

致密油储层特点与压裂液伤害的关系

——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例

王明磊^{1,2},张遂安¹,关辉²,刘玉婷²,管保山²,张福东²,崔伟香²

[1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北 廊坊 065007]

摘要:压裂是致密油开发的主要手段,在改造储层的同时又会带来储层伤害。以鄂尔多斯盆地延长组7段为例,依据储层物性、铸体薄片、电镜扫描、X-射线衍射、恒速压汞、核磁共振、CT以及敏感性测试等实验分析,研究致密油储层特点与压裂液伤害的关系。长7段属于典型的致密油储层,填隙物含量高达15%,易于运移和膨胀的伊利石占比大;孔隙、喉道皆为微米-纳米级别,孔喉连通性差,大孔隙常被小喉道所控制。长7段致密油储层属于中等偏弱速敏(岩心渗透率的损害率为0.33~0.48)、强水敏(岩心渗透率的损害率为0.14~0.28)、易水锁的储层,因此宜在压裂液配方中添加粘土稳定剂、防膨剂和助排剂以降低压裂液对储层的伤害;入井压裂液矿化度低于10 000 mg/L会产生盐敏伤害;压裂液残渣粒径为2.25~8.39 μm ,对于致密油储层而言,滤饼、沉积、吸附堵塞和桥堵等伤害现象都存在。综合研究认为,采用低伤害压裂液是降低残渣伤害的主要办法。

关键词:敏感性;压裂液;储层;致密油;延长组;三叠系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Relationship between characteristics of tight oil reservoirs and fracturing fluid damage: A case from Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Fm in Ordos Basin

Wang Minglei^{1,2}, Zhang Sui'an¹, Guan Hui², Liu Yuting², Guan Baoshan², Zhang Fudong², Cui Weixiang²

[1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

2. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei 065007, China]

Abstract: Fracturing stimulation is the main method for development of tight oil. It can improve reservoir quality, but also can cause damages to reservoirs. Taking the Chang 7 Member of Yanchang Formation in Ordos Basin as an example, the relationship between the characteristics of tight oil reservoirs and fracturing fluid damage is studied based on experimental analysis, such as physical properties of reservoir, casting thin sections, scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), rate-controlled mercury penetration, NMR, CT and sensitivity test. The Chang 7 Member is a typical tight oil reservoir in which the content of interstitial materials is as high as 15%. Illite, which is easy to transport and expand, accounts for a large proportion in the interstitial materials; Both pores and pore throats are of micro-nanometer scale, and the pore throats have poor connectivity. Large pores are generally controlled by small throats. The tight oil reservoir of the Chang 7 Member has moderate to weak velocity sensitivity (the damage rate of core permeability is in the range of 0.33-0.48), strong water sensitivity (the damage rate of core permeability is 0.14-0.28), and strong tendency of water blocking. Therefore, clay inhibitors, anti-swelling agents and cleanup additives should be added to the fracturing fluid formula to reduce the damage of fracturing fluid to the reservoir; salt sensitivity damage would occur when the salinity of the fracturing fluid running into the well is lower than 10,000 mg/L; the particle size of the fracturing fluid residue is 2.25-8.39 μm . For tight oil reservoirs, various damages such as filter cakes, sediments, absorption blocking and bridge plug can occur. It is considered through integrated study that using low damage fracturing fluids is the main way to reduce the residual damage.

Key words: sensibility, fracturing fluid, reservoir, tight oil, Yanchang Formation, Triassic, Ordos Basin

致密油是继页岩气之后全球非常规油气勘探开发的又一新热点,被石油工业界誉为“黑金”^[1-4]。鄂尔

多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)为主要致密油发育层段^[5],具有储层致密,孔喉结构复杂,物性差,油藏

收稿日期:2015-01-12;修订日期:2015-07-07。

第一作者简介:王明磊(1981—),工程师、博士,石油与天然气地质综合研究。E-mail:Wml69@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(50430503,2011ZX05007-002)。

压力系数低,单井产能低的特点^[6-9],常规开发方式难以实现有效动用。长庆油田成功实现了渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的超低渗透油藏的规模开发,其中压裂是较有效的开发方式。但在压裂过程中,压裂液形成具有一定几何形状与高导流能力的裂缝,在改善油气通道的同时也给储层带来了部分伤害^[8],因此影响了压裂的效果。本文从致密油储层特点出发,依据物性、铸体薄片、电镜扫描、X-射线衍射、恒速压汞、核磁共振、CT 以及敏感性测试等实验分析,深入研究了致密油储层特点与压裂液伤害的关系,为致密油储层改造选择压裂液体系、优选压裂液配方提供可靠理论依据,对降低压裂液对储层的伤害有重要意义。

1 易引起压裂液伤害的储层特点

1.1 填隙物中伊利石等粘土矿物含量高

利用 X-衍射、岩石薄片、场发射电镜等实验手段对长 7 致密油储层 341 个样品进行分析,岩石类型主要为岩屑长石砂岩及长石岩屑砂岩(图 1),石英和长石平均含量分别为 38% 和 19%。长 7 段填隙物含量为 15.3%,成分主要是伊利石、铁方解石,还含有少量绿泥石、高岭石等,其中伊利石含量高,平均为 9.4%,占填隙物总量的 60% 以上,主要呈丝缕状(图 2)、片状等。此外,填隙物中伊利石、铁方解石等充填孔隙,使储层物性变差,对储层主要起破坏作用^[10]。

1.2 孔隙喉道细小与孔喉连通性差

利用场发射扫描电镜、微米-纳米 CT 扫描以及恒速压汞等实验手段对长 7 段近 128 个样品的孔隙、喉道及孔喉连通性进行研究,并对孔隙与喉道进行综合定量评价(表 1)。研究认为,孔隙以粒间孔和溶蚀孔隙为主(图 3),溶蚀孔隙包括长石溶蚀孔隙和岩屑溶蚀孔隙。通过场发射扫描电镜分析,可判别的孔隙半径范围为 $0.005 \sim 30 \mu\text{m}$,主要分布区间为 $0.5 \sim 6.0 \mu\text{m}$;通过 CT 扫描分析,可判别的孔隙半径范围为 $0.1 \sim 12 \mu\text{m}$,主

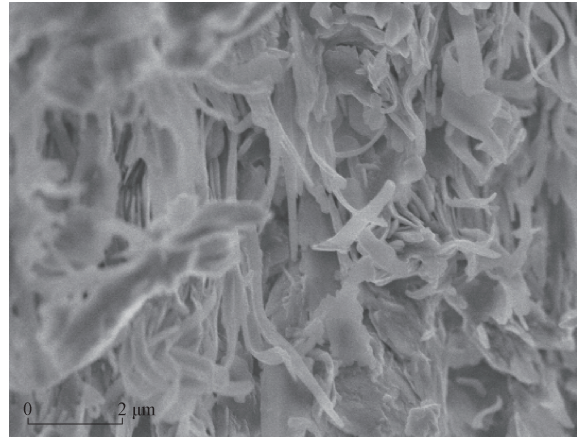


图 2 图 2 W233 井长 7 段(埋深 1 915.48 m)丝缕状伊利石场发射扫描电镜照片

Fig. 2 SEM Image of filament illite in sample from the Chang 7 Member of Yanchang Formation in Well W233 (1,915.48 m)

表 1 延长组 7 段孔喉定量分析数据

Table 1 Quantitative analysis of pore throats in the Chang 7 Member of Yanchang Formation

实验技术	可识别孔喉级别	孔隙半径/ μm		喉道半径/ μm	
		范围	主要分布区间	范围	主要分布区间
扫描电镜	纳米	0.005 ~ 30	0.5 ~ 6	0.005 ~ 1.2	0.2 ~ 0.8
CT 扫描	纳米-微米	0.1 ~ 12	0.5 ~ 9	0.1 ~ 3	0.3 ~ 1.1
恒速压汞	微米	120 ~ 200	150 ~ 160	0.2 ~ 0.8	0.3 ~ 0.4

要分布区间为 $0.5 \sim 9 \mu\text{m}$;通过恒速压汞分析,可判别的孔隙半径范围为 $120 \sim 200 \mu\text{m}$,主要分布区间为 $150 \sim 160 \mu\text{m}$ (表 1)。最终根据三种实验技术测得的数据对孔隙平均值综合分析,确定长 7 致密油储层主体孔隙大径范围为 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 。在此基础上,进一步对不同大小范围的孔隙、喉道所占比例进行分析(图 4), $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 范围内的孔隙所占比例最高,达 72%,小于 $2 \mu\text{m}$ 及大于 $14 \mu\text{m}$ 的孔隙所占比例较小。

喉道在致密油储层中多呈束状、孔隙缩小型与片状等。通过场发射扫描电镜分析,可判别的喉道半径范围为 $0.005 \sim 1.2 \mu\text{m}$,主要分布范围为 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$;通过 CT 扫描分析,可判别的喉道半径范围为 $0.1 \sim 3.0 \mu\text{m}$,主要分布范围为 $0.3 \sim 1.1 \mu\text{m}$;通过恒速压汞分析,可判别的喉道半径范围为 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$,主要分布范围为 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ (表 1)。根据三种实验技术测得的数据综合分析,确定长 7 致密油储层主体喉道半径为 $0.2 \sim 0.9 \mu\text{m}$,喉道细小,不利于储层中流体流动。在此基础上,进一步对不同大小范围的喉道所占比例进行分析(图 4), $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围内的喉道所占比例最高,达 56.8%,小于 $0.2 \mu\text{m}$ 及大于 $1.2 \mu\text{m}$ 的孔隙所占比例较小。利用微米-纳米 CT 扫描技术,建立了长 7 致密油储层的喉道三维立体模型(图 5a),可明显观察到长 7 致密油储层中虽然存在

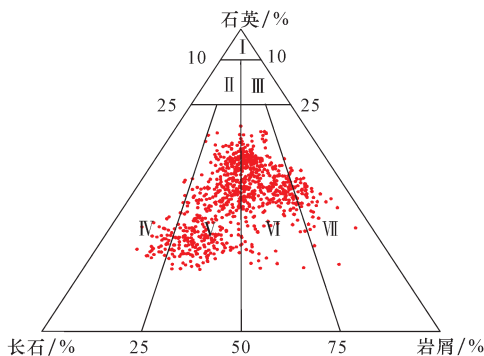


图 1 延长组 7 段岩石类型

Fig. 1 Rock type of the Chang 7 Member of Yanchang Formation

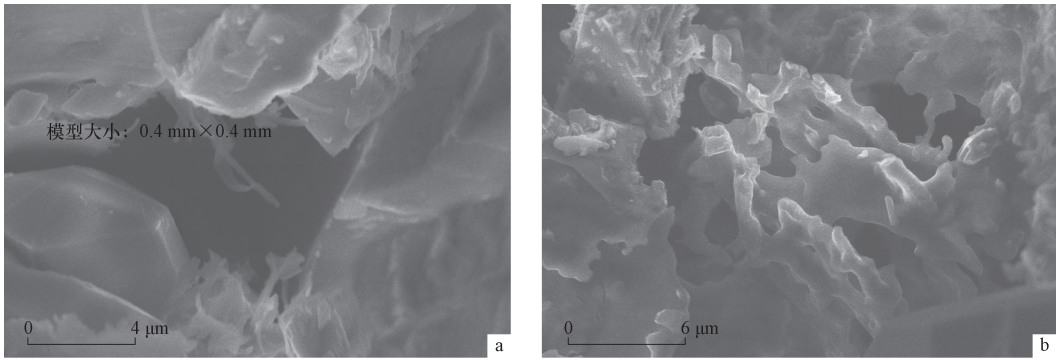


图3 长7致密油储层孔隙类型(场发射扫描电镜图)

Fig. 3 Pore types of tight oil reservoirs of Chang 7 Member of Yanchang Formation (SEM image)

a. 粒间孔, YC2井, 长7², 埋深2 043.1 m; b. 长石溶孔, Z164井, 长7², 埋深1 972.3 m

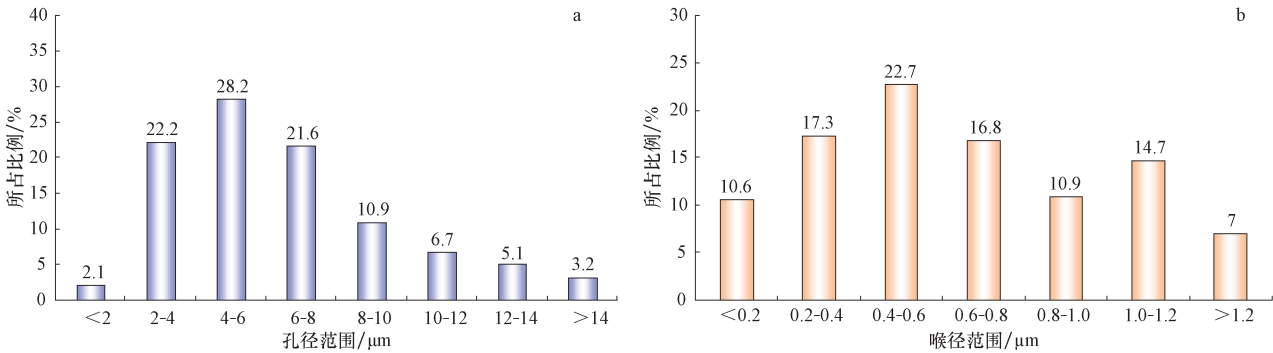


图4 长7致密油储层不同范围的孔隙与喉道所占比例

Fig. 4 Proportions of pores and throats with different sizes in tight oil reservoirs of Chang 7 Member of Yanchang Formation

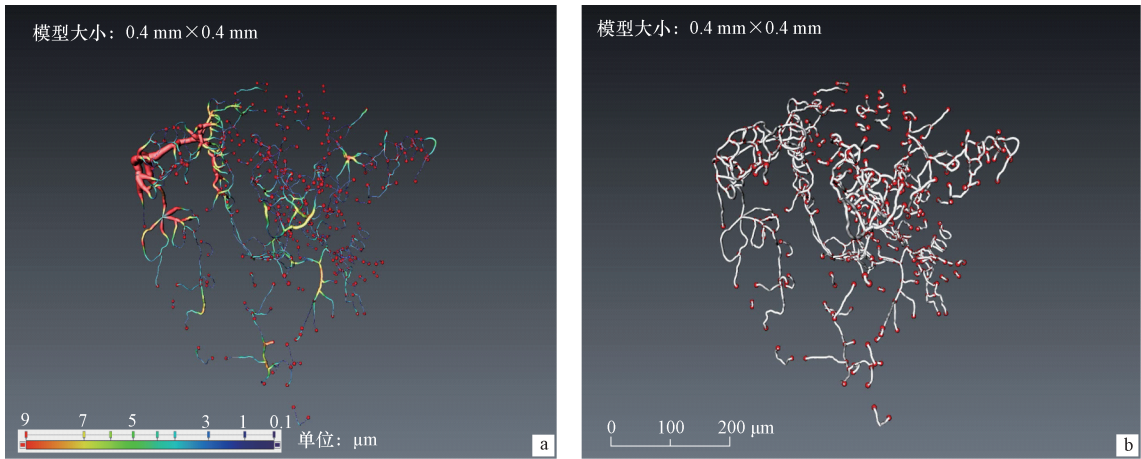


图5 X233井样品喉道三维立体模型与孔喉连通性球棍模型

Fig. 5 A 3D model for throats and a mallet model for the connectivity of pore throat in the samples from Well X233

a. 长7², 埋深1 972.3 m, 喉道三维立体模型, CT扫描图; b. 长7², 埋深1 972.3 m, 孔喉连通性球棍模型,

(注: CT扫描图, 红色圆球为孔隙简略模型, 白色棍体为喉道简略模型。)

20%~30%连通性较好、且半径大于4 μm的大喉道, 但半径小于1 μm的喉道约占60%以上。

利用微米-纳米CT扫描和恒速压汞对孔喉连通性进行分析。建立了长7致密油储层的孔喉结构球棍模型(图5b), 可明显观察到, 孔隙与孔隙之间多呈不连续状态, 表明喉道不发育, 即长7致密油储层孔喉连通性总体较差。

利用恒速压汞实验, 分析了5口井岩心样品储层孔喉半径比(表2), 实验数据显示, 渗透率低的样品

(Y2, Z143, N52)孔喉比大, 即大孔隙被小喉道所控制, 连通性差。

2 压裂液对致密油储层的伤害

2.1 压裂液敏感伤害

2.1.1 速敏伤害

当压裂液流速和压力变化较大, 或流速达到一定

表 2 长 7 致密油储层孔喉特征

Table 2 Characteristics of pore throats in tight oil reservoirs of Chang 7 Member of Yanchang Formation

井号	Y1	X233	Y2	Z143	N52
气测渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	0.38	0.12	0.06	0.04	0.03
有效喉道半径加权 平均值/μm	0.42	0.38	0.29	0.28	0.29
有效孔隙半径加权 平均值/μm	162.74	161.61	163.09	153.80	162.46
有效孔喉半径比加权 平均值	492.9	532.58	661.21	602.90	657.51

时,使水动力大于微粒间的范德华引力和双电层斥力之和,致密油储层孔隙中充填的伊利石等填隙物,甚至是长石和石英等微粒会随着水力运动而发生微粒运移,从而造成地层伤害^[11]。根据前述综合分析,储层岩石中伊利石、长石和石英均有分布,加之喉道细小与连通性差加剧了速敏伤害而造成运移微粒在储层深部

堵塞(图 6),使压裂液不能到达储层深部,因此降低了压裂效果。

本次研究采用模拟长 7 段地层水进行了 8 块岩心的速敏实验。实验结果显示,岩心渗透率的损害率为 0.33 ~ 0.48,当流速为 1.0 mL/min 左右时,渗透率均有明显下降现象,表明该类储层属于速敏伤害中等偏弱的储层。虽然不是强速敏储层,但由于致密油储层孔喉细小易于堵塞,宜在压裂液配方中添加粘土稳定剂减少伤害。

2.1.2 水敏伤害

压裂液进入地层产生的滤液和破胶液中有多种化学成分,其中部分会在储层条件下分解成为含电解质和一定矿化度的滤液和破胶液,其产生的电解质楔入粘土矿物的晶格,使之发生表面水化膨胀乃至渗透水化膨胀和分散,从而导致渗透率下降(图 7)。在以伊

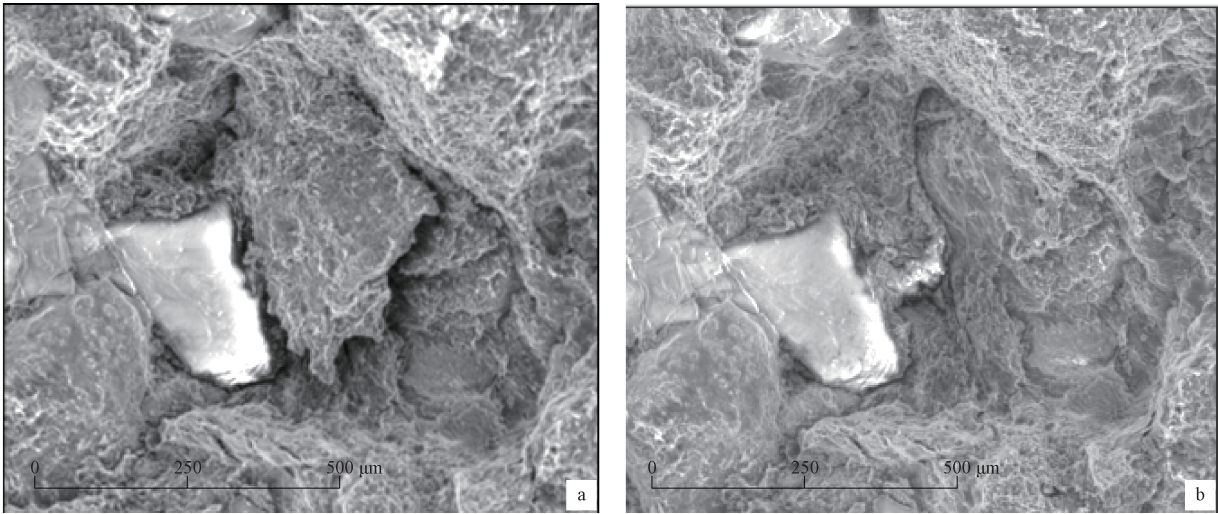


图 6 X233 井长 7 段(埋深 1 972.3 m)微粒运移前、后场发射扫描电镜图

Fig. 6 SEM image of samples before and after particle migration from Chang 7 Member of Yanchang Formation in Well X233 (1,972.3 m)

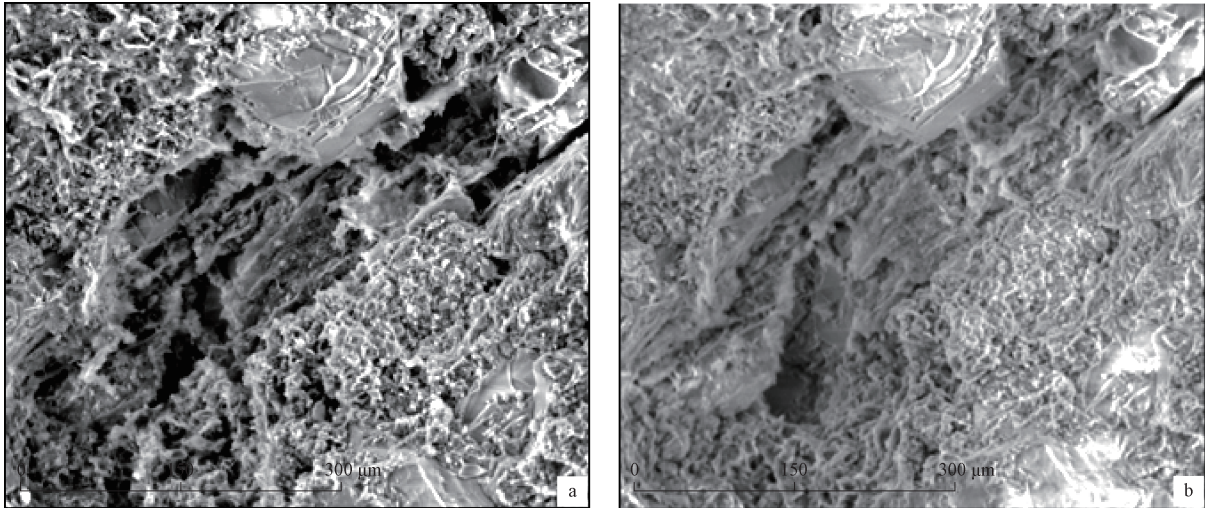


图 7 X233 井长 7 段(埋深 1 972.3 m)粘土膨胀前、后场发射扫描电镜图

Fig. 7 SEM image of samples before and after clay swelling from Chang 7 Member in of Yanchang Formation Well X233 (1,972.3 m)

利石为主要粘土矿物的致密油储层,由于外来矿物附着^[12],粘土矿物以及杂基发生破碎与结构坍塌,少量粘土矿物膨胀都会引起本来细小的喉道减小^[13]。压裂液进入储层后可引起粘土矿物的膨胀、分散、脱落和孔隙结构的破坏,导致储层孔隙空间的缩小及堵塞,最终降低储层渗透率,产生水敏损害。

采用模拟长7段地层水进行了8块岩心的水敏实验,实验结果显示,岩心渗透率的损害率为0.14~0.28,属于水敏伤害强的储层。由于致密油储层粘土矿物主要分布在填隙物中,水敏伤害产生后,填隙物中粘土膨胀,孔喉的连通性和有效性急剧降低,严重影响压裂效果。

为了降低速敏和水敏伤害,常在压裂液中添加粘土稳定剂或防膨剂,常见的氯化钾、氯化胺和各种聚季铵盐的阳离子表面活性剂是粘土稳定剂或防膨剂的主要成分。粘土稳定剂可以通过静电作用同时与多个粘土颗粒形成多点吸附,形成有机阳离子表面活性剂吸附保护膜,将粘土颗粒保护起来,防止粘土颗粒的水化、膨胀、分散和运移^[14]。防膨剂释放离子能嵌入硅酸盐薄片四面体的六元环中,以牢固的库伦力结合,增大粘土颗粒间吸附力,中和粘土表面部分负电荷,压缩双电层,防止水化膨胀。

2.1.3 盐敏伤害

随着压裂液注入,储层流体如地层水被大量压裂液中和,使其盐度下降,渗透率减小。盐敏伤害分两个阶段,第一阶段表面水化膨胀,伊利石等粘土矿物颗粒周围形成水膜,水可由渗透效应吸附,并使粘土矿物发生膨胀。第二阶段溶液的盐度低至临界盐度时,膨胀使粘土片距离超过相当于4个单分子层水的距离时,层间内将会产生双电层排斥使储层粘土表面水化膨胀。第二阶段粘土体积的膨胀率远远大于水化膨胀阶段,其体积膨胀率有时可达100倍以上,使得储层的渗透率急剧下降^[15]。改变压裂液盐度,对储层岩心进行了6个盐度、5块岩心的实验(图8)。当实验液体矿化度小于10 000 mg/L时,渗透率的损失率下降明显,因此保证入井压裂液矿化度高于10 000 mg/L可以避免盐敏伤害。

2.2 压裂液水锁伤害

致密油储层孔喉小且连通性差,加之孔隙表面的亲水性,当含水饱和度很小时,压裂液滤液处于岩石颗粒表面及孔隙的边、角狭窄部位,油气则处在大的易流动的连通网络中,而随着含水饱和度的进一步增大,水相逐渐向孔喉的中心扩展,不断挤压气相的空间,甚至完全占据较细小的喉道,压裂液滤液容易进入孔隙喉道,形成储层的水锁伤害^[16-18]。

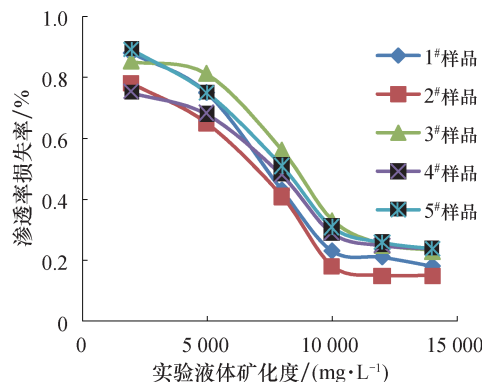


图8 长7致密油储层盐敏实验曲线

Fig. 8 Curve of salt sensitivity test in tight oil reservoirs of Chang 7 Member of Yanchang Formation

采用标准 SY/T 5153—1999“油藏岩石润湿性测定推荐方法”中的实验方法对长7段18块岩心进行润湿性分析。实验采用煤油和模拟地层水分别进行,模拟地层水参照长庆油田长7地层水配制,实验温度为室温。实验结果显示,水在岩石的表面铺展,接触角主要分布在80°~130°;油在岩石的表面不铺展,接触角主要分布在10°~30°;储层润湿性表现出偏亲油特征,从而降低了水相的流动能力。原生水分布于小孔道的颗粒周界附近呈平衡状态,一旦压裂液滤液作为外来水侵入,由于表面张力的作用,水容易进入孔隙。通过核磁实验结合离心法,发现0.1~0.5 μm喉道控制了储层中60%的可动体流体(图9),细小喉道是产生水锁伤害的主要因素。水锁增加了压裂液滤液返排的困难,添加助排剂可以减小压裂液对储层润湿带来的是的水锁伤害。助排剂主要成分是表面活性剂,能够降低油气相与液相之间的表面张力,增大与岩石表面的接触角,降低流体在储层孔隙中的毛细管力,从而降低采出过程中克服水锁所需的启动压力^[19-20]。

2.3 压裂液残渣残胶伤害

压裂液残渣与残胶会在储层中发生机械捕集,并

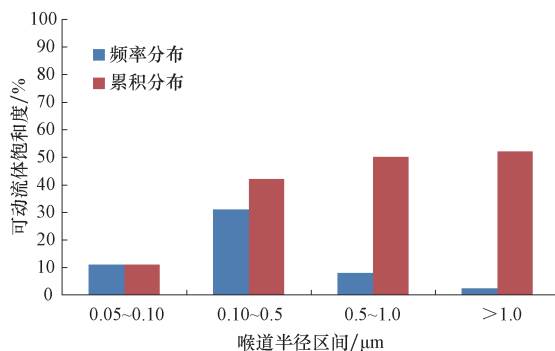


图9 X233井长7段(埋深1 972.3 m)喉道区间内可动流体分布

Fig. 9 Mobile fluid distribution in throats of samples from Chang 7 Member of Yanchang Formation in Well X233 (1,972.3 m)

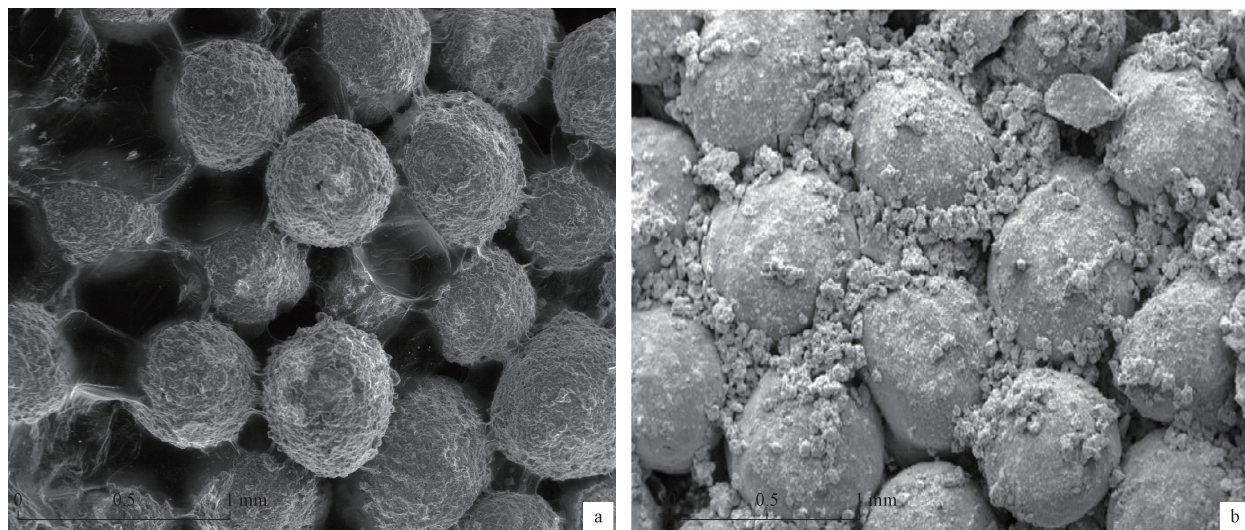


图10 长7致密油储层压裂液残胶与残渣场发射扫描电镜图

Fig. 10 SEM image of residual gel and residue of fracturing fluid in tight oil reservoirs of Chang 7 Member of Yanchang Formation

a. 压裂液残胶, X233井, 长⁷, 埋深1 972.3 m; b. 压裂液残渣, Z143井, 长⁷, 埋深1 871.1 m

相互缠结使团块尺寸变大, 最终滞留在储层中堵塞渗流通道和支撑裂缝的孔喉^[21-22], 从而造成储层伤害(图10)。压裂液残渣主要来自于破胶后的稠化剂碎片(如破胶后的残余压裂液冻胶胶体)和压裂液各成分生产和压裂液配置过程中产生的杂质。

长7段致密油储层主体孔隙半径范围为0.5~10 μm, 主体喉道半径范围为0.3~0.9 μm。对油田常用的羟丙基瓜尔胶压裂液、羧甲基破胶瓜尔胶压裂液、黄原胶压裂液以及聚合物压裂液破胶液进行粒度分析, 压裂液破胶液残渣粒径为2.25~8.39 μm。破胶液微粒尺寸与孔隙尺寸相当, 而远大于喉道尺寸。依据贝雷的1/7“架桥准则”, 不同渗透率岩心的损害程度和残渣颗粒大小、含量、粒径与岩心孔隙之间有密切的匹配关系。当压裂液中残渣粒径(D_f)大于有效孔喉直径(D_p)时就会形成滤饼伤害; 当 $1/7 \leq D_f/D_p \leq 2/3$ 时, 会形成沉积和吸附堵塞; 当 $D_f/D_p \leq 1/7$ 时, 还会造成桥堵。根据残渣粒径数据和孔喉数据, 对于致密油储层而言, 滤饼伤害、沉积和吸附堵塞与桥堵都存在。使用能够降低伤害的低浓度植物胶压裂液、无残渣的清洁压裂液和纤维素压裂液是降低此类伤害的直接方法。

3 结论

1) 延长组长7段属于典型的致密油储层。多种实验方法综合评定, 该储层主体孔隙半径范围为0.5~10 μm, 主体喉道半径范围为0.3~0.9 μm。储层中小喉道占有较大比例, 孔喉比较大, 大孔隙往往被小喉道所控制, 孔喉连通性差。

2) 孔隙喉道狭小, 且常以一端敞开的死胡同孔隙

存在; 孔隙内的填隙物使致密油储集空间减少了80%, 连通性降低了90%, 加大了孔喉的狭窄程度; 粘土矿物含量高, 平均达10%, 易于运移和膨胀的伊利石(9%)占比大。

3) 长7段属于中等偏弱速敏、强水敏伤害的储层。宜使用粘土稳定剂和防膨剂降低伤害。盐敏实验证明, 入井压裂液临界矿化度要高于10 000 mg/L可防止此类伤害。

4) 致密油储层孔喉小且喉道发育程度差, 加之孔隙表面的亲水性, 压裂液滤液容易进入孔隙喉道, 形成储层的水锁伤害。细小喉道是产生水锁伤害的主要原因。压裂液配方中添加助排剂能够降低油气相与液相之间的表面张力, 从而降低水锁伤害的影响。

5) 压裂液残渣粒径为2.25~8.39 μm, 对于致密油储层, 易产生滤饼、沉积、吸附堵塞和桥堵地等伤害现象。使用低浓度植物胶压裂液、无残渣的清洁压裂液和纤维素压裂液是降低此类伤害的直接方法。

参 考 文 献

- [1] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang, et al. Unconventional oil and gas exploration and development (I) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [2] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geology Press, 2011.
- [3] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129~145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Hou Lianhua, et al. Geological fea-

- tures, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(2): 129–145.
- [4] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 173–187.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, character, genesis and proocts of conventional hydrocarbon accumulations; taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173–187.
- [5] 任战利, 李厚文, 梁宇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 190–198.
- Ren Zhanli, Li Wenhui, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 190–198.
- [6] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 149–158.
- Wang Yonghui, Lu Yongjun, Li Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 149–158.
- [7] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 1–11.
- Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin. [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1–11.
- [8] 姚涇利, 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 Tingli, 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.
- [9] 张纪智, 陈世加, 肖艳, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区长8致密砂岩储层特征及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 679–684.
- Zhang Jizhi, Chen Shijia, Xiao Yan, et al. Characteristics and their of the Chang 8 tight sandstone reservoirs genesis in Huaqing area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 679–684.
- [10] 贾统权. 粘土矿物与油藏演化的对应关系对储层敏感性的影响——以正理庄油田樊131区块沙四段滩坝砂油藏为例[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(5): 12–15.
- Jia Tongquan. The corresponding relation of clay minerals and reservoir evolution; talk zhengli oilfield fan 131 block sand beach sand dam reservoir as an example[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(5): 12–15.
- [11] 石京平, 宫文超, 曹维政, 等. 储层岩石速敏伤害机理研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(5): 504–504.
- Shi Jingping, Gong Wenchao, Cao Weizheng, et al. A reaeach into the damage mechanism of velocity-sensitivity in sandtone of reservoir[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2003, 30(5): 504–504.
- [12] 田建峰, 高永利, 张蓬勃, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 700–707.
- Tian Jianfeng, Gao Yongli, Zhang Pengbo, et al. Genesis of illite in Chang 7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 700–707.
- [13] 廖纪佳, 唐洪明, 朱筱敏, 等. 特低渗透砂岩储层水敏实验及损害机理研究——以鄂尔多斯盆地西峰油田延长组第8油层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(2): 321–323.
- Liao Jijia, Tang Hongming, Zhu Xiaomin, et al. Water sensitivity experiment and damage mechanism of sandstone reservoirs with ultra low permeability: a case study of the eighth oil layer in the Yanchang Formation of Xifeng oilfield, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(2): 321–323.
- [14] 江建林, 岳湘安, 高震, 等. 特低渗透油藏注水粘土稳定剂及评价方法——以海拉尔盆地贝尔油田为例[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(2): 105–11.
- Jiang Jianlin, Yue Xiang'an, Gao Zhen, et al. Study on clay stabilizer and evaluation method for extra-low permeable reservoir oil field—a case study of beier oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(2): 105–11.
- [15] Kchistiakov A A. Colloid chemistry of in-situ clay induced formation damage[J]. *SPE58747*, 2000, 2: 780–787.
- [16] 庞振宇, 孙卫, 李进步, 等. 低渗透致密气藏微观孔隙结构及渗流特征研究: 以苏里格气田苏48和苏120区块储层为例[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(7): 133–138.
- Pang Zhenyu, Sun Wei, Li Jinbu, et al. Microscopic pore structure and seepage characteristics of low-permeability and tight sandstone gas reservoir; taking blocks Su 48 and Su 120 in Sulige Gas Field as an example [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(7): 133–138.
- [17] 张荣军, 蒲春生, 赵春鹏. 板桥凝析油气藏水锁伤害实验研究[J]. *钻采工艺*, 2006, 29(3): 79–81.
- Zhang Rongjun, Pu Chunsheng, Zhao Chunpeng. Exploration research on water locking injury Banqiao condensate oil-gas reservoir [J]. *Drilling & Production Technology*, 2006, 29(3): 79–81.
- [18] 管保山, 周煥顺, 程玉梅, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田压裂液对储层伤害的微观机理研究[J]. *中国石油勘探*, 2007, 59(4): 59–62.
- Guan Baoshan, Zhou Huanshun, Cheng Yumei, et al. Microcosmic analysis of damage of fracturing fluids to reservoirs in Xifeng Oilfield of Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 59(4): 59–62.
- [19] 于广红, 白群山, 韩桂欣, 等. 压裂用高效发泡助排剂JX-YL的性能评价与应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2004, 23(2): 53–55.
- Yu Guanghong, Bai Qunshan, Han Guixin, et al. Performance evaluation and application of high effective foaming cleanup additive (JX-YL) for fracturing fluids[J]. *Petroleum Geology Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(2): 53–55.
- [20] 曹健, 赵根锁, 张国宝, 等. 阴离子-阳离子复合表面活性剂体系用于压裂液助排剂的研究油田化学, 1992, 9(3): 225–229.
- Cao Jian, Zhao Gensuo, Zhang Guobao, et al. The study on anionic and cationic composite surfactant system used in the fracturing clean up additive[J]. *Oilfield Chemistry*, 1992, 9(3): 225–229.
- [21] 庄照锋, 赵贤, 李荆, 等. HPG压裂液水不溶物和残渣来源分析[J]. *油田化学*, 2009, 26(2): 139–141.
- Zhuang Zhaofeng, Zhao Xian, Li Jin, et al. Analysis on the origin in of residue and water insohible substances for HPG fracturiug fuild[J]. *Oilfield Chemistry*, 2009, 26(2): 139–141.
- [22] 何勤功. 高分子聚合物在储集层孔隙介质中的滞留机理[J]. *石油勘探与开发*, 1981, 3: 49–60.
- He Qingong. Retention mechanism of polymer in porous media of reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1981, 3: 49–60.