

引用格式:王守军.胜利油田污水对微球调驱性能影响实验研究[J].油气地质与采收率,2025,32(1):186-193.

WANG Shoujun. Experimental study on effect of sewage from Shengli Oilfield on microsphere flooding performance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(1): 186-193.

胜利油田污水对微球调驱性能影响实验研究

王守军

(中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257001)

摘要:微球调驱技术因其能够有效封堵高渗透通道、改善油层流动性能而备受关注。通过核心驱替实验和流变性能测试,系统分析了微球在不同浓度及pH值胜利油田污水中的分散性、驱油性能、长期稳定性及作用机理。结果表明:随着油田污水质量分数从0增加至50%,微球的平均粒径从1.2 μm 增至2.0 μm ,分散性显著变差。在不同pH值条件下,微球在pH值为4的油田污水中的平均粒径为2.2 μm ,而在pH值为9时降至1.3 μm ,分散性较好。核心驱替实验结果显示,在高有机物成分的油田污水中,微球的驱油效率最高,达到50.3%。微球在质量分数为30%的油田污水中的长期稳定性较差,28 d后平均粒径增至2.1 μm 。流变实验结果表明,微球悬浮液具有剪切增稠特性,剪切速率为1 000 s^{-1} 时剪切应力为9.1 Pa。机理分析表明,微球通过静电吸附、物理吸附和化学吸附与污水中的杂质和悬浮颗粒发生相互作用,显著影响其分散性和驱油效果。

关键词:胜利油田;油田污水;微球;驱替;稳定性

文章编号:1009-9603(2025)01-0186-08

DOI:10.13673/j.pgre.202409027

中图分类号:TE357.46

文献标识码:A

Experimental study on effect of sewage from Shengli Oilfield on microsphere flooding performance

WANG Shoujun

(SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying City, Shandong Province, 257001, China)

Abstract: Microsphere flooding technology has attracted much attention because it effectively blocks high-permeability channels and improves reservoir flow performance. Based on core flooding experiments and rheological experiments, the dispersion, oil displacement performance, long-term stability, and action mechanism of microspheres in sewage at different concentrations and pH values from Shengli Oilfield were systematically analyzed. The results show that as the concentration of sewage from Shengli Oilfield increases from 0 to 50%, the average particle size of the microspheres increases from 1.2 μm to 2.0 μm , indicating a significant deterioration in dispersion. Under different pH conditions, the average particle size of the microspheres is 2.2 μm in the sewage with a pH of 4, while it decreases to 1.3 μm , showing better dispersion in the sewage with a pH of 9. The core flooding experiments indicate that the oil displacement efficiency of the microspheres is the highest, reaching 50.3%, in sewage with high organic content from Shengli Oilfield. The long-term stability of the microspheres is poor in the sewage at a concentration of 30%, with the average particle size increasing to 2.1 μm after 28 days. The rheological experiments show that microsphere suspensions exhibit shear thickening properties, with a shear stress of 9.1 Pa at a shear rate of 1 000 s^{-1} . The mechanism analysis reveals that the microspheres interact with impurities and suspended particles in the sewage through electrostatic adsorption, physical adsorption, and chemical adsorption, significantly affecting their dispersion and oil displacement effects.

Key words: Shengli Oilfield; sewage from Shengli Oilfield; microsphere; displacement; stability

收稿日期:2024-09-18。

作者简介:王守军(1974—),男,山东莱州人,高级工程师,从事油气地球化学、油气提高采收率研究工作。E-mail:wangshoujun265.slyt@sinopec.com。

随着全球能源需求的不断增长和传统油田开发程度的提高,油田开发中难以采出的剩余油越来越受到关注^[1-6]。胜利油田作为中国重要的石油生产基地,面临着提高采收率的挑战^[7-9]。近年来,微球调驱技术作为一种新型的提高采收率方法,因其能够有效封堵高渗透通道、改善油层流动性而备受关注^[10-12]。然而,油田污水的存在对微球调驱性能的影响尚未得到充分研究。

微球调驱技术已经在中外一些油田中得到了研究和应用。研究主要集中在微球材料的制备、微球在油层中的运移和封堵机理等方面。LI等研究了不同种类微球材料在油层中的封堵效果,发现具有高表面积和良好分散性的微球材料可以显著提高驱油效率^[13]。NIE等则通过实验研究了微球在不同渗透率油层中的运移行为,结果表明微球在低渗透油层中具有较好的封堵效果^[14]。此外,国外研究还涉及到微球与其他调驱剂的协同作用,如微球与聚合物的复配使用,可以进一步提高驱油效率^[15-16]。国内研究多聚焦于微球调驱的实验研究和现场试验。黎晓茸等在长庆油田开展的微球调驱现场试验表明,微球可以有效改善油层流动性,提高采收率约10%^[17]。高思远在长庆油田的研究中探讨了微球在不同注入条件下的驱油效果,发现微球注入压力和注入速度对驱油效果有显著影响^[18]。此外,国内研究还关注微球的制备方法和性能优化,如通过改性微球表面以提高其分散性和稳定性^[19-20]。

目前的研究大多在理想实验条件下进行,未充分考虑实际油田污水对微球调驱性能的影响。油田污水中含有大量的盐类、悬浮物和有机物,这些成分可能会显著影响微球的分散性、稳定性和驱油性能。现有研究的不足之处在于:一是缺乏对不同成分油田污水中微球分散性和稳定性的系统研究;二是未充分探讨油田污水成分和微球浓度、粒径对调驱效果的具体影响;三是缺乏对微球在油田污水中长期稳定性的分析。

笔者通过系统实验探讨油田污水对微球调驱性能的影响,具体包括微球在不同浓度和pH值油田污水中的分散性研究,油田污水成分、微球浓度和粒径对微球调驱性能的影响,微球在油田污水中的长期稳定性及其调驱过程中的流动特性分析。通过这些研究,期望能够揭示油田污水对微球调驱性能的影响机制,为胜利油田等油田提高采收率提供理论支持和技术指导。

1 实验器材与步骤

1.1 实验材料

实验材料包括:微球,北京华美生物技术有限公司;油田污水,取自胜利油田;pH值调节剂(盐酸和氢氧化钠),盐酸纯度为36%,氢氧化钠纯度为99%,天津市大茂化学试剂厂和广州化学试剂厂。

1.2 实验仪器

实验仪器包括:Mastersizer 3000型激光粒度分析仪,马尔文仪器有限公司(中国代理);KQ-500DE型超声波处理器,昆山市超声仪器有限公司;ZY-01型核心驱替实验装置,北京卓越科技有限公司;MCR 302型旋转流变仪,安东帕公司(中国代理);SU8010型扫描电子显微镜,日立高新技术有限公司。

1.3 实验步骤

微球在不同浓度油田污水中的分散性分析 选用质量分数分别为0、10%、20%、30%、40%和50%的油田污水溶液,加入固定量的微球,并在超声波处理器中处理10 min以确保均匀分散。采用激光粒度分析仪测量每种溶液的粒径分布,以评估分散效果。

油田污水pH值对微球分散性的影响 选用pH值分别为4、5、6、7、8和9的油田污水溶液,加入固定量的微球,并在超声波处理器中处理10 min以确保均匀分散。采用激光粒度分析仪测量每种溶液的粒径分布,以评估分散效果。

微球在油田污水中的稳定性 选用质量分数为30%的油田污水溶液,加入固定量的微球,并在超声波处理器中处理10 min以确保均匀分散。分别在0、7、14、21和28 d进行取样,采用激光粒度分析仪和透射电子显微镜(TEM)测量其粒径分布和形貌变化,以评估微球的稳定性。

油田污水成分对微球调驱性能的影响 采用核心驱替实验测量油田污水中不同成分对微球调驱性能的影响。实验选用4种不同成分的油田污水溶液,分别为高盐度、高有机物、高悬浮物和混合成分。每种溶液加入固定量的微球,分别进行核心驱替实验,测量微球的驱油效率。实验参数设定为:恒定流速为0.5 mL/min,驱替压力为3.5 MPa,实验温度为60℃,驱替时间为60 min。

油田污水中微球浓度对调驱效果的影响 采用核心驱替实验测量不同微球浓度对油田污水调驱效果的影响。实验选用质量分数为30%的油田污水溶液,微球质量分数分别设为0.1%、0.2%、0.3%、

0.4%和0.5%。实验参数设定为:恒定流速为0.5 mL/min,驱替压力为3.5 MPa,实验温度为60 °C,驱替时间为60 min。

油田污水中微球粒径对调驱效果的影响 采用核心驱替实验测量不同微球粒径对油田污水调驱效果的影响。实验选用质量分数为30%的油田污水溶液,微球粒径分别设为100、200、300、400和500 nm。实验参数设定为:恒定流速为0.5 mL/min,驱替压力为3.5 MPa,实验温度为60 °C,驱替时间为60 min。

微球在油田污水中的作用机理 实验选用质量分数为30%的油田污水溶液,微球质量分数设为0.3%,包括静态吸附实验、动态吸附实验和微球在油田污水中的流动性测试。在静态吸附实验中,将一定量的微球加入油田污水中,搅拌均匀后静置24 h,测量吸附前后溶液中微球的浓度变化;驱替压力为3.5 MPa,温度为60 °C。在动态吸附实验中,通过流动装置模拟微球在油层中的流动过程,测量不同流速下微球的吸附量;驱替压力为5.0 MPa,温度为60 °C,恒定流速分别为0.5和1.0 mL/min。流动性测试通过核心驱替实验测量微球在不同驱替压力和温度条件下的流动性能,包括3组实验,实验条件分别为:驱替压力为3.5 MPa,温度为60 °C;驱替压力为5.0 MPa,温度为60 °C;驱替压力为3.5 MPa,温度为80 °C。

油田污水对微球结构和性质的影响 选用质量分数为30%的油田污水溶液,微球质量分数设为0.3%。分别在不同时间点(0、7、14、21和28 d)取样,使用扫描电子显微镜(SEM)观察微球表面的形貌变化。

微球调驱过程中的流动特性分析 采用核心驱替实验和流变实验分析微球在调驱过程中的流动特性。实验选用质量分数为30%的油田污水溶液,微球质量分数设为0.3%。核心驱替实验参数设定恒定流速为0.5 mL/min,驱替压力为3.5 MPa,实验温度为60 °C,驱替时间为60 min。流变实验通过旋转流变仪测量微球悬浮液的流变特性,包括剪切应力和剪切速率的关系。

2 实验结果与讨论

2.1 微球在油田污水中的分散性分析

2.1.1 微球在不同质量分数油田污水中的分散性

由图1可见,随着油田污水质量分数的增加,微

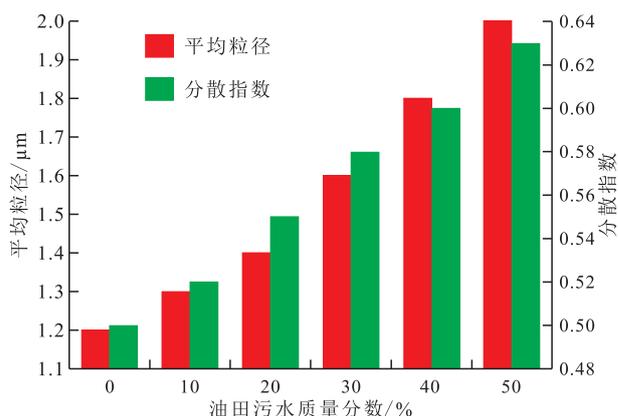


图1 不同质量分数油田污水中微球的平均粒径和分散指数
Fig.1 Average particle sizes of microspheres in sewage at different concentrations from Shengli Oilfield

球的平均粒径逐渐增大,分散指数也有所增加。这表明油田污水中的杂质和盐分对微球的分散性有显著影响,导致微球聚集形成更大的颗粒。在纯水中,微球的平均粒径为1.2 μm ,分散性最佳。在质量分数为50%的油田污水中,微球的平均粒径达到2.0 μm ,分散指数也从0.50增至0.63,表明分散性明显变差。这是因为在低质量分数的油田污水中,微球表面带有较强的静电斥力,形成稳定的双电层结构,阻止微球之间的聚集。然而,随着油田污水质量分数的增加,溶液中的离子强度上升,双电层被压缩,微球表面的静电斥力减弱,从而导致微球更容易聚集在一起。此外,油田污水中的有机物质和悬浮颗粒吸附在微球表面,改变微球的表面特性,进一步影响其分散性。有机物可能形成黏性层,促进微球的黏结和聚集。

2.1.2 油田污水pH值对微球分散性的影响

由图2可知,随着油田污水pH值的升高,微球的平均粒径逐渐减小,分散指数也有所降低。这表明油田污水的pH值对微球的分散性有显著影响,

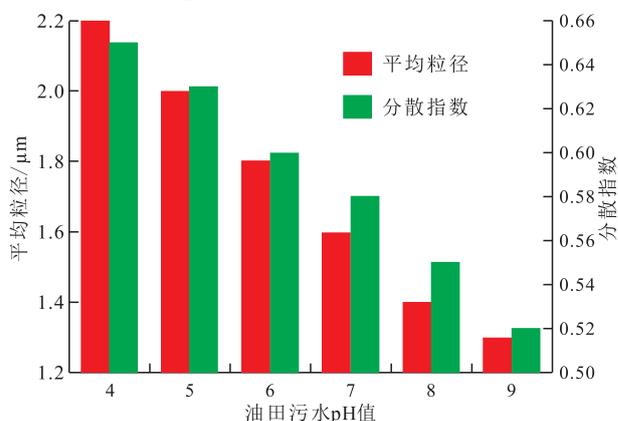


图2 不同pH值油田污水中微球的平均粒径和分散指数
Fig.2 Average particle size of microspheres in sewage at different pH values from Shengli Oilfield

低pH值的环境下微球更容易聚集,导致平均粒径较大,而高pH值的环境下微球的分散性较好,平均粒径较小。在pH值为4的油田污水中,微球的平均粒径为2.2 μm,分散指数为0.65;而在pH值为9的油田污水中,微球的平均粒径降至1.3 μm,分散指数为0.52,显示出较好的分散性。这是由于在低pH值的酸性环境中,微球表面可能发生质子化,带正电荷,导致静电斥力减弱,微球更容易聚集在一起。而在高pH值的碱性环境中,微球表面可能带负电荷,静电斥力增强,阻止微球聚集,分散性提高。此外,低pH值环境下,油田污水中的离子强度较高,双电层被压缩,静电斥力减弱,导致微球聚集。而高pH值环境下,离子强度较低,双电层较稳定,静电斥力增强,微球分散性较好。同时,不同pH值环境下,油田污水中的有机物和悬浮颗粒对微球的吸附作用也会不同。低pH值时,有机物可能更容易吸附在微球表面,形成黏性层,促进微球聚集;而高pH值时,有机物的吸附作用减弱,微球的分散性较好。

2.1.3 微球在油田污水中的稳定性

通过图3可知,随着时间的推移,微球的平均粒径逐渐增大,分散指数也有所增加。这表明微球在油田污水中的长期稳定性较差,微球逐渐聚集形成更大的颗粒。在0 d时,微球的平均粒径为1.6 μm,分散指数为0.58;而在28 d时,微球的平均粒径增至2.1 μm,分散指数为0.68,显示出聚集的趋势。这是由于随着时间的推移,油田污水中的离子逐渐中和微球表面的电荷,导致静电斥力减弱,微球更容易聚集在一起。另外,长时间在油田污水环境中,有机物和悬浮颗粒可能逐渐吸附在微球表面,形成黏性层,促进微球的聚集。这些有机物和悬浮颗粒可能会与微球表面发生物理和化学作用,导致微球的

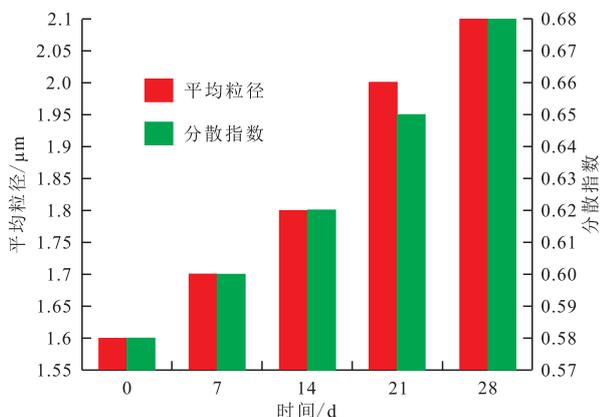


图3 不同时间点油田污水中微球的平均粒径和分散指数
Fig.3 Average particle sizes of microspheres in sewage from Shengli Oilfield at different time

分散性变差。同时,微球可能会发生物理和化学降解,导致其结构和性质的改变,从而影响其分散性和稳定性。

2.2 油田污水对微球调驱性能的影响

2.2.1 油田污水成分对微球调驱性能的影响

由图4可知,在高有机物成分的油田污水中,微球的驱油效率最高,为50.3%;高盐度和高悬浮物成分的油田污水中,微球的驱油效率分别为45.2%和42.7%;混合成分的油田污水中,微球的驱油效率最低,为40.5%。不同成分的油田污水对微球的驱油效率影响显著。高盐度成分的油田污水中,溶液的离子强度较高,微球表面的静电斥力减弱,导致微球聚集,分散性降低,从而影响其驱油效率。尽管如此,高盐度成分也可能通过增加溶液的黏度,提高微球的驱油能力。高有机物成分的油田污水中,有机物质可能通过与微球表面发生相互作用,形成稳定的微球悬浮液,从而提高其驱油效率。特别是一些表面活性物质,可以增强微球的分散性,减少微球聚集,提高驱油性能。高悬浮物成分的油田污水中,悬浮颗粒可能会与微球发生碰撞和黏附,导致微球的聚集,降低其驱油效率。此外,悬浮物可能会堵塞岩石孔隙,影响微球的渗透性,从而降低驱油效率。混合成分的油田污水中,盐度、有机物和悬浮物的综合作用可能会导致更复杂的相互作用,整体上对微球的驱油效率产生负面影响。尤其是在高盐度和高悬浮物成分的共同作用下,微球更容易聚集和堵塞,导致驱油效率显著降低。

2.2.2 油田污水中微球质量分数对调驱效果的影响

由图5可知,随着微球质量分数的增加,驱油效率逐渐提高。在微球质量分数为0.1%时,驱油效率为35.4%;而在微球质量分数为0.5%时,驱油效率

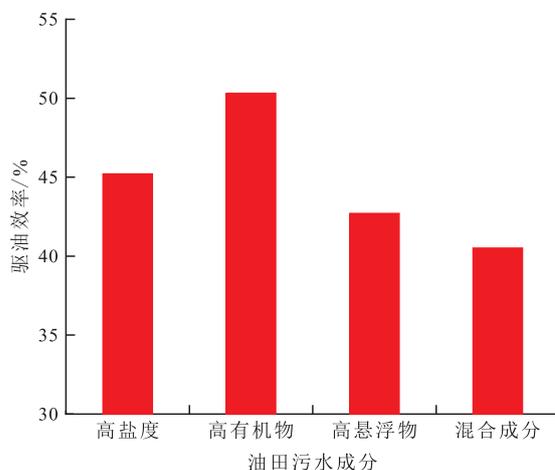


图4 不同成分油田污水中微球的驱油效率
Fig.4 Oil displacement efficiency of microspheres in sewage with different components from Shengli Oilfield

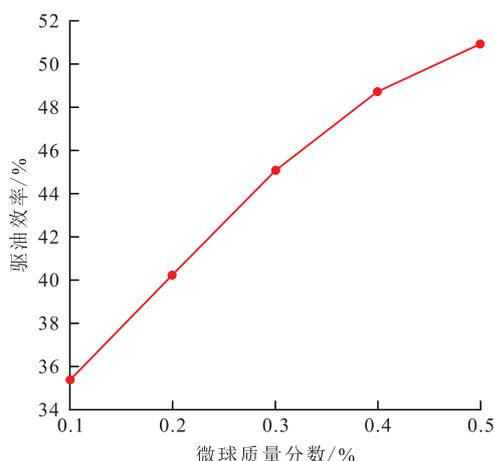


图5 不同微球质量分数下的驱油效率
Fig.5 Oil displacement efficiency at different microsphere concentrations

增至50.9%。随着微球质量分数的增加,更多的微球可以进入油层,增强对油层的封堵和改造效果,从而提高驱油效率。微球在油田污水中形成的稳定悬浮液有助于增加油层的流动阻力,促进更多的原油被驱替出来。高质量分数微球能够更均匀地覆盖油层表面,减少油层中的高渗透通道,优化油层的流体渗流特性,降低非均质性对驱油效率的影响,从而显著提升驱油效果。微球的覆盖效应还可以有效封堵油层中的微小裂缝和孔隙,提高油层的整体驱油效率。微球在油田污水中的分散性和稳定性也会随着浓度的增加而提高,减少微球的聚集和沉降现象,进一步增强其调驱效果。

2.2.3 油田污水中微球粒径对调驱效果的影响

由图6可知,在微球粒径为100 nm时,驱油效率最高,为52.3%。随着微球粒径的增加,200 nm时驱油效率降至48.7%;300 nm时驱油效率为45.4%;400 nm时驱油效率为42.1%;500 nm时驱油效率降

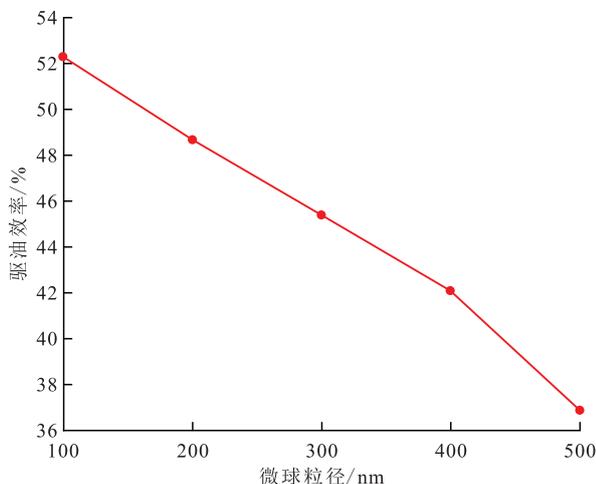


图6 不同微球粒径下的驱油效率
Fig.6 Oil displacement efficiency at different particle sizes of microspheres

至36.9%。微球粒径越小,其调驱效果越好,驱油效率也越高。出现这种现象的原因在于较小粒径的微球能够更容易进入油层的微小孔隙,增强对油层的封堵效果,从而提高驱油效率。微球粒径越小,其表面积越大,能够与油层中的更多表面发生相互作用,增强驱油效果。小粒径微球具有更好的注入能力,能够均匀分布在油层的低渗透区域,有效封堵高渗透通道,优化油层内的流体流动特性,从而提高驱油效率。小粒径微球还能够更有效地封堵油层中的微小裂缝和孔隙,提高油层的整体驱油效率。小粒径微球在油层中能够形成更强的物理和化学相互作用,增加油层的黏弹性和结构稳定性,从而提高驱油效率。小粒径微球在油田污水中的分散性和稳定性也较好,进一步增强其调驱效果。

2.3 机理分析

2.3.1 微球在油田污水中的作用机理

从图7a可以看出,在静态吸附实验中,微球与油田污水中的杂质和悬浮颗粒有充分的接触时间,吸附效果最好,吸附量达到15.6 mg/g。动态吸附实验中,由于流速的增加,微球与杂质和悬浮颗粒的接触时间减少,吸附效果降低,流速为0.5 mL/min时吸附量为12.3 mg/g,流速为1.0 mL/min时吸附量为10.7 mg/g。这说明在实际油田应用中,微球的吸

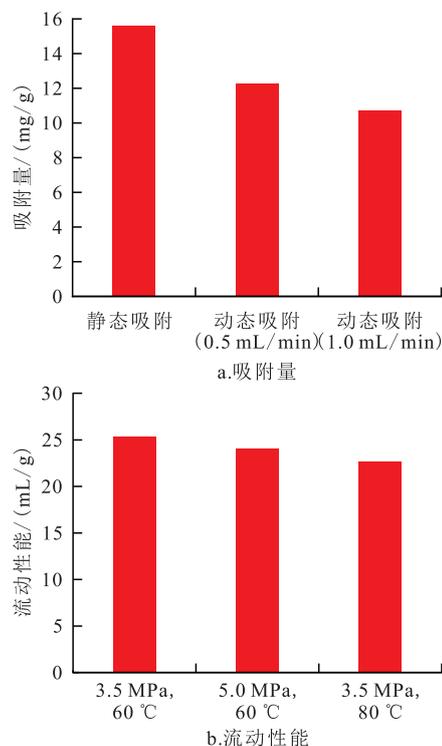


图7 不同实验类型和实验条件下微球的吸附量与流动性能

Fig.7 Adsorption and flow properties of microspheres under different experimental types and experimental conditions

附效果会受到流速的影响。从图7b可见,在驱替压力为3.5 MPa、温度为60 °C时,微球的流动性能为25.4 mL/g;当驱替压力增加到5.0 MPa时,流动性能降至24.1 mL/g;在温度升高到80 °C时,流动性能进一步降至22.7 mL/g。这表明驱替压力和温度对微球的流动性能有显著影响,较高的驱替压力和温度会降低微球的流动性能。

微球在油田污水中通过静电吸附、物理吸附和化学吸附与杂质和悬浮颗粒发生相互作用。这些相互作用使得微球能够有效地捕集和去除油田污水中的杂质,改善油田污水的质量。此外,微球的流动性能与驱替压力和温度密切相关,较高的驱替压力和温度会降低微球的流动性能,这对于优化微球在油田中的应用具有重要意义。

2.3.2 油田污水对微球结构和性质的影响

由图8可见,随着时间的推移,微球的表面形貌逐渐发生变化。0 d时,微球表面光滑;7 d时,表面出现裂纹;14 d时,裂纹增多;21 d时,裂纹明显,表面粗糙不均匀。到了28 d时,微球基本上属于分解状态,没有完整的球形形态,这表明油田污水对微球的表面结构有显著影响。这种变化可能是由于油田污水中的化学成分对微球表面的侵蚀作用引起的。随着时间的延长,这种侵蚀作用加剧,导致

微球表面损伤更加明显。油田污水中的酸性物质、盐类和有机物质可能对微球表面产生化学侵蚀作用,导致微球表面的物理结构发生变化。酸性物质可能通过质子化作用破坏微球表面的化学键,盐类可能通过离子交换作用影响微球的稳定性,有机物质可能通过吸附和反应改变微球的表面特性。随着油田污水对微球表面结构的持续影响,微球的结构稳定性逐渐降低。这可能会影响微球在油田污水处理中的长期效果。因此,需要考虑通过改进微球的材料和结构,提高其在油田污水中的化学稳定性和抗降解能力。

2.3.3 微球调驱过程中的流动特性分析

从表1可以看出,随着驱替时间的增加,压力降逐渐增大,驱油效率也逐渐提高。在驱替时间为0 min时,压力降为0 MPa,驱油效率为0%;驱替时间为60 min时,压力降增至3.5 MPa,驱油效率达到50.9%。这表明微球在调驱过程中能够显著提高驱油效率,随着时间的推移,驱油效果更加明显。流变实验结果(图9)显示,微球悬浮液的剪切应力随着剪切速率的增加而增大。在剪切速率为0.1 s⁻¹时,剪切应力为1.2 Pa;剪切速率为1 000 s⁻¹时,剪切应力增至9.1 Pa。这表明微球悬浮液具有剪切增稠特性,随着剪切速率的增加,悬浮液的黏度也随之

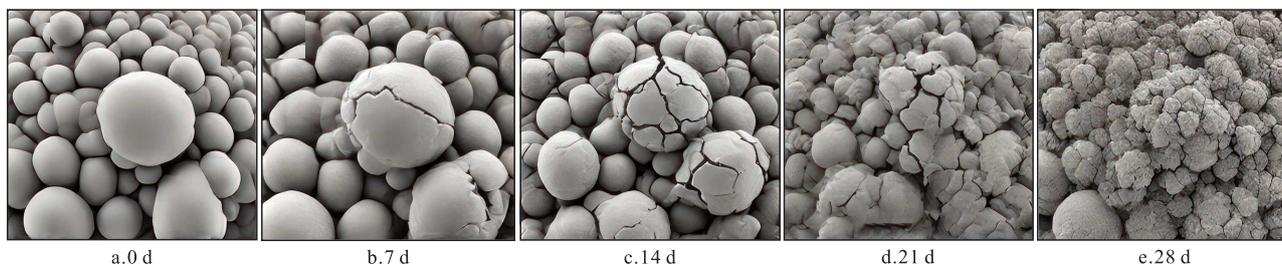


图8 不同时间点微球的表面形貌特征

Fig.8 Surface morphology of microspheres at different time

表1 驱替实验中不同驱替时间和压力降条件下的驱油效率

Table1 Oil displacement efficiency under different displacement time and pressure drop conditions in oil displacement experiments

驱替时间/min	压力降/MPa	驱油效率/%
0	0	0
10	0.5	15.4
20	1.2	28.7
30	2.0	35.6
40	2.8	42.3
50	3.1	47.8
60	3.5	50.9

增大。驱替实验结果表明,随着驱替时间的增加,微球在油层中的流动性和封堵效果逐渐增强,导致压力降增大,驱油效率显著提高;而流变实验结果显示微球悬浮液具有明显的剪切增稠特性,剪切速率越高,悬浮液的剪切应力越大。这种特性有助于在油层中形成稳定的悬浮液,增加流动阻力,促进驱油效果。在实际应用中,这种剪切增稠特性有助于微球在高流速下保持稳定,提高调驱效果。

3 结论

(1)油田污水浓度和pH值对微球的分散性具有显著影响。随着油田污水质量分数从0增至

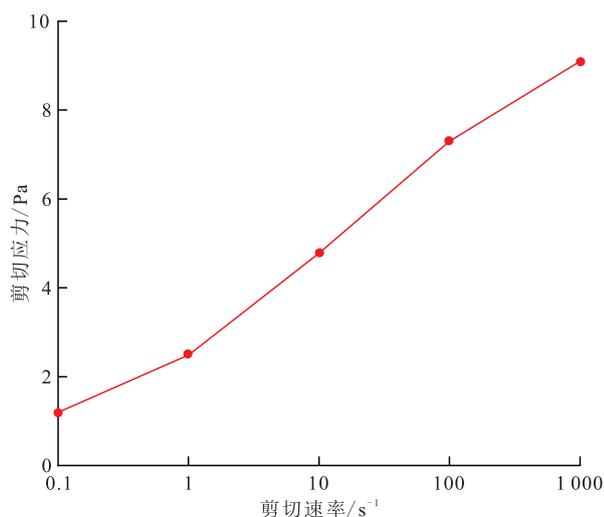


图9 微球悬浮液的剪切应力和剪切速率关系

Fig.9 Relationship between shear stress and shear rate of microsphere suspension

50%,微球的分散性逐渐变差,平均粒径从1.2 μm 增至2.0 μm 。在高pH值环境下,微球的分散性较好,pH值为9时微球的平均粒径降至1.3 μm ,显示出更稳定的分散效果。

(2)油田污水中的不同成分显著影响微球的调驱效率。在高有机物成分的油田污水中,微球的驱油效率最高,达到50.3%。高盐度和高悬浮物成分的油田污水分别使微球的驱油效率降至45.2%和42.7%,而混合成分油田污水中微球的驱油效率最低,仅为40.5%。

(3)微球在油田污水中主要通过静电吸附、物理吸附和化学吸附与污水中的杂质和悬浮颗粒发生相互作用。随着时间的推移,微球表面逐渐受到油田污水中化学成分的侵蚀,导致其结构和性质的变化。驱替实验和流变实验显示,微球悬浮液具有剪切增稠特性,能够在高流速下保持稳定,显著提高驱油效率。

参考文献

[1] 孙福街. 中国海上油田高效开发与提高采收率技术现状及展望[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 91-99.
SUN Fujie. Status and prospects of efficient development and EOR technologies in China offshore oilfields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 91-99.

[2] 王欣, 才博, 李帅, 等. 中国石油油气藏储层改造技术历程与展望[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(1): 67-75.
WANG Xin, CAI Bo, LI Shuai, et al. Development process and prospect of CNPC's reservoir stimulation technologies [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(1): 67-75.

[3] 汪洋, 黄延明, 同鑫, 等. 剩余油研究方法综述[J]. 特种油气藏, 2023, 30(1): 14-21.

WANG Yang, HUANG Yanming, TONG Xin, et al. Review of remaining oil research methods [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(1): 14-21.

[4] 陈筱, 肖鹏, 段瑞凯, 等. 深水浊积储层注气开发油藏流动单元划分及剩余油挖潜研究[J]. 非常规油气, 2023, 10(3): 103-111.
CHEN Xiao, XIAO Peng, DUAN Ruikai, et al. Study on flow unit division and remaining oil tapping in deep-water turbidite gas injection reservoir [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(3): 103-111.

[5] 郭肖, 冯金, 王鹏鲲, 等. 碳酸盐岩气藏注CO₂埋存及提高采收率机理研究进展[J]. 断块油气田, 2023, 30(6): 888-894.
GUO Xiao, FENG Jin, WANG Pengkun, et al. Progress on mechanism of CO₂ injection for storage and enhanced gas recovery in carbonate gas reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(6): 888-894.

[6] 李国永. 复杂断块油藏精细描述关键技术与应用[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(2): 152-162.
LI Guoyong. Key technology of fine description of complex fault block reservoir and its application [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 152-162.

[7] 刘建斌, 刘顺, 钟立国, 等. 胜利油田金17块稠油-水乳化特性及其对乳化驱油的影响[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(6): 112-121.
LIU Jianbin, LIU Shun, ZHONG Liguang, et al. Emulsification characteristics of heavy oil and water in Block Jin17 of Shengli Oilfield and its influence on emulsification oil flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 112-121.

[8] 何厚锋, 胡旭辉, 庄永涛, 等. 低渗透油藏CO₂驱注采参数优化研究与应用——以胜利油田A区块为例[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(2): 112-121.
HE Houfeng, HU Xuhui, ZHUANG Yongtao, et al. Study and application of injection-production parameter optimization for CO₂ flooding in low-permeability reservoirs: a case study of Block A in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(2): 112-121.

[9] 郭建春, 卢聪, 马莅. 胜利油田低渗透油藏压驱工程方案优化及矿场应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(4): 204-214.
GUO Jianchun, LU Cong, MA Li. Engineering scheme optimization and field application of fracturing-flooding for low-permeability reservoirs in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(4): 204-214.

[10] 曹家炜, 刘海成, 徐乐中, 等. 核壳型磁性TiO₂纳米微球制备及在水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2020, 40(4): 6-11.
CAO Jiawei, LIU Haicheng, XU Lezhong, et al. Preparation of core-shell magnetic TiO₂ nanomicrospheres and their application in water treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(4): 6-11.

[11] 杨雷, 罗凌燕, 巩卫军, 等. 微球调驱技术改善双低油藏水驱效果研究[J]. 石油化工应用, 2022, 41(4): 49-51, 58.
YANG Lei, LUO Lingyan, GONG Weijun, et al. Study on improving water flooding effect of double low reservoirs by microsphere flooding technology [J]. Petrochemical Industry Applica-

- tion, 2022, 41(4): 49-51, 58.
- [12] 鲍文博,肖丽华,刘长龙,等.新型荧光核壳微球调驱剂制备及性能表征[J].中国海上油气,2023,35(6):98-105.
BAO Wenbo, XIAO Lihua, LIU Changlong, et al. Preparation and performance characterization of novel fluorescent core-shell microspheres profile control and displacement agent [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(6): 98-105.
- [13] LI J, NIU L, WU W, et al. The reservoir adaptability and oil displacement mechanism of polymer microspheres [J]. Polymers, 2020, 12(4): 885.
- [14] NIE X, CHEN J, CAO Y, et al. Investigation on plugging and profile control of polymer microspheres as a displacement fluid in enhanced oil recovery [J]. Polymers, 2019, 11(12): 1993.
- [15] LIANG S, HU S, LI J, et al. Study on EOR method in offshore oilfield: combination of polymer microspheres flooding and nitrogen foam flooding [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 178: 629-639.
- [16] 杨俊茹,谢晓庆,张健,等.交联聚合物微球-聚合物复合调驱注入参数优化设计[J].石油勘探与开发,2014,41(6): 727-730.
YANG Junru, XIE Xiaoqing, ZHANG Jian, et al. Injection parameters optimization of cross-linked polymer microspheres and polymer composite flooding system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 727-730.
- [17] 黎晓茸,张营,贾玉琴,等.聚合物微球调驱技术在长庆油田的应用[J].油田化学,2012,29(4):419-422.
LI Xiaorong, ZHANG Ying, JIA Yuqin, et al. Application of polymer microspheres profile-controlling technology in Changqing Oilfield [J]. Oilfield Chemistry, 2012, 29(4): 419-422.
- [18] 高思远.大庆油田二类油层交联聚合物微球调剖剂性能[J].大庆石油地质与开发,2013,32(4):112-116.
GAO Siyuan. Profile-controlling performances of the cross-linked polymer microsphere in the sub-layers of Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(4): 112-116.
- [19] 翟佳昕.苯乙烯马来酰亚胺共聚物微球的制备及其用于构筑疏水表面研究[D].北京:北京化工大学,2023.
ZHAI Jiaxin. Preparation of styrene maleimide copolymer microsphere and its application in constructing hydrophobic surfaces [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [20] 沈焕文,王治国,王碧涛,等.特低渗油藏大剂量微球深部调驱提高采收率技术实践[J].石油化工应用,2022,41(9): 69-71,86.
SHEN Huanwen, WANG Zhiguo, WANG Bitao, et al. Enhanced oil recovery by deep profile control and flooding with high-dose microsphere in ultra-low permeability reservoir [J]. Petrochemical Industry Application, 2022, 41(9): 69-71, 86.

编辑 经雅丽