

文章编号:1009-9603(2020)04-0104-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.04.012

致密砂岩储层层理缝与构造缝渗吸差异分析

——以吉木萨尔凹陷芦草沟组为例

梁成钢¹, 罗 群², 张金凤³, 陈佳宇², 徐田录¹, 崔 倩², 滕志辉³

(1. 中国石油新疆油田分公司 吉庆油田作业区, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国石油大学(北京) 非常规油气科学技术研究院, 北京 102249; 3. 中国石油新疆油田分公司 准东采油厂, 新疆 昌吉 831511)

摘要:针对致密砂岩储层层理发育特点,探究层理缝渗吸效果,对进一步研究致密砂岩储层压裂开发具有重要意义。选取吉木萨尔凹陷芦草沟组致密砂岩储层为研究对象,开展静态渗吸物理模拟实验以及动态高温高压模拟实验,对层理缝与构造缝渗吸效果进行比较,探索两者渗吸效率差异及其根本原因,确定层理缝渗吸主控因素。研究结果表明:常温下构造缝平均渗吸效率约为26%,层理缝渗吸效率为20%,层理缝渗吸效率约为构造缝的77%;层理缝渗吸效果较好,常温常压和地层温压条件下渗吸可以分为极速渗吸、快速渗吸和缓慢—停止渗吸共3个阶段;地层温度升高,层理缝与构造缝渗吸效果差异减小,层理缝渗吸效率可达到构造缝的93.4%;在开启构造缝同时开启相同面积层理缝,渗吸效果基本不变,但渗吸时间大大缩短。层理缝与构造缝由于纵横向孔隙结构的不同,导致渗吸效率存在差异。

关键词:致密砂岩储层;渗吸;层理缝;构造缝;吉木萨尔凹陷

中图分类号:TE312

文献标识码:A

Analysis of imbibition difference between bedding fractures and structural fractures in tight sandstone reservoir: A case study in Lucaogou Formation in Jimsar Depression

LIANG Chenggang¹, LUO Qun², ZHANG Jinfeng³, CHEN Jiayu², XU Tianlu¹, CUI Qian², TENG Zhihui³

(1. Jiqing Oilfield Operation Area of Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 2. Unconventional Oil and Gas Science and Technology Research Institute, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 3. Zhundong Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Changji, Xinjiang, 831511, China)

Abstract: Considering the wide distribution of bedding fractures in tight sandstone reservoir, it is of great significance to further study the hydraulic fracturing of tight sandstone reservoir by investigating the effect of imbibition displacement of bedding fractures. The tight sandstone reservoir of Lucaogou formation in Jimsar Depression is selected as the research object, and the static imbibition experiments and dynamic simulation experiments at high temperature and high pressure are carried out to compare the imbibition displacement performance between the bedding fractures and structural fractures, and explore the reason caused the difference of imbibition performance. The main controlling factors for imbibition displacement of bedding fractures are determined. Results show that average imbibition efficiency of structural fractures and bedding fractures are about 26% and 20% at room temperature. That is to say the imbibition efficiency of the bedding fractures is 77% of that of the structural fractures. The imbibition performance of bedding fractures on improving oil recovery is better. Under normal temperature and pressure or formation temperature and pressure, the imbibition process can be divided into an extremely fast reaction stage, a fast reaction stage, and a slow-stop stage. As the formation temperature rises, the difference of imbibition efficiency between bedding fractures and structural fractures decreases slightly, and the imbibition ef-

收稿日期:2019-09-28。

作者简介:梁成钢(1970—),男,河南洛阳人,高级工程师,从事油气田开发方面的研究。E-mail:liangcg@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“致密油储层层理缝启闭与石油充注”(41672118),中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“陆相中高成熟度页岩油勘探开发关键技术研究与应用”(2019E-2609),中国石油战略合作科技专项课题6“吉木萨尔页岩油甜点形成机制与分类预测技术研究”(ZLZX2020-01-6)。

efficiency of the bedding fractures is 93.4% of that of the structural fractures. When the structural fractures and bedding fractures with the same area are opened together, the imbibition efficiency is basically unchanged, but the imbibition time is greatly reduced. Due to the difference of pore structure in vertical and horizontal direction between bedding fractures and structural fractures, the imbibition efficiency of them is different.

Key words: tight sandstone reservoir; imbibition; bedding fracture; structural fracture; Jimsar Depression

准噶尔盆地为中国西部大型叠合盆地之一,属于乌拉尔—蒙古复合造山带的一部分,油气资源非常丰富^[1]。吉木萨尔凹陷为准噶尔盆地东部隆起的次级构造单元,位于准噶尔盆地东南部,面积约为1 278 km²,构造上西临西地断裂,东接古西凸起,北临吉木萨尔断裂,南连三台断裂,是在中石炭统褶皱基底上发育的西深东浅的箕状凹陷^[2]。研究区构造缝发育程度不高,但是近水平、低角度的层理缝发育,其数量是构造缝的3~6倍^[3]。目前常规的水平井压裂以构造缝为主^[4],没有充分利用数量和规模更加可观的层理缝。层理缝研究一般关注其对油气运移、富集的影响,而吉木萨尔凹陷裂缝(层理缝)的研究程度不高,并且仅仅停留在裂缝的识别、表征和分布规律上^[5],对于如何利用层理缝提高页岩油、致密油采收率,尤其是层理缝中的压裂液与基质中的原油渗吸主控因素和渗吸效率方面研究很少,不能很好地将层理缝与注水开发结合。笔者通过一系列实验探究层理缝与构造缝渗吸效果的差异,其成果对优化页岩油、致密油压裂方式以及高效开发具有重要意义。

1 渗吸原理与实验方法

1.1 渗吸原理

在储层致密的情况下,如果油藏介质是亲水的,会发生自吸作用,水相进入多孔介质过程中替换出原有非润湿流体(油相),基质中的油将被吸入的水代替并排出到裂缝中,这种过程是裂缝性水湿油藏中自吸采油的重要机理^[6-7]。根据水吸入的方向与油气排出的方向,可分为同向渗吸和逆向渗吸。当水的吸入方向与油气被排出的方向相同时为同向渗吸,否则为逆向渗吸^[8]。同向渗吸是重力支配的推进速度占主导地位,而逆向渗吸是毛细管力占主导地位(图1)^[9-10]。致密储层的孔喉较小,对应毛细管力较高,其渗吸过程为毛细管力支配下的逆向渗吸^[8]。准噶尔盆地芦草沟组为低渗透储层,通过DU PERY公式判定毛细管力与重力的主导地位^[11]。当渗吸机理判别参数接近0时,重力支配作用明显,该参数越大,重力分异作用对渗吸的影响

越弱,毛细管力支配流动^[12]。

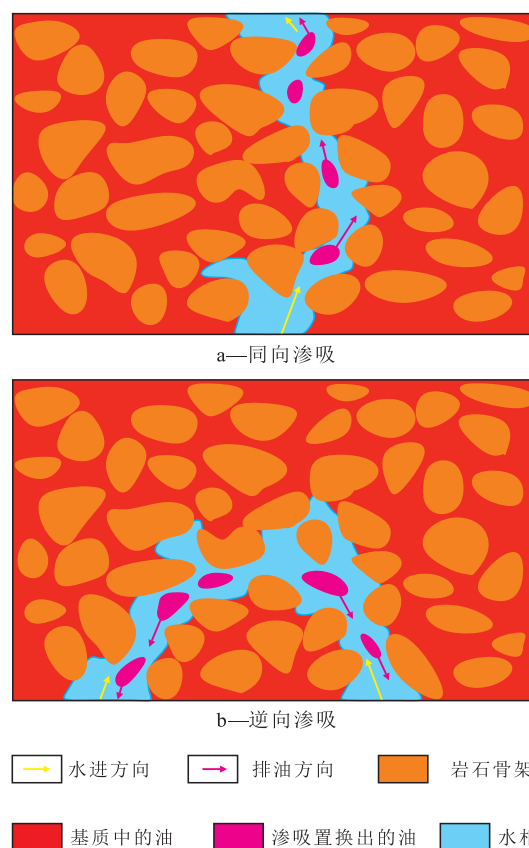


图1 渗吸机理模式

Fig.1 Schematic diagram of imbibition mechanism

1.2 实验方法

渗吸的传统实验方法主要包括体积法和质量法^[13]。由于研究区岩心致密、孔隙度小,静态渗吸排驱出的油相体积较小,并且少量渗吸置换出的油容易出现挂壁现象,使得体积法读数存在较大误差,无法准确测量各个时间段的渗吸置换量^[14],所以本次研究舍弃体积法,采取改进的质量法实验与高温高压动态渗吸实验分别用于对比常温常压与地层温压条件下的渗吸差异,利用薄片观察法分析差异原因。

1.2.1 质量法

质量法的原理是将含油岩心样品悬挂在润湿相流体容器中,垂直方向上,重力向下,浮力与拉力向上,3个作用力达到平衡。随着渗吸置换反应的发生,密度较大的润湿相置换岩心中密度较小的油相,使得岩心样品的重力增加,而岩心体积不变,因

此浮力不变,拉力增加的值等于重力增加的量,拉力的变化可以通过天平读数的变化表示。该方法精度较高,可以获得渗吸过程中各个时刻的渗吸量数据,具有较高的可信度,但实验周期长,一次实验只能做一块岩心,并且温度、湿度、震动等外界因素会对实验产生影响。尽管如此,综合对比各种手段,该方法是精度最高、最准确的方法。

本次研究采用天平型号为AUW120D,精度为0.1 mg,记录间隔为1 min,不间断地进行测量,记录质量变化。由于水、油的密度差,岩样吸水排油,因此质量逐渐增加。渗吸效率计算式^[15]为:

$$\eta = \frac{\Delta m}{(\rho_w - \rho_o)V_o} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.2 高温高压动态渗吸实验

尽管质量法具有较高的精度,但其不能模拟地层温压条件。因此,笔者设计了高温高压动态渗吸实验。将多块含油岩心放置在充满返排液的高压容器内部,高压容器耐压60 MPa、耐温150℃,满足模拟温压需求。每隔一段时间打开反应装置,对岩心进行称重,通过其质量变化换算出各个时刻对应的渗吸量。本次研究目的是对比层理缝和构造缝渗吸效率的区别,故采用热缩管包裹岩心,控制岩心样品仅有柱体上、下表面裸露,即可视为仅有构造缝作用或仅有层理缝作用下的渗吸情况。该方法可以模拟地层条件下的渗吸反应,但是装置拆卸繁琐,岩心称重误差大,初始阶段岩样渗吸速度快,岩心质量变化快,人工手动称重可能无法称量出相应所有的质量,因而可能漏失掉部分数据。

1.3 样品参数

本次研究所用2组标准岩心样品来源于吉木萨尔凹陷同一口采油井——JHW043井,均来自芦草沟组P₂l₂²⁻²段,深度约为2 920 m,物性差异较大。A组为灰色泥质粉砂岩,岩心出筒时新鲜断面油气味浓,平均孔隙度为13.97%;B组为灰色荧光泥质粉砂岩,岩心出筒时新鲜断面无油气味,平均孔隙度为3.92%。2组岩心分别有2块垂直层理和平行层理钻取的标准柱塞样,具体参数见表1。同时将钻取A组标准岩心剩余的边角料加工成铸体薄片与不同规格的长方体(图2),进行镜下观察与质量法实验,由于长方体小块来源于同一块岩心的水平相邻位置,基本可以忽略其物性差异。

2组实验均需将岩心进行饱和油处理,饱和用油为芦草沟组地层原油与煤油按照体积比1:4的比例混合。常规的饱和油方式为抽真空法饱和,但是

表1 吉木萨尔凹陷芦草沟组部分岩心样品孔渗数据
Table1 Porosity and permeability of core samples of Lucaogou Formation in Jimsar Depression

样品编号	孔隙度(%)	渗透率(μD)	样品编号	孔隙度(%)	渗透率(μD)
AV1	14.66	2.12	BV1	3.87	1.00
AV2	14.31	0.89	BV2	3.33	0.81
AH1	15.18	3.58	BH1	4.57	1.26
AH2	13.97	2.91	BH2	3.89	0.46

注:V为垂直层理钻取;H为平行层理钻取。

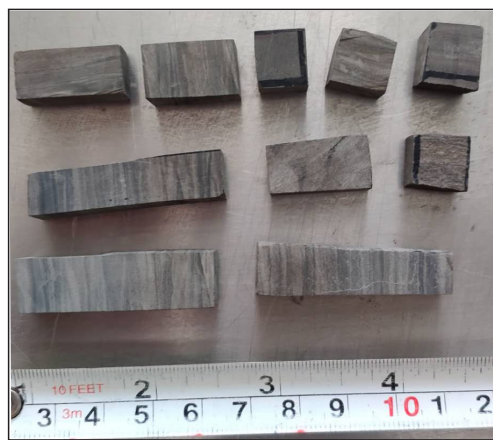


图2 质量法实验所用样品

Fig.2 Samples used by mass method

由于致密储层物性较差,饱和效果不理想。笔者在抽真空法的基础上进行改进,先进行高温抽真空法饱和,饱和48 h后,再采用高温油驱的方法(将传统油驱装置置于100℃恒温箱中)进行二次饱和24 h。经过计算,A组岩心饱和程度平均为98.03%,B组平均为95.61%,质量法样品饱和程度平均达99.72%,饱和程度较高,可以达到实验需求。

2 实验结果与分析

2.1 薄片特征分析

前人对渗吸主控因素做过大量研究,包括孔隙度、渗透率、润湿性、温度和流体黏度等^[7-8,16]。因此本文对以上因素不做过多研究,研究重点在于判断层理缝与构造缝渗吸效率的区别,主要实验手段为薄片观察法。2组岩心分别沿垂直层理方向(垂直剖面)和平行层理方向(水平剖面)制作16个铸体薄片。从铸体薄片照片可以更加直观的看出,研究区芦草沟组层理十分发育,纹层厚度约为0.1~3 mm,属于薄纹层,层理呈直线状且相互平行,属于水平层理,反映沉积水动力较弱的特点(图3)。

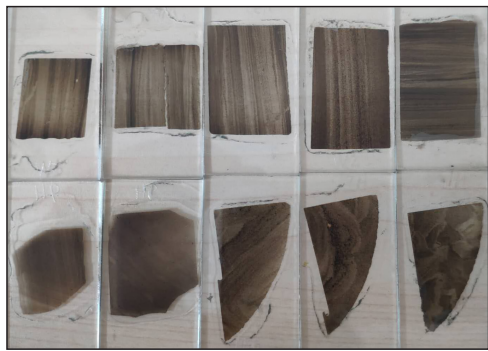


图3 吉木萨尔凹陷芦草沟组2组岩心铸体薄片照片

Fig.3 Two groups of core casting slices of Lucaogou Formation in Jimsar Depression

由垂直剖面薄片可以看到,微裂缝平行层理发育,微裂缝开度为10~20 μm ,长度为200~400 μm ,溶蚀孔隙发育程度较高,约占总孔隙的65%,可见少量残余粒间孔(图4)。溶蚀孔多发育在泥质含量较高的区域,推测其为生烃形成的有机酸溶解方解石与长石等矿物形成。邻近的溶孔连接成缝,进一步发育形成肉眼可见的开启的层理缝。部分微裂

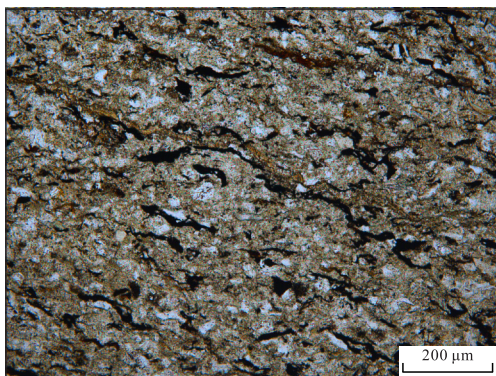


图4 垂直剖面薄片孔、缝特征

Fig.4 Characteristics of pores and fractures in vertical section

缝连接成更长的层理缝。A样品面孔率约为4%~5%。水平剖面薄片面孔率与垂直剖面薄片基本一致,但是孔隙未连接成微裂缝,连通性较差,导致垂向渗透率低于水平渗透率(图5)。

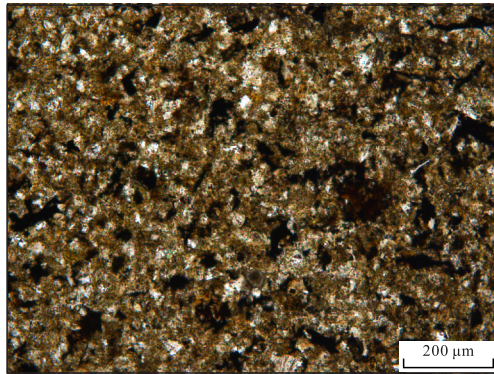


图5 水平剖面薄片孔、缝特征

Fig.5 Characteristics of pores and fractures in horizontal section

通过对荧光照片的观察发现,垂直剖面方向原油呈条带状沿裂缝展布,与邻近裂缝连通较好的裂缝中含油较少,而孤立的孔缝中含油较多(图6)。水平剖面方向观察到含油量较少,可能沿该方向原油更容易散失,残余油呈满天星状无规律地分布于孔隙中(图7)。因此油气更容易沿水平方向的狭长孔隙、微裂缝等运移到构造缝中,即层理缝渗吸效率比构造缝低。

2.2 层理缝与构造缝渗吸效率对比

2.2.1 常温常压下

常温常压下4块样品取自A组,包括1块层理缝样品(缝面积/体积为2 $\text{cm}^2/1 \text{ cm}^3$)、2块构造缝样品(缝面积/体积分别为2和4 $\text{cm}^2/1 \text{ cm}^3$)和1块全裸露

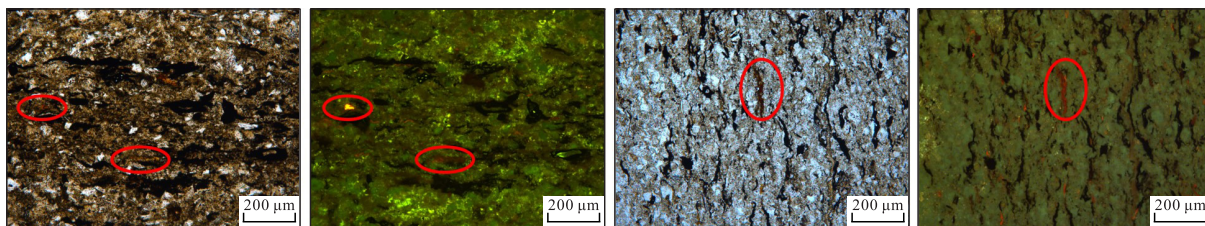


图6 垂直剖面荧光特征

Fig.6 Fluorescence characteristics in the vertical section

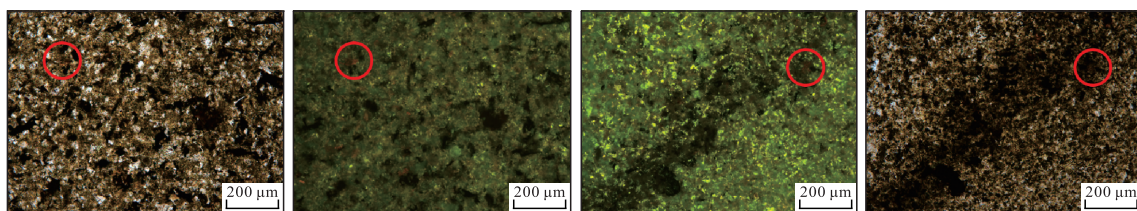


图7 水平剖面荧光特征

Fig.7 Fluorescence characteristics in horizontal section

岩心样品(层理缝面积为 2 cm^2 ,构造缝面积为 4 cm^2 ,体积为 1 cm^3)。从4块样品渗吸效率随时间的变化(图8)可以看出,渗吸过程可以分为3个阶段,在渗吸开始的初期,渗吸效率增长较快,而后增长速率基本稳定,呈现出平缓增长的趋势,并缓慢趋于停止。对比层理缝与构造缝样品,前者渗吸效率增长缓慢,渗吸周期长,并且最终渗吸效率低于后者。对比不同缝面积的构造缝样品,缝面积越大,最终渗吸效率越高。对于全裸露岩心样品,其在极速渗吸阶段的渗吸效率增长速率大于单一构造缝或单一层理缝样品,在缓慢—停止渗吸阶段增长速率放缓,最终渗吸效率和单一构造缝样品差异不大。

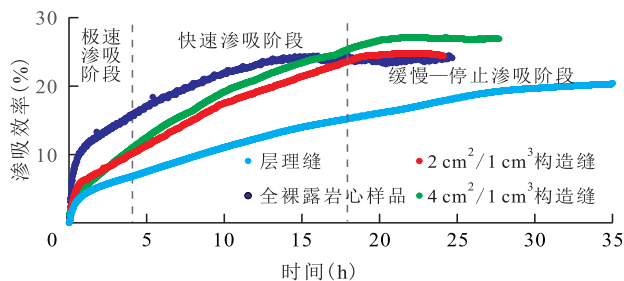


图8 常温常压下渗吸效率曲线

Fig.8 Imbibition efficiency at normal temperature and pressure

对曲线进一步分析可知:①单位体积渗吸质量差约为 $6.5\times 10^{-3}\sim 8.0\times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$,即岩心可以渗吸置换油体积约为 $0.032\text{ 5}\sim 0.04\text{ mL/cm}^3$;②层理缝和构造缝渗吸效率约为20%~27%,构造缝渗吸效率平均约为26%,层理缝渗吸效率约为构造缝的77%;③ $2\text{ cm}^2/1\text{ cm}^3$ 的构造缝、 $4\text{ cm}^2/1\text{ cm}^3$ 的构造缝、层理缝和全裸露岩心渗吸结束时间分别约为19,20,27和14 h,同时开启层理缝与构造缝可以极大地缩短渗吸时间;④通过对极速渗吸阶段拐点的观察发现,构造缝样品先出现拐点,并且变化幅度较大,层理缝样品后出现拐点,变化较为平稳,而全裸露岩心样品拐点的出现时间与变化幅度介于两者之间。推测是构造缝样品沿层理方向排列的孔隙以及微裂缝快速发生渗吸所致。

2.2.2 地层温压下

综合朱维耀等研究^[16-18]认为,在压力较高的情况下,压力继续增加对渗吸效率产生的影响较小。本次研究控制压力为30 MPa,调节不同温度模拟不同地层条件下构造缝与层理缝的渗吸效率。从图9和图10可以看出,孔隙度相对较低的B组岩心最终渗吸效率略高于孔隙度相对较高的A组岩心,平均渗吸效率提高5.7%左右;A和B组组内对比可以发现,构造缝样品渗吸效率为46.2%,略高于层理缝样

品的43.2%,层理缝渗吸效率约是构造缝的93.4%。对同一组样品不同温度下的渗吸效率对比发现,提高温度可以提高渗吸效率,但是A和B两组渗吸效率差异以及同一组内不同裂缝类型样品渗吸效率差异呈现缩小的趋势。

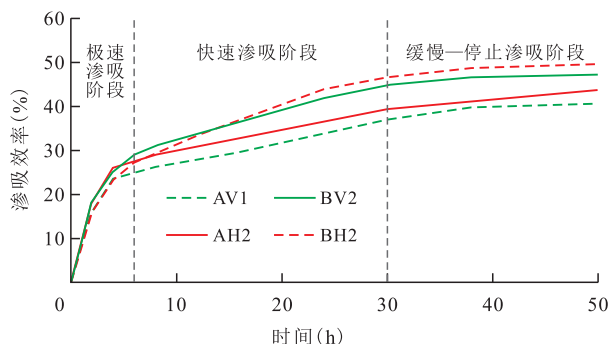


图9 温度为100 °C、压力为30 MPa下渗吸效率曲线

Fig.9 Imbibition efficiency curve at 100 °C and 30 MPa

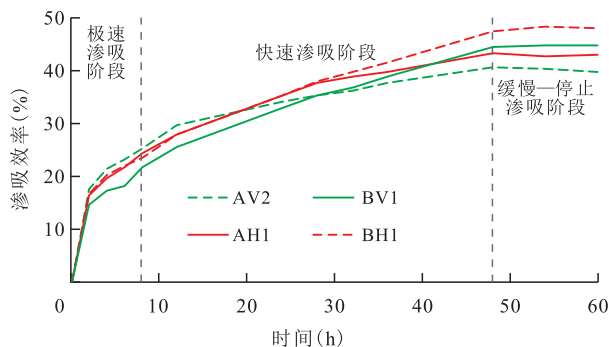


图10 温度为80 °C、压力为30 MPa下渗吸效率曲线

Fig.10 Imbibition efficiency curve at 80 °C and 30 MPa

根据4个样品渗吸速度曲线(图11,图12),研究区致密砂岩储层构造缝和层理缝渗吸反应均遵循3段式渗吸模式:极速渗吸阶段、快速渗吸阶段和缓慢—停止渗吸阶段,不同温压条件对应不同时长。

2.3 差异机理分析

孔隙结构的差异是导致层理缝与构造缝渗吸效率差异的根本原因。薄片观察发现,研究区芦苇沟组储层纹层发育,水平方向孔隙连通性较好,以

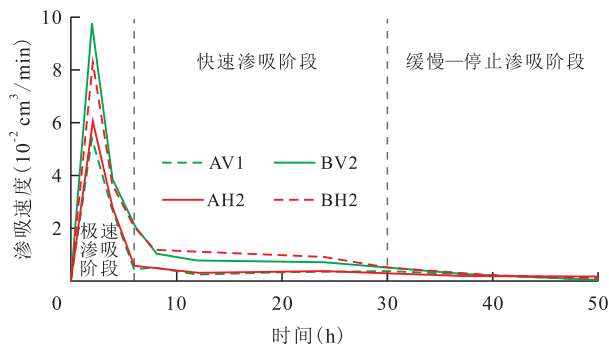


图11 温度为100 °C、压力为30 MPa下渗吸速度曲线

Fig.11 Imbibition rate curves at 100 °C and 30 MPa

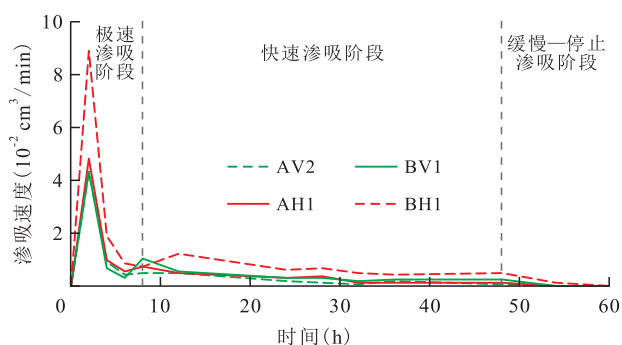


图12 温度为80℃、压力为30 MPa下渗吸速度曲线

Fig.12 Imbibition rate curves at 80 °C and 30 MPa

此构建渗吸模型骨架模拟不同裂缝类型对岩石基质中原油的渗吸效果。由层理缝渗吸模式(图13)可以看出,水相沿垂直方向的孔喉进入储层基质中,置换其中的原油,层理缝渗吸的通道——孔隙喉道较窄,水相进入与油相排出的路径较长,并且较为曲折。由于纵向上受压实与胶结作用影响,颗粒呈扁平状,纵向上孔喉减少甚至消失,导致层理缝渗吸方向存在死孔隙。

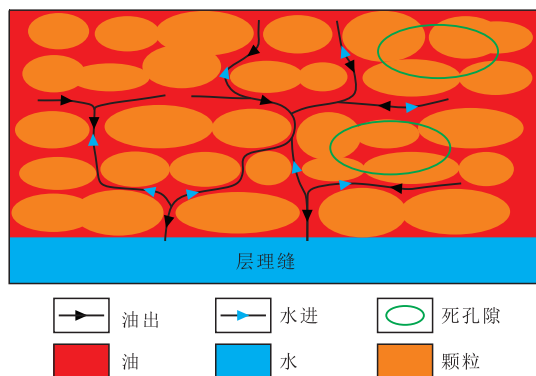


图13 层理缝渗吸模式

Fig.13 Imbibition pattern of bedding fractures

由构造缝渗吸模式(图14)可以看出,水相沿层理方向进入储层置换其中的油相,渗吸反应主要发生在连通性较好的水平方向的孔隙中,反应通道平直,渗吸主要通道为顺层的连通孔隙或微裂缝。构造缝渗吸反应可以进入层理缝渗吸无法深入的纵向上的死孔隙中。值得一提的是,在构造缝渗吸模

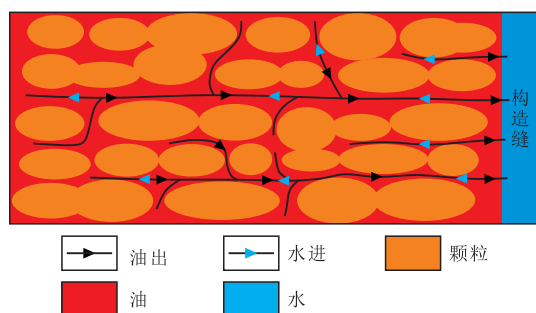


图14 构造缝渗吸模式

Fig.14 Imbibition pattern of structural fractures

式中,如果存在较粗的微裂缝或层理缝(图15),左侧构造缝中的水相在较小的毛细管力的情况下无法克服重力作用,因而无法发生渗吸反应;右侧构造缝中的水相由于毛细管力和重力同向,因而可以置换微裂缝或者层理缝中的原油。

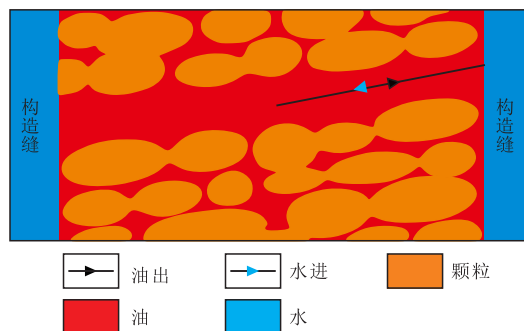


图15 重力(浮力)作用影响渗吸反应的示意

Fig.15 Schematic diagram of gravity (buoyancy) effect on imbibition response

对比层理缝与构造缝渗吸模式可以发现,层理缝渗吸通道更加曲折,但是由于层理缝渗吸的孔隙喉道较窄,毛细管力较大,导致层理缝与构造缝在渗吸时间上无明显差异。相比较于构造缝,层理缝存在部分死孔隙,导致最终渗吸效率低于构造缝。

3 结论

孔隙结构的差异是层理缝与构造缝渗吸差异的根本原因。层理缝具有明显的渗吸效应,地层温压下其渗吸效率约为构造缝的93.4%。充分利用层理缝的渗吸效应,可大幅度提高致密油采收率。

闷井过程中,层理缝中的压裂液渗吸来置换致密基质中的原油的过程具有明显的三段性,第1阶段为极速渗吸阶段,第2阶段为快速渗吸阶段,第3阶段为缓慢—停止渗吸阶段。

建立了层理缝、构造缝渗吸模式,纵横向孔隙结构的不同导致2种裂缝渗吸存在差异。

符号解释

V_o ——岩样饱和油的体积, cm^3 ;

Δm ——岩样质量的增加值, g ;

η ——渗吸效率, %;

ρ_w ——润湿相密度, g/cm^3 ;

ρ_o ——模拟油密度, g/cm^3 。

参考文献

- [1] 陈发景,汪新文,汪新伟.准噶尔盆地的原型和构造演化[J].地学前缘,2005,12(3):77-89.

- CHEN Fajing, WANG Xinwen, WANG Xinwei. Prototype and tectonic evolution of the Junggar Basin, northwestern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 77-89.
- [2] 田伟, 刘慧卿, 何顺利, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层岩石微观孔隙结构表征 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(4): 24-32.
- TIAN Wei, LIU Huiqing, HE Shunli, et al. Characterization of microscopic pore structure of tight oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimusaer Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(4): 24-32.
- [3] 刘冬冬, 张晨, 罗群, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密储层裂缝发育特征及控制因素 [J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(4): 36-47.
- LIU Dongdong, ZHANG Chen, LUO Qun, et al. Development characteristics and controlling factors of natural fractures in Permian Lucaogou Formation tight reservoir in Jimsar sag, Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(4): 36-47.
- [4] 田守增, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂机理与技术研究进展 [J]. *石油钻采工艺*, 2008, 30(1): 58-62.
- TIAN Shouzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research on hydraulic fracturing mechanisms and technologies [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2008, 30(1): 58-62.
- [5] 朱德宇, 罗群, 姜振学, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密储集层裂缝特征及主控因素 [J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(3): 276-283.
- ZHU Deyu, LUO Qun, JIANG Zhenxue, et al. Fracture characteristics and main controlling factors of tight reservoirs in Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(3): 276-283.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] MOGENSEN K, STENBY E H. A dynamic pore-scale model of imbibition [R]. Tulsa: The 1998 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, 1998.
- [10] HABIBI A, BINAZADEH M, DEGHANPOUR H, et al. Advances in understanding wettability of tight oil formations [R]. Houston: The SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2015.
- [11] DU PREY E L. Gravity and capillarity effects on imbibition in porous media [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1978, 18(3): 195-206.
- [12] SCHECHTER D S, ZHOU D, ORR F M. Low IFT drainage and imbibition [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1994, 11(4): 283-300.
- [13] 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.
- [14] 王教邦, 杨胜来, 吴润桐, 等. 渗吸研究中的典型问题与研究方法概述 [J]. *石油化工应用*, 2016, 35(7): 1-4.
- WANG Mibang, YANG Shenglai, WU Runtong, et al. Typical problems and research methods in the study of imbibition [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2016, 35(7): 1-4.
- [15] 王香增, 党海龙, 高涛. 延长油田特低渗油藏适度温和注水方法与应用 [J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 1 026-1 034.
- WANG Xiangzeng, DANG Hailong, GAO Tao. Method of moderate water injection and its application in ultra-low permeability oil reservoirs of Yanchang Oilfield, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 1 026-1 034.
- [16] 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.
- [17] 王锐, 岳湘安, 谭习群, 等. 低渗油藏岩石压敏性及其对渗吸的影响 [J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(6): 173-175.
- WANG Rui, YUE Xiang'an, TAN Xiqun, et al. Influence of pressure sensitivity on imbibition for low permeability reservoir rocks [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(6): 173-175.
- [18] 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.

编辑 经雅丽