

文章编号:1009-9603(2019)03-0092-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.03.012

致密油藏动态渗吸排驱规律与机理

王秀宇^{1,2}, 巨明霜^{1,2}, 杨文胜^{1,2}, 隋微波^{1,2}

(1. 油气资源与探测国家重点实验室 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘要: 高效开发致密油藏是石油领域的一项重要任务, 而渗吸采油作为开发致密油藏的重要机理之一, 越来越受到人们的重视。选取新疆油田致密砂岩天然岩心和人造岩心, 在室内条件下, 利用改进的动态渗吸实验装置, 系统地研究基质渗透率、温度、压力、岩心尺寸和裂缝密度等因素对动态渗吸采出程度的影响。通过将实验参数进行无因次化, 得到无因次渗吸采出程度归一化模型。利用该模型得到的采出程度大于目前广泛应用的 *Ma* 模型计算结果, 与动态渗吸实验得到的规律相吻合。研究表明: 当岩心渗透率处于同一级别时, 动态渗吸采出程度既有可能与岩心渗透率呈正相关, 也有可能呈负相关; 在其他条件相同的前提下, 温度越高, 岩心长度越短, 动态渗吸效果越好; 压力对渗吸效果的影响存在一个最佳范围, 在本实验条件下为 5~7 MPa; 动态渗吸采出程度的增幅与裂缝密度呈线性正相关。

关键词: 致密油藏; 动态渗吸; 致密油; 渗吸排驱规律; 无因次时间

中图分类号: TE312

文献标识码: A

Dynamic imbibition principles and mechanism of tight oil reservoirs

WANG Xiuyu^{1,2}, JU Mingshuang^{1,2}, YANG Wensheng^{1,2}, SUI Weibo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: Efficient development of tight oil reservoirs is an important task in the petroleum field. Spontaneous imbibition is an important mechanism for tight oil development, which is receiving increasing attention. Natural cores and artificial cores of the tight sandstone reservoirs in Xinjiang Oilfield were selected. Experiments with improved dynamic imbibition device were carried out to study the influence of permeability, temperature, pressure, core length and fracture density on the dynamic imbibition recovery. In addition, a new dimensionless normalized model of the imbibition recovery was proposed through normalization on the experimental parameters. The new model has a better fitting to the dynamic experimental data than the widely used *Ma* model. The results show that core permeability has a positive or negative correlation with the dynamic imbibition recovery within a certain permeability level; a higher temperature and a shorter core corresponds to a higher imbibition recovery under the same other conditions; higher fluid pressure is more favorable to the dynamic imbibition at the optimal pressure range of 5~7 MPa in the experimental study; increment of the imbibition recovery is linearly related to the fracture density.

Key words: tight oil reservoir; dynamic imbibition; tight oil; imbibition principles; dimensionless time

世界上致密油资源非常丰富, 经济价值巨大, 中国致密油藏所占比例逐渐增加, 高效开发这类油气资源是石油领域的一项重要任务^[1-2]。渗吸采油

作为重要的采油机理出现于 20 世纪 50 年代初之后, 众多学者开始把渗吸采油视为亲水油藏高效开发的重要技术手段之一, 并开展了大量的研究工

收稿日期: 2019-01-05。

作者简介: 王秀宇(1976—), 女, 辽宁庄河人, 副教授, 博士, 从事油层物理学和提高采收率研究。联系电话: 13811270754, E-mail: wangxiuyu@cup.edu.cn。

基金项目: 国家“973”计划“提高致密油储层采收率机理与方法研究”(2015CB250904), 国家自然科学基金项目“致密油储层基质渗吸规律及原油动用机理研究”(51574257)。

作^[3-8]。

地层内的渗吸是由大小孔道间毛管压力之差以及重力、界面张力等共同作用下发生的润湿相驱替非润湿相的过程。对于亲水油藏,当地层基质处于低渗透致密状态时,毛管压力很大,孔道内的原油在毛管压力作用下由于地层水的吸入而排出,这个过程就是自发渗吸。致密储层的渗吸过程一般为:注入水通过孔喉进入储层基质,并在毛管压力为主动力的作用下置换出储层内部的原油,置换出的原油经孔喉流出基质,进入裂缝,进而提高致密油藏开发效果。在渗吸过程中会受多种因素的影响,如基质渗透率、润湿性、流体界面张力和外界温度及压力等。渗吸过程中主要动力是毛管压力^[9-13]。

根据外部环境的影响,渗吸可分为动态渗吸和静态渗吸两类,静态渗吸是指发生渗吸的外界条件是静止的,即在静止的液体环境下发生的自发渗吸;动态渗吸则是发生在外界液体为流动状态下的自发渗吸(即水有一定的注入速度)。为此,选取新疆油田致密砂岩天然岩心和人造岩心,利用自行研制的高精度动态渗吸实验装置开展室内物理模拟实验,系统研究基质渗透率、温度、压力、岩心尺寸和裂缝密度等因素对动态渗吸采出程度的影响程度和内在原因等,以期在现场致密储层开发提供理论依据。

1 实验器材与方法

实验装置 在总结以往实验装置优缺点的基础上,自主设计体积法动态渗吸装置(图1),通过磁力搅拌器带动水的流动,模拟动态渗吸的实验条件。实验时,将致密岩心放在大网孔硬塑料挡板上,挡板对岩心底面的遮挡可忽略。该装置可以高精度计量渗吸出油量,最小可读体积为0.005 mL。为模拟地层条件,研制了高温高压动态渗吸实验装

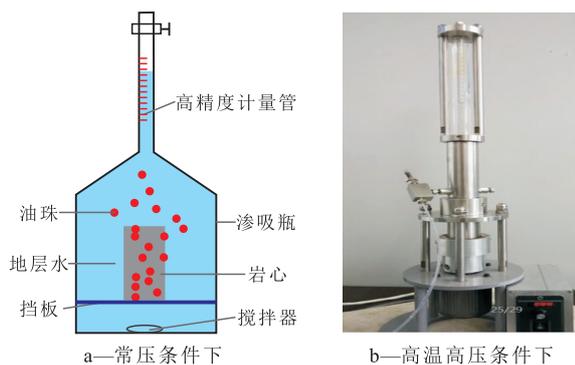


图1 体积法动态渗吸装置

Fig.1 Diagram of volumetric dynamic imbibition device

置(图1b)。该装置底部带有旋转搅拌器,用以模拟动态渗吸条件,承压可达到20 MPa,耐温可达到80℃。

实验材料 实验岩心采用直径为2.5 cm的新疆油田致密砂岩天然岩心和人造岩心,圆柱体人造岩心编号前加R,长方体人造岩心加F。利用人造岩心的原因是现场致密岩心数量有限,且为了获得更好的可比性。实验用油为煤油,室温下其黏度为2.7 mPa·s,密度为0.792 g/cm³。实验用水为模拟地层水,由蒸馏水与不同化学试剂配制而成,化学试剂包括氯化钠、无水硫酸钠、碳酸氢钠、氯化钙、氯化镁和氯化钾,其水型为碳酸氢钠型,矿化度约为30 000 mg/L。

实验方法 采用上述实验装置开展动态渗吸实验。实验中渗吸出的油滴在水流的带动下被不断剥离岩心表面,在油水密度差作用下向上运动,通过计量管计量不同时间下的出油量,从而得到渗吸排驱效率。具体实验步骤包括:①测定岩心长度、直径、干重、孔隙度和气测渗透率等基本物性参数。②按照地层水矿化度配制模拟地层水,并对地层水抽真空。③将选好的干岩心抽真空饱和煤油。④将饱和好煤油的岩心放置于渗吸瓶中开展动态渗吸实验。⑤记录渗吸出油量,直至实验结束。

2 动态渗吸排驱规律与机理

2.1 渗透率对致密储层动态渗吸的影响

选取岩心长度相近,渗透率不同的6块岩心,岩心基础数据如表1所示。实验结果(图2)表明:当岩心渗透率为0.031,0.053和0.059 mD时,渗吸采出程度分别为20.8%,18.7%和15.8%。说明当渗透率小于0.1 mD时,岩心渗透率越低,渗吸采出程度越高。当岩心渗透率为0.278,0.363和0.474 mD时,渗吸采出程度分别为19.7%,20.7%和22.4%。说明当渗透率略大(渗透率为0.1~0.5 mD)时,致密岩心的动态渗吸采出程度随着渗透率的增加而有所增加。这

表1 致密砂岩岩心基础数据
Table 1 Basic parameters of tight sandstone cores

岩心编号	长度(cm)	直径(cm)	孔隙度(%)	渗透率(mD)
R4-1	5.31	2.5	5.78	0.031
R4-2	5.53	2.5	10.30	0.053
R4-3	5.37	2.5	12.73	0.059
R4-4	4.98	2.5	10.98	0.474
R4-5	4.97	2.5	10.77	0.363
R4-6	5.66	2.5	9.86	0.278

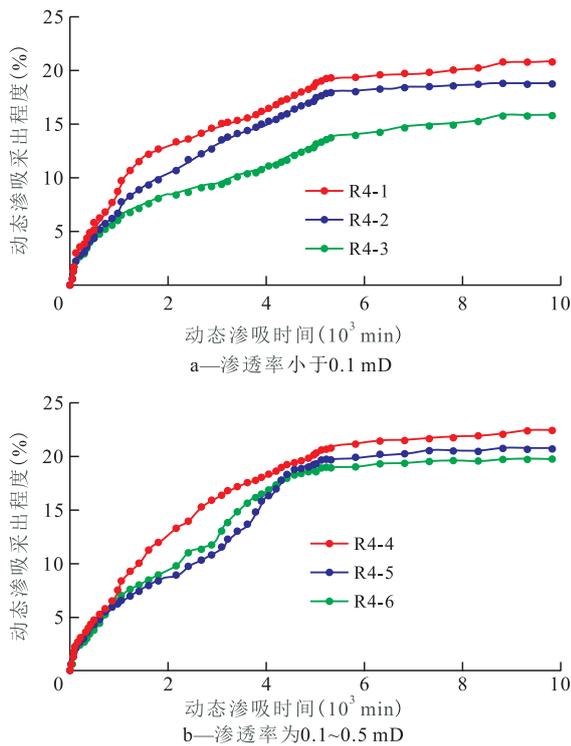


图2 不同渗透率下致密人造岩心的动态渗吸采出程度
Fig.2 Dynamic imbibition recovery of tight artificial cores with different permeability

与渗透率小于0.1 mD时的实验结论相反。

岩石内部的孔隙结构是一个错综复杂、互相影响的整体,应综合考虑岩心孔隙度和孔隙结构等基础物性进行研究,故引入储层品质指数(RQI)。储层品质指数是目前储层分类评价过程中常常用到的指标,其值为 $\sqrt{K/\phi}$ ^[14]。由图3可以看出,动态渗吸采出程度随储层品质指数的增大而增大。这说明,储层品质指数可以更好地表征岩心的孔隙品质。当储层品质指数较高时,岩心在渗透率、孔隙半径和孔隙迂曲度等方面的综合特性较好。

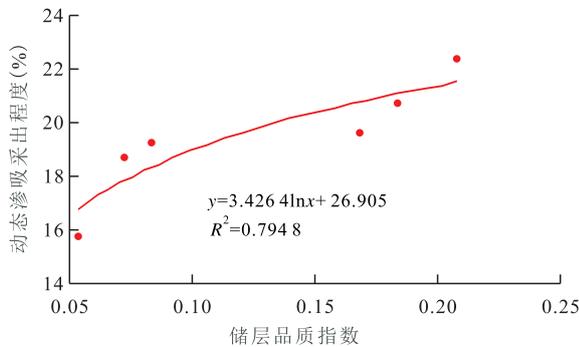


图3 储层品质指数与岩心动态渗吸采出程度关系
Fig.3 Relationship between RQI and dynamic imbibition recovery

综上所述,在一定的渗透率级别范围内,动态渗吸采出程度既有可能与岩心渗透率呈正相关,也有可能呈负相关,但从整体看,致密油藏的渗透率

与动态渗吸采出程度之间的相关性较差,这说明致密岩心渗透率仅仅是综合衡量岩心内部孔隙结构的指标之一,与其渗吸效果并无必然联系。

2.2 温度对致密储层动态渗吸的影响

分别选取2组物性相近的致密天然岩心,开展温度对动态渗吸采出程度的影响实验。岩心基础数据如表2所示。第1组实验,将3块物性相近岩心2-3,2-4和2-5分别在实验温度为75,50和25℃下进行动态渗吸实验。实验结果表明,动态渗吸采出程度随实验温度的升高而增加(图4a)。第2组实验,将物性相近的2块岩心3-6和3-7分别在50和25℃下开展动态渗吸实验,当岩心基本不再出油时,将2块岩心的实验温度升至75℃,继续使其发生渗吸。实验结果表明,在温度升高一段时间后,岩心表面又渗吸出油珠,渗吸采出程度分别提高了4.52%和2.84%(图4b)。

表2 温度影响实验岩心基础数据
Table2 Basic core data of experiment to analyze temperature effect

岩心编号	长度(cm)	直径(cm)	孔隙度(%)	渗透率(mD)
2-3	4.58	2.5	11.68	0.236
2-4	4.77	2.5	11.49	0.278
2-5	4.75	2.5	10.77	0.217
3-6	5.55	2.5	10.53	0.136
3-7	5.67	2.5	10.99	0.185

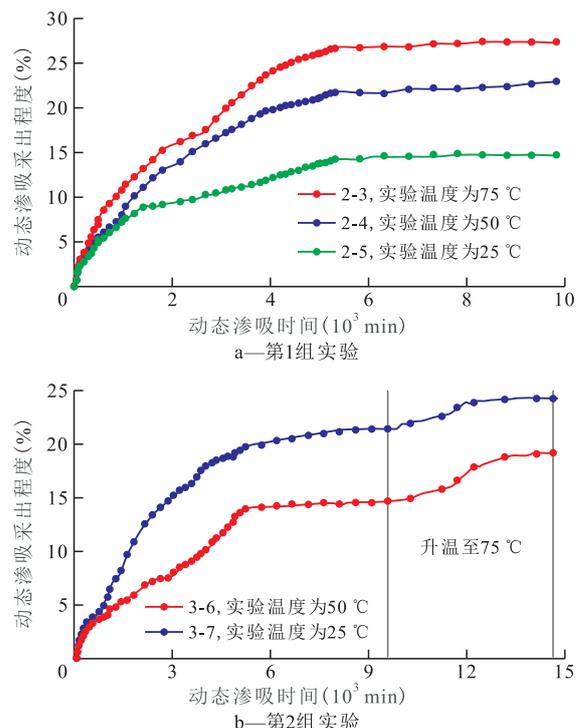


图4 2组不同温度下的动态渗吸采出程度实验结果
Fig.4 Dynamic imbibition recovery degree at different temperatures for two groups

温度对渗吸的影响机理主要包括原油黏度的降低以及原油的膨胀等^[15]。因岩石、地层水、原油受热膨胀系数不同,温度变化相同时,原油体积变化最大,增加的体积差使原油离开岩石表面向外运动;而且,温度升高,原油中活性成分受热分解,胶体层厚度减小,增加了流体在孔隙中的流动通道,为渗吸的发生提供有利的条件。

2.3 岩心长度对致密储层动态渗吸的影响

选取物性相近,长度比分别为1:2,1:3和1:4的3组人造岩心进行实验。岩心数据如表3所示。实验结果(图5)表明,动态渗吸采出程度随岩心长度的增加而增加,且随着岩心长度比的增加,采出

程度的增加幅度提高。

为进一步找出岩心长度对动态渗吸采出程度

表3 岩心长度影响实验岩心基础数据
Table3 Basic core data of experiment to analyze core length effect

岩心编号	长度(cm)	直径(cm)	孔隙度(%)	渗透率(mD)
R5-1	1.93	2.5	6.32	0.005
R5-2	8.00	2.5	6.32	0.005
R6-1	2.25	2.5	5.17	0.008
R6-2	4.9	2.5	5.17	0.008
R7-1	2.17	2.5	8.67	0.065
R7-2	6.33	2.5	7.22	0.066

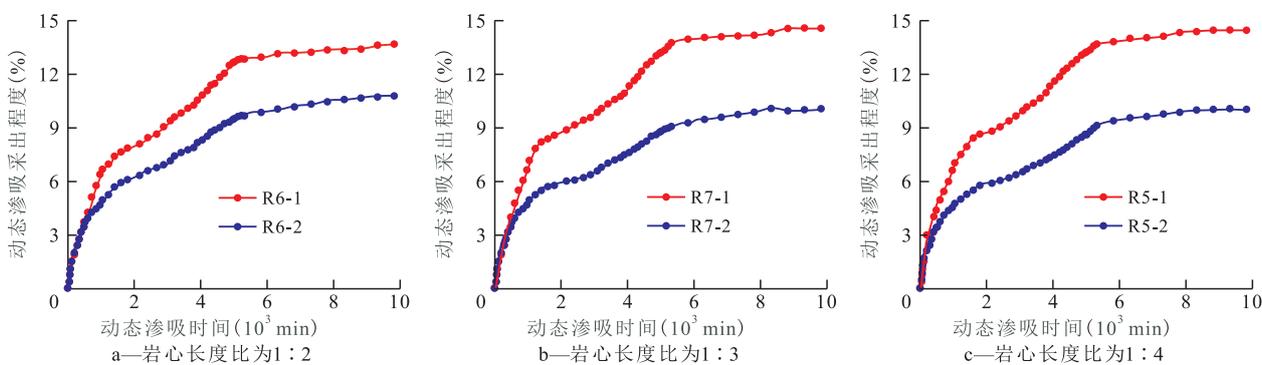


图5 不同岩心长度比下的动态渗吸采出程度对比结果

Fig.5 Comparison of dynamic imbibition recovery at different core length ratio

的影响规律,以岩心长度为横坐标,以动态渗吸采出程度为纵坐标绘制曲线,结果(图6)表明,致密岩心动态渗吸采出程度与岩心长度呈负相关,岩心长度越短,动态渗吸采出程度越高。这说明,致密储层中裂缝发育越完善,细小、短裂缝越多,越有利于致密储层发生动态渗吸作用。

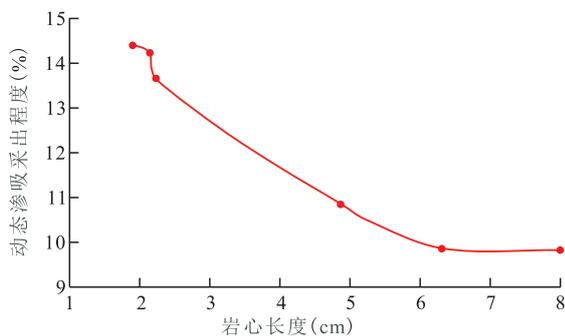


图6 岩心长度与动态渗吸采出程度的关系

Fig.6 Relationship between dynamic imbibition recovery and core length

2.4 压力对致密储层动态渗吸的影响

常温25℃下,将饱和过煤油的岩心放置于动态渗吸装置中,分别设定实验压力为2.5,5,7.5,10,12.5和15MPa进行实验。岩心基础数据如表4所示。分析3块岩心在不同压力下的最终动态渗吸采

出程度(图7)发现,对液体施加压力能够促进渗吸的进行,且压力为5~7MPa时的动态渗吸采出程度最大。随着压力的进一步增加,渗吸采出程度基本不再变化。这说明在中低压力下,岩心压敏性受到影响较大,渗透率降低范围大,一定程度上增大了

表4 压力影响实验岩心基础数据
Table4 Basic core data of experiment to analyze pressure effect

岩心编号	长度(cm)	直径(cm)	孔隙度(%)	渗透率(mD)
1-3	6.94	2.5	16.20	0.378
1-4	5.77	2.5	6.69	0.107
R7-3	6.33	2.5	7.22	0.097

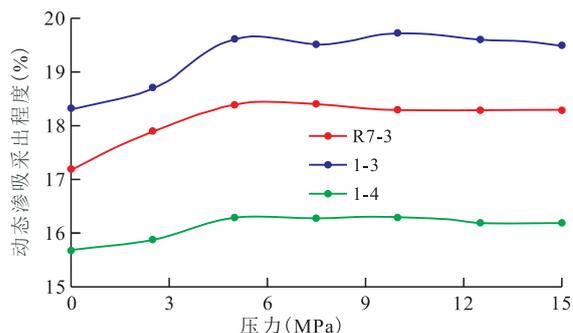


图7 动态渗吸采出程度与压力的关系

Fig.7 Relationship between dynamic imbibition recovery and pressure

渗吸的动力(毛管压力)。由图7亦可看出,岩心1-3, 1-4和R7-3的渗透率分别为0.378, 0.107和0.097 mD, 动态渗吸采出程度最大增幅分别为1.4%, 1.2%和0.6%, 说明对于致密岩心, 岩心渗透率越大, 压力对渗吸采出程度的影响也越明显。

为进一步研究压力的影响, 对岩心1-3和R7-3开展压力敏感性实验。将实验岩心在洗油、烘干、称重后放入岩心夹持器, 通过设定不同上覆压力, 测定各个压力下的渗透率。由图8可见, 当有效压力为0~10 MPa时, 岩心渗透率降幅明显, 继续增加有效压力, 渗透率的降幅变小。渗透率的下降, 一定程度上增加了渗吸的动力(毛管压力)^[16]。同时, 岩心外部压力的作用促进了地层水向岩心内部流动。此外, 还可以看出, 岩心1-3在加压5 MPa时的渗透率改变量为15%, 而R7-3在相同压力下的渗透率改变量仅为7%。这说明岩心渗透率越大, 受压力影响也越大^[17]。这与岩心1-3的动态渗吸采出程度受压力影响比岩心R7-3更加明显的实验结果相符。

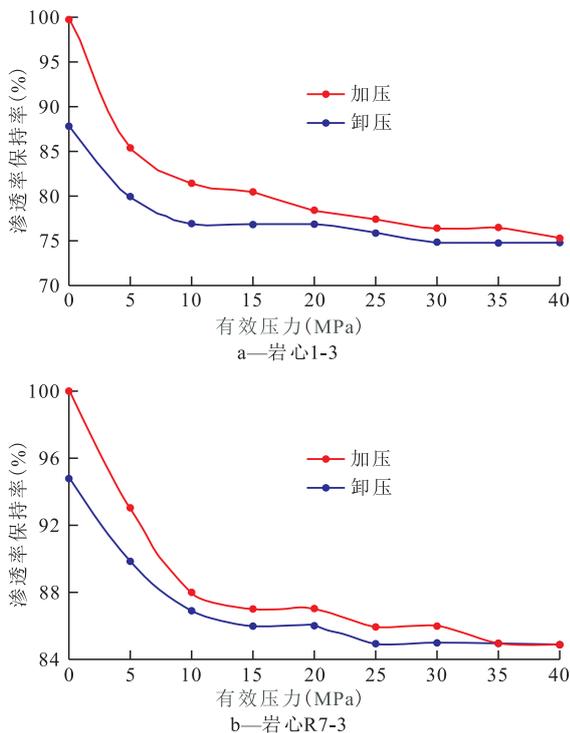


图8 岩心渗透率随有效压力的变化

Fig.8 Permeability changes with effective pressure

2.5 裂缝密度对致密储层动态渗吸的影响

为模拟裂缝密度的影响, 采用XB-Q型轻便岩石切割机, 在单块长方形岩心上切割宽度为1 mm的裂缝, 裂缝不完全贯穿岩心, 以保证岩心的整体性。将4块尺寸为2 cm×2 cm×5 cm的岩心, 分别处理为无缝、单缝、双缝和四缝, 相对应的裂缝密度分别为

0, 0.2, 0.4和0.8条/cm, 进行渗吸实验对比, 岩心基础数据如表5所示。

表5 裂缝密度影响实验岩心基础数据
Table5 Basic core data of experiment to analyze fracture density effect

岩心编号	长度 (cm)	岩心横截面边长 (cm)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)
F1-4	5.00	2	6.73	0.89
F1-5	5.01	2	6.63	0.76
F1-6	4.97	2	6.31	0.96
F1-7	5.05	2	6.97	0.93

由图9可以看出, 动态渗吸采出程度随裂缝条数的增加而增加。从曲线的间隔可以看出, 与无缝岩心对比, 动态渗吸采出程度的增幅与裂缝条数基本呈线性正相关。这是因为, 裂缝可以为渗吸的发生提供更多的通道, 外界流体的流动可以及时将从大孔道渗吸置换出的油携带走, 提高渗吸作用^[18]; 其次, 单位体积致密岩心裂缝越多, 岩心内各小岩块的体积越小, 油滴渗吸的过流面积也越小, 可以降低渗吸阻力, 提高渗吸效率^[19]。对于裂缝性油藏, 裂缝越发育, 越有利于渗吸作用。

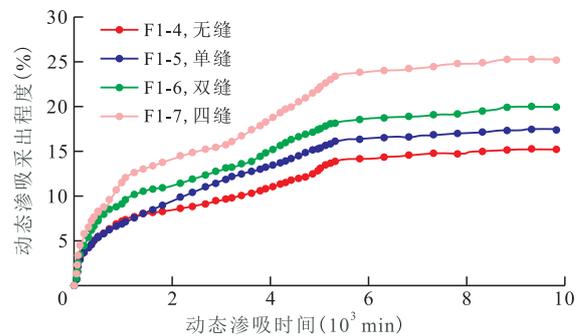


图9 裂缝密度对致密储层动态渗吸采出程度的影响

Fig.9 Effect of fracture density on dynamic imbibition recovery of tight reservoirs

2.6 致密储层动态渗吸无因次时间模型

为更好地将室内实验结果与实际生产相结合, 为油田现场生产提供一定的理论依据, 须建立无因次时间与动态渗吸采出程度归一化模型。目前应用广泛的是MA等所提出的模型^[20-28], 其表达式为:

$$R_r = 1 - e^{-\gamma t_D} \tag{1}$$

其中:

$$t_D = \alpha \sqrt{\frac{K}{\phi}} \times \frac{\sigma t}{\mu_w L_c^2} \tag{2}$$

式中: R_r 为相对采出程度; γ 为经验常数; t_D 为无因次时间; α 为系数; K 为渗透率, m²; ϕ 为岩石孔隙度; σ 为界面张力, N/m; t 为渗吸时间, s; μ_w 为地面水黏度, Pa·s; L_c 为岩心特征长度, m。

利用本次研究中2-3等岩心的动态渗吸实验数据与Ma模型进行对比,发现Ma模型拟合度较低(图10a)。说明Ma模型不适用于动态渗吸实验规律研究。需要对动态渗吸实验数据采用反推得到新的方程。具体方法为:由已知的实验数据计算出相对采出程度,并用 $1 - R_r$ 为纵坐标,同时计算出相对采出程度对应的无因次时间,并以此为横坐标进行绘图,对曲线进行拟合即可得到不同岩心的拟合公式(图10b)。求取各个岩心拟合公式系数的平均数,最终得到新的动态渗吸采出程度归一化方程,其表达式为:

$$R_r = 1 - 0.969e^{-4.177t_D} \quad (3)$$

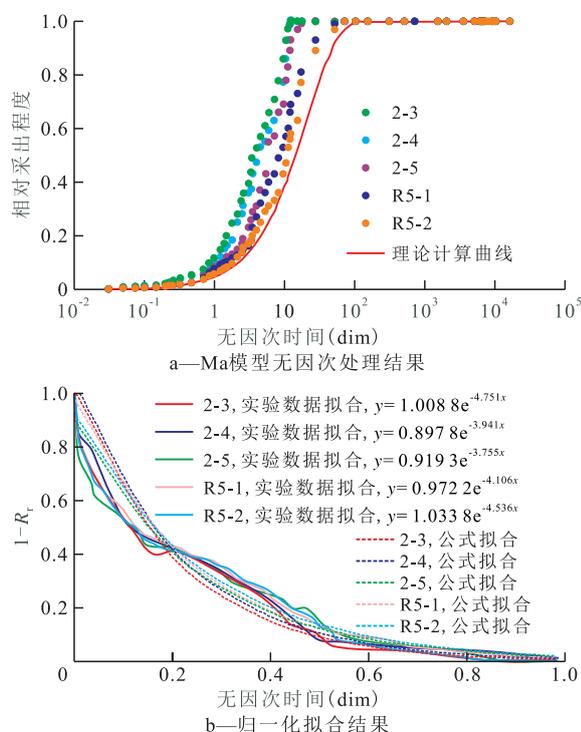


图10 利用Ma模型无因次化处理及改进的动态渗吸实验拟合结果

Fig.10 Dimensionless results of dynamic imbibition experiment estimated with Ma model and normalized model

改进的归一化拟合方程与Ma模型的形式相比,在底数e前面增加了系数。在相同的无因次时间下,新方程得到的相对采出程度较Ma模型偏大,与动态渗吸实验得到的规律相吻合。

3 结论

动态渗吸采出程度与渗透率相关性较差,与储层品质指数相关性较好。致密岩心越短,渗吸的阻力越小,越有利于渗吸的发生。对应于实际致密储层,裂缝越发育,动态渗吸采油效果越好。

温度和压力升高均有利于渗吸的进行。压力主要通过改变岩心渗透率来影响动态渗吸采出程度。压力的影响存在一个最佳范围,对于本次研究所用的岩心,其值为5~7 MPa。在现场可通过提高地层压力来提高动态渗吸采油效果。动态渗吸采出程度随裂缝条数的增加而线性增加。对于实际致密油藏,裂缝发育越好,可提供的渗吸通道越多,渗吸的过流面积也越小,阻力降低,可有效提高动态渗吸采出程度。研究所得到的动态渗吸采出程度归一化方程拟合程度高,适用于动态渗吸的研究,可为致密储层的开发提供理论依据。

参考文献

- [1] 杨智,付金华,郭秋麟,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J].中国石油勘探,2017,22(6):9-15. YANG Zhi, FU Jinhua, GUO Qiulin, et al. Discovery, characteristics and resource potential of continental tight oil in Triassic Yan-chang Formation, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 9-15.
- [2] 黄东,杨跃明,杨光,等.四川盆地侏罗系致密油勘探开发进展与对策[J].石油实验地质,2017,39(3):304-310. HUANG Dong, YANG Yueming, YANG Guang, et al. Countermeasure and progress of exploration and development of Jurassic tight oil in the Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(3): 304-310.
- [3] MILTER Jess, AUSTAD Tor. Chemical flooding of oil reservoirs 6. Evaluation of the mechanism for oil expulsion by spontaneous imbibitions of brine with and without surfactant in water-wet, low permeable, chalk material [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1996, 113(3): 269-278.
- [4] RANGEL-GERMAN E R, KOVSCEK A R. Water infiltration in fractured systems: experiments and analytical model [C]. SPE 71618, 2001.
- [5] 李晓晓,任晓娟,罗向荣.低渗透致密砂岩储层孔隙结构对渗吸特征的影响[J].油气地质与采收率,2018,25(4):115-120, 126. LI Xiaoxiao, REN Xiaojuan, LUO Xiangrong. Influence of pore structures on the characteristic of spontaneous imbibition in low-permeability tight sandstone reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(4): 115-120, 126.
- [6] 李世奎,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.
- [7] 姚同玉,李继山,王建,等.裂缝性低渗透油藏的渗吸机理研究及有利条件[J].吉林大学学报:工学版,2009,39(4):937-940. YAO Tongyu, LI Jishan, WANG Jian, et al. Mechanisms and optimal conditions of imbibition in naturally fractured low-permeability reservoir [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Tech-

- nology Edition, 2009, 39(4): 937-940.
- [8] 朱维耀, 鞠岩, 杨正明, 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, YANG Zhengming, 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.
- [9] 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.
WU Runtong, YANG Shenglai, XIE Jianyong, et al. Experiment and mechanism of spontaneous imbibition of matrix core in tight oil-gas reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 98-104.
- [10] 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. Imbibition model of tight sandstone based on distribution characteristics of throat [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13): 50-54.
- [11] 周万富, 王鑫, 卢祥国, 等. 致密油储层动态渗吸采油效果及其影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(3): 148-155.
ZHOU Wanfu, WANG Xin, LU Xiangguo, et al. Effects of the dynamic imbibition recovery and its influencing factors for the tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(3): 148-155.
- [12] 王向阳, 杨正明, 刘学伟, 等. 致密油藏大模型逆向渗吸的物理模拟实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 43-48.
WANG Xiangyang, YANG Zhengming, LIU Xuewei, et al. Physical simulation investigation on large scale model using counter-current imbibition in tight oil reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(8): 43-48.
- [13] 周凤军, 陈文明. 低渗透岩心渗吸实验研究[J]. 复杂油气藏, 2009, 2(1): 54-56.
ZHOU Fengjun, CHEN Wenming. Study on spontaneous imbibition experiment of low permeability core [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2009, 2(1): 54-56.
- [14] 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 Cheng'en, 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.
- [15] 陈淦, 宋志理. 火烧山油田基质岩块渗吸特征[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(3): 268-275.
CHEN Gan, SONG Zhili. Imbibition characteristics of rock matrix in Huoshaoshan oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1994, 15(3): 268-275.
- [16] 李斌会, 付兰清, 董大鹏, 等. 松辽盆地北部致密砂岩高温高压吞吐渗吸实验[J]. 特种油气藏, 2018, 25(1): 140-145.
LI Binhui, FU Lanqing, DONG Dapeng, et al. High temperature-pressure huff-puff imbibition experiment in the tight sandstone reservoir of northern Songliao Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 140-145.
- [17] 唐海, 吕栋梁, 谢军, 等. 川中大安寨裂缝性油藏渗吸注水实验研究[J]. 西南石油学院院报: 自然科学版, 2005, 27(2): 41-44.
TANG Hai, LÜ Dongliang, XIE Jun, et al. Experiment study of water imbibition injection for Daanzai fracturing reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute: Science & Technology Edition, 2005, 27(2): 41-44.
- [18] 谢坤, 韩大伟, 卢祥国, 等. 高温低渗油藏表面活性剂裂缝动态渗吸研究[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(3): 39-43, 66.
XIE Kun, HAN Dawei, LU Xiangguo, et al. Study on dynamic imbibition of surfactant in low permeability fractured reservoir with high temperature [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(3): 39-43, 66.
- [19] 蔡建超, 郭士礼, 游利军, 等. 裂缝-孔隙型双重介质油藏渗吸机理的分形分析[J]. 物理学报, 2013, 62(1): 220-224.
CAI Jianchao, GUO Shili, YOU Lijun, et al. Fractal analysis of spontaneous imbibition mechanism in fractured-porous dual media reservoir [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(1): 220-224.
- [20] MA S, MORROW N R, ZHANG X, et al. Characterization of wettability from spontaneous imbibitions measurements [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1999, 38(13): 1-8.
- [21] RAPOPORT L A, LEAS W J. Properties of liner waterflood [J]. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1953, 5(5): 139-148.
- [22] MATTAX C C, KYTE J R. Imbibition oil recovery from fractured, water-drive reservoir [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1962, 2(2): 177-184.
- [23] STANDNES D C. Scaling spontaneous imbibition of water data accounting for fluid viscosities [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2010, 73(3): 214-219.
- [24] LI K, HORNE R N. An analytical scaling method for spontaneous imbibition in gas/water/rock systems [J]. SPEJ, 2004, 9(3): 322-329.
- [25] MASON G, FISCHER H, MORROW N R, et al. Correlation for the effect of fluid viscosities on counter-current spontaneous imbibition [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2010, 72(1): 195-205.
- [26] ANDERSEN P Ø, EVJE S, KLEPPE H. A model for spontaneous imbibition as a mechanism for oil recovery in fractured reservoirs [J]. Transport in Porous Media, 2014, 101(2): 299-331.
- [27] MA Shouxiang, MORROW N R, ZHANG Xiaoyun. Generalized scaling of spontaneous imbibition data for strongly water-wet systems [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1997, 18(3/4): 165-178.
- [28] BABADAGLI T, HATIBOGLU C U, HAMIDA T. Evaluation of matrix-fracture transfer functions for countercurrent capillary imbibitions [R]. SPE 92111, 2005.