

# 裂缝性致密砂岩储层渗吸机理及影响因素

——以鄂尔多斯盆地吴起地区长8储层为例

韦青<sup>1</sup>,李治平<sup>1</sup>,王香增<sup>2</sup>,白瑞婷<sup>1</sup>,王才<sup>1</sup>,李洪<sup>1</sup>

(1.中国地质大学(北京)非常规天然气能源地质评价与开发工程北京市重点实验室,  
北京 100083; 2.陕西延长石油(集团)有限责任公司,陕西 西安 710075)

**摘要:**近年来,渗吸作为裂缝性致密砂岩油藏水驱采油的主要机理受到广泛关注。针对目前渗吸实验存在的不足,以鄂尔多斯盆地吴起地区长8储层为研究对象,通过低温氮气吸附、高压压汞、Amott法及渗吸—核磁联测等实验手段,对研究区储层性质和渗吸采收率的主要影响因素进行分析。结果表明:研究区储层具有较强的亲水性,微孔和介孔以平板型狭缝毛细孔为主,喉道分散,属于细喉道、细—微孔隙型地层;影响渗吸采收率的主要因素中,储层品质和最大连通孔喉半径与渗吸采收率呈正相关,比表面与渗吸采收率呈负相关,而相对润湿指数的增加和界面张力的减小均有利于渗吸过程的进行。由此可知,孔隙结构好且孔喉连通程度高的亲水性致密砂岩储层渗吸作用明显,并初步判断在该区实行压裂后渗吸作用将对储层的开发起到积极作用。

**关键词:**渗吸 孔隙结构 致密砂岩储层 氮气吸附 相对润湿指数

中图分类号:TE311

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)04-0102-06

## Mechanism and influence factors of imbibition in fractured tight sandstone reservoir: An example from Chang8 reservoir of Wuqi area in Ordos Basin

Wei Qing<sup>1</sup>, Li Zhiping<sup>1</sup>, Wang Xiangzeng<sup>2</sup>, Bai Ruiting<sup>1</sup>, Wang Cai<sup>1</sup>, Li Hong<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China; 2. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710075, China)

**Abstract:** In recent years, as a main mechanism of water driving in fractured tight sandstone reservoirs, imbibition is widely concerned. In view of the shortcomings of the current experimental research of imbibition, taking Chang8 reservoir of Wuqi area in Ordos Basin as target, the characteristics of the reservoir and the main influence factors of imbibition were analyzed by using low-temperature nitrogen adsorption, high pressure mercury injection and Amott methods, as well as nuclear magnetic resonance (NMR) technology. The experimental results show that as a water-wet reservoir, the formation is dominant by narrow slit-like pores with micro- and mesopore size. The throat is scattered and the reservoir belongs to fine throat and micro-fine pore type. Among the main factors which affect recovery efficiency of the imbibition, reservoir quality and maximum pore throat radius have positive correlation with the recovery efficiency of the imbibition, and specific surface area has negative correlation with the recovery efficiency. The increase of relative wettability index and the decrease of interfacial tension are favorable to the process of imbibition. So imbibition is obvious in hydrophilic tight sandstone reservoir with good pore structure and pore-throat connectivity, and imbibition after the hydraulic fracturing will play a positive role in the development of reservoir.

**Key words:** imbibition; pore structure; tight sandstone reservoir; nitrogen adsorption; relative wettability index

收稿日期:2016-04-06。

作者简介:韦青(1988—),女,山东东营人,在读博士研究生,从事致密油气开发方法研究。联系电话:(010)82320165, E-mail: weiqing0213@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“新一代油藏数值模拟软件系统”(2011ZX05009-006),国家自然科学基金项目“CO<sub>2</sub>驱油对储层的伤害机理研究”(51174178)。

随着世界范围内能源需求的急剧增加,非常规油气资源受到越来越多的关注。致密油在北美大规模的成功开采,使其成为继页岩气之后全球非常规油气勘探开发的又一热点<sup>[1-2]</sup>。中国致密储层主要为陆相沉积,由于受成藏作用影响,大多数储层裂缝、微裂缝发育,同时在开采过程中,为了提高裂缝导流能力,通过压裂制造了大量裂缝,从而构成了裂缝与基质共存的复杂地层。现阶段致密油藏大多采用水驱方式进行开采,由于裂缝与基质之间渗透率差异巨大,注水开发后期基质岩块中仍有大量的剩余油富集。油田开发实践证明,毛管压力的渗吸作用是致密油藏提高采收率的关键<sup>[3]</sup>。因此,在考虑致密储层特征的基础上研究毛细管渗吸规律,对认识致密储层的驱油机理意义重大。

发生在多孔介质中的渗吸过程非常复杂,前人在理论分析和实验研究的基础上,提出孔隙的空间结构、岩石润湿性、界面张力以及地层条件下油水性质是决定原油采收率的最主要因素<sup>[4-5]</sup>。然而目前渗吸实验多集中于研究润湿性<sup>[6-7]</sup>和界面张力<sup>[8-9]</sup>等因素的影响,鲜有关于孔隙结构的研究。同时,大多数实验未采用单因素分析法,在研究润湿性和界面张力的过程中,没有排除孔隙结构及其他因素的影响。针对目前渗吸实验存在的问题,通过低温氮气吸附实验和高压压汞实验,对鄂尔多斯盆地吴起地区长8储层的微观孔隙结构进行研究,同时采用Amott法对目标区块天然露头岩心的润湿性进行测定,并在此基础上,采用渗吸—核磁联测技术,分析孔隙结构、润湿性和界面张力等因素对渗吸采收率的影响,以期对裂缝性致密砂岩储层渗吸机理的研究及其此类型油藏的开发提供参考和依据。

## 1 储层特征

### 1.1 微观孔隙结构特征

铸体薄片、扫描电镜、高压压汞和恒速压汞是目前研究储层孔隙结构的最主要手段,然而致密砂岩储层物性差、丰度低,孔喉直径一般为纳米级,局部发育微米—毫米级孔隙,微观孔隙结构非常复杂,常规方法无法准确描述孔隙结构及形态<sup>[10]</sup>。

根据孔隙直径,将孔隙分为微孔(直径小于2 nm)、介孔(直径为2~50 nm)和宏孔(直径大于50 nm)3类<sup>[11]</sup>。气体吸附法所得结果可有效表征储层中微孔和介孔的孔径分布,而高压压汞法的孔径探测上限为1 mm,可以准确地描述宏孔的发育情况,因此,将高压压汞实验与低温氮气吸附实验相结

合能够对致密砂岩微观孔隙结构进行全面的研

#### 1.1.1 储层微孔及介孔特征

储层孔隙的复杂程度和形貌特征可以通过低温氮气吸附实验所得到的吸附—脱附等温线来表征<sup>[14]</sup>,通过定性评价所得曲线,能够较准确地描述研究区储层中、小孔隙的分布和发育情况。

对研究区18块致密砂岩样品进行低温氮气吸附实验,通过观察所得到的氮气吸附和脱附等温线(图1)发现,虽然不同样品的吸附量略有差别,但曲线整体趋势相同,所有岩样的吸附曲线均呈反S型。

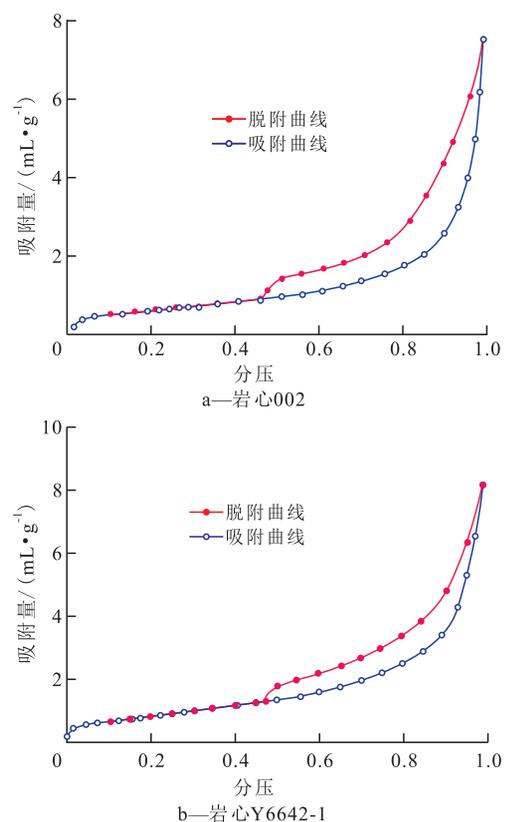


图1 致密砂岩样品氮气吸附—脱附等温线

Fig.1 Adsorption and desorption isotherms of tight sandstone samples

根据国际理论与应用化学协会(IUPAC)的分类,研究区致密砂岩样品的吸附—脱附等温线与IV型等温线类似。由图1可以看出:当分压较低时,吸附量缓慢上升,此时致密砂岩与液氮相互作用,发生单层吸附并且填充微孔;当单层吸附接近饱和时出现拐点,并开始向多分子层吸附转变,此时吸附量呈线性增加;当分压为0.8~1.0时,吸附量急剧上升,此时氮气在致密砂岩样品表面形成毛细凝聚,直到分压无限接近于1.0时也未出现吸附饱和现象,说明样品中含有一定量的中孔和大孔。

由图1亦可看出:当分压小于0.4时吸附曲线与脱附曲线基本重合,而当分压为0.4~1.0时,脱附曲

线在吸附曲线的上方,存在滞后环,但由于2条曲线均上升平缓,滞后环较小,其形态与H3型类似。实验结果表明,研究区储层中微孔和介孔以四周开放的平板型的狭缝毛细孔为主,发育该类孔隙的储层连通性较好,有助于油气运移,是渗吸采油的有利条件。

### 1.1.2 储层孔喉特征

利用高压压汞实验可以间接对储层孔喉特性进行研究,大量实际资料表明,致密砂岩储层毛管压力曲线的形态主要受排驱压力、孔喉分选程度、歪度和最大进汞饱和度控制,因此,研究毛管压力曲线形态可以定性分析研究区储层中各类孔隙的发育情况及孔喉间连通状况。

通过对18块采自目标区的致密砂岩样品进行高压压汞分析,以其中3块为例,结果(图2)表明,研究区大部分样品的毛管压力曲线偏向右上方,进汞曲线与退汞曲线中间距离较大,同时毛管压力曲线中间段较短且不与横坐标平行。由此可知,研究区储层排驱压力较高,喉道较窄且分布比较分散,连通程度和物性均较差,属于细喉道、细—微孔隙型地层,有利于油气聚集,但不利于油气运移,此类地层经压裂后才能更好地发挥渗吸采油的优势。

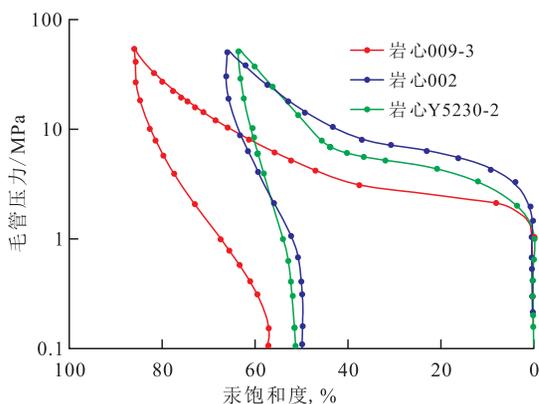


图2 致密砂岩样品毛管压力曲线

Fig.2 Capillary pressure curves of tight sandstone samples

## 1.2 润湿性

目前,中外研究者提出了多种分析润湿性的方法,其中Amott自吸排油法<sup>[15]</sup>具有测试范围大、数值定义清楚及对油气勘探开发影响小等优势,被广泛应用于岩心润湿性的定量评价中。为此,利用Amott法对鄂尔多斯盆地吴起地区长8储层18块致密砂岩样品进行润湿性测定,结果(表1)表明,18块致密砂岩样品的相对润湿指数为0.20~0.86,储层具有较强的亲水性,有利于毛细管自吸作用的进行。因此,充分发挥毛细管渗吸作用在一定条件下可成为开采研究区的有效方式。

表1 18块致密砂岩样品基本物性数据

Table1 Basic physical property data of 18 tight sandstone samples

岩心编号	孔隙度, %	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	相对润湿指数	岩心编号	孔隙度, %	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	相对润湿指数
1-8	12.499	0.044	0.35	2-11	9.294	0.105	0.47
1-10B	5.983	0.014	0.41	002	7.787	0.026	0.35
1-18B	8.351	0.014	0.27	002-1	7.843	0.005	0.35
1-19	8.781	0.078	0.42	005	8.187	0.033	0.27
1-22	10.431	0.048	0.33	005-1	8.005	0.033	0.27
1-26	8.221	0.042	0.27	009-3	12.082	0.052	0.38
1-27	14.936	0.042	0.33	Y6642-1	6.328	0.003	0.20
1-30	4.376	0.014	0.33	Y5230-2	6.113	0.008	0.23
2-1	9.600	0.295	0.51	006	13.893	4.928	0.86

## 2 自发渗吸实验结果与分析

自发渗吸实验步骤为:①将取自研究区的天然露头岩心洗油、清洗、烘干、冷却后称重,并用常规实验方法测定孔隙度和渗透率,其基本参数如表1所示;②将现场原油进行脱水、脱气处理,与煤油以1:4的体积比配制模拟油,室温下粘度为2.02 mPa·s,密度为0.81 g/cm<sup>3</sup>;③配制矿化度为55 000 mg/L的CaCl<sub>2</sub>型模拟地层水,在水中加入MnCl<sub>2</sub>用以屏蔽水中的氢信号,将岩心抽真空一段时间后,注入模拟地层水,加压30 MPa,继续饱和12 h以上;④用配制好的模拟油驱替完全饱和的岩心造束缚水,驱替速度为0.005 mL/min,当完全驱不出水时,从岩心夹持器中取出岩心,放入模拟油中老化48 h待用;⑤测定完全饱和原油时岩心的核磁共振T<sub>2</sub>谱,将其作为参照,将岩心放入自行设计的渗吸仪中,每隔一段时间记录样品渗吸量,同时测定其对应的核磁共振T<sub>2</sub>谱,利用渗吸—核磁联测方法研究不同尺寸孔径的吸水排油过程。

由于实验过程中加入MnCl<sub>2</sub>屏蔽了水中氢信号,故测定的T<sub>2</sub>谱可表征渗吸过程中孔隙内含油量的变化。从图3中可以看出:在自发渗吸开始阶段,T<sub>2</sub>谱所包围的面积迅速减小,并且峰值右移,说明此时水迅速进入中等孔隙和小孔隙并进行油水置换,使得岩心含油饱和度迅速降低;而24 h后T<sub>2</sub>谱所包围面积的变化程度减小,说明渗吸速度降低,含油饱和度降低速率减缓;随着自发渗吸的进行,T<sub>2</sub>谱所包围的面积不再变化,即岩心含油饱和度不再降低时,渗吸过程结束。

分析渗吸时间与渗吸采收率的关系曲线(图4)

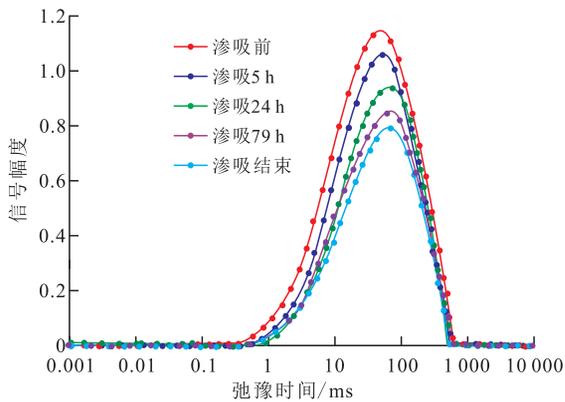


图3 致密砂岩样品自发渗吸  $T_2$  谱

Fig.3  $T_2$  spectrums of spontaneous imbibition in tight sandstone sample

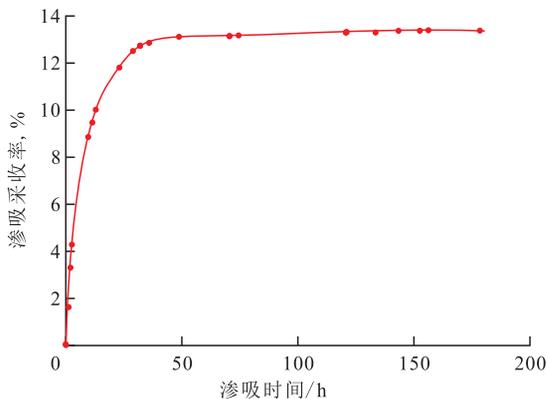


图4 渗吸时间与渗吸采收率的关系

Fig.4 Relationship between imbibition time and recovery efficiency of imbibition

可知,在自发渗吸的初始阶段,曲线斜率很大,渗吸速度非常快,中等孔隙和小孔隙在毛管压力的作用下吸水排油,渗吸采收率迅速提高;随着中等孔隙和小孔隙中含水饱和度的增大,渗吸速度逐渐减慢,渗吸采收率增幅变缓;自发渗吸末期,渗吸速度逐渐趋于0,当渗吸采收率不再升高时,渗吸过程结束。结果表明,图4所表征的变化规律与图3是一致的。

通过图3不难看出:在渗吸作用下,中等孔隙和小孔隙优先发生吸水排油;而渗吸结束后,中等孔隙和小孔隙的含水饱和度远大于大孔隙的含水饱和度,这个实验现象也同时证明了自发渗吸的主要动力是毛管压力。

### 3 致密砂岩自发渗吸影响因素

#### 3.1 孔隙结构

在分析孔隙结构这一影响因素时,应尽量减少润湿性差异对自发渗吸结果的影响,因此,在润湿性测定实验的基础上,选择了15块相对润湿指数接

近的岩心进行实验。

**储层品质指数** 在实际应用中,常用孔隙度和渗透率表征储层的基本物性:孔隙度描述储集空间的大小,而渗透率反映孔隙空间的连通性和储层的渗流能力。

由于致密砂岩储层孔隙结构十分复杂,在孔隙度大致相同的情况下,渗透率却存在很大差异,因此单一地用孔隙度或渗透率来描述其储层孔隙结构,非常不准确。目前在储层分类评价过程中常用储层品质指数(RQI)来综合反映储层孔隙结构的品质,其值为  $\sqrt{K/\phi}$  [16]。

由图5可以看出,15块岩心的储层品质指数与渗吸采收率呈现较好的正相关关系。这是因为,当储层品质指数较高时,储层品质较好,孔隙中值半径较大,中值压力较小,孔隙结构较好,故渗吸采收率较高。

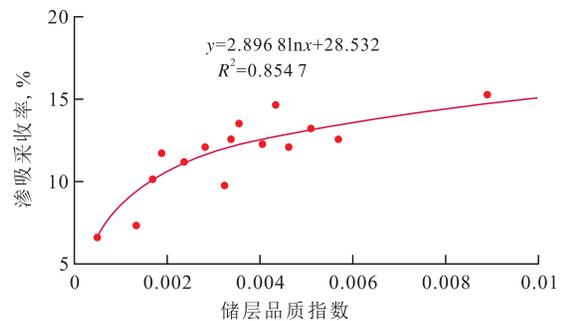


图5 储层品质指数与渗吸采收率的关系

Fig.5 Relationship between reservoir quality index and recovery efficiency of imbibition

**最大连通孔喉半径** 由图6可知,渗吸采收率与最大连通孔喉半径呈线性正相关关系,最大连通孔喉半径与排驱压力相对应,为润湿相驱替非润湿相时经过的最大孔喉半径,最大连通孔喉半径越大,排驱压力越小,说明储层孔隙结构较好,孔喉连通程度较高,有利于渗吸过程中润湿相流体的吸入和非润湿相流体的排出。

比表面 致密砂岩储层微孔和介孔的分布可

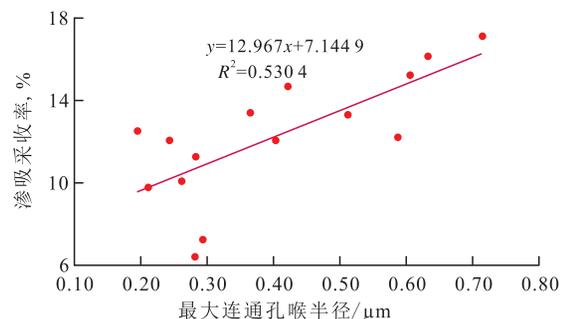


图6 最大连通孔喉半径与渗吸采收率的关系

Fig.6 Relationship between maximum pore throat radius and recovery efficiency of imbibition

以通过低温氮气吸附实验得到,而宏孔的分布可由高压压汞测试获得,利用2种实验方法所得数据可对致密砂岩储层比表面进行计算。由图7可以看出,比表面与渗吸采收率呈负相关关系,低温氮气吸附所得的比表面与渗吸采收率的相关性较差,这是由于低温氮气吸附所得的结果与微孔和介孔相关,而在油水渗吸过程中介孔和微孔孔径微小,原油在其中的粘滞力很大,故而基本不发生渗吸;而高压压汞测试所得的比表面与渗吸采收率相关性较好,储层比表面越大,说明储层内中、小喉道越发育,孔喉比相对较大,孔喉连通性差,因此渗吸进入的流体无法有效地驱替非润湿相,导致渗吸采收率相对较低。

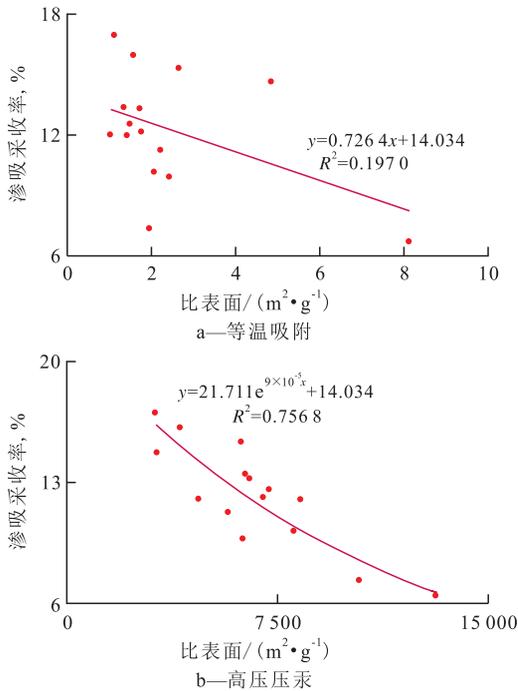


图7 比表面与渗吸采收率的关系

Fig.7 Relationship between specific surface area and recovery efficiency of imbibition

### 3.2 润湿性

由图8可知,相对润湿指数与渗吸采收率呈正相关关系,渗吸过程是润湿相依靠毛管压力自发吸入多孔介质中驱替非润湿相的过程,对于水湿储层,水是润湿相,毛管压力是渗吸动力,因此水湿程度越高,毛管压力的作用越强,水能够进入的孔隙占总孔隙的比例越高,驱出的油越多,故而渗吸采收率越高。

### 3.3 界面张力

将编号为002和002-1与005和005-1的岩心分为2组进行自发渗吸实验,由于每组样品取自同一块全直径岩心,因此基本物性、孔隙结构和润湿性均大致相同,可以在排除其他因素影响的情况

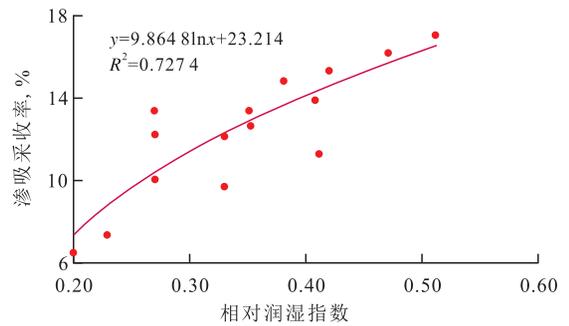


图8 相对润湿指数与渗吸采收率的关系

Fig.8 Relationship between relative wettability index and recovery efficiency of imbibition

下,单纯考察界面张力在自发渗吸中的作用。

室温下测得质量分数为0.05%的OP-10溶液和十二烷基溴化铵溶液的界面张力分别为30.1和33.5 mN/m,模拟地层水的界面张力为65.6 mN/m,加入表面活性剂后模拟地层水溶液的界面张力明显降低。由图9可知:加入表面活性剂后,渗吸时间与渗吸采收率关系曲线的斜率明显增大,其斜率代表了渗吸速率,说明岩心的渗吸速率加快,最终渗吸采收率明显提高;加入质量分数为0.05%的十二烷基二甲基溴化铵溶液后,最终采收率提高了4.34%,增长率为43%;而加入质量分数为0.05%的OP-10溶液后,最终采收率提高了6.18%,增长率为55.38%。对比发现,界面张力较低的质量分数为0.05%的OP-10溶液对于渗吸采收率增加的贡献大于界面张力相对较高的质量分数为0.05%的十二烷基二甲基溴化铵溶液,说明表面活性剂溶液可以改善岩石表面的润湿情况,同时降低原油粘度,提高渗吸采收率。

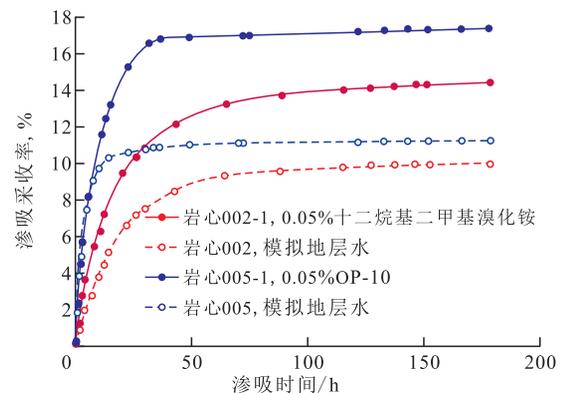


图9 表面活性剂溶液对渗吸采收率的影响

Fig.9 Effect of surfactant solution on recovery efficiency of imbibition

## 4 结论

研究区储层氮气吸附曲线呈反S型,储层中微

孔和介孔以平板型狭缝毛细孔为主;高压压汞测试所得到的毛管压力曲线整体偏向右上方,中间段较短且不与横坐标平行,说明研究区储层排驱压力较高,喉道较窄且分布比较分散,连通程度和物性均较差,属于细喉道、细—微孔隙型地层;润湿性测试结果表明,研究区储层为水湿储层,根据储层性质,初步判断该区块实施压裂后,自发渗吸作用将对该储层的开发起到积极作用。

致密砂岩储层渗吸初期,核磁共振  $T_2$  谱峰值右移,中等孔隙和小孔隙迅速被水充填,渗吸速度较快,渗吸采收率较高;随着渗吸的进行,渗吸速度逐渐减小直至趋近于0,实验结果说明渗吸作用主要发生在中等孔隙和小孔隙中,毛管压力是渗吸过程的主要动力。

对于致密砂岩储层,储层品质相对较好的地层渗吸采收率相对较高;比表面与渗吸采收率呈负相关关系,储层比表面越大,中、小喉道越发育,孔喉比越大,孔隙的连通性越差,渗吸进入的流体无法有效地驱替非润湿相,导致渗吸采收率偏低;相对润湿指数的增加和界面张力的减小均有利于渗吸过程的进行。实验结果表明,亲水性强且孔喉连通性好的致密砂岩储层渗吸作用更为明显。

#### 参考文献:

- [1] 庞正炼,邹才能,陶士振,等.中国致密油形成分布与资源潜力评价[J].中国工程科学,2012,14(7):60-67.  
Pang Zhenglian, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. Formation, distribution and resource evaluation of tight oil in China [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(7): 60-67.
- [2] 韩永林,刘军锋,余永进,等.致密油藏储层驱替特征及开发效果——以鄂尔多斯盆地上里塬地区延长组长7油层组为例[J].石油与天然气地质,2014,35(2):207-211.  
Han Yonglin, Liu Junfeng, Yu Yongjin, et al. Displacement characteristics and development effect of tight oil reservoir: a case from Chang7 oil layer of the Yanchang Formation in Shangliyuan area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 207-211.
- [3] 朱维耀,鞠岩,赵明,等.低渗透裂缝性砂岩油藏多孔介质渗吸机理研究[J].石油学报,2002,23(6):56-59.  
Zhu Weiyao, Ju Yan, Zhao Ming, et al. Spontaneous imbibition mechanism of flow through porous media and water flooding in low-permeability fractured sandstone reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 56-59.
- [4] Mattax C C, Kyte J R. Imbibition oil recovery from fractured water drive reservoir [J]. SPEJ, 1962, 2(2): 177-184.
- [5] 许建红,马丽丽.低渗透裂缝性油藏自发渗吸渗流作用[J].油气地质与采收率,2015,22(3):111-114.  
Xu Jianhong, Ma Lili. Spontaneous imbibition in fractured low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 111-114.
- [6] Treiber L E, Archer D L, Owens A. A laboratory evaluation of the wettability of fifty oil-producing reservoirs [J]. SPEJ, 1972, 12(6): 531-540.
- [7] Austad Tor, Standnes Dag C. Spontaneous imbibition of water into oil-wet carbonates [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 39(3/4): 363-376.
- [8] Stoll W M, Hofman J P, Ligtheim T. Toward field-scale wettability modification the limitation of diffusive transport [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(3): 633-640.
- [9] 李爱芬,凡田友,赵琳.裂缝性油藏低渗透岩心自发渗吸实验研究[J].油气地质与采收率,2011,18(5):67-69,77.  
Li Aifen, Fan Tianyou, Zhao Lin. Experimental study of spontaneous imbibition in low permeability core, fractured reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(5): 67-69, 77.
- [10] 王香增,任来义,贺永红,等.鄂尔多斯盆地致密油的定义[J].油气地质与采收率,2016,23(1):1-7.  
Wang Xiangzeng, Ren Laiyi, He Yonghong, et al. Definition of tight oil in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 1-7.
- [11] Rouquerol J, Avinir D, Fairbridge C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids [J]. Pure & Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739-1785.
- [12] 曹涛涛,宋之光,刘光祥,等.氮气吸附法—压汞法分析页岩孔隙、分形特征及其影响因素[J].油气地质与采收率,2016,23(2):1-8.  
Cao Taotao, Song Zhiguang, Liu Guangxiang, et al. Characteristics of shale pores, fractal dimension and their controlling factors determined by nitrogen adsorption and mercury injection methods [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 1-8.
- [13] 肖前华,张尧,杨正明,等.中国典型致密油区低温氮气吸附实验[J].特种油气藏,2015,22(4):82-85.  
Xiao Qianhua, Zhang Yao, Yang Zhengming, et al. Experiment on low-temperature nitrogen adsorption in typical tight oil zones in China [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(4): 82-85.
- [14] Gregg S J, Sing S W. Adsorption, surface area, and porosity [M]. 2nd Edition. London: Academic Press, 1982.
- [15] William A G. Wettability literature survey—part 2: wettability measurement [J]. Journal of Petroleum Technology, 1986, 38(11): 1246-1259.
- [16] 张程恩,潘保芝,刘茜茹.储层品质因子RQI结合聚类算法进行储层分类评价研究[J].国外测井技术,2012,33(4):11-13.  
Zhang Chengen, Pan Baozhi, Liu Qianru. Reservoir classification evaluation research with combination of reservoir quality factor RQI and clustering algorithm [J]. World Well Logging Technology, 2012, 33(4): 11-13.

编辑 常迎梅