

温敏型纳米复合材料的研制及驱油性能研究

陈思齐¹, 郑学成^{1,2*}, 樊维¹, 林小莎³, 周雪峰¹

(1. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学油气田应用化学四川省重点实验室, 四川 成都 610500;

3. 南充电子信息产业技术研究院, 四川 南充 637131)

摘要:为提高纳米流体驱对油藏的适用性, 满足高效开采的需求, 设计了一种对温度能动态响应的纳米材料。将温敏性单体异丙基丙烯酰胺 (NIPAm) 和亲水单体衣康酸 (IA) 接枝在纳米 SiO₂ 表面制备了温敏型纳米复合材料 NIPAm/IA/SiO₂。通过红外光谱、动态光散射等表征手段研究了 NIPAm/IA/SiO₂ 的化学结构、热稳定性、形貌及粒径。结果表明, NIPAm/IA/SiO₂ 具有良好的分散性和热稳定性 (初始分解温度为 310°C), 中值粒径为 264 nm。当环境温度低于低临界溶液温度 (LCST) 时, NIPAm/IA/SiO₂ 呈现亲水性。温敏型纳米流体的润湿作用使岩石表面亲水性增强、毛细管力增大, NIPAm/IA/SiO₂ 提高采收率主要是通过渗吸作用完成; 当温度高于 LCST 时, NIPAm/IA/SiO₂ 呈现两亲性, 此时岩石表面趋于中性润湿, 从而提高了油水两相的流动性, 使孔喉中的油更容易被注入流体驱替。

关键词: 温度响应; 纳米复合材料; 提高采收率; 地层温度; 低临界溶液温度

中图分类号: TE34

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)07-0186-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.07.033

Preparation of temperature-sensitive nanocomposite and study on its oil displacement performance

CHEN Si-qi¹, ZHENG Xue-cheng^{1,2*}, FAN Wei¹, LIN Xiao-sha³, ZHOU Xue-feng¹

(1. College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Field Applied Chemistry, Southwest Petroleum University,

Chengdu 610500, China; 3. Nanchong Electronic Information Industry Technology Institute, Nanchong 637131, China)

Abstract: In order to improve the applicability of nano-fluid flooding to reservoir and meet the demand of efficient production, a kind of nanomaterial with dynamic response to temperature is designed. NIPAm/IA/SiO₂, a temperature-sensitive nanocomposite, is prepared through grafting *N*-isopropylacrylamide (NIPAm) and itaconic acid (IA) onto the surface of nano-SiO₂. The chemical structure, thermal stability, morphology and particle size of NIPAm/IA/SiO₂ are studied by means of infrared spectroscopy, dynamic light scattering and etc. It is indicated by the results that NIPAm/IA/SiO₂ has good dispersion performance and thermal stability (initial decomposition temperature of 310°C), and its median particle size is 264 nm. NIPAm/IA/SiO₂ shows hydrophilic property when the ambient temperature is lower than the low critical solution temperature (LCST). The wetting effect of temperature-sensitive nanofluid enhances the hydrophilicity of the rock surface and increases the capillary force, therefore NIPAm/IA/SiO₂ improves the recovery efficiency mainly through imbibition. NIPAm/IA/SiO₂ shows amphiphilicity when the temperature exceeds LCST. Under this condition, the rock surface tends to be neutral wetting, which increases the fluidity of the oil-water two phases, and makes the oil in the pore throat easier to be injected into the fluid to displace.

Key words: temperature responsiveness; nanocomposite; enhanced oil recovery; formation temperature; low critical solution temperature

与常规化学驱相比, 纳米颗粒的尺寸与低渗油藏储层的孔喉尺寸较匹配, 纳米流体在提高低渗油藏采收率领域的应用前景广阔^[1-3]。近年来, 纳米二氧化硅颗粒由于具有高表面能、刚性强、热稳定性优异等特点, 在钻采开发、驱油增产等相关领域得到

广泛应用^[4-7]。但纳米 SiO₂ 的强亲水性、低界面活性和分散稳定性限制了其在驱油方面的应用。对纳米二氧化硅进行改性是解决上述问题的有效途径^[8-10]。Ahmed 等^[11]以内部烯烴磺酸盐 (IOS20-24 和 IOS19-23) 和阴离子表面活性剂对纳米 SiO₂

收稿日期: 2024-02-24; 修回日期: 2024-04-29

基金项目: 南充市科技计划项目 (23YYJCYJ0035)

作者简介: 陈思齐 (1998-), 女, 硕士生, 研究方向为化学驱提高采收率, 1193902501@qq.com; 郑学成 (1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为油气田安全环保, 通讯联系人, xc.zheng@swpu.edu.cn。

进行表面改性,改性后的纳米材料使岩片的润湿角从 80° 减小到 3° ,增强了岩石的亲水性。Cao等^[12]以3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)和辛基三乙氧基硅烷(OTES)与纳米二氧化硅(NS)反应制备了两亲性二氧化硅颗粒(OAS-3),该颗粒使岩心润湿性从油性润湿转变为中性润湿,界面张力从 14.9 mN/m 降低到 10.4 mN/m 。与纳米 SiO_2 相比,OAS-3颗粒驱油效果可提高 10.3% 。在先前的研究中改性 SiO_2 用于驱油的可行性已被证明,而大多研究仅局限于减小油水界面张力、增强岩石亲水性方面,忽略了地层温度、岩石亲水/油性对提高采收率的影响,以致改性后的纳米流体应用范围受到限制。

在聚合物驱替中,温度响应型聚合物是聚合物智能化的一个重要分支,引起了研究学者的重点关注^[13-15]。Zhou等^[16]制备了温度响应性纳米微球(PNIPAM),PNIPAM通过模拟储层高温触发构象转变原理,减小了微球的粒径和亲水性,故更容易到达油水界面。这类聚合物在温差作用下表现出不同的水溶性,很大程度上减小了地层温度对提高采收率的影响。纳米流体具有润湿反转能力^[17-18],若能再具有温度响应性便可以表现出不同的润湿性,对改善油藏中亲油岩石、亲水岩石的润湿性具有积极作用。基于此,笔者以纳米 SiO_2 作为内核,引入温敏性单体异丙基丙烯酰胺(NIPAM)和亲水单体衣康酸(IA),形成一个核壳结构的温敏型纳米颗粒NIPAM/IA/ SiO_2 。结合岩心驱替和核磁共振实验系统评价了NIPAM/IA/ SiO_2 的提高采收率效果,并提出温敏型纳米流体提高采收率机理。

1 实验材料与仪器

1.1 实验材料

纳米二氧化硅(99.5%,40 nm)、*N*-异丙基丙烯酰胺($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}$,98%),阿拉丁工业公司生产;甲苯(C_7H_8 ,99.5%)、无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$,99.7%)、 γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570,97.0%),成都科隆化工有限公司生产;衣康酸(IA,99%),上海麦克林生化科技有限公司生产。

1.2 实验仪器

RHB1S25型加热磁力搅拌器,德国IKA公司生产;WQF-520-FTIR型傅里叶变换红外光谱仪,北京瑞利分析仪器有限公司生产;DSC823型热分析仪,梅特勒-托利多国际有限公司生产;BI-200SM型激光粒度分析仪,美国布鲁克海文仪器有限公司生产;TX-500C型旋转滴界面张力仪,美国Kino工

业公司生产;MacoMR12-150H-1型低场核磁共振岩心分析仪,上海纽迈电子科技有限公司生产;S-TWIN-F20型场发射透射电子显微镜,美国FEI公司生产;KRUSS-DSA30S型界面参数一体测量系统,德国克吕士科学仪器上海有限公司生产。

2 实验方法

2.1 温敏型纳米颗粒NIPAM/IA/ SiO_2 的合成

温敏型纳米颗粒NIPAM/IA/ SiO_2 的制备如图1所示,主要分两步进行:第一步采用化学接枝法并通过KH-570($\text{C}_{10}\text{H}_{22}\text{O}_4\text{Si}$)对纳米 SiO_2 进行改性。将纳米 SiO_2 加入甲苯溶剂中超声1 h,将分散液转移到三口烧瓶中。惰性气氛下加入硅烷偶联剂KH-570,得到产物KH570@ SiO_2 ;第二步,将白油、span-80和Tween80加入到三口烧瓶中形成油相,将KH570- SiO_2 、NIPAM、IA加入去离子水中形成水相。随后将水相缓慢滴加到油相中,在 70°C 下搅拌形成W/O反相微乳液。反应12 h后,向三口烧瓶中加入适量的无水乙醇,破乳,搅拌洗涤。待颗粒充分分散后,抽滤,并用无水乙醇重复洗涤3次。真空干燥、研磨,得到最终产物NIPAM/IA/ SiO_2 。将制备的NIPAM/IA/ SiO_2 分散到模拟地层水中得到温敏型纳米流体备用。

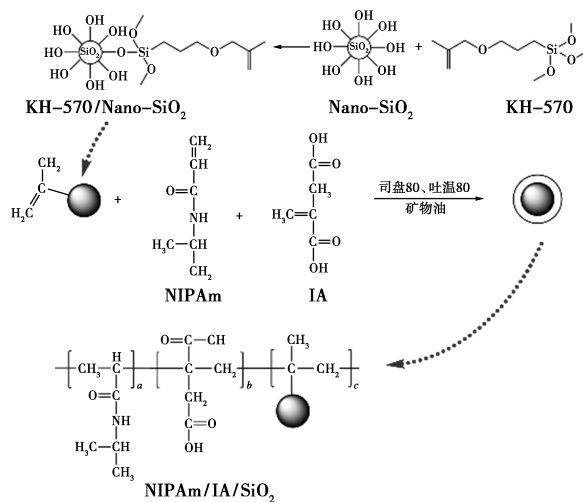


图1 NIPAM/IA/ SiO_2 的合成路线

2.2 NIPAM/IA/ SiO_2 的表征与测试

通过傅里叶变换红外光谱仪分析未经改性的纳米二氧化硅颗粒和温敏性纳米颗粒NIPAM/IA/ SiO_2 的官能团信息;利用热重分析仪对温敏性纳米颗粒(NIPAM/IA/ SiO_2)进行热稳定性分析;利用激光散射系统测量未经改性的纳米二氧化硅颗粒和温敏型纳米颗粒(NIPAM/IA/ SiO_2)在去离子水中的粒径尺

寸及分布情况;利用透射电子显微镜观察了纳米二氧化硅颗粒和温敏型纳米颗粒(NIPAm/IA/SiO₂)形貌。

2.3 NIPAm/IA/SiO₂ 温度响应能力测试

利用紫外分光光度计测定 NIPAm/IA/SiO₂ 分散液的透光率。分析温度变化对溶液透光率的影响,探讨 NIPAm/IA/SiO₂ 的低临界溶液温度(LCST)。

2.4 NIPAm/IA/SiO₂ 界面性质测试

通过界面参数一体测量系统测量液滴与岩片表面的接触角。通过旋转液滴张力计测试原油与温敏型纳米流体之间的界面张力,以温敏型纳米流体为轻相、原油为重相,测试环境温度分别为 50℃ 和 90℃。

2.5 温敏型纳米流体驱油效果评价

选取渗透率在 40~50 mD 的人工岩心(φ2.5 cm×10 cm)进行驱油实验。将岩心置于烘箱中烘干并称取其干重。在饱和水前,将岩心置于岩心夹持器中,真空条件下饱和模拟地层水,测定岩心孔隙体积、孔隙度和岩心渗透率。称取岩心饱和水后的质量,以恒定速率饱和原油。将岩心在夹持器中老化 24 h,使岩心中油水均匀分布。

驱油实验装置如图 2 所示。首先进行水驱试验,直至压力稳定且采出液含水率稳定在 98%时,转注温敏型纳米流体。当压力稳定且采出液含水率稳定在 98%时,结束纳米流体驱替转注后水驱。

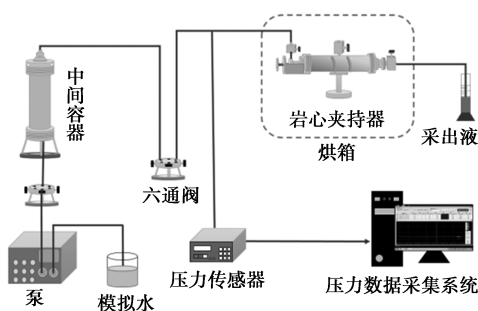


图 2 驱油实验装置

2.6 核磁共振实验

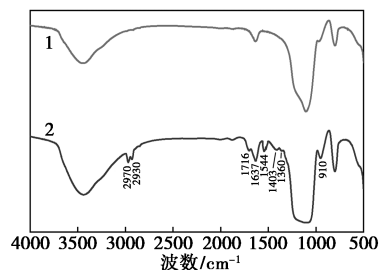
核磁共振(NMR)技术可以定量检测流体中的氢原子信号,进而分析流体在岩心中的分布情况^[19]。以重水为溶剂制备注入流体,屏蔽注入流体的氢信号。仅检测原油中的氢原子从而分析原油的动用规律。在同一根岩心上,依次进行饱和油、水驱、纳米流体驱状态下的核磁共振实验,分析不同状态下横向弛豫时间与信号幅值的关系。为了探究温度对岩心内原油的动用情况的影响,实验温度分别

设定为 50℃ 和 90℃,其他实验条件保持一致。

3 结果与讨论

3.1 NIPAm/IA/SiO₂ 表征分析

未改性纳米 SiO₂ 颗粒和温敏型纳米颗粒 NIPAm/IA/SiO₂ 的红外谱图如图 3 所示。从图 3 中可以看出,1 716、1 403、910 cm⁻¹ 为 IA 分子结构单元中羧基上的 C=O、O—H、COOH 的伸缩振动峰;1 360、2 930、2 970 cm⁻¹ 为 NIPAm 分子结构单元中异丙基 C—H 以及甲基、亚甲基 C—H 的振动峰;1 554、1 637 cm⁻¹ 为 NIPAm 分子结构单元中酰胺上的 N—H、C=O 伸缩振动的组合吸收产生的特征峰。表明 NIPAm 和 IA 已成功接枝在纳米二氧化硅颗粒的外壳上。



1—纳米 SiO₂;2—NIPAm/IA/SiO₂

图 3 纳米 SiO₂ 和 NIPAm/IA/SiO₂ 的红外谱图

温敏型纳米颗粒 NIPAm/IA/SiO₂ 的 TGA 曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,由于样品测试前经过干燥处理,温敏性纳米颗粒在 310℃ 左右才开始分解,直到 600℃ 左右趋于稳定。主要是由于 NIPAm/IA/SiO₂ 外壳上的酰胺基团的热分解造成,实验结果表明温敏性纳米颗粒具有优异的热稳定性。

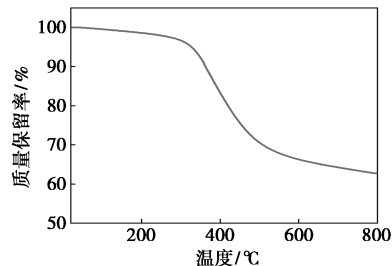


图 4 NIPAm/IA/SiO₂ 的 TGA 曲线

纳米 SiO₂ 颗粒和所制备的温敏型纳米颗粒 NIPAm/IA/SiO₂ 的粒度分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出,纳米 SiO₂ 粒径分布范围较广,甚至远超出了纳米尺寸范围。而 NIPAm/IA/SiO₂ 分布范围在 131~512 nm,中值粒径为 264 nm,且 NIPAm/IA/

SiO₂ 粒径相比纳米 SiO₂ 分布更集中,粒度分布情况呈正态分布,表明所制备的 NIPAm/IA/SiO₂ 粒度均匀。

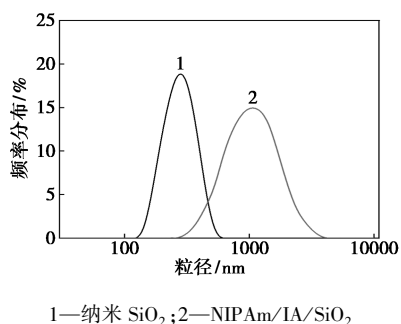


图5 纳米 SiO₂ 和 NIPAm/IA/SiO₂ 的动态光散射曲线

纳米二氧化硅和所制备的温敏型纳米颗粒 NIPAm/IA/SiO₂ 的透射电镜图如图 6 所示。从图 6 中可以看出,纳米 SiO₂ 颗粒呈团聚体的形式,而 NIPAm/IA/SiO₂ 团聚现象明显有所改善且形状规则。证明所制备的 NIPAm/IA/SiO₂ 分散性良好。

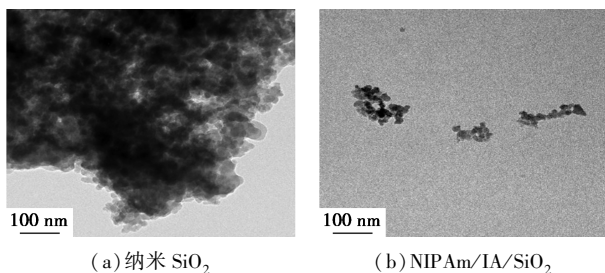


图6 纳米 SiO₂ 和 NIPAm/IA/SiO₂ 的 TEM 图

3.2 NIPAm/IA/SiO₂ 温度响应能力分析

NIPAm/IA/SiO₂ 分散溶液透光率随温度的变化情况如图 7 所示。从图 7 中可以看出,在体系温度小于 69.8℃ 时,分散液的透过率较高且稳定。此时分散液清澈,NIPAm/IA/SiO₂ 能够很好地分散在水中。当体系温度超过 69.8℃ 后,分散液的透光率迅速下降,分散液出现浑浊,此时 NIPAm/IA/SiO₂ 在水中的分散性变差。原因是因为 NIPAm/IA/SiO₂ 分子中同时存在着亲疏水基团。由于温差作用,酰胺基团与水分子的水合程度导致不同的水溶性。当体系温度低于 69.8℃ 时,分子内的酰胺基、羧基以及羟基在水溶液中形成大量氢键,使 NIPAm/IA/SiO₂ 表面的聚合物分子链被拉伸,聚合物分子链亲水性增强,NIPAm/IA/SiO₂ 表现为亲水性;当体系温度高于 69.8℃ 后,NIPAm/IA/SiO₂ 与水分子间形成的氢键被破坏,异丙基的疏水作用变得更加显著。NIPAm/IA/SiO₂ 表面的聚合物分子链蜷缩^[20]。

NIPAm/IA/SiO₂ 表面的温敏型聚合物分子链由亲水状态转变为疏水状态,从而导致 NIPAm/IA/SiO₂ 的分散液由澄清转变为浑浊。综上分析,NIPAm/IA/SiO₂ 的温度响应机制主要是由其表面的温敏型聚合物分子链来决定的,其 LCST 值是 69.8℃。

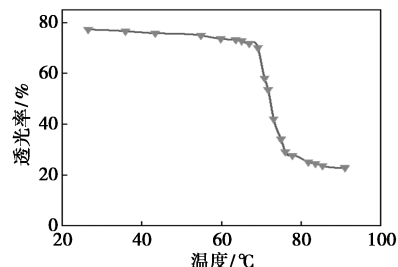
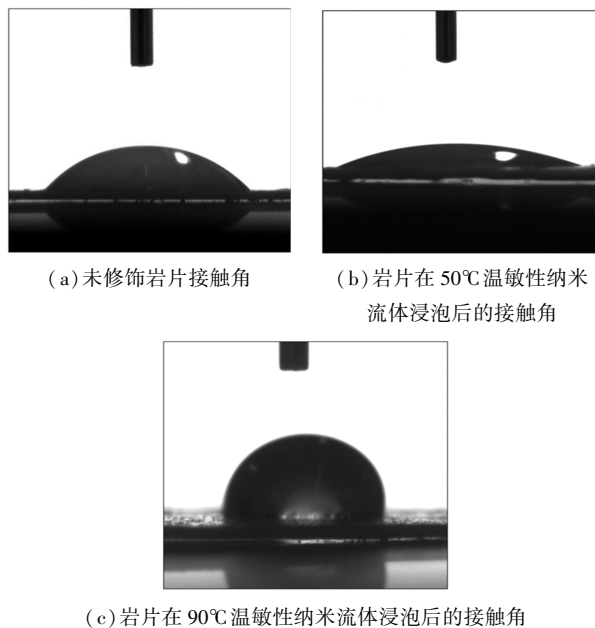


图7 NIPAm/IA/SiO₂ 分散液透光率随温度的变化情况

3.3 温敏型纳米流体界面润湿分析

岩片与水滴的接触角如图 8 所示。从图 8 中可以看出,未经处理的岩片表面接触角为 37.67°,此时未修饰的岩石表面亲水性强,表面润湿呈水湿。在环境温度为 50℃ ($T < LCST$) 下,经温敏型纳米流体浸泡后的岩片表面接触角为 18.30°。表面润湿仍呈水湿,但是接触角明显减小。然而在环境温度为 90℃ ($T > LCST$) 下,经温敏型纳米流体浸泡后的岩片表面接触角为 96.51°,岩石表面呈中性润湿。岩片经过温敏型纳米流体的浸泡后会吸附在岩片的表面,从而改变岩片的润湿性^[21]。实验结果进一步验证了 NIPAm/IA/SiO₂ 的温度响应性。



(c) 岩片在 90℃ 温敏性纳米流体浸泡后的接触角

图8 岩片与水滴的接触角

3.4 温敏型纳米流体界面张力分析

不同 NIPAm/IA/SiO₂ 质量分数纳米流体与原

油在 50、90℃ 的界面张力如表 1 所示。从表 1 中可以看出,在环境温度为 50℃ 和 90℃ 时,去离子水与原油的界面张力分别为 24.31 mN/m 和 16.67 mN/m。加入温敏型纳米流体后,无论是在环境温度为 50℃ 还是 90℃ 下,界面张力都迅速下降。当 NIPAm/IA/SiO₂ 质量分数为 0.2% 时,界面张力分别降至 4.47 mN/m 和 0.71 mN/m。这证实了 NIPAm/IA/SiO₂ 可以改变油水界面张力。而较低的油水界面张力将促进原油乳化油滴,油滴更容易被纳米流体置换。温敏型纳米流体与油滴在环境温度为 90℃ 时的界面张力明显低于 50℃ 时的界面张力。这种差异归因于以下两个因素:一方面,高温下分子热运动加剧,导致分子间相互作用减弱。油水界面张力随温度升高而降低;另一方面,当温度高于 LCST 时,NIPAm/IA/SiO₂ 具有两亲性,并倾向于向油水界面迁移。此时,油水界面张力进一步降低。

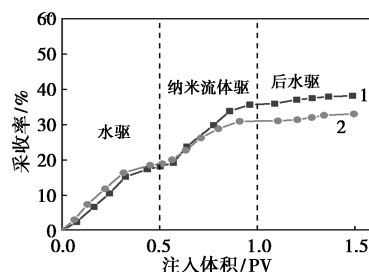
表 1 不同 NIPAm/IA/SiO₂ 质量分数纳米流体与原油在 50、90℃ 界面张力

温敏型纳米流体质量分数/%	50℃ 界面张力/(mN·m ⁻¹)	90℃ 界面张力/(mN·m ⁻¹)
0	24.31	16.67
0.005	15.60	5.95
0.010	10.39	2.41
0.050	7.14	1.52
0.100	5.05	0.92
0.200	4.47	0.71

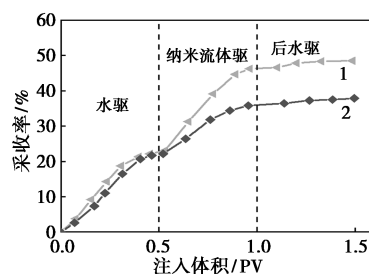
3.5 温度对 NIPAm/IA/SiO₂ 提高采收率的影响

以 KH570@SiO₂(中间产物)为对照实验,在相同浓度、注入速度及注入体积的条件下进行岩心驱替实验,探究温度对 NIPAm/IA/SiO₂ 提高采收率的影响,结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出,在环境温度为 50℃ 时,温敏型纳米流体的采收率为 38.17%,KH570@SiO₂ 纳米流体的采收率为 33.04%;在环境温度为 90℃ 时,温敏型纳米流体的采收率为 48.52%,KH570@SiO₂ 纳米流体的采收率为 37.87%。无论环境温度低于还是高于 LCST,温敏型纳米流体在提高采收率方面都优于 KH570@SiO₂ 纳米流体。随着温度的升高,温敏型纳米流体提高采收率幅度增长了 10.35%。而 KH570@SiO₂ 纳米流体提高采收率增幅仅为 4.78%。温敏型纳米流体随着温度的升高,提高采收率效果更好。这是因为 NIPAm/IA/SiO₂ 在温度高于 LCST 亲水性减

弱所致。当温度敏感的纳米流体进入岩心时,降低了油水界面张力并改变了岩石润湿性。岩石表面趋于弱亲水性或中性润湿更有利于注入流体对原油的驱替^[22]。



(a) 50℃



(b) 90℃

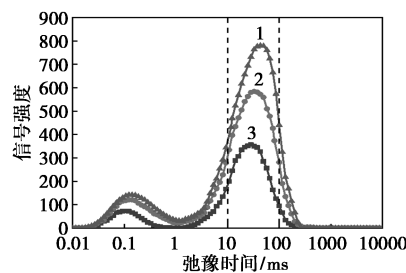
1—温敏型纳米流体;2—KH570@SiO₂ 纳米流体

图 9 不同温度下 NIPAm/IA/SiO₂ 纳米流体对提高采收率的影响

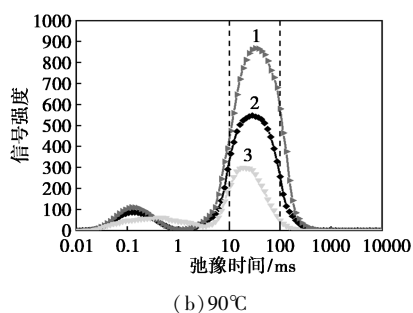
3.6 核磁共振(NMR)实验分析

核磁共振结果显示横向弛豫时间与信号幅值之间的关系,其中横向弛豫时间与孔喉大小成正比。当横向弛豫时间(T_2)小于 10 ms 时,孔隙为小孔隙; T_2 在 10~100 ms 之间,对应的孔隙为中孔隙; T_2 大于 100 ms 为大孔隙。根据核磁共振技术原理,弛豫时间越长,模拟岩心孔隙尺寸越大。信号幅度积分面积越大,多孔介质含油饱和度越高^[23]。不同温度下岩心驱油过程 T_2 谱图如图 10 所示。从图 10 中可以看出,2 个 T_2 谱图孔喉分布相似,主要以中孔隙为主。

从图 10(a)中可以看出,经过重水驱替后,弛豫时间在 10~100 ms 范围内信号强度出现明显下降,



(a) 50℃



1—饱和油;2—水驱;3—温敏型纳米流体驱

图10 不同温度下岩心驱油过程 T_2 谱图

而弛豫时间小于 10 ms 内信号强度变化不明显。结果表明,重水驱替后大孔隙和中孔隙的油被驱替,但是小孔隙的油几乎没有被动用。经过温敏型纳米流体驱替后,小孔隙信号强度明显下降,并且小孔隙对应的波峰出现左移,其弛豫时间从 0.11 ms 移动到 0.13 ms。表明部分小孔隙的油被采出。

从图 10(b)中可以看出,与环境温度为 50℃ 下的驱油实验一样,经过重水驱油后,小孔隙的油并未发生明显运移。而经过温敏型纳米流体驱替后,中孔隙的信号强度在水驱的基础上进一步降低,波峰向左偏移。小孔隙的弛豫时间增加且部分信号峰强度增大,说明小孔隙的油被运移,但由于渗流阻力,油被滞留在其他孔隙中。对比不同环境温度下注入温敏型纳米流体后原油在岩心中的动用情况,在 50℃ 下小孔隙的油动用效果更明显,虽然中、大孔隙的油也得到了动用,但 90℃ 下中、大孔隙的油动用效果相较更好。

3.7 温敏型纳米流体提高采收率机理分析

NIPAm/IA/SiO₂ 提高采收率的机理如图 11 所示,具体机理主要与其自身的温度响应性有关。当环境温度 $T < LCST$ 时,NIPAm/IA/SiO₂ 呈现亲水性。此时纳米流体的润湿作用增加了岩石表面的亲水性,从而增加了岩心小孔隙的毛细力^[24]。毛细管力由阻力转变为毛管动力,渗吸作用使小孔隙中的油更容易被采出;当环境温度 $T > LCST$ 时,NIPAm/IA/SiO₂ 为两亲性,此时岩石表面趋于弱亲水性或中性润湿,有助于提高油水两相的流动性。由于岩石表面亲水性降低,毛细管力也随之减小,部分小孔隙的原油难以被毛管力驱动,从而导致部分小孔隙中的油被滞留,相比之下大孔道中的油更容易被驱替。NIPAm/IA/SiO₂ 的亲疏水相之间的转变更有利于储层剩余油的驱替,无论环境温度高于还是低于 $LCST$ 时,NIPAm/IA/SiO₂ 均能有效提高原油采收率。

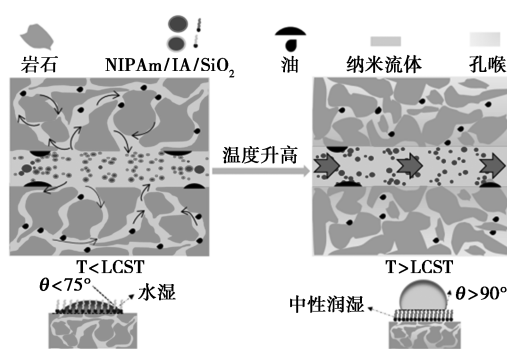


图11 温敏型纳米流体驱油机理

4 结论

基于反相微乳液聚合法,温敏性单体 NIPAm 和亲水性单体 IA 成功接枝在纳米 SiO₂ 表面,得到了温敏型 NIPAm/IA/SiO₂ 纳米颗粒。

(1) NIPAm/IA/SiO₂ 具有优异的热稳定性和分散性。NIPAm/IA/SiO₂ 的 $LCST$ 为 69.8℃,即温度低于 69.8℃ 时 NIPAm/IA/SiO₂ 为亲水性,温度超过 69.8℃ 时 NIPAm/IA/SiO₂ 为两亲性。NIPAm/IA/SiO₂ 的温度响应机制主要由其表面的温敏型聚合物分子链来决定。

(2) 当环境温度低于 $LCST$ 时,温敏型纳米流体会增强岩石表面的亲水性;当环境温度高于 $LCST$ 时,温敏型纳米流体会使岩石表面趋于弱亲水性或中性润湿。

(3) 温度高于或低于 $LCST$, NIPAm/IA/SiO₂ 提高采收率的效果均大于 KH@570SiO₂。对比不同温度下的核磁共振实验结果发现,小孔隙的油在温度低于 $LCST$ 时运移更明显,大孔隙的油在温度大于 $LCST$ 时运移更明显。

(4) NIPAm/IA/SiO₂ 提高采收率的机理:当温度低于 $LCST$ 时,NIPAm/IA/SiO₂ 使岩石表面的亲水性增强,孔喉中的油由于渗吸作用被动用;当温度高于 $LCST$ 时,NIPAm/IA/SiO₂ 呈现两亲性。此时,岩石表面趋于弱亲水性或中性润湿,有助于提高油水两相的流动性,使孔喉中的油更容易被纳米流体驱替。

参考文献

- [1] Dibaji A S, Rashidi A, Baniyaghoob S, 等. 碳纳米管-二氧化钛纳米复合材料的合成及纳米流体驱油实验[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1234-1241.
- [2] 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.

- [3] 胡文瑞,魏漪,鲍敬伟.中国低渗透油气藏开发理论与技术进展[J].石油勘探与开发,2018,45(4):646-656.
- [4] 田晓,周长华,杨广彬,等.表面具有不同官能团的分散二氧化硅纳米微粒对钻井液滤失性能的影响[J].油田化学,2021,38(3):381-387,405.
- [5] 林安国.纳米二氧化硅-壳聚糖杂化材料在水基钻井液中的应用研究[J].应用化工,2020,49(S1):205-209.
- [6] 马腾,胡克剑,金田,等.一种分子修饰纳米驱油剂的合成与提高采收率机理的研究[J].当代化工,2023,52(12):2915-2922,2940.
- [7] 刘帅,蒲春生,白云.纳米二氧化硅改性以及在 EOR 中的应用机理研究[J].应用化工,2021,50(10):2856-2860.
- [8] 青玉泉,杨明君,李奎,等.改性纳米二氧化硅复合降黏剂的制备与性能评价[J].现代化工,2020,40(2):153-156,161.
- [9] Nguangna E N, Zaidi Jaafar M, Norddin M, et al. Surface modification of nanoparticles to improve oil recovery mechanisms: A critical review of the methods, influencing Parameters, advances and prospects[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 360: 119502.
- [10] Haruna M A, Gardy J, Yao G, et al. Nanoparticle modified polyacrylamide for enhanced oil recovery at harsh conditions [J]. Fuel, 2020, 268: 117186.
- [11] Ahmed A, Saaid I M, Ahmed A A, et al. Evaluating the potential of surface-modified silica nanoparticles using internal olefin sulfonate for enhanced oil recovery [J]. Petroleum Science, 2020, 17(3): 722-733.
- [12] Cao J, Wang J, Wang X, et al. Preparation and characterization of modified amphiphilic nano-silica for enhanced oil recovery [J]. Colloids And Surfaces A-Physicochemical And Engineering Aspects, 2022, 633: 127864.
- [13] 葛永驰,刘振宇,崔宝蓉,等.pH/温度双重响应型介孔二氧化硅载药微球的制备及缓释性能研究[J].现代化工,2022,42(11):155-160,169.
- [14] 谢坤,程前,刘长龙,等.油气田刺激响应性材料应用现状及前景展望[J/OL].精细化工,1-18[2024-02-24].
- [15] 潘一,徐明磊,侯冰,等.温敏聚合物在油气开采中的研究进展[J].化工进展,2021,40(4):2109-2119.
- [16] Zhou Y, Luo Z, Xu M, et al. Preparation and properties of temperature-sensitive P(NIPAM-AM) nano-microspheres in enhanced oil recovery[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(1):204-213.
- [17] 侯向前,卢拥军,方波,等.渗吸驱油用改性纳米 SiO₂ 研究现状及展望[J].现代化工,2023,43(10):84-88,93.
- [18] 刘乔,黄鑫,王海波,等.纳米颗粒调控流体润湿性微观实验观测[J].科学技术与工程,2024,24(1):183-188.
- [19] 朱峰.中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验地质技术之核磁共振岩心分析技术[J].石油实验地质,2023,45(4):590.
- [20] Shen Y, Zhu Y, Gao Z, et al. Nano-SiO₂ grafted with temperature-sensitive polymer as plugging agent for water-based drilling fluids [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48(7): 9401-9411.
- [21] 吴亚,蔡晴,方荣苗,等.提高油气采收率的纳米流体研究进展[J].应用化工,2022,51(7):2045-2051,2056.
- [22] 侯宝峰.表面活性剂改变岩石表面润湿性及其提高采收率研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- [23] Sun H, Wang H, Lun Z. Effect of permeability and fractures on oil mobilization of unconventional resources during CO₂ EOR using nuclear magnetic resonance [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 12660.
- [24] 袁帅,周福建,李源,等.致密砂岩油藏纳米乳液渗吸增产作用机理[J].油气地质与采收率,2024,31(1):126-136.■

多项石油和化工领域成果获得 2023 年度国家科学技术奖

6月24日,2023年度国家科学技术奖在京揭晓,共评选出250个项目,其中多项石油和化工领域成果获奖。

(1)国家自然科学奖:石油和化工领域获得国家自然科学奖的成果均为二等奖,分别是:分子压电体的铁电化学设计、氮化碳光催化、碳化钨催化剂上水的低温活化和制氢过程、高分子递药载体的构筑与功能调控研究、双金属有机试剂的发现与发展、基于角度调控和协同促进策略的不对称催化方法学研究、一维尺度亚纳米尺度材料的合成与性质。

(2)国家技术发明奖:石油和化工领域中,陆上宽频宽方位高密度地震勘探关键技术与装备获得国家技术发明奖一等奖;绿色生物基材料包膜控释肥创制与应用,无机非金属废水处理与资源回收技术及应用,碳纤维增强高性能湿式摩擦材料关键技术及应用,低铂、高效燃料电池膜电极组件工程化成套制备技术及应用,硅氧烷杂化聚合物功能涂层设计制备新技术及其应用,聚合物熔体纳米纤维绿色高效制造技术及应用,离子液体强化反应和分离新过程及产业化应用等获得国家技术发明奖二等奖。

(3)国家科学技术进步奖:石油和化工领域中,“深海一号”超深水大气田开发工程关键技术与应用、基于聚烯烃凝聚态结构调控制备高性能锂离子电池隔膜、新型膜法水处理关键技术及应用等获得国家科学技术进步奖一等奖;锂电前驱体反应结晶新装备开发及高端正极材料智能制造、气体净化膜材料的创制及应用、基于分子链软硬段精准调控的可降解共聚酯制备关键技术及农膜应用、高效低成本太阳能单晶硅片制造关键技术创新与应用、长寿命大型乙烯裂解反应器设计制造与维护技术、全过程优化的锂电固废高效低碳处理技术与应用、渤海伸展-走滑复合断裂带深部油气勘探理论技术创新与重大发现等获得国家科学技术进步奖二等奖。

科技奖励是我国长期坚持的激励科技创新的重要基础制度,2023年度国家科学技术奖评奖工作坚持“四个面向”,把服务国家重大战略需求并作出创造性贡献作为提名和评审的重要原则,围绕国家战略需要,优化评审组设置和评审委员会专家构成,强化重点领域。(中化新网)