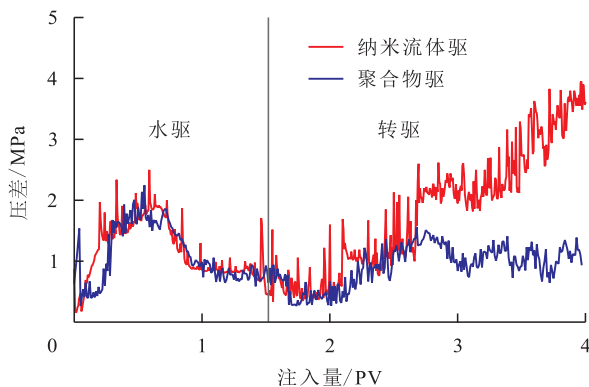


图10 聚合物驱和纳米流体驱的压差变化曲线

Fig.10 Pressure difference changes in polymer flooding and nano-fluid flooding

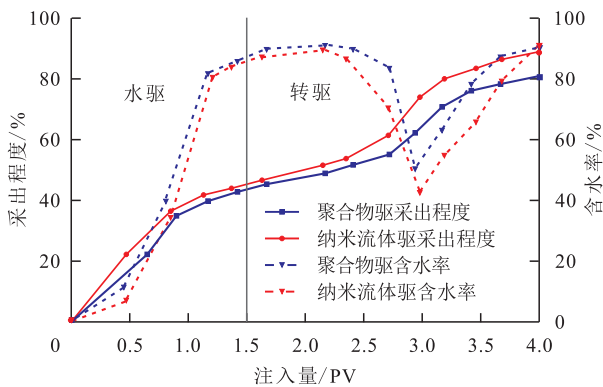


图11 聚合物驱和纳米流体驱的采出程度及含水率比较

Fig.11 Comparison of recoveries and water cuts between polymer flooding and nano-fluid flooding

3 结论

针对固体杂盐难处理、难利用及纳米颗粒成本高等问题,提出了将钙镁离子含量高的固体杂盐作为原料合成纳米颗粒。在实验室中评选出最佳合成条件下合成了平均粒径为120.9 nm的纳米颗粒,并制备出超过24 h不沉降的稳定纳米流体,将其作为纳米流体驱油剂进行驱替实验,得到纳米流体驱所提高的采出程度幅度比聚合物驱提高了7.74%,制备得到良好的新型纳米流体驱油剂。将工业废弃物固体杂盐再利用,合成出低成本的纳米颗粒,并将三

次采油技术用于稠油驱替实验,提高了整体的经济效益,拥有广阔的应用前景。对于纳米流体驱油实验的注入参数还未进行优化,后续研究可以进一步讨论注入时机、注入方式及渗透率级差等因素对驱油效果的影响。

参考文献

- [1] 汪群慧. 固体废物处理及资源化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004:143-150.
WANG Qunhui. Solid waste treatment and recycling[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:143-150.
- [2] SONG Qingbin, LI Jinhui, ZENG Xianlai. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104:199-210.
- [3] LIU Yuqiang, GUO Dewei, DONG Lu, et al. Pollution status and Environmental Sound Management (ESM) trends on typical general industrial solid waste[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 31:615-520.
- [4] 孙瑞君. 浅谈固体废物及其处置技术[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(6):144-145.
SUN Ruijun. Talking about the solid wastes and their disposal techniques[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2006, 16(6):144-145.
- [5] ZHAO Yan, SI Jitao, TIAN Baoguo, et al. Method of technology choosing of municipal solid waste treatment and disposal II. A case study[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 2(44):217-223.
- [6] GUNAWARDANA E G W, BASNAYAKE B F A, SHIMADA S, et al. Influence of biological pre-treatment of municipal solid waste on landfill behaviour in Sri Lanka[J]. Waste Management & Research, 2009, 27(5):456-462.
- [7] 牛东杰, 孙晓杰, 赵由才. 工业固体废物处理与资源化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007:221.
NIU Dongjie, SUN Xiaojie, ZHAO Youcai. Industrial solid waste treatment and recycling[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007:221.
- [8] 王鸣川, 商晓飞, 段太忠, 等. 海外油气田开发新项目储量评价方法[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2):296-301.
WANG Mingchuan, SHANG Xiaofei, DUAN Taizhong, et al. Reserves evaluation for new investment projects in overseas oil and gas field development[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2):296-301.
- [9] 刘德华. 油田开发中后期综合治理技术研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
LIU Dehua. Study on comprehensive treatment technology in the middle and late period of oilfield development[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2005.
- [10] 王婷婷, 吴贵彬, 陈建玲, 等. 基于多因素分析提高采收率驱替方式优选方法的研究[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(5):803-808.
WANG Tingting, WU Guibin, CHEN Jianling, et al. Optimiza-

- tion of enhanced oil recovery displacement methods based on multifactor analysis[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(5): 803-808.
- [11] 金亚杰. 国外聚合物驱油技术研究及应用现状[J]. *非常规油气*, 2017, 4(1): 116-122.
JIN Yajie. Progress in research and application of polymer flooding technology abroad[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2017, 4(1): 116-122.
- [12] BASHIR A, HADDAD A S, RAFATI R. A review of fluid displacement mechanisms in surfactant-based chemical enhanced oil recovery processes: analyses of key influencing factors[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(3): 1 211-1 235.
- [13] 王其伟. 泡沫驱油发展现状 & 前景展望[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(2): 94-97.
WANG Qiwei. Present situation and development prospect of foam flooding[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(2): 94-97.
- [14] 户昶昊. 中深层稠油油藏蒸汽驱技术研究进展与发展方向[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(6): 54-59.
HU Changhao. Research progress and development direction of steam flooding technology for medium and deep heavy oil reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(6): 54-59.
- [15] 詹迎青, 万昕艺, 王雅洁, 等. 纳米粒子在油田驱油中的研究进展[J]. *现代化工*, 2016, 36(8): 37-40.
ZHAN Yingqing, WAN Xinyi, WANG Yajie, et al. Research progress of nanoparticles in oilfield for oil displacement[J]. *Modern Chemical Industry*, 2016, 36(8): 37-40.
- [16] 余海棠, 邓雄伟, 刘艳梅, 等. 致密油储层渗吸驱油用纳米流体研究[J]. *断块油气田*, 2022, 29(5): 604-608.
YU Haitang, DENG Xiongwei, LIU Yanmei, et al. Research of nanofluids suitable for imbibition and oil displacement in tight oil reservoirs[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(5): 604-608.
- [17] EHTESABI H, AHADIAN M M, TAGHIKHANI V, et al. Enhanced heavy oil recovery in sandstone cores using TiO₂ nanofluids[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(1): 423-430.
- [18] 余文可, 冯茹森, 林凌, 等. 纳米流体驱油机理研究进展[J]. *中外能源*, 2022, 27(7): 29-36.
YU Wenke, FENG Rusen, LIN Ling, et al. Research progress of nanofluid flooding mechanism[J]. *Sino-Global Energy*, 2022, 27(7): 29-36.
- [19] 吕晓光, 李伟. 水驱油藏特高含水阶段提高采收率可行性研究及技术对策[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(6): 130-137.
LÜ Xiaoguang, LI Wei. Feasibility and technologies for improving recovery at extra-high water cut development stage in water-flooding reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(6): 130-137.
- [20] 李晶晶, 邓昌联, 唐晓东, 等. 稠油减氧空气泡沫驱注入参数优化及现场应用[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(4): 131-135.
LI Jingjing, DENG Changlian, TANG Xiaodong, et al. Injection parameter optimization of deoxidized air foam flooding for heavy oil reservoir and its field application[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(4): 131-135.
- [21] 唐晓东, 凌思豪, 向城鑫, 等. 稠油采出水制备纳米颗粒及其泡沫驱油研究[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(4): 84-89.
TANG Xiaodong, LING Sihao, XIANG Chengxin, et al. Study on preparation of nanoparticles from produced water of heavy oil and its foam flooding[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(4): 84-89.
- [22] 印永嘉. 物理化学简明手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
YIN Yongjia. Concise handbook of physical chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [23] ABEYWARDENA M R, ELKADUWE R K W H M K, KARUNARATHNE D G G P, et al. Surfactant assisted synthesis of precipitated calcium carbonate nanoparticles using dolomite: effect of pH on morphology and particle size[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(1): 269-278.
- [24] 张舒琴. 聚/表复合驱不同驱替阶段孔隙结构及微观残余油变化规律[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(5): 98-104.
ZHANG Shuqin. Change laws of the pore structure and micro-residual oil for the polymer/surfactant composite flooding at different displacement stages[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(5): 98-104.
- [25] 薛罗, 史忠生, 马轮, 等. 南苏丹 Melut 盆地北部坳陷烃源岩热演化特征及油气地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(6): 79-86.
XUE Luo, SHI Zhongsheng, MA Lun, et al. Thermal evolution characteristics of source rocks and their petroleum geological significance in the Northern depression of Melut Basin, South Sudan[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(6): 79-86.

编辑 王星