



引用格式: 杨 柳,曹金栋,赵逸清,等. 盐间页岩盐离子扩散对自发渗吸驱油的影响——以潜江凹陷潜江组页岩为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1386-1393

Yang Liu, Cao Jindong, Zhao Yiqing, et al. The influence of salt ion diffusion in intersalt shale on spontaneous imbibition and oil displacement: a case study of Qingjiang Formation in Qingjiang Sag[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(4): 1386-1393

盐间页岩盐离子扩散对自发渗吸驱油的影响 ——以潜江凹陷潜江组页岩为例

杨 柳^{1,2}, 曹金栋¹, 赵逸清², 鲁晓兵³, 周 彤⁴

(1. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 新疆油田公司 勘探开发研究院开发所 克拉玛依 834000; 3. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190; 4. 中国石油大学(北京) 非常规气体研究所, 北京 102249)

摘 要 潜江凹陷盐间页岩富含石盐矿物, 遇到水后迅速发生盐溶解、扩散, 目前对于盐离子扩散对自发渗吸驱油的影响尚不清楚。以潜江凹陷的钙芒硝质盐间页岩、白云质盐间页岩和泥质盐间页岩样品为研究对象, 开展页岩油储层逆向自发渗吸实验, 采用低场核磁共振测试仪监测盐间页岩的渗吸过程中的油相变化。实验结果显示渗吸水进入盐间页岩后, 将孔隙中的油以油滴的形式置换、排驱出来, 具有小孔吸水、大孔排油的特征。初期小孔原油排出速率较高, 大孔或微裂缝中的原油含量基本不变, 但随着小孔原油排出速率的下降, 新生的大孔或微裂缝中原油逐渐减少。此外, 渗吸过程中, 骨架结构中石盐矿物迅速溶解, 产生大量的溶孔、裂缝。然而, 量纲分析结果表明渗吸速率与石盐矿物含量具有负相关关系, 石盐矿物含量越高, 渗吸速率越低。石盐矿物的溶解引起颗粒崩落, 堵塞基质孔隙, 对储层产生了伤害作用, 反而不利于孔隙中原油向新生溶孔、裂缝中迁移。研究了盐间页岩油储层中的盐的溶解、扩散机制及其对油动态迁移特征的影响, 对盐间页岩的压裂液返排制度的建立和提高页岩油产出具有重要意义。

关键词 页岩油; 渗吸; 离子扩散; 石盐; 储层伤害

中图分类号 TE348; 文献标志码 A

The Influence of Salt Ion Diffusion in Intersalt Shale on Spontaneous Imbibition and Oil Displacement:

A Case Study of Qingjiang Formation in Qingjiang Sag

YANG Liu^{1,2}, CAO Jin-dong¹, ZHAO Yi-qing², LU Xiao-bing³, ZHOU tong⁴

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Xinjiang Oilfield Company Exploration and Development Research Institute, Kelamayi 834000, China; 3. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Unconventional Gas Research Institute, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

[Abstract] the intersalt shale in Qianjiang Sag is rich in halite minerals, which are dissolved and diffused rapidly after encountering water. At present, the effect of salt ion diffusion on spontaneous imbibition and oil displacement is not clear. Thus, the samples of glauberite salt shale, dolomite salt shale, and argillaceous salt shale in Qianjiang Sag were taken as the research objects. The reverse spontaneous imbibition experiment of shale oil reservoir was carried out, and the oil phase change in the imbibition process of salt shale was monitored by low field NMR tester. The experimental results show that the oil in the pores was displaced and drained out in the form of oil droplets after the water seepage entered the salt shale, being characteristic of water absorption in small hole and oil drainage in large hole. In the early stage, the oil discharge rate of small hole was higher, and the crude oil content in the large hole or micro fracture remained largely unchanged; with the decrease in oil discharge rate of the small hole, crude oil in new large hole or micro fracture gradually decreased. In addition, in the process of imbibition, halite minerals in the skeleton structure dissolved rapidly, resulting in a large number of dissolved pores and cracks. However, the results of dimensional analysis show that there was a negative correlation between the imbibition rate and the content of halite minerals. The higher the content of halite minerals was, the lower the imbibition rate was. The dissolution of halite minerals caused particle collapse, blocked matrix pores, and caused damage to the reservoir. On the

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11702296)

第一作者: 杨 柳(1987—) 男, 山东潍坊人, 博士。研究方向: 岩石与流体相互作用。E-mail: shidayangliu@126.com.

投稿网址: www.stae.com.cn

contrary, it was not conducive to the migration of crude oil from pores to new dissolved pores and fractures. The mechanism of salt dissolution and diffusion in intersalt shale oil reservoir and its influence on the characteristics of oil dynamic migration were revealed, which is of great significance to the establishment of fracturing fluid return system and the improvement of shale oil production.

[Key words] shale oil; imbibition; ion diffusion; stone salt; reservoir damage

页岩油是指以游离、吸附及溶解态等多种方式赋存于富有机质泥页岩地层中的液态烃类,属于典型的自生自储型原地聚集的油气类型^[1]。页岩油的资源分布广泛,是重要的非常规能源,对缓解国家能源战略供需矛盾具有重要的意义。然而,页岩油储层低孔、低渗透,毛细管力大,油在孔隙中难以被动用。高毛细管力诱发的自发渗吸作用下,水可以将油自发置换出来,是页岩油开采的一个重要机理。

Blair 等^[2]通过计算分析了自发吸收过程中岩石含水饱和度与采收率之间的关系。Schechter 等^[3]提出用毛管压力与重力之比 N_B^{-1} 作为渗吸机理判别参数来解释渗吸机理,并给出了参数范围,判别渗吸过程中毛管压力和重力谁在起主导作用。汪伟英等^[4]研究发现,岩石孔隙结构影响产生毛细管力的大小和改变渗流规律,进而渗吸效果会有较大差异。Mason 等^[5]提出半球形凹陷向外自发逆流吸收的模型,渗吸量随着时间线性变化。朱维耀等^[6]用气驱模拟岩样中油的渗吸过程,基于核磁共振中 T_2 谱和成像技术,根据实验结果和现象,发现渗流速度由小变大,其排油的主导作用有毛细管力变为驱动力,存在最佳渗流速度,到达最好的驱油效果。李爱芬等^[7]通过自发渗吸实验研究了润湿性、温度和黏度、界面张力对于渗吸的影响,结果分析表明岩心亲水性越好,深吸率越高;温度间接影响渗吸效果,不同岩样性质都存在最佳界面张力范围。杨发荣等^[8]进行了动态和静态渗吸的实验研究,动态渗吸实验通过有缝和无缝研究渗吸面积对于渗吸量的影响,渗吸深度不受渗吸面积的影响;静态实验得出不同介质,其渗吸效果存在较大的差异。Yassin 等^[9]研究了有机页岩为粉末状条件下润湿性及其与其他岩石物理特性的关系。蒙冕模等^[10]研究在自发渗吸过程的不同时段,对不同岩性的页岩用核磁共振仪生成 T_2 谱,分析了水力压裂后返排率低、产能高的机理。黄睿哲等^[11]研究了不同矿物含量页岩储层渗吸率的变化情况,并据此评价了页岩储层空隙的连通性。李士奎等^[12]在低渗透亲水岩心自发渗吸实验中,发现化学试剂降低界面张力,可将剩余油量变为可动油。吴志伟^[13]分析了电阻率与含油饱和度之间的对应关系因素,指出水驱后剩余油潜力区域和聚合物驱在不同储层中的携油潜力。李洪等^[14]基于 Hagen-Poiseuille 方

程,建立了自发渗吸初期,自发渗吸量与渗吸时间的平方根呈线性变化的关系式。王学武等^[15]建立了一种研究周期注气微观驱油机理的新方法,分析了不同驱油阶段岩心静置前后原油在孔隙中的变化规律,提出了周期注气指数参数,并对周期注气效果进行评价。王海涛等^[16]通过驱替实验研究了 CO_2 原油体系的平衡界面张力与气驱采收率之间存在的关系。王学忠等^[17]提出利用深层高温注水,降低原油黏度,提高流动能力,进而提高采出率,并作出地热采油流程概念设计。邱小松等^[18]提出利用体积法计算页岩气资源量,并给出评价参数赋值,可以准确评价出页岩气资源量。陈会军等^[19]制定油页岩开发优选指标体系的一系列参数和指标权重,做到最优化开发。

潜江凹陷位于江汉盆地中部,面积 2 530 km²,潜江组纵向上共发育 193 个含盐韵律^[20-21]。盐度含量高、蒸发强度大、湿润与干旱天气长期交替作用形成了十分厚的潜江组盐系地层^[22]。潜江凹陷发育了两种类型页岩油藏:一是油浸泥岩夹白云岩的页岩油藏,黏土含量达到 30% ~ 40%,大部分区段烃指数 $S_1/\text{TOC} > 100$;二是盐间油浸泥质白云岩的页岩油藏,脆性矿物含量达到 40% ~ 60%, S_1/TOC 平均为 570,两种类型都具有较好的烃源条件和含油性^[23]。潜江凹陷潜江组页岩矿物组成与北美 Woodford 页岩、北美 Barnett 页岩、皖南荷塘组、川南地区龙马溪组、川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩分别在石英含量、碳酸盐矿物含量、黏土矿物含量、脆性矿物含量进行对比,具有“低黏土矿物、低石英、高碳酸盐、高脆性矿物”的特征,具有较好的脆性,烃源岩条件好,展现出良好的页岩油勘探开发前景^[24-26]。

页岩油储层压裂后闷井一段时间,有利于促进毛细管力渗吸驱油作用,提高页岩油的产出。与常规页岩油储层不同,潜江凹陷盐间页岩油储层富含石盐矿物。压裂液渗吸进入孔隙后会起石盐矿物溶解、扩散,改变了原有的孔隙结构,从而对油的迁移产生影响。目前,针对潜江凹陷盐间页岩油渗吸特征的研究较少,盐离子溶解、扩散对孔隙结构和渗吸驱油的影响尚不清楚。本文以潜江凹陷盐间页岩储层为研究对象,开展渗吸核磁共振实验,研究了盐离子扩散对孔隙结构、渗吸驱油和渗吸采收率的影响。

1 实验装置及方法

1.1 实验样品

盐间页岩油地层主要发育白云质页岩、钙芒硝页岩和泥页岩,分别取三种储层岩性进行对比实验。白云质页岩为灰白色,气测孔隙度为4.4%,渗透率为0.006 2 mD;钙芒硝页岩充填大量的白色块状或条带状盐晶体,非均质性较强,孔隙度为1.7%,渗透率0.15 mD;泥页岩为黑色或灰黑色,发育层理裂缝,裂缝中间充填白色盐晶体颗粒,孔隙度为9.2%,渗透率约为0.014 mD。三种盐间页岩地层孔隙度和渗透率差别较大,说明盐间页岩非均质性强,储层特征差异较大。高渗透率的样品主要与发育微裂缝有关。此外,饱和油测试的孔隙度普遍低于氦气测试的孔隙度。

图1介绍了渗透率和孔隙率的分布特征。白云岩页岩、钙芒硝页岩和泥质页岩的孔隙度分别为4%~8%、2%~8%和2%~12%。白云岩页岩、钙芒硝页岩和泥质页岩的渗透率分别为0.02~0.6 mD、0.006~2.5 mD和0.0005~0.85 mD。页岩储层的渗透率分布范围很广,可以用微裂缝的发育程度来解释。微裂缝埋藏的样品具有较高的渗透率,孔隙度与渗透率正相关。没有微裂缝的样品对应于低孔隙度-渗透率区域(I)和涉及微裂缝的样品对应于高孔隙度-渗透率区域(III)。分别选取三个盐间页岩样品进行实验,物理性质如表1所示,有助于分析孔隙度和渗透率对油迁移的影响。

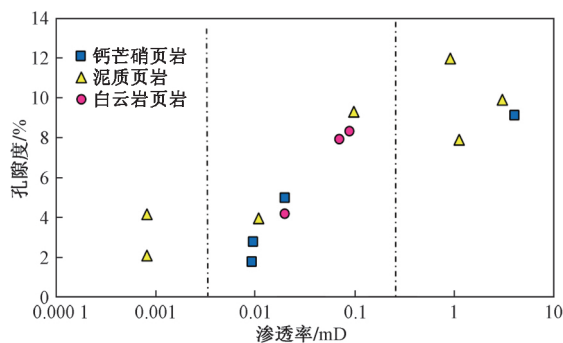


图1 渗透率和孔隙度

Fig. 1 Permeability and porosity

表1 页岩样品的物理性质

Table 1 Physical properties of shale samples

标号	岩性	直径/ cm	长度/ cm	干质量/ g	渗透率/ mD	孔隙率/ %
D	白云岩页岩	2.51	1.65	21.084 5	0.006 2	4.4
G	钙芒硝页岩	2.49	1.92	26.850 1	0.15	1.7
A	泥质页岩	2.5	1.52	18.216 6	0.015	9.2

注: D代表白云岩页岩, G代表钙芒硝页岩, A代表泥质页岩。

矿物组成的XRD分析结果如表2所示。与海相页岩气储层相比,盐间页岩储层具有低石英含量(质量分数17.6%~21.3%)和低黏土矿物含量(质量分数15.3%~21.3%)的特点。此外,石盐矿物(质量分数3.4%~7.4%)的存在使盐间页岩与海相页岩更加不同。海相页岩气储层的盐主要赋存于孔隙内壁和黏土矿物层间,而盐间页岩的盐以石盐矿物的形式存在,是骨架结构的一部分。此外,三种盐间页岩样品的矿物组成存在较大不同。白云岩页岩由高含量白云石矿物(质量分数29.8%)组成,钙芒硝页岩含有大量钙芒硝矿物(质量分数23.3%),泥质页岩含有高浓度的黏土矿物(质量分数21.3%)。

表2 页岩样品的矿物学成分

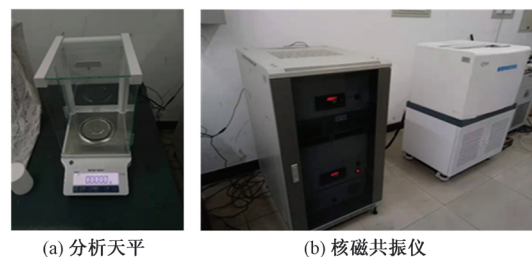
Table 2 Mineralogical composition of shale samples

标号	质量分数/%								
	石英	方解石	长石	白云石	钙芒硝	岩盐	黄铁矿	TOC	黏土
D	17.6	6.8	12.3	29.8	9.3	5.7	2.1	1.2	15.3
G	18.7	9.5	14.8	6.7	23.3	7.4	1.5	3.2	14.7
A	21.3	13.1	15.7	12.2	6.7	3.4	4.7	2.1	21.3

采用MnCl₂溶液作为渗吸流体开展研究,高浓度(>20%)的MnCl₂溶液能够很好地屏蔽水中的氢信号,抑制水中的核磁共振信号。由于水中加入了MnCl₂屏蔽了水的核磁信号,因此测量的T₂谱动态曲线,就很好地反映出渗吸作用下岩石孔隙中的含油量。

1.2 实验装置及方法

实验装置为精度为0.000 1 g梅特勒分析天平(型号ME204E),如图2(a)所示。通过测量样品质量的变化,根据油和水的密度差,来推测吸入水和排出油的体积。核磁共振仪由苏州纽迈分析仪器股份有限公司提供,型号为MiniMR-VTP,磁场强度0.5 T,如图2(b)所示。测试温度为25℃,湿度为40%,压力为大气压力。核磁共振是一种无损测试方法,通过测量岩石内氢元素含量来分析岩石的物性特征。核磁共振T₂谱可以很好地反映孔隙结构和流体分布特征。T₂值越高,说明赋存流体的孔径



(a) 分析天平

(b) 核磁共振仪

图2 致密油渗吸排油实验装置

Fig. 2 Tight oil seepage and drainage test device

越大;某一孔径的岩石中流体越多,则 T_2 谱幅度越大。通过测量渗吸过程中致密储层样品的 T_2 谱,可以很好地获得毛细管力渗吸引起的孔隙流体饱和度分布特征。

实验步骤如下。

(1) 将样品烘干,测试质量、尺寸,抽真空加压饱和煤油,测试质量。

(2) 将饱和油的样品放置于 $MnCl_2$ 溶液中,室温条件下密封。

(3) 每隔一段时间测试质量,并采用高分辨率相机对样品表面进行拍照。

(4) 将样品表面擦拭赶紧,置于核磁共振仪内,测试 T_2 谱(图3)。

(5) 重复(3)、(4)直到质量与 T_2 谱变化不大,绘制质量与 T_2 随着时间的变化。

2 实验结果分析

2.1 盐离子扩散对孔隙结构的影响

图4为盐间页岩储层样品渗吸实验过程中的外观变化。综合来看,三种页岩油样品在渗吸实验过程中,盐晶体随着浸泡时间的延长逐渐溶解,使得样品表面形态变化极大。白云质页岩中原有的晶体聚集体溶解,形成了较大的溶孔,直径1~5 mm之间,说明晶体聚集体可以在水中全部溶解。钙芒硝页岩表面的层理微裂缝或弱面逐渐扩展,形成了大量的平行于层理的微裂缝。原有的层理弱面处于开启状态,渗透性较好,水渗吸进入弱面中溶解充填的盐晶体,形成大量的层理裂缝。泥页岩在渗吸初期(约2 h)出现了层状崩落现象,随着渗吸时间的延长,样品表面的出现越来越多的小凹坑。

渗吸实验过程中,盐间页岩的孔隙结构变化是由于盐晶体的溶解引起的,因此表面的凹坑、裂缝、溶孔也反映了盐晶体的分布特征。结合实验前的肉眼观察和显微镜观测可知,盐间页岩储层中盐晶体主要有三种分布模式:晶体聚集型、充填弱面型和密集分布型。分布模式不同,水岩相互作用对孔隙结构的影响也不同。

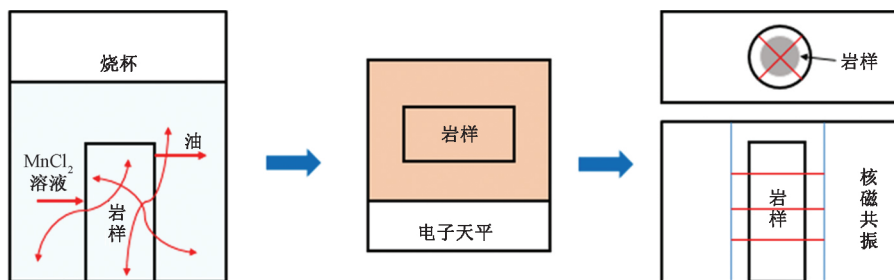


图3 自发渗吸核磁监测实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spontaneous infiltration nuclear magnetic monitoring experiment

渗吸实验后,将样品在75℃下烘干,测量孔隙度,表3为实验前后孔隙度对比,可知自发渗吸实验后,孔隙度有了大幅度提升。白云质页岩孔隙度由4.4%提升到15.2%,钙芒硝页岩孔隙度由1.7%提升到8.8%,而泥页岩孔隙度由9.9%提升到20.5%。闷井期间,水自发渗吸进入盐间页岩储层后,盐晶体的溶解一定程度上可以改善储层的物性特征参数。

2.2 盐离子扩散对渗吸驱油的影响

水在毛细管力作用下自发渗吸进入页岩油储层,将基质孔隙中的原油驱替出来,油滴附着于样品表面(图5)。页岩油储层A析出的油滴体积较大,储层D和C表面油滴体积较小。幅度- T_2 曲线变化能够很好地反映出不同孔隙中的原油动态变化。如图5所示,储层D、C和A样品的谱面积随着渗吸时间逐渐降低,说明孔隙中的油滴逐渐被水驱替出来。从渗吸实验开始到 $t=439$ h时,储层D、C和A样品谱面积分别降低了约1723、300和2732。相比而言,储层A具有更高的原油排出速率,这与A析出的油滴体积较大现象一致。这与储层A具有较高的孔隙度和渗透率有关。

描述了盐间页岩油层盐离子扩散在自发渗吸驱油的不同时刻 T_2 谱曲线变化,反映孔隙中原油排出动态,如图6所示。从 T_2 谱中可以明显地观察到出现两个峰(左峰和右峰),右峰的振幅大且弛豫区域大,说明油主要存在于这个区域中。右峰的振幅小,有少量的油存在其中。随着自发渗吸驱油时间的加长, T_2 谱曲线的左峰值出现明显的降低,右峰值逐渐增加。白云质页岩、钙芒硝页岩的峰值趋势线向下,泥质页岩峰值的趋势线向右侧转移,说明泥质页岩在自发渗吸的过程中,油从小孔往大孔运移。蓝框标记的区域,随着驱油时间,由原来的无振幅到有振幅变化,说明产生了新的孔隙或裂缝,并且油滴逐渐运移进入了新生的孔隙或裂缝中。可见,新生的孔隙或裂缝可作为原油运移的通道。红框标记的区域(即右峰),随着驱油时间,峰面积的增加,结合左峰的降低,可以推测油先从小孔运移到大孔或者新生裂隙中,然后经微裂缝运移出去。

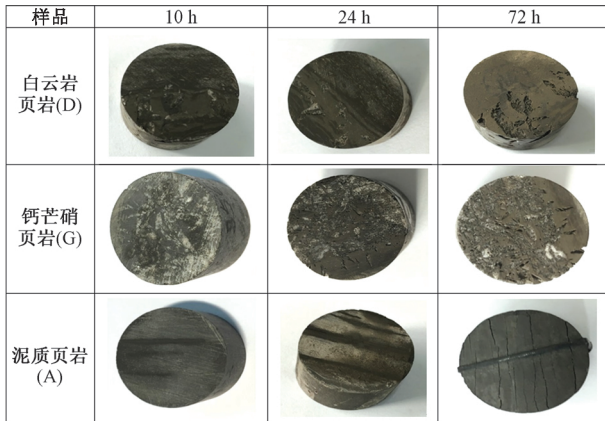


图4 不同浸泡时期样品的外观变化

Fig. 4 Appearance changes of samples during different soaking periods

表3 实验前后物性参数对比

Table 3 Comparison of physical parameters before and after the experiment

样品	状态	孔隙率 $\varphi/\%$
白云质页岩 D	实验前	4.4
	实验后	15.2
钙芒硝页岩 C	实验前	1.7
	实验后	8.8
泥质页岩 A	实验前	9.2
	实验后	20.5

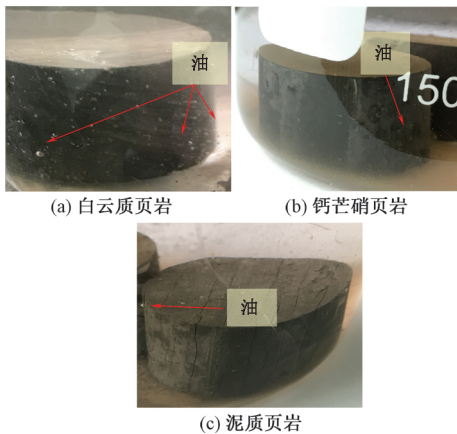


图5 水驱出的油滴

Fig. 5 Oil droplets driven by water

2.3 盐离子扩散对渗吸采收率的影响

渗吸采收率是通过谱面积的变化与原始谱面积的比值来计算得到的。渗吸采收率与储层特征参数、流体性质、边界条件等因素有关,这些结论已经众多学者进行了深入研究,这里不再进行分析。为了分析盐晶体含量对渗吸采收率的影响,有必要采用无量纲渗吸时间进行分析。无量纲渗吸时间是根据式(1)计算得到:

$$t_D = t \sqrt{\frac{k}{\phi}} \frac{\sigma}{\sqrt{\mu_w \mu_o} L_S^2} \quad (1)$$

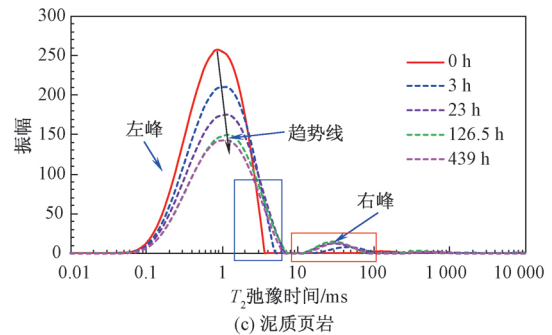
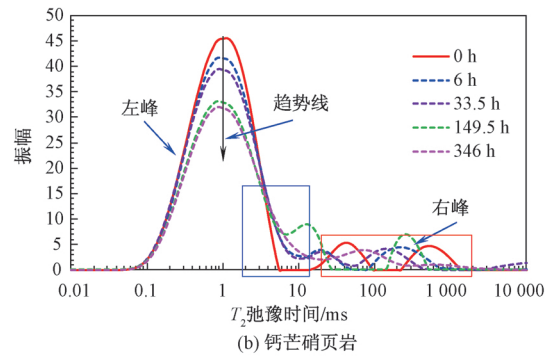
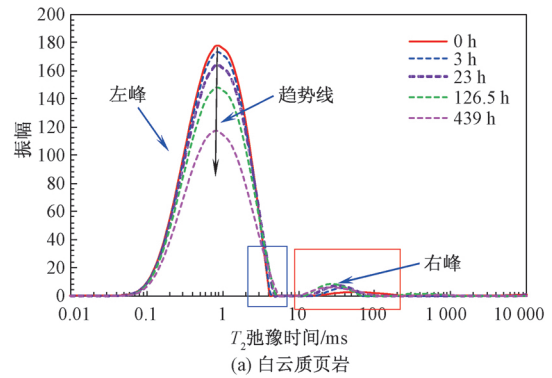


图6 岩样的幅度

Fig. 6 Magnitude of the rock sample

式(1)中: t 为渗吸时间, d ; k 为渗吸率, $\%$; ϕ 为孔隙率, $\%$; σ 为表面张力, mN/m ; μ_w 为水黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_o 为油的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; L_S 为特征长度, μm 。

煤油与水接触时的界面张力可取 45 mN/m 。考虑到三个样品都是采用水和煤油进行实验,因此界面张力的取值并不影响分析结果。然而,无量纲渗吸时间 t_D 难以反映渗吸速率的大小,可绘制渗吸采收率与无量纲时间的平方根曲线,通过对比曲线斜率来定量分析渗吸速率(图7)。可知,页岩油储层 D、C 和 A 的无量纲渗吸速率分别为 0.28 、 0.11 和 0.72 。

根据文献[27],取3个盐间页岩样品粉碎成100目的颗粒,分别取3g颗粒样品置于1000 mL的蒸馏水中,搅拌均匀后测得初始电导率 G_0 ,即为表面离子密度。图8为无量纲渗吸速率随着初始电导率 G_0 的变化,先增加在减少。页岩储层内含盐量越高,无量纲渗吸速率反而越低。跟预期并不一致,盐晶体溶解会生成量的大孔隙和微裂缝,表面上看

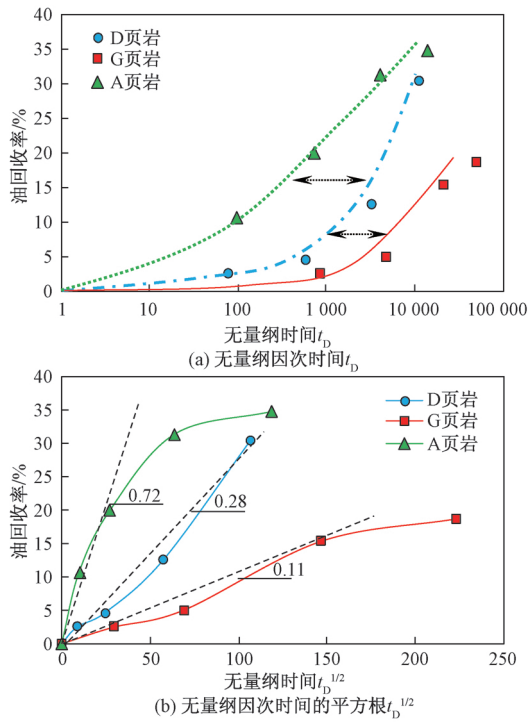


图7 油渗吸采收率回收率与无量纲时间 t_D 和 $t_D^{1/2}$
 Fig. 7 Recovery rate of oil absorption recovery and dimensionless time t_D and $t_D^{1/2}$

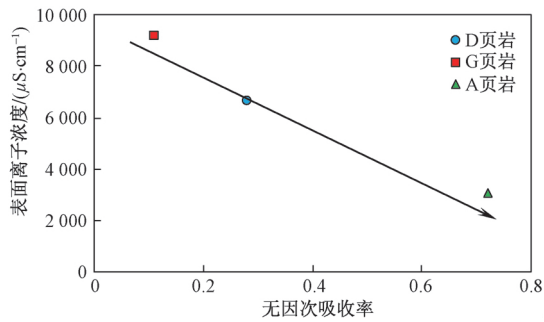


图8 无量纲渗吸速率随着石盐矿物含量的变化
 Fig. 8 The dimensionless infiltration rate varies with the mineral content of rock salt

提高了储层的孔隙度和渗透率。然而由于盐晶体的溶解,崩落的晶体颗粒或骨架颗粒松动,开始堵塞基质孔隙,使得基质孔隙中的原油难以运移出来,只有少部分可以进入新生的大孔隙和微裂缝中。因此,大量盐晶体的溶解,反而不利于原油的产出。

3 讨论

煤油的质量与谱面积成良好的线性关系,可通过谱面积的变化计算排出煤油的体积。结合水与煤油的密度差,则可以计算得到样品质量随着时间的变化(不考虑盐晶体溶解)。理论上,计算得到的质量变化没有考虑盐晶体的溶解,因此样品质量要高

于实际样品的质量变化,如图9(a)、图9(b)所示。但是,储层样品A的实际样品质量要高于理论样品质量[图9(c)]。这与新生的孔隙或微裂缝有关。当盐晶体溶解后,产生了新的孔隙或微裂缝,此时新生的孔隙或微裂缝被水($MnCl_2$ 溶解)占据,之后煤油逐渐运移进入这些新生的孔隙或微裂缝,被核磁共振仪监测到,但是油并不能完全充满这些孔隙,可见幅度差(D-value)的正值区域显示的并不是新生的孔隙或微裂缝的体积,只是其中油的体积。因此,样品的实际质量变化,会超过理论计算结果。

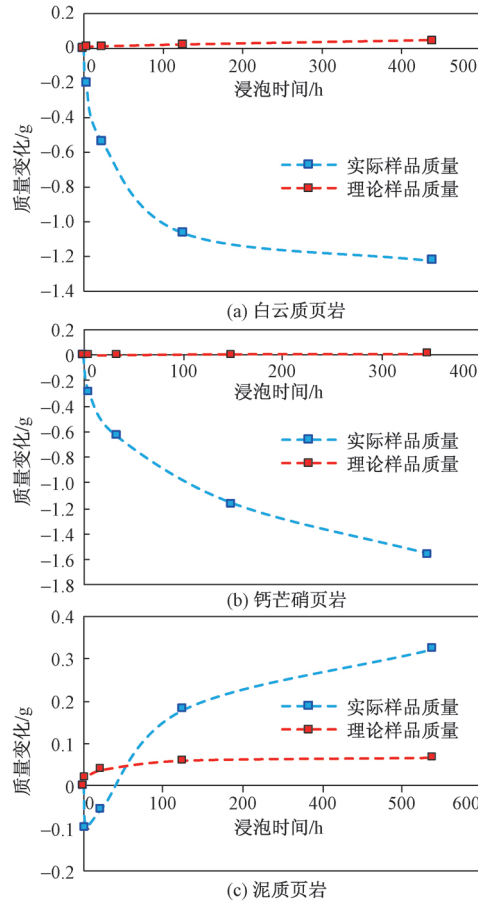


图9 样品质量和谱面积随着时间的变化
 Fig. 9 Sample mass and spectral area as a function of time

可见,盐间页岩储层渗吸规律极其复杂,涉及了多个物理过程。水自发渗吸进入储层内,盐晶体接触到水会溶解,盐离子开始在浓度差作用下发生扩散作用。同时,盐晶体的溶解也会改变孔隙结构影响到原油的运移。这样复杂的物理现象,仅仅采用核磁共振、天平作为测量手段是不够的,有必要引入电导率仪,同步分析溶液中电离出的离子含量。

4 结论

针对潜江凹陷的页岩油储层开展自发渗吸实验,分析原油在盐间页岩储层中的分布特征,研究

盐间页岩中盐晶体溶解引起的孔隙结构变化,阐明盐间页岩的渗吸过程中原油迁移规律及影响因素。主要结论如下。

(1) 盐间页岩吸入压裂液后,骨架结构中的盐颗粒发生溶解,产生溶孔;含盐弱面发生开裂,形成裂缝;盐晶体的溶解也引起样品表面崩落。

(2) 核磁 T_2 谱变化反映:初期小孔原油排出速率较高,新生的大孔或微裂缝中原油不会降低。但随着小孔原油排出速率的下降,新生的大孔或微裂缝中原油逐渐减少。

(3) 盐间页岩储层吸入压裂液后,盐晶体溶解产生的溶孔和裂缝能够明显地提高储层的孔隙度。由于盐晶体的溶解,崩落的晶体颗粒或骨架颗粒松动,开始堵塞基质孔隙,使得基质孔隙中的原油难以运移出来,只有少部分可以进入新生的大孔隙和微裂缝中。因此,大量盐晶体的溶解,反而不利于原油的产出。

参 考 文 献

- 1 金春爽. 漫谈页岩油与油页岩 [N]. 中国矿业报, 2018, 12(7): 8-12.
Jin Chunshuang. On shale oil and oil shalen [N]. China Mining Newspaper, 2018, 12(7): 8-12.
- 2 Blair P M. Calculation of oil displacement by countercurrent water imbibition [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1964, 4(3): 195-202.
- 3 Schechter D S, Zhou D, Jr F M, et al. Capillary imbibition and gravity segregation in low IFT systems [J]. Infection and Immunity, 1991, 71(12): 6734-6741.
- 4 汪伟英, 张公社. 束缚水饱和度、岩石性质对自吸的影响 [J]. 石油学报, 2000, 21(3): 66-69.
Wang Weiyang, Zhang Gongshe. Effect of irreducible water saturation and rock properties on self-priming [J]. Petroleum Journal, 2000, 21(3): 66-99.
- 5 Mason G, Fern M A, Haugen, et al. Spontaneous counter-current imbibition outwards from a hemi-spherical depression [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 91(17): 131-138.
- 6 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. Study on percolation mechanism of porous media in low permeability fractured Sandstone Reservoir [J]. Petroleum Journal, 2002 23(6): 56-59.
- 7 李爱芬, 凡田友, 赵琳, 等. 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.
Li Aifen, Fan Youtian, Zhao Lin. Experimental study on spontaneous imbibition of low permeability core in fractured reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2011, 18(5): 67-69.
- 8 杨发荣, 左罗, 胡志明, 等. 页岩储层渗吸特性的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(25): 63-66.
Yang Farong, Zuo Luo, Hu Zhiming, et al. Experimental study on permeability characteristics of shale reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(25): 63-66.

- 9 Yassin M R, Begum M, Dehghanpour H. Organic shale wettability and its relationship to other petrophysical properties: a duvernay case study [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 16(9): 74-91.
- 10 蒙冕模, 葛洪魁, 纪文明, 等. 基于核磁共振技术研究页岩自发渗吸过程 [J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 137-140.
Meng Mianmu, Ge Hongkui, Ji Wenming, et al. Study on spontaneous imbibition process of shale based on nuclear magnetic resonance [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2015, 22(5): 137-140.
- 11 黄睿哲, 姜振学, 高之业, 等. 页岩储层结构特征对自发渗吸的影响 [J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 111-115.
Huang Ruizhe, Jiang Zhenxue, Gao Zhiye, et al. Influence of shale reservoir fabric characteristics on spontaneous imbibition [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2017, 24(1): 111-115.
- 12 李士奎, 刘卫东, 张海琴, 等. 低渗透油藏自发渗吸驱油实验研究 [J]. 石油学报, 2007, 12(2): 109-112.
Li Shikui, Liu Weidong, Zhang Haiqin, et al. Experimental study on spontaneous permeability flooding in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Journal, 2007, 12(2): 109-112.
- 13 吴志伟. 非均质油藏水驱后剩余油分布实验研究及潜力评价 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 57-64.
Wu Zhiwei. Experimental study and potential evaluation of residual oil distribution after water flooding in heterogeneous reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(15): 57-64.
- 14 李洪, 李治平, 王香增, 等. 基于喉道分布特征的致密砂岩渗吸模型 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 50-54.
Li Hong, Li Zhiping, Wang Xiangzeng, et al. Tight sandstone infiltration model based on throat distribution characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13): 50-54.
- 15 王学武, 杨正明, 李文举, 等. 致密油藏周期注气微观驱油机理实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 7-11.
Wang Xuewu, Yang Zhengming, Li Wenju, et al. Experimental study on micro-discharge mechanism of gas injection in tight reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(7): 7-11.
- 16 王海涛, 王锐, 伦增珉, 等. 高温高压 CO_2 /原油界面张力及对驱油效率影响 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(34): 38-42.
Wang Haitao, Wang Rui, Lun Zengmin, et al. Interfacial tension of high temperature and high pressure CO_2 /crude oil and its effect on oil displacement efficiency [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 38-42.
- 17 王学忠, 王建勇. 利用地热资源进行热水驱油的技术研究 [J]. 中国地质, 2009, 36(4): 885-891.
Wang Xuezhong, Wang Jianzhong, Technical research on using geothermal resources for hot water flooding [J]. Geology in China, 2009, 36(4): 885-891.
- 18 邱小松, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 页岩气资源评价方法及评价参数赋值——以中扬子地区五峰组—龙马溪组为例 [J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2091-2098.
Qiu Xiaosong, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Evaluation method of shale gas resources and evaluation parameter assignment: taking the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Middle Yangtze area as an example [J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2091-2098.
- 19 陈会军, 刘招君, 朱建伟, 等. 油页岩含矿区开发优选的指标体系和权重的确定 [J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1359-1365.

投稿网址: www.stae.com.cn

- Chen Huijun, Liu Zhaojun, Zhu Jianwei, et al. Determination of the preferred index system and weight for oil shale mining area development [J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1359-1365.
- 20 郑有恒, 吴世强, 何又雄, 等. 潜江凹陷盐间泥质白云岩油藏勘探技术研究 [R]. 武汉: 中国石化江汉油田分公司, 2013.
- Zheng Youheng, Wu Shiqiang, He Youxiong, et al. Research on exploration technology of intersalt argillaceous dolomite reservoir in Qianjiang Sag [R]. Wuhan: Jiangnan Oilfield Branch, Sinopec, 2013.
- 21 陈树杰, 赵 薇. 江汉盆地潜江凹陷盐间泥质白云岩油藏储层物性特征探讨 [J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2010, 7(1): 168-170.
- Chen Shujie, Zhao Wei. Discussion on reservoir physical properties of intersalt muddy dolomite reservoir in Qianjiang depression, Jiangnan basin [J]. *Journal of Changjiang University (Natural Science Edition)*, 2010, 7(1): 168-170.
- 22 方志雄. 潜江盐湖盆地盐间沉积的石油地质特征 [J]. *沉积学报*, 2002, 4(4): 34-36.
- Fang Zhixiong. Petroleum geological characteristics of intersalt deposits in Qianjiang Salt Lake Basin [J]. *Journal of Sedimentary Sciences*, 2002, 4(4): 34-36.
- 23 吴世强, 唐小山, 杜小娟, 等. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征 [J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(3): 282-286.
- Wu Shiqiang, Tang Xiaoshan, Du Xiaojuan, et al. Geological characteristics of continental shale oil in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. *Journal of Donghua University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(3): 282-286.
- 24 张明扬, 李贤庆, 董泽亮, 等. 皖南地区下寒武统荷塘组页岩矿物组成及脆度分析 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(1): 177-183.
- Zhang Mingyang, Li Xianqing, Dong Zeliang, et al. Analyses on mineral compositions and brittleness of the lower Cambrian Hetang Formation shale in south anhui province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 177-183.
- 25 赵 佩, 李贤庆, 孙 杰, 等. 川南地区下古生界页岩气储层矿物组成与脆性特征研究 [J]. *现代地质*, 2014, 28(2): 396-403.
- Zhao Pei, Li Xianqing, Sun Jie, et al. Study on mineral composition and brittleness characteristics of shale gas reservoirs from the lower Paleozoic in the southern Sichuan Basin [J]. *Geoscience*, 2014, 28(2): 396-403.
- 26 王芙蓉, 何 生, 郑有恒, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层矿物组成与脆性特征研究 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(2): 211-218.
- Wang Furong, He Sheng, Zheng Youheng, et al. Mineral composition and brittleness characteristics of intersalt shale oil reservoirs in Qianjiang Formation of Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. *Petroleum Experimental Geology*, 2016, 38(2): 211-218.
- 27 Yang L, Shi X, Ge H K, et al. Quantitative investigation on the characteristics of ions transport into water in gas shale: marine and continental shale as comparative study [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 46(3): 251-264.