



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406025

引用格式:文士豪,李忠诚,李明义,等.吉林某低渗透油藏CO₂驱沥青质沉淀对储层非均质性的影响[J].科学技术与工程,2025,25(15):6290-6296.

Wen Shihao, Li Zhongcheng, Li Mingyi, et al. Effect of CO₂ flooding asphaltene differential precipitation on reservoir heterogeneity in low permeability reservoirs in Jilin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6290-6296.

石油、天然气工业

吉林某低渗透油藏 CO₂ 驱沥青质沉淀对储层非均质性的影响

文士豪¹, 李忠诚², 李明义², 陈粟², 李金龙², 陈伟², 黄文奎^{3,4*}

(1. 中国石油吉林油田公司, 松原 138000; 2. 中国石油吉林油田公司勘探开发研究院, 松原 138000;
3. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102299; 4. 中国石油大学(北京)天然气地质与工程研究中心, 北京 102299)

摘要 CO₂驱是提高低渗透油藏采收率最有效的技术手段之一,但注入的CO₂会引发原油中沥青质沉淀,导致储层渗透率下降并改变储层的非均质性。为明确不同压力条件下沥青质差异化沉淀对低渗透储层非均质性的影响,以吉林油田某低渗透油藏为研究对象,通过CO₂长岩心驱替实验,明确了不同压力下的CO₂驱替特征,同时结合原油及岩心性质测试结果,分析不同压力条件下驱替前后原油沥青质含量及储层性质变化,进一步明确了沥青质沉淀的分布规律。结果表明:非混相条件下,原油采出程度较低,仅为55.11%,沥青质沉淀随驱替距离的增加呈现先增加后减小的趋势,CO₂主要驱替大孔隙原油,沥青质沉淀也主要发生在高渗区域内,从而抑制了储层非均质性;混相条件下,原油采出程度较高,达81.84%,沥青质沉淀随驱替距离的增加而增加,CO₂能够驱替小孔隙原油,沥青质沉淀发生在高渗及低渗区域,但低渗区域受到的影响大,储层非均质性进一步加强。

关键词 CO₂驱; 沥青质沉淀; 采出程度; 原油组分; 储层非均质性

中图分类号 TE342; **文献标志码** A

Effect of CO₂ Flooding Asphaltene Differential Precipitation on Reservoir Heterogeneity in Low Permeability Reservoirs in Jilin

WEN Shi-hao¹, LI Zhong-cheng², LI Ming-yi², CHEN Li², LI Jin-long², CHEN Wei², HUANG Wen-kui^{3,4*}

(1. PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, China; 2. China Petroleum Jilin Oilfield Exploration and Development Research Institute, Songyuan 138000, China; 3. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102299, China; 4. Natural Gas Geology and Engineering Research Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102299, China)

[Abstract] CO₂ flooding is one of the most effective technical means to improve the recovery of low permeability reservoirs. However, the injected CO₂ will cause asphaltene precipitation in crude oil, resulting in the decrease of reservoir permeability and the change of reservoir heterogeneity. In order to clarify the effect of asphaltene differential precipitation on the heterogeneity of low permeability reservoirs under different pressure conditions, a low permeability reservoir in Jilin Oilfield was taken as the research object. Through the CO₂ long core displacement experiment, the CO₂ displacement characteristics under different pressures were clarified. At the same time, combined with the test results of crude oil and core properties, the changes of crude oil asphaltene content and reservoir properties before and after displacement under different pressure conditions were analyzed, and the distribution law of asphaltene precipitation was further clarified. The results show that under immiscible conditions, the degree of crude oil recovery is low, only 55.11%. The asphaltene precipitation increases first and then decreases with the increase of displacement distance. CO₂ mainly displaces the large pore throat crude oil, and the asphaltene precipitation also mainly occurs in the high permeability area, thus inhibiting the reservoir heterogeneity. Under miscible conditions, the degree of crude oil recovery is high, up to 81.84%. Asphaltene precipitation increases with the increase of displacement distance. CO₂ can displace small pore throat crude oil. Asphaltene precipitation occurs

收稿日期: 2024-08-11 修订日期: 2024-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51974329)

第一作者: 文士豪(1976—),男,汉族,四川南充人,硕士,高级工程师。研究方向:油气田开发。E-mail:wenshh@petrochina.com.cn。

*通信作者: 黄文奎(1998—),男,汉族,江西赣州人,博士研究生。研究方向:油气田开发。E-mail:17354378392@163.com。

in high permeability and low permeability areas, but low permeability areas are greatly affected, and reservoir heterogeneity is further strengthened.

[**Keywords**] CO₂ flooding; asphaltene precipitation; the degree of recovery; crude oil component; reservoir heterogeneity

CO₂驱油技术作为三次采油技术的重要组成部分,在开采低渗透油藏方面有着很大的优势,从而被广泛应用于国内外许多油田^[1-4]。与水驱相比,CO₂驱还具有注入压力低、驱油效果好的优势^[5],此外,CO₂与地层流体接触后发生溶解抽提等物理化学作用,由此表现出良好的混相效应、原油溶胀、降黏、改善流度比、降低界面张力等效果,从而提高油气采收率^[6-9]。然而,该物理化学反应也会破坏原油体系中胶质-沥青质-原油的平衡状态,造成沥青质颗粒沉淀析出,堵塞孔喉,从而对储层造成不可逆的伤害^[10-12]。

针对 CO₂驱沥青质沉淀对储层物性的影响,国内外学者进行了大量研究。Ali 等^[13]利用固体检测系统(solid state detection system, SDS)检测了相同沥青质沉淀下不同渗透率岩心的渗透率下降幅度,结果表明沥青质沉淀对低渗透岩心的损害较大。黄兴等^[14]通过开展不同注入压力下 CO₂吞吐和驱替实验,辅以核磁共振在线扫描技术,研究了不同注气方式下沥青质在岩心中的沉淀特征,定量评价了不同注气方式下沥青质沉淀对孔隙度、渗透率、润湿性和孔隙结构的伤害程度。崔传智等^[15]根据相平衡理论和修正的 Flory-Huggins 溶解理论,建立了沥青质组分的最大溶解度模型,结合毛管束模型,推导了沥青质沉淀对孔喉半径的影响公式。但这些研究均以单一短岩心为研究对象,CO₂的作用距离十分有限。郭永伟等^[16]虽然开展 CO₂驱替长岩心实验,研究 CO₂非混相和混相驱油过程中沥青质和无机质沉淀对岩心物性的伤害特征,但缺少对沥青质差异化沉淀对储层性质的影响。储层非均质性指的是储层内部的性质、构造和分布等方面的不均匀性,直接影响着油田的开发效果。因此,由必要开展 CO₂长岩心驱替实验,明确 CO₂注入前后储层非均质性的变化,进一步优化油田开发方案,提高油藏采收率。

以吉林某低渗透油藏为研究对象,通过 CO₂长岩心驱替、岩心物性测试及原油四组分测定实验,研究不同实验压力条件下原油采收率、原油四组分及岩心物性的变化。在此基础上,结合渗透率变异系数、突进系数及极差等参数对 CO₂驱替前后储层非均质性进行评价,进一步分析沥青质沉淀对储层非均质性的影响,为吉林油田注 CO₂开发提高采收率提供理论指导。

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

实验材料:实验岩心(图1)取自吉林油田双二段储层岩心,该段储层原始地层压力为 28 MPa,目前地层压力为 15 MPa。15 块岩心气测渗透率为 0.617 ~ 0.993 mD,平均 0.875 mD;气测孔隙度为 11.27% ~ 15.54%,平均 13.38%。实验原油为地面脱气原油,原油密度为 0.841 3 g/cm³,黏度为 7.6 mPa·s,根据前期细管实验结果,CO₂与地层原油的最小混相压力(minimum miscible pressure, MMP)为 23 MPa。实验用水为模拟地层水(水型为 NaHCO₃型,矿化度为 5 500 mg/L);实验用 CO₂气体的纯度为 99.9%,北京华通精科气体化工有限公司。

实验仪器:CO₂长岩心驱替实验装置如图2所示,主要仪器包括:高压驱替泵、中间容器、压力表、恒温箱、岩心夹持器、回流阀、围压手摇泵、计量系统及背压泵。



图1 实验所用岩心实物图

Fig. 1 Physical diagram of the core used in the experiment

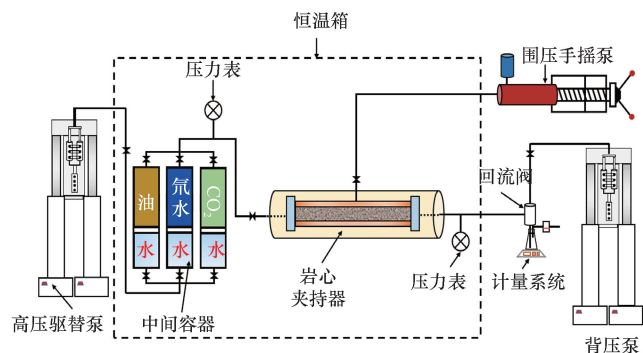


图2 CO₂长岩心驱替实验流程图

Fig. 2 Flow chart of CO₂ long core displacement experiment

1.2 实验方案

1.2.1 实验准备

(1)将清洗后岩心放入恒温箱内烘干,测定其孔隙度和渗透率,然后抽真空、饱和模拟地层水。并根据长岩心排序计算方法^[17-18]将短岩心串联成长岩心,拼接同时为了减小末端效应的影响,在各短岩心之间加入经地层水润湿的滤纸^[19],拼接方案如表1所示。

(2)将地面脱气原油放入高压压力釜中,根据实际油藏的原始气油比($91 \text{ m}^3/\text{m}^3$)注入一定量的天然气,在地层温压条件下配置实验用油^[20-21]。

(3)按照SY/T 5119—2016《岩石中可溶有机物及原油族组分分析》方法测定驱替前原油四组分。

表1 CO₂驱替实验岩心物性参数及拼接方案

Table 1 Core physical parameters and splicing scheme of CO₂ flooding experiment

实验压力/MPa	拼接顺序	长度/mm	直径/mm	渗透率/mD	孔隙度/%
15	1	63.65	25.16	0.993	13.68
	2	53.47	25.08	0.617	13.05
	3	58.98	25.09	0.967	13.37
	4	52.05	25.14	0.948	12.29
	5	67.90	25.11	0.920	15.54
	汇总	296.05	25.11	0.870	13.69
23	1	37.40	25.15	0.682	12.21
	2	54.53	25.14	0.989	13.11
	3	70.39	25.05	0.962	11.27
	4	66.38	25.04	0.776	12.81
	5	68.61	25.07	0.931	15.38
	汇总	297.31	25.09	0.868	13.02
28	1	44.23	25.09	0.964	13.68
	2	53.93	25.08	0.739	13.52
	3	69.20	25.02	0.952	14.56
	4	53.47	25.07	0.763	13.11
	5	62.25	25.00	0.929	13.08
	汇总	283.08	25.05	0.861	13.63

1.2.2 CO₂长岩心驱替实验

(1)连接装置:按照图2连接CO₂长岩心驱替装置后,利用配置的地层水在实验温度(60℃)下检查装置的密封性,随后将拼接的岩心放入岩心夹持器中。

(2)造束缚水:在回压23 MPa、温度60℃条件下,以0.1 mL/min的速度向岩心注入复配原油,直到岩心出口端无地层水产出。

(3)CO₂驱:在回压23 MPa、温度60℃条件下,以0.1 mL/min的速度向岩心注入CO₂,直到岩心出口端无原油产出,记录实验过程中产油量及入口压力。

(4)岩心物性测试:基于沥青质不溶于石油醚

的特性^[22],将岩心用石油醚洗油并烘干,测定CO₂驱替后各块岩心的孔隙度及渗透率。

(5)原油组分测试:按照SY/T 5119—2016《岩石中可溶有机物及原油族组分分析》方法测定驱替实验结束后原油四组分。

(6)重复实验:将回压设置在15、28 MPa,重复步骤(2)~步骤(5)。

2 实验结果

2.1 CO₂驱替前后原油组分分析

不同压力条件下CO₂驱替前后原油组分测试结果如图3所示。从结果可以看出,CO₂驱替实验结束后采出原油中沥青质和芳烃含量降低,饱和烃和非烃含量增加。当实验压力由15 MPa增加至23 MPa时,原油中沥青质含量由实验前的4.88%分别降低至3.76%和2.85%,降低幅度为0.91%;当实验压力由23 MPa增加至28 MPa时,原油中沥青质含量降低至2.67%,降低幅度为0.18%。这是因为随着实验压力的增加,沥青质在岩心中的沉淀量不断增大,导致驱出原油的沥青质含量减少;当实验压力达到23 MPa(MMP)后,采出油的沥青质含量降低幅度较小,说明此时CO₂对原油的抽提萃取能力达到最强^[23],如果继续增大实验压力,CO₂仍不能将原油中剩余的沥青质组分抽提出来。

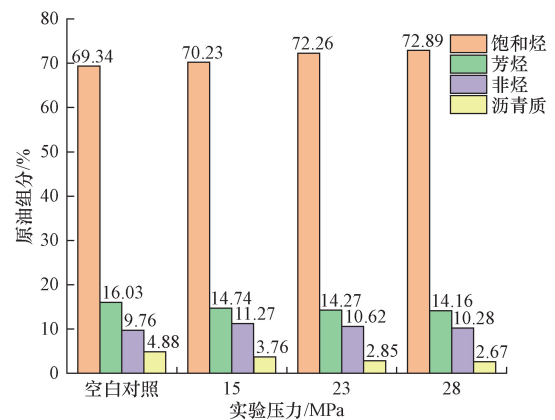


图3 不同压力条件下CO₂驱替前后原油组分测试结果

Fig. 3 The test results of crude oil composition before and after CO₂ flooding under different pressure conditions

2.2 CO₂驱替特征曲线分析

不同压力条件下CO₂驱替特征曲线如图4所示。从结果可以看出,随着注气体积的增大,驱替实验的采出程度呈现先增加后趋于平缓的趋势,当注气体积达到2PV时,15、23、28 MPa下的最终采出程度分别为55.11%、76.35%和81.84%。此外,在注入初期,相同注气体积下低实验压力下的原油采出程度大于高实验压力,这是因为在15 MPa下,CO₂

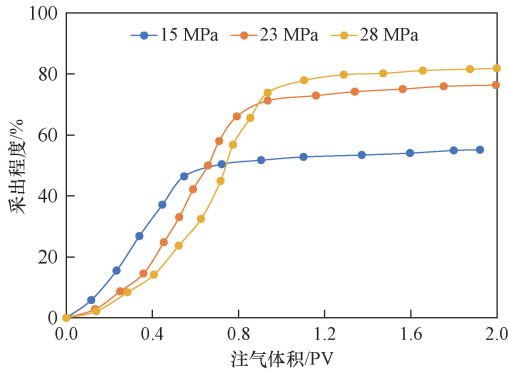


图4 不同压力条件下 CO₂驱替特征曲线

Fig. 4 CO₂ displacement characteristic curves under different pressure conditions

驱油方式为非混相驱;而在 23 MPa 和 28 MPa 下, CO₂与原油能较好的混相,采油方式以混相驱为主,而 CO₂与原油混相是一个多次接触的过程,因此初期混相驱采出程度低于非混相驱。此外,混相后能有效延缓气体突破时间,从而进一步提高原油驱替效率。

2.3 CO₂驱替岩心物性分析

不同实验压力条件下 CO₂驱替前后岩心渗透率变化如表 2 所示。同时借鉴 SYT 5358—2010《储层敏感性流动实验评价方法》对沥青质沉淀后的岩心渗透率损害进行评价,结果如图 5 所示。由表 2 和图 5 可知,CO₂驱替后,岩心物性的损伤程度受到岩石物性、实验压力及运移距离的影响:15 MPa 实验

表 2 不同实验压力条件下 CO₂驱替前后岩心渗透率变化

Table 2 The change of core permeability before and after CO₂ flooding under different experimental pressure conditions

实验压力/MPa	拼接顺序	长度/mm	驱替前渗透率/mD	驱替后渗透率/mD	损伤程度/%
15	1	63.65	0.993	0.920	7.351
	2	53.47	0.617	0.579	6.159
	3	58.98	0.967	0.886	8.376
	4	52.05	0.948	0.886	6.540
	5	67.90	0.920	0.883	4.022
	汇总	296.05	0.870	0.816	6.180
23	1	37.40	0.682	0.627	8.065
	2	54.53	0.989	0.892	9.808
	3	70.39	0.962	0.860	10.603
	4	66.38	0.776	0.670	13.660
	5	68.61	0.931	0.800	14.071
	汇总	297.31	0.868	0.755	13.028
28	1	44.23	0.964	0.877	9.025
	2	53.93	0.739	0.674	8.796
	3	69.20	0.952	0.835	12.290
	4	53.47	0.763	0.633	17.038
	5	62.25	0.929	0.763	16.792
	汇总	283.08	0.861	0.752	12.466

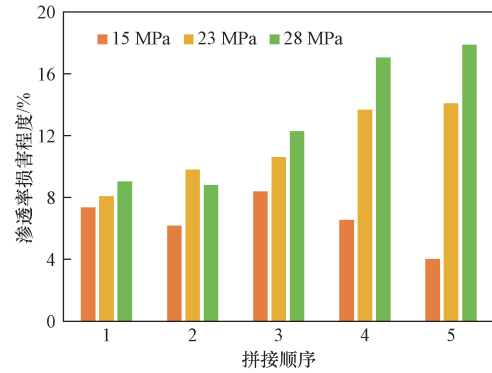


图5 不同压力条件下 CO₂驱替后岩心渗透率损伤程度

Fig. 5 The damage degree of core permeability after CO₂ flooding under different pressure conditions

条件下,沥青质沉淀对各岩心渗透率的损害程度随着驱替距离的增加呈现先增加后降低的趋势,其中第二块岩心损伤程度较低,这是因为非混相条件下 CO₂主要在渗透率较高的大孔喉流动^[24-25],沥青质沉淀主要发生在大孔喉中,以小孔喉为主的低渗岩心中沉淀较少,该组实验岩心整体损伤程度介于 4.02% ~ 8.38%;23 MPa 实验压力条件下,CO₂与原油形成混相,从而更容易进入小孔喉,沥青质沉淀对各岩心渗透率的损害程度随驱替距离的增加而不断增大,整体岩心损伤程度介于 8.07% ~ 14.07%;28 MPa 实验压力条件下,沥青质沉淀对各岩心渗透率的损害程度整体随驱替距离的增加而不断增大,其中第二块低渗岩心损伤程度偏低也表明沥青质在岩心中的沉淀是不均匀的,该组岩石损伤程度介于 8.80% ~ 17.87%。

2.4 CO₂驱沥青质沉淀机理分析

CO₂驱油过程中,注入的 CO₂对原油中轻质组分的抽提萃取作用,导致储层内的平衡状态发生改变,从而导致沥青质的沉淀^[26-27]。沥青质沉淀机理主要包括孔喉捕集和表面吸附,一方面,沥青质分子随着流体在岩石孔隙中运移过程中尺寸逐渐增大,当沥青质尺寸接近或超过孔喉的尺寸时,聚集体会被捕集,从而导致沥青质沉淀;另一方面,沥青质沉淀也不断吸附在岩石矿物的表面上,导致孔隙和喉道的尺寸逐渐减小,使沥青质沉淀颗粒更容易沉积在地层中^[25,28]。

实验压力为 15 MPa 时,CO₂驱油为非混相驱,非混相驱条件下 CO₂注入会形成 3 个区域(图 6)。在 CO₂区中,CO₂含量较高,原油含量很小,所以从原油中分离出来的沥青质沉淀较少;在原油区中,原油含量较高,CO₂含量较小,CO₂与原油的相互作用较弱,导致原油区沥青质沉淀也较少;中间 CO₂-原油混合区中,CO₂与原油含量较高,CO₂与原油之间的反应较为充分,所以中间区域沥青质沉淀最多。

图6 CO₂非混相驱油区域划分示意图Fig. 6 CO₂ immiscible flooding area division diagram

实验压力为 23 MPa 和 28 MPa 时, CO₂ 驱油为混相驱, 混相状态下 CO₂ 与原油能充分接触反应, 原油中的沥青质分子在岩心孔喉空间内相互碰撞并絮凝成聚集体, 这些聚集体在运移过程中尺寸会不断增大, 当聚集体尺寸接近或超过孔喉的尺寸时, 沥青质才会沉积在岩心中。因此, 混相驱条件下沥青质沉淀会随着驱替距离的增加而不断增大。

3 沥青质沉淀后储层非均质性变化

低渗透砂岩储层是大多数中国陆相沉积盆地的重要产油层, 通常具有低孔低渗和非均质性强等特征^[29]。CO₂ 注入后, 沥青质在储层中的沉淀会对储层造成损害, 但这种损害对储层非均质性影响的研究几乎空白。因此, 在上述实验的基础上, 结合渗透率变异系数、突进系数及极差对 CO₂ 驱替前后储层非均质性进行评价, 其计算公式为

$$V_k = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2 / n}}{\bar{K}} \quad (1)$$

$$T_k = \frac{K_{\max}}{K} \quad (2)$$

$$K_{\min} = \frac{K_{\max}}{K_{\min}} \quad (3)$$

式中: V_k 为变异系数; K_i 为某块岩心的渗透率, mD; \bar{K} 为岩心平均渗透率, mD; n 为岩心数, 块; T_k 为突进系数; K_{\max} 为岩心最大渗透率, mD; K_{\min} 为渗透率极差; K_{\min} 为岩心最小渗透率, mD。

不同压力条件下 CO₂ 驱替前后储层非均质性变化如表 3 所示。由表 3 可知, 15 MPa 实验压力下, 沥青质沉淀导致储层非均质性减弱, 这是因为低压下 CO₂ 更多地与大孔喉中的原油作用, 沥青质沉淀发生在大孔喉中, 导致高渗区域比例降低, 进一步使得岩心更加均质。23 MPa 实验压力下, 沥青质沉淀导致变异系数减小, 极差更接近 1, 而突进系数则远离 1, 这是因为混相条件下 CO₂ 能够驱替低压条件下不易动用的的小孔喉中原油, 沥青质沉淀在大小孔喉中均能发生。28 MPa 实验压力下, CO₂ 能够与原油充分混相, 进而能将大孔喉和小孔喉中的原油驱替出来, 大孔喉与小孔喉均出现较多沥青质沉淀, 但沥青质沉淀对低渗岩心渗透率的影响程度更大, 进一步加剧了储层非均质性。

表 3 不同压力条件下 CO₂ 驱替前后储层非均质性参数变化
Table 3 Changes of reservoir heterogeneity parameters before and after CO₂ flooding under different pressure conditions

项目	实验压力/MPa			
	15	23	28	
实验前	变异系数	0.155	0.137	0.112
	突进系数	1.117	1.139	1.109
	极差	1.610	1.450	1.300
实验后	变异系数	0.152	0.135	0.122
	突进系数	1.107	1.159	1.159
	极差	1.590	1.420	1.390
变化幅度	变异系数	-1.864	-1.017	8.912
	突进系数	-0.861	1.698	4.566
	极差	-1.271	-1.896	6.209

4 结论

(1) 不同压力下 CO₂ 驱替前后原油四组分测定结果表明: 注入 CO₂ 会导致稳定存在原油中的沥青质沉淀, 采出原油的沥青质含量随着实验压力的增加而降低, 降低幅度随实验压力的增加而减小。

(2) 不同压力下 CO₂ 驱替特征曲线表明: 非混相驱条件下长岩心 CO₂ 驱最终采出程度为 55.11%; 混相驱条件下长岩心 CO₂ 驱最终采出程度可达到 81.84%。混相驱采出程度远远高于非混相驱。

(3) 非混相条件下, 注 CO₂ 产生的沥青质沉淀随驱替距离的增加呈现先增加后减小的趋势, 主要沉淀区域位于岩心中部; 混相条件下, 沥青质沉淀随驱替距离的增加而增加, 主要沉淀区域位于岩心出口端。混相条件下沥青质沉淀对渗透率的损伤程度大于非混相条件。

(4) 注 CO₂ 过程中原油中沥青质在岩心中沉淀是不均匀的, 沥青质的不均匀沉淀会进一步改变储层的非均质性, 进一步影响开发效果。

(5) 低渗透油藏注 CO₂ 开发过程中, 地层压力应尽可能保持在最小混相压力之上, 抑制沥青质沉淀应重点关注生产井附近; 非混相驱抑制沥青质沉积应重点研究注采井中间区域。

参 考 文 献

- [1] 杨永超, 尚庆华, 王玉霞, 等. 延长油田乔家洼油区 CO₂ 驱沥青质沉积规律研究[J]. 石油地质与工程, 2016, 30(2): 142-144.
Yang Yongchao, Shang Qinghua, Wang Yuxia, et al. Study on asphaltene deposition law of CO₂ flooding in Qiaojiawa area of Yan-chang Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(2): 142-144.
- [2] 韦琦, 侯吉瑞, 郝宏达, 等. 特低渗油藏 CO₂ 驱气窜规律研究

- [J]. 石油科学通报, 2019, 4(2): 145-153.
- Wei Qi, Hou Jirui, Hao Hongda, et al. Study on gas channeling law of CO₂ flooding in ultra-low permeability reservoirs [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(2): 145-153.
- [3] Wang X, Luo P, Er V, et al. Assessment of CO₂ flooding potential for Bakken formation, Saskatchewan [C]//The Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference. Calgary: SPE, 2010: 137728.
- [4] Uchenna O, Anuj G. Optimization and design of carbon dioxide flooding [C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi: SPE, 2010: 138684.
- [5] 张成龙, 胡丽莎, 牛兆轩, 等. CO₂-EOR 在低渗透滩坝砂油藏的应用初探——以高 89 为例 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6393-6401.
- Zhang Chenglong, Hu Lisha, Niu Zhaoxuan, et al. Preliminary study on the application of CO₂-EOR in low-permeability beach-bar sand reservoirs—taking Gao 89 as an example [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6393-6401.
- [6] 王玉霞. 致密砂岩油藏 CO₂ 驱提高采收率机理研究 [D]. 西安: 西北大学, 2020.
- Wang Yuxia. Research on the mechanism of enhanced oil recovery by CO₂ flooding in tight sandstone reservoirs [D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [7] 刘学利, 郑小杰, 钱德升, 等. 塔河油田强底水砂岩油藏 CO₂/N₂ 驱提高采收率机理 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6409-6418.
- Liu Xueli, Zheng Xiaojie, Qian Desheng, et al. Enhanced oil recovery mechanism of CO₂/N₂ flooding in sandstone reservoirs with strong bottom water in Tahe Oilfield [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6409-6418.
- [8] 胡永乐, 郝明强, 陈国利, 等. 中国 CO₂ 驱油与埋存技术及实践 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 716-727.
- Hu Yongle, Hao Mingqiang, Chen Guoli, et al. CO₂ flooding and storage technology and practice in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 716-727.
- [9] 钱坤, 杨胜来, 窦洪恩, 等. 注 CO₂ 过程中流体性质变化及驱油机理实验研究 [J]. 石油科学通报, 2019, 4(1): 69-82.
- Qian Kun, Yang Shenglai, Dou Hongen, et al. Experimental study on the change of fluid properties and oil displacement mechanism during CO₂ injection [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(1): 69-82.
- [10] 王琛, 李天太, 赵金省, 等. 利用核磁共振技术研究沥青质沉淀对低渗透层孔隙结构的影响 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1700-1706.
- Wang Chen, Li Tiantai, Zhao Jinsheng, et al. The effect of asphaltene deposition on the pore structure of low permeability reservoirs was studied by nuclear magnetic resonance technology [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1700-1706.
- [11] Wang X, Gu Y. Oil recovery and permeability reduction of a tight sandstone reservoir in immiscible and miscible CO₂ flooding processes [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(4): 2388-2399.
- [12] 唐梅荣, 张同伍, 白晓虎, 等. 孔喉结构对 CO₂ 驱储层伤害程度的影响 [J]. 岩性油气藏, 2019, 31(3): 113-119.
- Tang Meirong, Zhang Tongwu, Bai Xiaohu, et al. The influence of pore throat structure on the damage degree of CO₂ flooding reservoir [J]. Lithological Reservoir, 2019, 31(3): 113-119.
- [13] Ali M A, Kholosy S M, Al-Haddad A A. Laboratory investigation of dynamic growth of asphaltene deposition and formation damage on sandstone cores [C]// the SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition. Kuwait: SPE, 2012: 163274.
- [14] 黄兴, 李响, 何梦卿, 等. 致密轻质油藏不同 CO₂ 注入方式沥青质沉积及储层伤害特征 [J]. 石油学报, 2021, 42(12): 1665-1674.
- Huang Xing, Li Xiang, He Mengqing, et al. Asphaltene deposition and reservoir damage characteristics of tight light oil reservoirs with different CO₂ injection methods [J]. Petroleum Journal, 2021, 42(12): 1665-1674.
- [15] 崔传智, 刘力军, 武改红, 等. 考虑沥青质沉积的储层压力场数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(35): 40-45.
- Cui Chuanzhi, Liu Lijun, Wu Gaihong, et al. Numerical simulation of reservoir pressure field considering asphaltene deposition [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(35): 40-45.
- [16] 郭永伟, 闫方平, 王晶, 等. 致密砂岩油藏 CO₂ 驱固相沉积规律及其储层伤害特征 [J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 153-161.
- Guo Yongwei, Yan Fangping, Wang Jing, et al. Solid phase deposition law and reservoir damage characteristics of CO₂ flooding in tight sandstone reservoirs [J]. Lithological Reservoirs, 2021, 33(3): 153-161.
- [17] 孙雷, 魏瑾, 李浩, 等. WS17-2 低渗砂砾岩油藏注水/注气长岩心驱替效果评价及方案优选 [J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(6): 26-33.
- Sun Lei, Wei Jin, Li Hao, et al. Evaluation of water/gas injection long core displacement effect and scheme optimization of WS17-2 low permeability glutenite reservoir [J]. Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(6): 26-33.
- [18] 魏瑾. 乌石凹陷低渗水敏储层渗流特征及水驱效果实验研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- Wei Jin. Experimental study on seepage characteristics and water flooding effect of low-permeability water-sensitive reservoirs in Wushi Sag [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [19] 邓玄, 张乔良, 杨山, 等. 文昌油田驱油效率综合研究及应用 [J]. 石油地质与工程, 2017, 31(6): 91-94.
- Deng Xuan, Zhang Qiaoliang, Yang Shan, et al. Comprehensive research and application of oil displacement efficiency in Wenchang Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(6): 91-94.
- [20] 熊建华, 龙小泳, 朱璐, 等. 深层低渗透砂砾岩油藏注 CO₂ 吞吐提高采收率实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(4): 1518-1525.
- Xiong Jianhua, Long Xiaoyong, Zhu Lu, et al. Experimental study on enhanced oil recovery by CO₂ huff and puff in deep low permeability glutenite reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(4): 1518-1525.
- [21] Chung F T H, Jones R A. Measurements and correlations of the physical properties of CO₂/heavy-crude-oil mixtures [J]. SPE Reservoir Engineering, 1988, 3(3): 822-828.
- [22] 陈龙龙, 余华贵, 汤瑞佳, 等. 沥青质沉积对轻质油藏 CO₂ 驱的影响 [J]. 油田化学, 2017, 34(1): 87-91.
- Chen Longlong, Yu Huagui, Tang Ruijia, et al. Effect of asphaltene deposition on CO₂ flooding in light oil reservoirs [J].

- Oilfield Chemistry, 2017, 34(1): 87-91.
- [23] 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.
- Qi Zhao, An Kaisheng, Wang Xiaoye, et al. The damage mechanism of CO₂ flooding asphaltene deposition on tight reservoirs—taking the Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin as an example [J]. Fault Block Oil and Gas Fields, 2020, 27(3): 350-354.
- [24] Wang Q, Lorinczi P, Glover P W J. Oil production and reservoir damage during miscible CO₂ injection [J]. The Leading Edge, 2020, 39(1): 22-28.
- [25] 王千, 杨胜来, 拜杰, 等. CO₂驱油过程中孔喉结构对储层岩石物性变化的影响[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 654-668, 685.
- Wang Qian, Yang Shenglai, Bai Jie, et al. The influence of pore throat structure on the change of reservoir rock physical properties in the process of CO₂ flooding [J]. Petroleum Journal, 2021, 42(5): 654-668, 685.
- [26] 李洪毅. 超临界二氧化碳萃取深层稠油组分的分子动力学模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12543-12550.
- Li Hongyi. Molecular dynamics simulation for supercritical carbon dioxide extraction of heavy oil components in deep reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12543-12550.
- [27] Fakher S, Imqam A. Asphaltene precipitation and deposition during CO₂ injection in nano shale pore structure and its impact on oil recovery[J]. Fuel, 2019, 237: 1029-1039.
- [28] Davudov D, Moghanloo R G. A new model for permeability impairment due to asphaltene deposition[J]. Fuel, 2019, 235: 239-248.
- [29] 李平, 樊平天, 相金元, 等. 鄂尔多斯盆地南212井区长4+5~2储层的非均质性[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 1-9.
- Li Ping, Fan Pingtian, Xiang Jinyuan, et al. The heterogeneity of Chang 4 + 5 ~ 2 reservoir in Nan 212 well area of Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition), 2023, 38(1): 1-9.