

文章编号:1000-4092(2022)02-343-06

致密砂岩油藏CO₂吞吐沥青质沉积对储层的伤害特征*

石磊

(中国地质大学资源学院,湖北 武汉 430074)

摘要:针对注CO₂提高原油采收率过程中易产生沥青质沉积的现象,以致密砂岩天然岩心和储层原油为研究对象,利用CO₂吞吐以及核磁共振等实验手段,开展了致密砂岩油藏CO₂吞吐过程中沥青质沉积对储层的伤害特征研究。实验结果表明:原油的沥青质含量越高,CO₂吞吐过程中沥青质的沉积率越大;随着实验压力的升高,沥青质沉积率先增大后减小,当压力为25 MPa时,沥青质沉积率最大;CO₂吞吐过程中沥青质沉积对储层渗透率的伤害程度较大,而对孔隙度的伤害程度则相对较小;沥青质主要沉积在大孔隙中,且油样中沥青质的含量越高,对岩心大孔隙的堵塞程度就越大;沥青质沉积可以使岩心进口端面的润湿性由亲水性向亲油性转变;沥青质沉积会影响CO₂吞吐实验的采收率,沥青质含量越高,采收率越小。在致密砂岩油藏注CO₂吞吐过程中,应采取相应的抑制沥青质沉积措施,以提高CO₂吞吐措施的效果。

关键词:致密砂岩;CO₂吞吐;沥青质沉积;储层伤害;采收率

文献标识码:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.02.026

中图分类号:TE341

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 前言

随着常规油气资源的不断勘探与开发,国内大部分的常规油气田已经进入中后期开发阶段,而油气资源的需求量却在不断的增加,因此,加快非常规油气资源的勘探与开发成为一项十分迫切的任务。致密油作为一种非常规油气资源,近年来受到越来越多的关注,致密油储层由于渗透率低、孔喉细小以及孔隙结构复杂等原因,导致注水等常规开采方式无法取得明显的效果^[1-3]。

众多研究表明,注CO₂开发是提高致密砂岩油藏采收率的一种有效手段,CO₂注入地层后溶解于原油中,能够通过降低原油黏度、改善原油物性、降低表/界面张力以及提高原油流动能力等作用来提高原油的采收率,且与常规注水开发相比,CO₂更易注入地层,使部分小孔隙中的原油得到有效动用^[4-8]。

但是CO₂的注入会使原油性质发生一定的改变,导致原油中沥青质组分容易发生沉积,堵塞地层孔隙,降低储层孔隙度和渗透率,从而对储层造成一定的伤害。研究表明,在注CO₂过程中沥青质的沉积量与注入压力、注入速率、温度以及沥青质含量等有关,沥青质沉积不仅会降低储层渗透率,改变地层孔隙结构组成,还可能通过改变岩石表面润湿性等作用影响致密砂岩油藏的采收率^[9-13]。因此,研究注CO₂过程中沥青质沉积对储层的伤害特征,对预防沥青质沉积,提高致密砂岩油藏采收率具有十分重要的意义。目前国内外针对CO₂驱油过程中沥青质沉积对储层的伤害研究较多,且取得了较多的研究成果^[14-20],而针对致密砂岩油藏CO₂吞吐过程中沥青质沉积的相关研究则相对较少^[21]。因此,笔者以陆上某致密砂岩油藏储层岩心和原油为研究对象,开展了CO₂吞吐过程中沥青质沉积对致密

* 收稿日期:2021-06-18;修回日期:2021-09-16。

作者简介:石磊(1990—),男,中国地质大学资源学院地质资源与地质工程专业硕士(2018),从事石油天然气地质方面的研究,通讯地址:430074 河北省邯郸市峰峰矿区临水镇美雅小区24号楼一单元102, E-mail:shilei1289710287@163.com。

砂岩储层的伤害特征研究,主要包括沥青质沉积对渗透率、孔隙度、孔隙结构、润湿性以及采收率的影响,为致密砂岩油藏CO₂吞吐现场施工提供一定的技术支持。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

实验用水为模拟地层水,矿化度为35 150 mg/L,根据目标区块储层段地层水离子组成,在1 L蒸馏水中加入1.978 g氯化钙、0.509 g氯化镁、1.272 g硫酸钠、5.949 g碳酸氢钠、4.202 g氯化钾和21.324 g氯化钠配制而成;实验用油为储层脱气原油,沥青质含量分别为1.52%、2.87%和4.35%时,地层温度条件下对应的黏度分别为9.13、9.35、9.89 mPa·s,原油与CO₂的最小混相压力为18.3 MPa;实验用岩心为致密砂岩天然岩心,取自目标区块储层段,具体物性参数见表1;实验用CO₂气体,纯度为99.99%。

表1 实验用致密砂岩岩心的基本物性参数

岩心号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	气测渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	实验压力/MPa	饱和油的沥青质含量/%
1#	10.07	2.5	12.94	0.516	15	1.52
2#	10.12	2.5	13.05	0.509	20	
3#	10.05	2.5	13.12	0.541	25	
4#	10.01	2.5	12.97	0.556	30	
5#	10.03	2.5	13.01	0.571	15	2.87
6#	10.02	2.5	13.25	0.592	20	
7#	10.11	2.5	13.15	0.530	25	
8#	10.08	2.5	13.09	0.507	30	
9#	10.05	2.5	12.95	0.519	15	4.35
10#	10.07	2.5	13.04	0.524	20	
11#	10.03	2.5	13.08	0.562	25	
12#	10.06	2.5	13.18	0.581	30	

BH-2型岩心抽空加压饱和装置、QKL-4型岩心气体孔-渗联测仪,南通仪创实验仪器有限公司;HARKE-SPCA-3型接触角测定仪,北京哈科试验仪器厂;MesoMR23-060H型核磁共振分析仪,上海纽迈电子科技有限公司;CO₂吞吐实验装置,主要包括岩心夹持器、平流泵、恒温装置、中间容器、压力表、回压阀和手摇泵等,CO₂吞吐实验流程见图1。

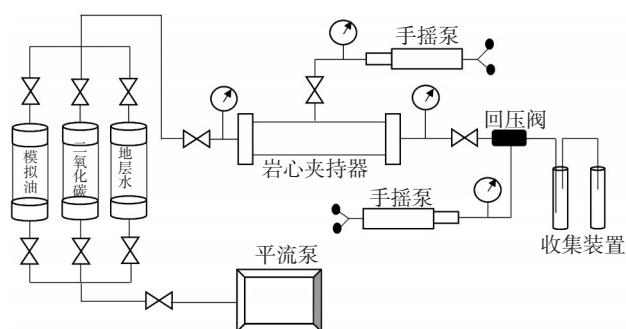


图1 CO₂吞吐实验流程示意图

1.2 实验步骤

(1) 准备实验

①实验用岩心处理。将储层天然岩心洗油、洗盐、烘干后,测定其气测渗透率和孔隙度,然后抽真空、饱和模拟地层水,备用。

②实验用油样处理。将取自目标油田储层段的脱气原油按照原始气油比(16:1 sm³/sm³)与天然气进行混合,在高温高压中间容器中进行搅拌反应,配制成原始气油比的模拟油,备用。

(2) CO₂吞吐实验

①将天然岩心放入夹持器中,以0.3 mL/min的流速驱替模拟地层水,测定其初始液相渗透率;

②以0.01 mL/min的流速驱替岩心饱和模拟油,并计算岩心含油饱和度,岩心饱和模拟油后,为防止模拟油脱气,在岩心夹持器出口端加上与实验压力相同的回压;

③待实验压力稳定后,关闭岩心夹持器的出口端阀门,以相同的压力往岩心中以0.1 mL/min的流速注入2 PV(折算成实验温度和压力条件下的CO₂体积)的高纯CO₂气体,然后关闭岩心夹持器的进口端阀门,模拟“焖井”12 h;

④开井生产,记录不同时间后压力和采收率,当压力降低至储层原油饱和压力值时停止实验;

⑤对CO₂吞吐实验后的岩心继续驱替石油醚,将其中的剩余原油驱替出来(沥青质不溶于石油醚),直至出口端产出液为无色时停止,然后将岩心烘干处理,测定其渗透率和孔隙度;

⑥改变实验条件(实验压力、模拟油中沥青质含量),重复步骤①—⑤,上述实验温度均80℃。

(3) 实验结果的处理

①沥青质沉积率计算。通过测定产出原油中沥青质的质量分数,并与初始模拟油中沥青质的质

量分数进行对比,按式(1)计算 CO₂ 吞吐过程中的沥青质沉积率 δ :

$$\delta = (W_1 - W_2) / W_1 \quad (1)$$

式中: δ —沥青质沉积率,%; W_1 —初始模拟油中沥青质的质量分数,%; W_2 —产出原油中沥青质的质量分数,%。

② 沥青质沉积对岩心渗透率和孔隙度的影响。测定 CO₂ 吞吐实验后岩心的渗透率和孔隙度,并与初始渗透率和孔隙度进行对比,按式(2)、(3)计算岩心渗透率伤害率 θ 和孔隙度伤害率 η :

$$\theta = (K_1 - K_2) / K_1 \quad (2)$$

式中: θ —岩心渗透率伤害率,%; K_1 —岩心的初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_2 —CO₂ 吞吐实验后岩心的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

$$\eta = (\varphi_1 - \varphi_2) / \varphi_1 \quad (3)$$

式中: η —岩心孔隙度伤害率,%; φ_1 —岩心的初始孔隙度,%; φ_2 —CO₂ 吞吐实验后岩心的孔隙度,%。

③ CO₂ 吞吐过程中沥青质沉积对岩心孔隙结构的影响。采用核磁共振仪测定 CO₂ 吞吐实验前后岩心饱和模拟地层水后的 T₂ 谱图,以此判断 CO₂ 吞吐实验后岩心孔隙结构的变化情况。为避免地层水对核磁共振信号的影响,需要加入一定量的 MnCl₂ 来屏蔽水中的氢信号。

④ 沥青质沉积对岩心润湿性的影响。使用接触角测定仪测量水在 CO₂ 吞吐实验前天然岩心进口端面的接触角,以及在吞吐实验后距离进口端面不同长度的岩心切片表面的接触角,以此考察沥青质沉积对岩心润湿性的影响。

⑤ 沥青质沉积对原油采收率的影响。在相同的实验压力条件下,考察原油中不同沥青质含量时对采收率的影响。

2 结果与讨论

2.1 沥青质的沉积率

在不同实验压力、不同原油沥青质含量下,经过 CO₂ 吞吐后的沥青质在天然岩心中的沉积率见图 2。由图 2 可以看出,在相同的实验压力条件下,原油中沥青质含量越高,CO₂ 吞吐实验后沥青质的沉积率越大;而当原油中沥青质含量一定时,随着 CO₂ 吞吐实验压力的增大,沥青质沉积率呈现出先增大后减小的趋势,当原油的沥青质含量为 4.35%、实验

压力为 25 MPa 时,沥青质的沉积率最大可达 60% 以上。

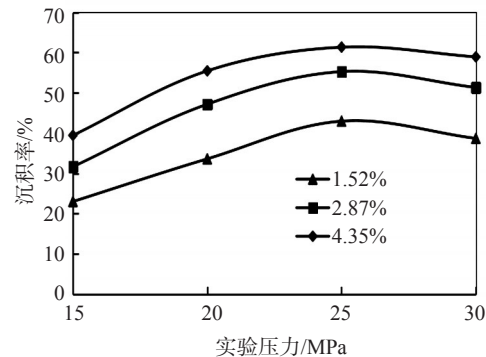


图 2 不同实验压力、不同原油沥青质含量下的沥青质沉积率

实验压力越高,溶解于原油中的 CO₂ 越多,这些 CO₂ 更多地占据了原本包裹在沥青质外层胶质的空间,使沥青质之间更容易相互缔合聚并,从而造成沥青质沉积量增大;而当实验压力升高至一定程度后,再继续增大压力,CO₂ 分子与原油混相体系的密度会有所增大,使沥青质更容易溶解,从而使其沉积量有所降低。

2.2 CO₂ 吞吐过程中沥青质沉积对储层的伤害

2.2.1 对渗透率和孔隙度的影响

在不同实验压力、不同原油沥青质含量下,经过 CO₂ 吞吐后,沥青质沉积对岩心渗透率和孔隙度的伤害情况见图 3 和图 4。由图 3 可知,在相同的实验压力条件下,原油的沥青质含量越高,CO₂ 吞吐实验后沥青质沉积对岩心渗透率的伤害率就越大;而当原油的沥青质含量相同时,随着 CO₂ 吞吐实验压力的增大,沥青质沉积对岩心渗透率的伤害率呈现出先增大后降低趋势,这与 2.1 中的实验结果相吻合。沥青质沉积对天然岩心渗透率的伤害程度相

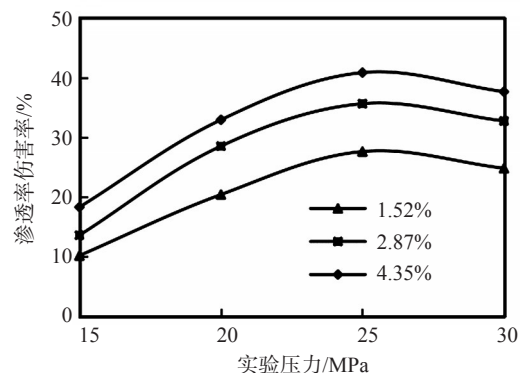


图 3 沥青质沉积对岩心渗透率的伤害情况

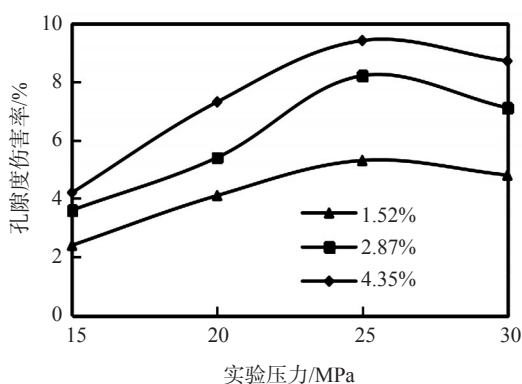


图4 沥青质沉积对岩心孔隙度的伤害情况

对较高,当原油中沥青质的含量为4.35%、实验压力为25 MPa时,沥青质沉积对岩心的渗透率伤害率最高可达40%以上。

由图4可知,CO₂吞吐实验后沥青质沉积对岩心孔隙度的伤害率与上述渗透率的伤害率变化趋势相同,但岩心孔隙度伤害率相对较小,当原油的沥青质含量为4.35%、实验压力为25 MPa时,沥青质沉积对岩心的孔隙度伤害率最大,但仍小于10%。

分析原因认为,沥青质沉积导致的吸附和桥塞损害作用中,桥塞损害起主导作用,从而使致密砂岩天然岩心的孔喉堵塞严重,渗透率降低幅度较大,而吸附损害作用的影响相对较小,从而使天然岩心的孔隙度降低幅度较小。

2.2.2 对孔隙结构的影响

在实验压力为25 MPa下,不同沥青质含量时CO₂吞吐实验前后岩心饱和模拟地层水后的T₂谱图见图5。由图5可以看出,由于实验用岩心为致密砂岩岩心,T₂谱图弛豫时间主要集中在0.1~100 ms之间,且0.1~10 ms之间的波峰明显大于10~100 ms,说明岩心主要以小孔隙为主,大孔隙则相对较少。当原油的沥青质含量为1.52%时,CO₂吞吐后岩心T₂谱图中小孔隙对应的信号幅度基本没有变化,而大孔隙对应的信号幅度则有所减少;随着原油的沥青质含量的增大,CO₂吞吐后岩心T₂谱图中小孔隙对应的信号幅度稍有减少,但变化幅度较小,而大孔隙对应的信号幅度则明显减少,当沥青质含量增至4.35%时,CO₂吞吐后岩心T₂谱图中大孔隙对应的信号幅度显著减少。这说明在CO₂吞吐过程中,沥青质主要沉积在岩心的大孔隙中,使大孔隙所占

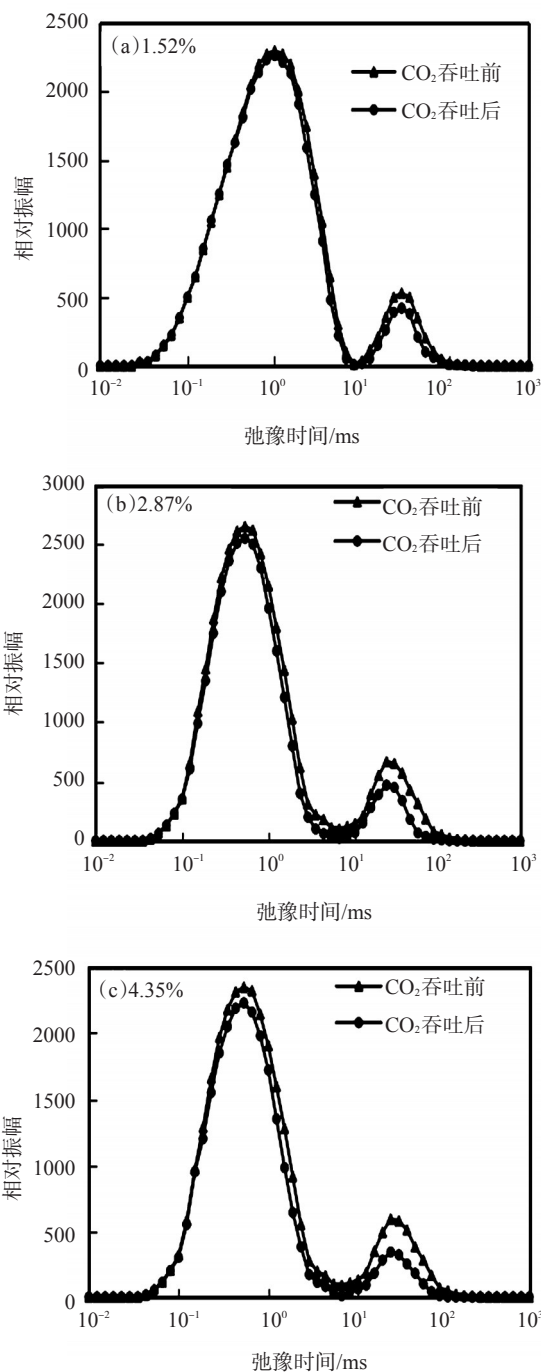


图5 CO₂吞吐实验前后岩心的T₂谱图

的比例有所减小;且沥青质含量越高,大孔隙被沥青质沉积堵塞的程度越大,使部分大孔隙变成中、小孔隙,甚至变成死孔隙,导致岩心中孔隙之间的连通性降低。因此,在致密砂岩油藏实施CO₂吞吐矿场实验时,应尽量降低沥青质的沉积量,避免沥青质沉积对致密砂岩孔隙结构造成严重的堵塞损害。

2.2.3 对润湿性的影响

通过接触角的测试来考察沥青质沉积对致密砂岩岩心润湿性的影响。水在CO₂吞吐实验前后天然岩心进口端面的接触角,以及在实验压力为25 MPa、不同沥青质含量时CO₂吞吐实验后距离进口端面不同长度的岩心切片表面的接触角见表2。

表2 沥青质沉积对岩心润湿性的影响

沥青质含量/%	接触角/°				
	CO ₂ 吞吐前	CO ₂ 吞吐后	进口端 2 cm	进口端 4 cm	进口端 6 cm
1.52	29.3	61.8	41.6	32.9	30.7
2.87	30.6	73.3	49.2	32.5	31.2
4.35	29.8	85.9	54.8	33.6	31.4

由表2可知,CO₂吞吐实验前,水在目标区块储层致密砂岩岩心表面的接触角约为30°,表现为亲水性,而在CO₂吞吐实验后,岩心表面接触角则明显增大,润湿性由亲水性向亲油性转变,其中当沥青质含量为4.35%时,接触角增大至85°以上。对岩心进行切片时,随着切片距离进口端长度的增大,切片表面的接触角逐渐减小,当切片距离进口端6 cm时,切片表面接触角与CO₂吞吐实验前的接触角基本一致,润湿性表现为亲水性。这是由于CO₂吞吐过程沥青质主要沉积在岩心端面上,运移至岩心内部的沥青质则相对较少。但沥青质的沉积会对岩石表面润湿性产生比较严重的影响,少量的沥青质沉积就会使润湿性由亲水性向亲油性转变,亲油性的增强不利于原油的渗流,进而影响致密砂岩油藏的开发效率。

2.2.4 对原油采收率的影响

在实验压力为25 MPa下,不同原油沥青质含量时CO₂吞吐不同时间后的采收率结果见图6。由图6可知,岩心采收率均随着开采时间的延长而逐渐升高,在0~45 min内采收率的增幅较大,这是由于CO₂吞吐开采初期压差较大,采收率的提升速率较快,而随着时间的延长,压差逐渐减小,采收率的提升速率则逐渐趋于缓慢。此外,在相同的实验条件下,原油中沥青质的含量越高,采收率相对越小,这是由于原油的沥青质含量越高,在CO₂吞吐过程中沥青质的沉积量越大,对岩心渗透率、孔隙度、孔隙结构以及润湿性所造成的影响越严重,进而降低了CO₂吞吐实验的采收率。因此,在致密砂岩油藏现

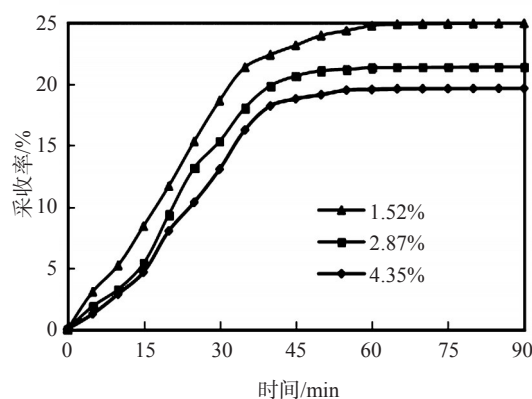


图6 沥青质含量对采收率的影响

场实施CO₂吞吐作业时,应尽可能采取措施降低原油中沥青质的沉积量,比如往地层中先注入沥青质沉积抑制剂等化学处理剂,降低沥青质沉积对储层的伤害程度,从而提高致密砂岩油藏CO₂吞吐的效果。

3 结论

在实验压力相同的情况下,油样中沥青质含量越高,CO₂吞吐后沥青质的沉积率越大;而当原油的沥青质含量相同时,随着CO₂吞吐实验压力的升高,沥青质的沉积率先增大后减小,当实验压力为25 MPa时,沥青质的沉积率达到最大。

CO₂吞吐过程中沥青质沉积,对渗透率的伤害程度较大,对孔隙度的伤害程度较小。沥青质主要沉积在大孔隙中,随着沥青质含量的增大,大孔隙的堵塞程度逐渐增大。沥青质沉积对岩心进口端面的润湿性影响较大,能使其由亲水性向亲油性发生转变,而对岩心内部润湿性的影响相对较小。

在相同的实验条件下,原油沥青质含量越高,沥青质沉积量越大,原油的采收率相对越小。因此,在致密砂岩油藏CO₂吞吐开采过程中应注意减少沥青质的沉积量,以最大程度提高原油的采收率。

参考文献:

- [1] 周永炳,徐启,樊晓东,等.大庆外围油田致密油层叠置组合分类与开发实践[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):195-203.
- [2] 郭建设,周福建,胡晓玲,等.三塘湖盆地致密油水平井增能压裂力学机理[J].断块油气田,2021,28(1):57-62.
- [3] 王秀宇,巨明霜,杨文胜,等.致密油藏动态渗吸排驱规律与机理[J].油气地质与采收率,2019,26(3):92-98.

- [4] 马铃峥, 杨胜来, 陈浩, 等. 致密油储集层 CO₂ 吞吐效果及影响因素分析: 以新疆吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J]. 石油科学通报, 2018, 3(4): 434-445.
- [5] 唐万举, 邓学峰, 卢瑜林, 等. 致密储层 CO₂ 驱油实验[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 757-760.
- [6] 郭茂雷, 黄春霞, 董小刚, 等. 延长油田致密砂岩油藏 CO₂ 驱油机理研究[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(2): 75-79.
- [7] GODEC M L, KUUSKRAA V A, DIPIETRO P. Opportunities for using anthropogenic CO₂ for enhanced oil recovery and CO₂ storage[J]. *Energ Fuel*, 2013, 27(8): 4183-4189.
- [8] RAHIMI V, BIDARIGH M, BAHRAMI P. Experimental study and performance investigation of miscible water-alternating-CO₂ flooding for enhancing oil recovery in the Sarvak formation [J]. *Oil Gas Sci Technol*, 2017, 72(6): 35.
- [9] ZENDEHBOUDI S, AHMADI M A, MOHAMMADZADEH O, et al. Thermodynamic investigation of asphaltene precipitation during primary oil production: laboratory and smart technique [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2013, 52(17): 6009-6031.
- [10] WIEHE I A. Asphaltene solubility and fluid compatibility [J]. *Energ Fuel*, 2012, 26(7): 4004-4016.
- [11] 刘磊, 曹畅, 程汝镇, 等. 顺北沥青质分子结构和析出沉积规律研究[J]. 复杂油气藏, 2020, 13(4): 86-91.
- [12] 秦冰, 赵琳, 江建林. 原油沥青质沉积抑制及解堵技术研究进展[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(10): 7-15.
- [13] 吴润楠, 魏兵, 邹鹏, 等. 超临界 CO₂ 对普通稠油和超稠油物性的影响规律[J]. 油田化学, 2018, 35(3): 440-446.
- [14] 王琛, 李天太, 高辉, 等. CO₂ 驱沥青质沉积量对致密砂岩油藏采收率的影响机理[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(3): 107-111.
- [15] 乞照, 安锴胜, 王筱晔, 等. CO₂ 驱沥青质沉积对致密储层的伤害机理: 以鄂尔多斯盆地延长组长 8 储层为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 350-354.
- [16] 李兆敏, 王美佳, 武守亚, 等. CO₂ 驱油过程中原油胶质对沥青质沉积的影响[J]. 油田化学, 2019, 36(4): 651-656.
- [17] 王琛, 李天太, 高辉, 等. CO₂ 驱沥青质沉积对岩心的微观伤害机理[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(5): 602-606.
- [18] 孙志新. CO₂ 驱替下沥青质沉积实验研究[J]. 油田化学, 2010, 27(4): 374-376.
- [19] 张钧溢, 赵凤兰, 侯吉瑞, 等. CO₂ 驱替过程中沥青质沉积及其对原油采收率的影响[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 107-109.
- [20] 王琛, 李天太, 赵金省, 等. 利用核磁共振技术研究沥青质沉积对低渗储层孔隙结构的影响[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1700-1706.
- [21] 吴润楠. 致密油藏注 CO₂ 沥青质沉积及储层物性变化规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.

Damage Characteristics of Asphaltene Deposition during CO₂ Huff and Puff in Tight Sandstone Reservoir

SHI Lei

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, P R of China)

Abstract: Aiming at the phenomenon that asphaltene deposition is easy to occur in the process of CO₂ injection to enhance oil recovery, the damage characteristics of asphaltene deposition on tight sandstone reservoir during CO₂ huff and puff were studied by using CO₂ huff and puff and nuclear magnetic resonance. The experimental results showed that, the higher the asphaltene content in the oil sample, the greater the asphaltene deposition rate in the process of CO₂ huff and puff. With the increase of experimental pressure, the asphaltene deposition first increased and then decreased, and the asphaltene deposition rate reached the maximum when the pressure was 25 MPa. The damage degree of asphaltene deposition to reservoir permeability was greater, while the damage degree to porosity was relatively small during CO₂ huff and puff. The asphaltene mainly deposit in the bigger pores, moreover, the higher the asphaltene content of the crude oil, the greater the damage degree of the bigger pores. The asphaltene deposition could make the wettability of the inlet core edge change from hydrophilic to the lipophilic. The asphaltene deposition would affect the oil recovery during CO₂ huff and puff, the greater the asphaltene content, the lower the oil recovery. In the process of CO₂ huff and puff in tight sandstone reservoir, the corresponding measures should be taken to restrain asphaltene deposition, so as to improve the effect of CO₂ huff and puff.

Keywords: tight sandstone; CO₂ huff and puff; asphaltene deposition; reservoir damage; oil recovery