

低渗透致密砂岩储层孔隙结构对渗吸特征的影响

李晓晓^{1,2,3},任晓娟^{1,2,3},罗向荣^{1,2,3}

(1.西安石油大学石油工程学院,陕西西安710065; 2.陕西省油气田特种增产技术重点实验室,陕西西安710065;
3.西部低渗-特低渗油藏开发与治理教育部工程研究中心,陕西西安710065)

摘要:为深入研究低渗透致密储层中不同孔隙结构的渗吸机理及对渗吸过程的影响,以邦德系数、无因次时间下的自吸驱油效率为评价指标,通过压汞、扫描电镜和核磁共振等多种实验手段,在对鄂尔多斯盆地东部X区长6段低渗透致密砂岩储层孔隙结构分类的基础上,研究不同孔隙结构对渗吸特征和自吸驱油效率的影响。结果表明:低渗透致密砂岩储层可以分为中大孔型和微孔缝型2种孔隙组合。不同孔隙结构组合的岩心中,中大孔喉的比例决定自吸驱油效果,残余油主要滞留在微孔喉中。中大孔型岩心中大孔喉比例高,地层水和表面活性剂中自吸驱油效率高,自吸过程受到毛管力作用较弱,表面活性剂改善驱油效果和渗吸方式明显;微孔缝型岩心中大孔喉比例小,毛管阻力影响大,地层水和表面活性剂中自吸驱油效率低。表面活性剂可以明显改变渗吸方式,提高自吸驱油效率,但仍有一部分残余油滞留束缚在微小孔喉中。

关键词:低渗透致密砂岩储层 孔隙结构 自吸 邦德系数 核磁共振 表面活性剂 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Influence of pore structures on the characteristic of spontaneous imbibition in low-permeability tight sandstone reservoir

LI Xiaoxiao^{1,2,3}, REN Xiaojuan^{1,2,3}, LUO Xiangrong^{1,2,3}

(1.College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 2.Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil & Gas Reservoirs, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China;
3.Engineering Research Center of Development and Management for Low to Extra-Low Permeability Oil & Gas Reservoirs in West China, Ministry of Education, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China)

Abstract: In order to explore spontaneous imbibition mechanism of different pore structures and its influence on the imbibition process in the low-permeability tight reservoir, the pore structure of the low-permeability tight sandstone reservoirs in Chang6 member in X study area of eastern Ordos Basin was classified. On this basis, the influence of various pore structures on the imbibition characteristics and efficiency of oil displacement was researched through mercury intrusion, SEM and NMR and other analysis methods taking Bond index and imbibition efficiency in dimensionless time as the evaluation index. The experiment results show that there are two types of pore combination: mid-large pore and micro-pore and fracture. The proportion of the mid-large pore throat decides oil displacement effect of the imbibition in cores having different pore structure combinations, and the residual oil mainly remains in the micro-pore throat. The core having mid-large pore is characterized by high proportion of large pore throat, higher oil displacement efficiency of the imbibition in formation water and surfactant, weak effect from capillary pressure during the imbibition process and an evident change in oil displacement efficiency and the way of imbibition by surfactant. The core with micro-pore and fracture is characterized by low proportion of large pore throat, strong effect from capillary pressure and relatively poor imbibition efficiency in formation water and surfactant. Though the surfactant can significantly change the way of imbibition and improve oil displacement efficien-

收稿日期:2018-04-12。

作者简介:李晓晓(1994—),男,河北沧州人,在读硕士研究生,从事油田化学及提高采收率方面的研究。联系电话:15002965952, E-mail: 544382061@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(2016ZX05050006),西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS17212042)。

cy, a part of the residual oil still remains in the micro-pore throat.

Key words: low-permeability tight sandstone reservoir; pore structure; spontaneous imbibition; Bond index; NMR; surfactant; Ordos Basin

由于低渗透致密储层存在低渗透、低孔、低压以及高毛管压力和高有效应力的“三低两高”特征,使得该类储层的开发难度极大,现场注水困难,产量递减快,储层易受到破坏,因此实现稳产和提高采收率是低渗透致密储层开发面临的重大问题^[1-5]。低渗透致密储层中微裂缝发育广泛,而裂缝与基质之间的交换能力是提高油藏采收率最主要的因素,对改善低渗透致密油藏注水开发效果起重要作用。许多学者从岩石特性、流体特性、润湿性、初始含油饱和度等不同角度和方式对自吸驱油进行了深入研究,并取得了许多的成果^[6-22]。但是,在不同孔隙结构的渗吸驱油特征及对自吸驱油效率的影响方面,并没有进行过深入的研究。因此,笔者在通过压汞、铸体薄片、扫描电镜对鄂尔多斯盆地东部X区长6段低渗透致密砂岩储层孔隙结构进行分类的基础上,通过岩心自吸实验,结合核磁共振 T_2 谱分析,采用无因次时间下的自吸驱油效率和邦德指数作为评价指标,研究低渗透致密砂岩储层不同孔隙结构的渗吸特征,讨论孔隙结构对自吸驱油的影响,以期为进一步理解这类储层的渗吸机理、进一步提高采收率提供指导。

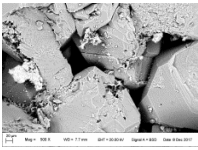
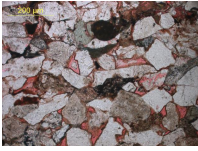
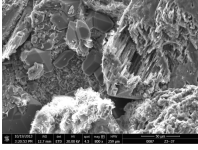
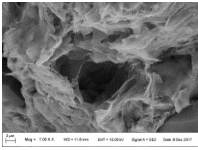
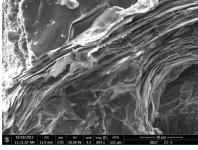
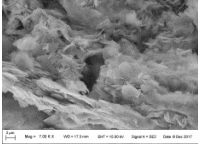
1 孔隙结构分类

通过压汞曲线、铸体薄片、SEM观察和统计分析,将研究区低渗透致密砂岩储层的孔隙主要分为裂隙型、中大孔型和微孔/小孔型3大类。裂隙型主要为天然裂缝,以粒内缝、溶蚀缝、贴裂缝及切穿几个岩石颗粒的微裂缝为主,缝宽约为0.5~10 μm。中大孔型以粒间孔和溶孔发育为主,孔喉半径为5~50 μm。颗粒支撑孔隙,孔隙中常充填自生石英和云母等矿物。渗透率越高,这类孔隙在储层岩石中所占比例越多,是渗透率主要的贡献通道。微孔/小孔型主要微孔有长石溶孔、杂基溶孔以及绿泥石和高岭石等的晶间孔、纳米孔,孔喉半径为0.05~5 μm。渗透率越低,岩心致密程度越高,这类孔隙和天然裂缝所占比例越多。

研究区储层岩石孔隙结构主要是由这几类孔隙类型组合而成,按其贡献对渗透率的贡献,主要有2种组合类型,每种组合按对渗透率的贡献排序,即:粒间孔+溶孔+微裂缝+微孔(简称中大孔型)、微裂缝+

微孔+粒间孔+溶孔(简称微孔缝型)(表1)。

表1 低渗透致密储层孔隙结构类型
Table1 Types of pore structure in low-permeability tight reservoir

孔隙结构分类	组合方式(按对渗透率贡献排序)	孔喉半径/μm	渗透率/mD	孔隙类型	孔隙图像
中大孔型	原生粒间孔			原生粒间孔	
	粒间孔+溶孔+微裂缝+微孔	5~50	0.3~1.2	残余粒间孔	
	长石溶孔			长石溶孔	
微孔缝型	晶间溶孔			晶间溶孔	
	微裂缝+微孔+粒间孔+溶孔	0.05~10	0.05~0.3	微裂缝	
	微孔			微孔	

2 实验器材与方法

2.1 实验器材

实验仪器主要包括 RecCore-04核磁共振岩样分析仪、Amott自吸瓶和HX-2恒温箱等。

实验用水为模拟地层水, CaCl₂型, 密度为1.030 g/cm³, 粘度为1.058 mPa·s, 矿化度为47 470 mg/L; 实验模拟油为煤油, 实验条件下密度为0.793 g/cm³, 粘度为1.751 mPa·s; 实验用表面活性剂为非-阴离子型, 界面张力为0.06 mN/m, 密度为0.996 g/cm³, 粘度为0.995 mPa·s。

实验模拟温度为40℃。

2.2 实验方法

将天然岩心取样成长度为3.5~6.0 cm、直径约为2.52 cm的小圆柱,进行洗油干燥、抽空饱和地层水、油驱至束缚水状态。然后将不同孔隙结构类型的岩心浸泡在装有地层水或表面活性剂的Amott自吸装置中,在恒温40℃环境下,每隔15 min测量驱油体积,持续72 h后用地层水驱替,计算总出油体积。同时,对自吸前、自吸后和地层水驱替后3个过程的岩心进行核磁共振 T_2 谱测试。岩心气测渗透率、孔隙度等依据SY/T 5336—2006^[23],岩心自吸实验标准依据SY/T 5153—2007^[24],岩心核磁共振实验依据SY/T 6490—2007^[25]。

3 实验结果及分析

3.1 渗吸特征

为了减小岩心在自吸过程中岩心物性参数、流体粘度差异、界面张力等的影响,STANDNES等在Washburn方程和M-K方程的基础上发展了一个更具准确性的无因次标度模型,用来描述自吸过程中的渗吸特征^[26-27]。

3.1.1 地层水

对中大孔型和微孔缝型2组各3块岩心进行模拟地层水条件下自发渗吸实验,发现岩心上部和侧面均有微小油滴析出,中大孔型岩心渗吸作用时间更长,微小油滴数量更多,出油速度更快。中大孔型岩心的自吸驱油效率相对较高,平均为10.1%;微孔缝型岩心的自吸驱油效率很低,平均为5.7%(图1),表明中大孔型岩心中由于中大孔喉数量多,在

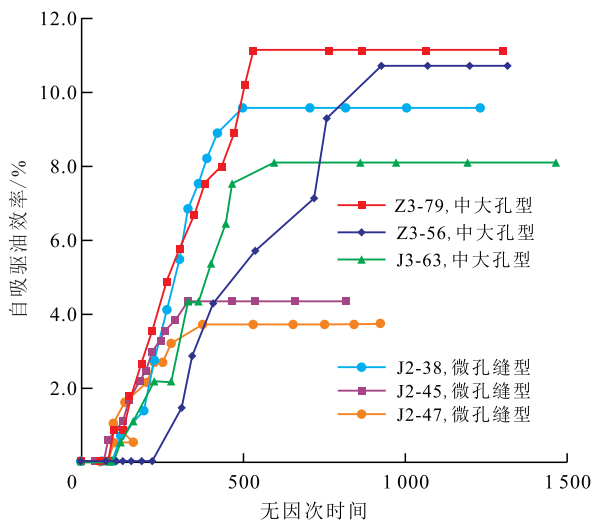


图1 地层水自吸驱油效率与无因次时间的关系

Fig.1 Relationship of oil displacement efficiency in formation water imbibition and dimensionless time

地层水的环境下容易与外界发生油水交换,相比微孔、微裂缝数量更多的微孔缝型岩心更容易发生自发渗吸。

3.1.2 表面活性剂

对中大孔型和微孔缝型2组各3块岩心进行表面活性剂条件下的自发渗吸实验。与模拟地层水条件下的自吸过程相似,对于中大孔型岩心,微小油滴从岩心上部和侧面均有析出,且自吸时间长、数量多,驱油体积多;微孔缝型岩心的出油体积明显高于地层水条件下的出油体积,且出油速度加快,微小油滴析出时间增长。

中大孔型岩心自吸驱油效率平均为25.9%,微孔缝型岩心自吸驱油效率为12%~28.8%,平均为18.6%(图2),与模拟地层水条件下相比明显提高。中大孔型岩心驱油效率增大明显,平均自吸驱油效率提高了15.8%;表面活性剂降低了油水界面张力,使得更多的地层水进入微小孔喉中,部分岩石表面的润湿性得到改善,从而减小了毛管阻力的作用,使得更多的油滴自发析出,自吸驱油效率更高。表面活性剂对微孔缝型岩心的作用也很明显,平均自吸驱油效率提高了12.9%。

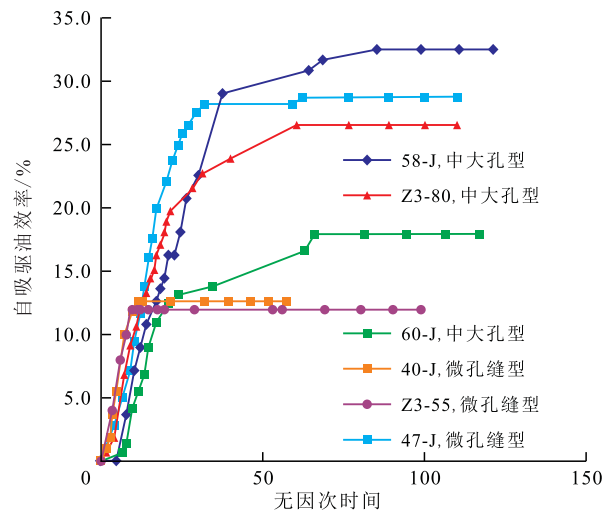


图2 表面活性剂自吸驱油效率与无因次时间的关系

Fig.2 Relationship of oil displacement efficiency in surfactant imbibition and dimensionless time

结合图1和图2,对于与岩心40-J孔渗参数相仿的岩心J2-45,自吸驱油效率从4.2%提高到12.6%,说明微孔缝型岩心在表面活性剂中可以达到较好的驱油效果,表面活性剂可以改善孔喉环境,降低岩心中微孔喉的毛管阻力作用,增大自吸效率。对于微孔缝型岩心J2-38和47-J表现出自吸驱油效率较高的现象,可能是由于微孔缝型岩心非均质性更强,尽管孔渗物性参数表现相似,但是孔隙结构的不尽相同、微裂缝所占孔隙的比例都会影

响岩心自吸驱油效率,使得少部分岩心表现出较高的自吸驱油效率。

3.2 孔隙结构对渗吸的影响机制

3.2.1 结合邦德系数分析

由于岩心自吸过程中无法忽视重力作用, SCHETCHER 提出了邦德系数来研究渗吸机理^[27]。当邦德系数大于5时,毛细力在自吸驱油过程中起支配作用,主要的渗吸方式是逆向渗吸;当邦德系数小于0.2时,重力是主要驱动力,主要的渗吸方式是顺向渗吸;介于两者之间时属于重力和毛细力共同支配的渗吸过程。

由不同孔隙结构岩心的邦德系数(表2)可以看出:无论自吸溶液是地层水还是表面活性剂,中大孔型和微孔缝型岩心的邦德系数都表现出明显的差异。模拟地层水自吸时,中大孔型岩心的邦德系数为1~2,属于重力和毛细力的共同作用,使地层水与孔喉中的油进行交换析出;微孔缝型岩心的邦德系数均大于中大孔型岩心的邦德系数,其中岩心 J2-45 和 J2-47 的邦德系数均大于5, J2-38 的邦德系数也接近于3,说明微孔缝型岩心的渗吸作用属于毛细力作用主导下的渗吸,主要的渗吸方式是逆向渗吸,自吸驱油效率相比较低。在表面活性剂溶液自吸过程中,中大孔型和微孔缝型岩心的邦德系数均小于0.2,重力是主要的驱动力,顺向渗吸是主要的渗吸方式,并且中大孔型岩心的邦德系数要小于微孔缝型岩心的。与地层水自吸的邦德系数对比可以看出,表面活性剂对低渗透致密储层岩心的作用明显,尤其是对于微孔缝型岩心。邦德系数的改变不仅说明自吸方式由复合作用或毛细作用转化

为重力作用,表面活性剂削减了毛细阻力作用,使得油滴析出数量增多,自吸驱油效率得到提高;同时,在表面活性剂中油水界面张力更小,使得油滴在小的孔喉中流动能力增强,更容易通过并且析出表面,增大自吸驱油效率。邦德系数越小,自吸驱油效率越高。

3.2.2 结合核磁共振 T_2 谱分析

通常 NMR 技术的 T_2 谱中弛豫时间为 0.1~10 ms 代表微小半径孔喉, 10~1 000 ms 代表中大半径孔喉, 流体在不同孔隙中 H^+ 的含量代表峰值, 2 个峰值间的面积代表所占比例。以表面活性剂自吸前、自吸后和水驱后 4 块岩心 60-J(渗透率为 1.16 mD, 中大孔型), Z3-80(渗透率为 0.992 mD, 中大孔型), 47-J(渗透率为 0.063 5 mD, 微孔缝型)和 Z3-55(渗透率为 0.281 mD, 微孔缝型)为例, 分析各个过程 T_2 谱分布特征。

从不同孔隙结构岩心的 T_2 谱(图3)可以看出, 低渗透致密储层岩心 T_2 谱的 2 个波峰分布在 0.1~10 和 10~1 000 ms。以自吸前束缚水状态下的 T_2 谱为基线, 自吸后中大孔型和微孔缝型岩心的 T_2 谱曲线明显有一定幅度的下降, 这是因为表面活性剂中含有的金属阳离子对 H^+ 的强度具有抑制作用, 也说明在自吸后表面活性剂不但可以进入中大孔喉, 同时改变了部分岩石表面的润湿性、表面张力, 改善了孔喉的流动环境。由水驱后 T_2 谱可以看出, 中大孔型和微小孔缝型岩心的 T_2 谱信号强度均有提高, 说明地层水不但可以进入中大孔喉将油滴驱替, 也可以将部分微小孔喉中的油滴进行置换, 流动通道得到改善, 驱油效率有所提高。

不同孔隙结构类型岩心自吸后的 T_2 谱具有明显的差异。相同类型孔隙组合的岩心中大半径孔喉比例越高, 自吸驱油效果越好, 说明中大孔喉在低渗透致密储层中对采收率的贡献起主要的作用, 并且中大孔喉中的原油相对容易被采出; 处于微小孔喉中原油的比例越高, 原油越不易采出, 驱油效果相对较差。而对于物性差的微孔缝型岩心, 经过表面活性剂自吸后, 地层水更多地进入微小孔喉部分, 使得自吸驱油效果得到明显的改善, 说明表面活性剂可以改善微小孔喉的渗流环境, 减小毛细阻力作用, 这与之前得到的结果对应。

同时, 低渗透致密储层中, 中大孔喉中的原油容易通过自发渗吸作用采出, 残余油主要滞留在连通性不好的微小孔喉中, 虽然表面活性剂可以有效地提高采出效果, 但是仍会有一部分油滴束缚在微小孔喉中无法采出。

表2 不同孔隙结构岩心的邦德系数

Table2 Bond index of cores with different pore structures					
岩心编号	孔隙类型	自吸溶液	界面张力/ ($mN \cdot m^{-1}$)	自吸驱油效率/%	邦德系数
Z3-56		地层水	10.5	10.7	1.41
Z3-79		地层水	10.5	11.1	1.85
J3-63	中大	地层水	10.5	8.1	1.84
58-J	孔型	表面活性剂	0.06	32.7	0.010 2
60-J		表面活性剂	0.06	18.1	0.009 28
Z3-80		表面活性剂	0.06	27.0	0.005 50
J2-45		地层水	10.5	4.3	5.66
J2-38		地层水	10.5	9.6	2.93
J2-47	微孔	地层水	10.5	3.7	5.20
40-J	缝型	表面活性剂	0.06	12.6	0.050 4
47-J		表面活性剂	0.06	28.7	0.034 4
Z3-55		表面活性剂	0.06	12.0	0.016 0

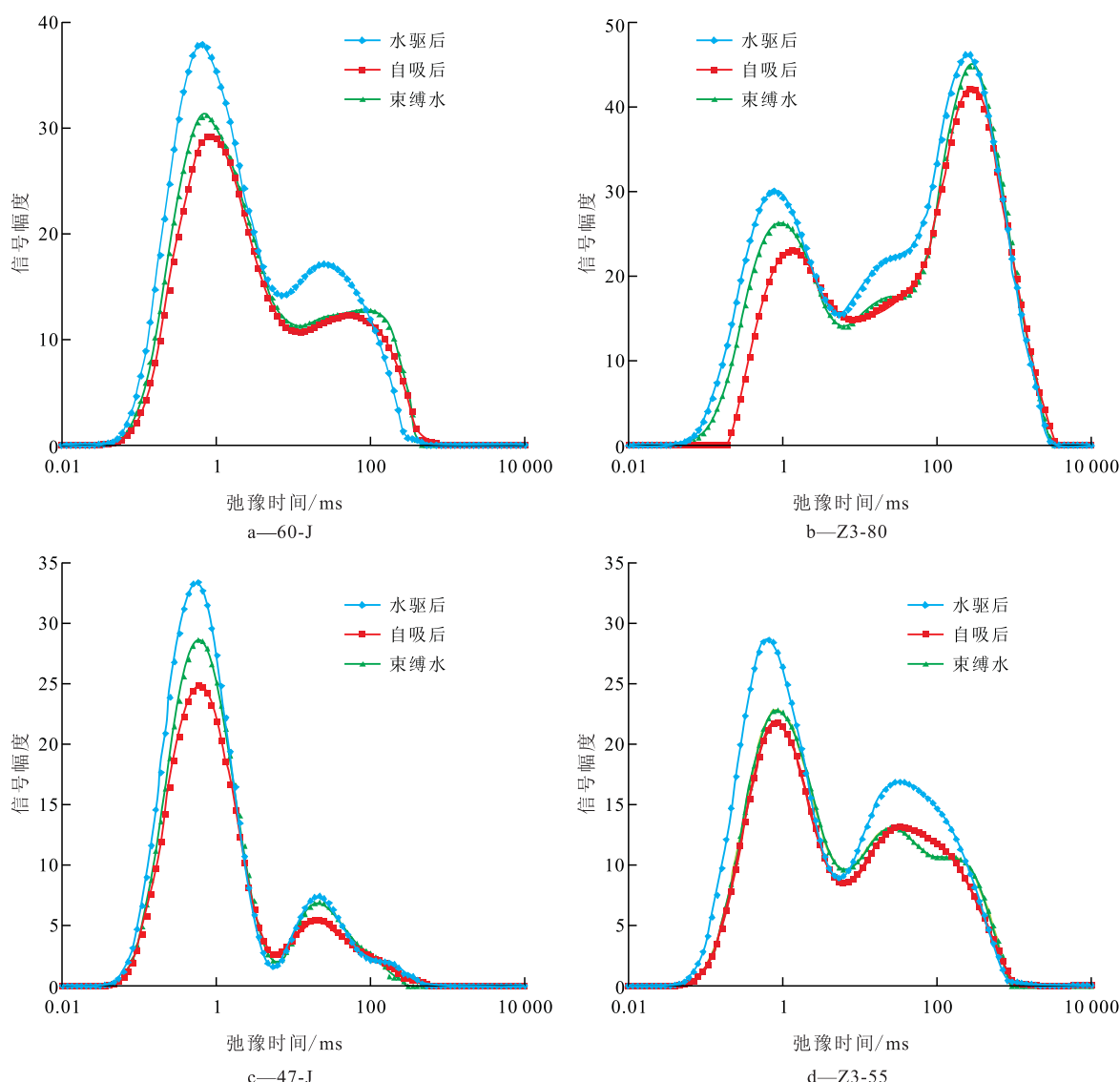


图3 不同孔隙结构岩心的 T_2 谱分布曲线

Fig.3 NMR T_2 distribution of cores with different pore structures

4 结论

低渗透致密储层可以分为中大孔型和微孔缝型2种孔隙组合。中大孔型岩心地层水中自吸驱油时间长,微小油滴数量多,平均自吸驱油效率为10.1%;微孔缝型岩心在地层水中驱油速度慢,驱油效率低,平均自吸驱油效率为5.7%。2种孔隙类型的岩心在表面活性剂中的自吸驱油效率均有提高,微孔缝型在表面活性剂中的自吸驱油效率相比地层水平均提高了12.9%,中大孔型岩心由于半径较大的孔喉比例更多,在表面活性剂中的自吸效果更好,自吸驱油效率平均提高了15.8%。

中大孔型岩心在地层水中的邦德系数为1~2,自吸主要受重力和毛管力共同作用,微孔缝型岩心

在地层水中的邦德系数高于5或更接近于5,自吸过程主要是毛管力支配的逆向自吸渗吸;在表面活性剂溶液中,中大孔型和微孔缝型岩心的邦德系数均小于0.2,毛管力作用减弱,重力作用增强并主导自吸过程。

在核磁共振 T_2 谱中,中大孔型岩心渗吸弛豫时间分布在10~1 000 ms的比例高,中大孔喉所占比例大,自吸驱油效率高;微孔缝型岩心弛豫时间分布在0.1~10 ms比例大,自吸驱油效率低。表面活性剂可以提高自吸驱油效率,但是仍会有一部分残余油滞留在微小孔喉中,弛豫时间在0.1~10 ms的比例越高,自吸驱油效率越低,残余油滞留体积越多。

参考文献:

[1] 朱维耀,孙玉凯,王世虎,等.特低渗透油藏有效开发渗流理论

- 和方法[M].北京:石油工业出版社,2010:3-17.
- ZHU Weiyao, SUN Yukai, WANG Shihu, et al. Percolation theory and method for effective development in ultra-low permeability reservoir[J]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 3-17.
- [2] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150-158.
- YAO Jingli, DENG Xiuqin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.
- [3] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1 323-1 336.
- ZHU Rukai, WU Songtao, SU Ling, et al. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1 323-1 336.
- [4] 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 Shangliyu area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 207-211.
- [5] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30, 64.
- LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30, 64.
- [6] MOORE T F, SLOBOD R L. The effect of viscosity and capillarity on the displacement of oil by water [J]. Producers Monthly, 1956, 20(10): 20-30.
- [7] GRAHAM J W, RICHARDSON J G, GRAHAM J W, et al. Theory and application of imbibition phenomena in recovery of oil [J]. Journal of Petroleum Technology, 1959, 11(2): 65-69.
- [8] PARSONS R W, CHANEY P R. Imbibition model studies on water-wet carbonate rocks [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1966, 6(1): 26-34.
- [9] XIE X, MORROW N R. Oil recovery by spontaneous imbibition from weakly water-wet rocks [J]. Petrophysics, 2001, 42(4): 313-322.
- [10] 李洪, 李治平, 王香增, 等. 表面活性剂对低渗透油藏渗吸敏感因素的影响[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 100-103.
- LI Hong, LI Zhiping, WANG Xiangzeng, et al. The effect of surfactants on imbibition-sensitive factors of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 100-103.
- [11] 孙琳, 蒲万芬, 辛军, 等. 表面活性剂对低渗岩心高温渗吸的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 103-107.
- SUN Lin, PU Wanfen, XIN Jun, et al. Influence of surfactant on high temperature imbibition of low permeability cores [J]. Journal of China University of Petroleum: Science & Technology Edition, 2012, 36(6): 103-107.
- [12] 王家禄, 刘玉章, 陈茂谦, 等. 低渗透油藏裂缝动态渗吸机理实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 86-90.
- WANG Jialu, LIU Yuzhang, CHEN Maoqian, et al. Experimental study on dynamic imbibition mechanism of low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 86-90.
- [13] 游利军, 康毅力. 油气储层岩石毛细管自吸研究进展[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(4): 112-116.
- YOU Lijun, KANG Yili. Progress in research on spontaneous capillary imbibition of oil and gas reservoir rocks [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(4): 112-116.
- [14] 程晓倩, 刘华勋, 熊伟, 等. 新疆低渗透砂砾岩油藏自发渗吸实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(26): 7 793-7 797.
- CHENG Xiaoqian, LIU Huaxun, XIONG Wei, et al. Experimental research of spontaneous imbibition in low-permeability glauconitic reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(26): 7 793-7 797.
- [15] 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 waterflooding in low-permeability fractured sandstone reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 56-59.
- [16] 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, 28(2): 109-112.
- LI Shikui, LIU Weidong, ZHANG Haiqin, et al. Experimental study of spontaneous imbibition in low-permeability reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 109-112.
- [17] 游利军, 康毅力. 裂缝性致密砂岩气藏水相毛细管自吸调控[J]. 地球科学进展, 2013, 28(1): 79-85.
- YOU Lijun, KANG Yili. Aqueous capillary imbibition behavior management in fractured tight gas reservoirs [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(1): 79-85.
- [18] 韦青, 李治平, 王香增, 等. 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[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 102-107.
- WEI Qing, LI Zhiping, WANG Xiangzeng, et al. Mechanism and influence factors of imbibition in fractured tight sandstone reservoir: An example from Chang8 reservoir of Wuqi area in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 102-107.
- [19] 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): 6-9.
- WANG Weiyong, ZHANG Gongshe. Effect of initial water saturation and rock lithology on spontaneous imbibition [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(3): 6-9.
- [20] 黄睿哲, 姜振学, 高之业, 等. 页岩储层组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. Effect of composition and structural characteristics on spontaneous imbibition of shale reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 111-115.
- [21] 吴润桐, 杨胜来, 谢建勇, 等. 致密油气储层基质岩心静态渗吸实验及机理[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(3): 98-104.