文章编号:1673-5005(2012)02-0027-07

用微观方法研究西峰油田长8油层特低渗透砂岩 油藏的岩石应力敏感性

廖纪佳1,唐洪明2.3,朱筱敏1,李 皋2,赵 峰2.3,林 丹3

(1. 中国石油大学地球科学学院,北京102249;2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都610500;3. 西南石油大学资源与环境学院,四川成都610500)

摘要:基于铸体薄片、岩心物性测试及压汞分析认为、西峰油田长8油层属于特低渗透砂岩油藏。通过试验研究孔隙 型岩样和裂缝型岩样的应力敏感性,利用特殊设计的裂缝可视化测试系统、毛管流动孔隙结构仪等微观分析测试手 段评价裂缝闭合规律及定量表征裂缝宽度变化;基于扫描电镜、X 衍射分析等研究方法探讨孔隙和裂缝应力敏感性 的损害机制。研究表明:研究区孔隙型岩样应力敏感性较弱,裂缝型岩样应力敏感性强;孔隙衬里绿泥石、局部分布 的石英加大、自形程度高的石英锥晶是孔隙型岩石应力敏感损害率低、渗透率恢复率高的主要原因;裂缝表面的微 凸起发生弹塑性形变是裂缝应力敏感性损害极强的主要原因。建立的孔隙和裂缝的应力敏感性损害模式可以为高 效开发该类油藏提供依据。

关键词:西峰油田;长8油层;特低渗透砂岩;孔隙;裂缝;应力敏感性;损害模式 中图分类号:TE 122.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.02.005

Study on stress sensitivity in ultra-low permeability sandstone reservoir of Chang 8 oil formation in Xifeng Oilfield based on microscopic methods

LIAO Ji-jia¹, TANG Hong-ming^{2,3}, ZHU Xiao-min¹, LI Gao², ZHAO Feng^{2,3}, LIN Dan³

(1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation in Southwest Petroleum University,

Chengdu 610500, China;

3. School of Resources and Environment in Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Based on thin sections of casting, physical property analysis and mercury penetration analysis, the Chang 8 oil formation in Xifeng Oilfield belongs to the ultra-low permeability sandstone reservoir. The stress sensitivity of porosity and fractured rock samples was studied by experimental methods. The fracture closure laws were evaluated and fracture width change was characterized quantitatively by specially designed fracture visualization test system and capillary flow porometer. The damage mechanism of the stress sensitivity of pore and fracture was researched through research methods such as scanning electron microscope, X-ray diffraction analysis. The results show that in the research area, the stress sensitivity of porosity rock samples is weak and that of the fractured ones is strong. The chlorite in pore's liner, the quartz secondary distributed partly and the high automorphic quartz crystallite are main causes of the low stress sensitivity injury rate and the high permeability recovery for porosity rock. Elastic-plastic deformation of micro-salient on surface of fracture is the chief reason to severe damage of the fracture stress sensitivity. The established stress sensitivity damage modes of porous and fractured rock can provide the basis for efficient development of such reservoirs.

Key words: Xifeng Oilfield; Chang 8 oil formation; ultra-low permeability sandstone; pore; fracture; stress sensitivity; damage mode

基金项目:国家油气重大专项课题(2008ZX05001-002)

作者简介:廖纪佳(1983-),男(汉族),四川绵竹人,博士研究生,主要从事沉积学及储层地质学研究。

收稿日期:2011-07-16

岩石渗透率随围岩应力变化而发生改变的现象 称为岩石的应力敏感性[1]。近年来,特低渗储层开 发已经成为油气工业发展的热点,而特低渗储层应 力敏感性方面的问题是有效开发该类储层面临的重 点和难点。前人研究认为,低渗透储层具有较强的 渗透率应力敏感性[24]。有学者认为影响储层应力 敏感性的因素可分为内部因素(岩石组分、孔隙类 型、胶结方式、颗粒分选性与接触关系)和外部因素 (有效应力、孔隙流体类型及饱和度、储层温 度)^[78]。李传亮^[9]认为岩石的应力敏感程度只与 岩石硬度有关。当前裂缝应力敏感性研究中缺乏对 裂缝闭合规律、空间变化的定量研究,并且没有建立 不同储渗空间的应力敏感性损害模式。因此,笔者 依据铸体薄片、扫描电镜、X-衍射等微观分析手段对 鄂尔多斯盆地西峰油田长 8 油层进行岩石学、矿物 学及孔隙结构的研究,根据行业标准通过岩心流动 试验进行应力敏感性评价,运用可视化装置和毛管 流动孔隙结构仪对应力敏感试验中裂缝的闭合规律 及微观结构的变化进行定量表征,详细研究敏感性 损害机制,建立孔隙和裂缝的应力敏感性损害模式, 为高效开发该类油藏提供依据。

1 储集层特征

1.1 岩石组分和孔隙结构特征

西峰油田长 8 油层岩性以中—细粒长石岩屑砂 岩、岩屑长石砂岩和长石砂岩为主,颗粒分选中等, 中等结构成熟度,磨圆度以次棱状为主。石英、长石 含量平均为 28.8%、53.1%,岩屑含量为 8.1%,填 隙物含量为 10%。

储层孔隙空间以残余粒间孔、粒内溶孔为主 (图1(a)),其次是杂基孔、黏土矿物晶间微孔(图1 (b))。储层孔隙度平均为8%,渗透率平均为2.5× 10⁻³ µm²;平均喉道半径为0.45 µm;中值喉道半径



Fig. 1 Main reservoir space types of Chang 8 oil formation in Xifeng Oilfield

平均为0.36 µm;退汞效率为14.9%~48.5%,平均

为28.48%,认为西峰油田长8油层属于特低渗透 砂岩油藏。

1.2 裂缝特征

通过岩心、岩石薄片分析认为,研究区以斜交层 面的构造缝及成岩破裂缝(裂缝倾角为 80°~90°) 为主,未充填,利于提高储层的渗流能力。特低渗透 砂岩储层的成岩作用强烈,岩石致密,脆性程度高, 在强烈的成岩作用和后期的构造挤压作用下,近水 平成岩裂缝和与层面近垂直的高角度构造裂缝发 育^[10]。通过岩心观察发现构造缝易于识别,延伸较 远,裂缝面平直(图 2),个别裂缝面被成岩晚期碳酸 盐(主要为铁方解石)胶结物充填;成岩缝在镜下主 要以因压实破裂并溶蚀扩大的长石破裂缝为主,其 延伸较短,是成岩过程中形成的主要喉道之一。



(a)西122井, 2.0261~2.0263 km
 (b)西166井, 2.1017 km
 图 2 西峰油田长 8 油层垂直层面的构造裂缝
 Fig. 2 Tectonic fractures showing vertical stratification

of Chang 8 oil formation in Xifeng Oilfield

1.3 黏土矿物特征

根据 Stokes 试验沉降原理,利用沉降法抽提砂 岩中的黏土矿物,通过 X-射线衍射分析得知(表 1),长8 油层黏土矿物以伊利石和绿泥石为主,见 少量伊/蒙间层矿物,不含高岭石。伊利石含量平均 为49.8%;绿泥石含量平均为43.52%;伊/蒙间层 含量平均为6.68%。不同类型的黏土矿物产状差 异明显:绿泥石主要呈粒表衬垫附着于颗粒表面 (图3(b));伊利石呈桥接式产状分割储集空间(图 3(a)),其结果是减小孔隙空间,将原有较大孔喉改 造成大量的微细孔喉。

表1 西13-17 井区长8 油层黏土矿物 XRD 分析 Table 1 XRD analysis result of clay in Chang 8 oil formation in western 13-17 well district

序号	井号	黏土中各矿物的相对含量 w ₁ /%				黏土绝对
		伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	含量 w2/%
1	西13	53.6	0	32.6	13.8	13.0
2	西13	66.3	0	26.7	7.0	8.5
3	西17	49.4	0	50.2	0.4	6.0
4	西17	38.4	0	57.6	4.0	11.0
5	西17	41.3	0	50.5	8.2	8.5
¥	均值	49.8	0	43.52	6. 68	9.4



(a) 桥接状伊利石, 董66-63井 (b) 粒表衬垫绿泥石, 西22井

图 3 西峰油田长 8 油层黏土矿物微结构 Fig. 3 Clay's microstructure of Chang 8 oil formation in Xifeng Oilfield

2 试验评价

2.1 试验方法

储层岩石的应力敏感性与单井产能和储层最终 采收率密切相关。本研究采用岩心驱替试验评价岩 石的应力敏感性,试验标准为 SY/T5358-2002。试 验样品为圆柱状岩心,样品规格为 Ø2.5 cm×5 cm, 孔隙型岩心两个,裂缝型岩心4个(均为人工造 缝)。

常规应力敏感性评价的目的主要是考察岩心渗 流能力在有效应力变化情况下的变化规律。根据西 峰油田长8油层的孔隙、裂缝发育情况和注采压差, 分别在1、2.5、5、7.5、10、15 和 20 MPa 有效应力下 测定孔隙型岩样和裂缝型岩样的气体和液测渗透率 变化情况。

2.2 孔隙应力敏感性分析

长8油层孔隙型岩样渗透率随有效应力变化敏 感性程度较弱。董66-63 井和西 232 井孔隙型岩样 的气测渗透率分别为 1.31 × 10-3 和 0.846 × 10-3 μm²,随着有效应力增加,渗透率均呈下降趋势。有 效应力增加的早期(2.5~10 MPa),渗透率下降幅 度相对较大,而在有效应力增加的后期(10~20 MPa),渗透率下降幅度相对较小;当有效应力增加 到一定程度时渗透率趋于不变,此时有效应力的变 化对渗透率的影响已趋于极限。有效应力由 2.5 增 加至 20 MPa 时,岩石渗透率分别下降 33.6% 和 27.2%,属于中等偏弱到弱应力敏感性。有效应力 增加至5~10 MPa 过程为渗透率下降的主要过程。 随着有效应力的降低,岩样渗透率又逐渐增加,但是 在相同有效应力下卸载时的岩样渗透率小于加载时 的渗透率,表现出较明显的渗透率滞后效应。如有 效应力由 20 卸载至初始的 2.5 MPa 后, 渗透率恢复 程度高,分别为87.8%和99.3%(图4)。

低渗透致密岩石发生渗透率应力敏感的根本原

因在于应力状态的改变导致骨架颗粒与孔喉结构间 的原始关系发生变化,进而引起渗流通道的变化。 岩石的孔隙结构包括孔隙和喉道两部分、由孔、喉变 形理论可知,致密岩石受压时,首先被压缩的是喉道 而并非孔隙[12],因此岩石的渗透率主要受喉道制 约。特低渗透率的砂岩也具类似性质,当有效应力 增加时,变化较为敏感的是相对较小的喉道,小喉道 半径所占的比例越大,喉道减小或闭合的数量越多, 因此渗透率下降的幅度越大。随着有效应力的进一 步加大,骨架颗粒不断被压实,未闭合喉道的数量逐 渐减少,且多数不易闭合,因此渗透率降低的趋势会 逐渐减小。

· 29 ·





对比董 66-63 井、西 232 井试验岩样的微观特 征发现,两者自生绿泥石含量和自生石英含量偏高。 董 66-63 并岩样绿泥石含量为 4.2%,其产状主要为 包裹长石等易溶组分而形成铸模孔,抗压强度降低; 自生石英含量为 7.9%。西 232 井绿泥石含量 6.3%,其产状主要为垂直于颗粒表面呈集合体生长 的绿泥石包膜;自生石英含量10.1%。相比而言、 西 232 井岩样的渗透率在有效应力增加的过程中减 小程度小于董 66-63 井岩样,且卸载有效应力后西 232 井岩样的渗透率恢复程度高于董 66-63 井岩样 的。综合分析岩样的微观差异和试验数据,认为西 峰油田长8油层孔隙型岩石应力敏感损害率低、渗 透率恢复高的主要原因为:①垂直颗粒壁向中心生 长的绿泥石包膜增强了颗粒的抗压性(图 5(a)、 (b))^[13-17],降低喉道缩小的程度,对喉道有一定的 保护作用,如果在颗粒接触处没有绿泥石,则压实可 能造成颗粒的塑性形变[14];②在孔隙衬里绿泥石不 发育的地方局部分布的石英加大(图5(d))增加了 骨架颗粒的强度:③在绿泥石发育的孔隙中,自形程 度高、相对较孔隙衬里绿泥石晚形成的石英雏晶 (图5(c))发育于喉道处,当有效应力增加时,此类 石英可作为支点保护喉道。



图 5 长 8 油层喉道表面特征

Fig. 5 Surface features of throats in Chang 8 oil formation

2.3 裂缝应力敏感性分析

裂缝具有极强应力敏感性。由于难以通过钻井 取心的方式获取天然裂缝岩样,对西 210 井和董 84-65 井各 2 块岩样通过人工造缝来进行应力敏感性 试验。西 210 井和董 84-65 井模拟裂缝的气测渗透 率分别为 388×10⁻³和 153×10⁻³ µm²,随有效应力增 加,裂缝渗透率快速下降,在有效应力由 2.5 增加至 20 MPa 时,两裂缝岩样的气测渗透率分别下降 86.6%和 98.9%,发生极强应力敏感性损害(图 6 (c)、(d))。西 210 井和董 84-65 井用于液测裂缝



应力敏感性试验岩样的渗透率分别为 481×10⁻³和 319×10⁻³ µm²,随有效应力增加,裂缝渗透率迅速下

降;在有效应力增至 20 MPa 时渗透率下降幅度为 99.8%和98.8%,几乎不具备裂缝渗流能力(图 6 (a)、(b))。对比气测和液测结果,裂缝渗透率在有 效应力增加至5~10 MPa 过程中降低幅度最大,并 且在卸载后裂缝的渗透率恢复率不超过 27.8%。 这说明长8油层裂缝比孔隙的应力敏感程度要强得 多,并且损害后极难恢复。

3 裂缝闭合规律及裂缝宽度变化

裂缝的应力敏感性受裂缝在有效应力增加过程 中的闭合规律和闭合过程中裂缝的空间结构演化的 控制。利用特殊设计的可视化光学测量系统和毛管 流动孔隙结构仪进行裂缝闭合规律和孔隙空间结构 演化研究,以深入认识该油层的裂缝应力敏感性效 应。

3.1 裂缝可视化观测

裂缝可视化观测系统是一种直观、实用、简便的 室内试验研究方法,主要利用改进的体视显微镜直 观地观察有效应力变化下裂缝整体宽度以及每一个 微凸体的动态变化。

试验步骤为选取有效应力点,分别为1、2.5、5、 7.5、10、15 MPa,在每个应力点记录裂缝变化特征。 由于天然裂缝难以钻取到,本试验岩心的裂缝均为 人造裂缝,试验结果见图7。





图 7 为采用可视化测量系统直接观察到的裂缝 闭合过程。裂缝表面实际上是由不同尺寸的微凸体 构成,在裂缝的闭合过程中微凸体具有支撑作用。 其中A,B,C,D分别为裂缝不同位置的4个微凸体, 从测量结果可以看出,有效应力从1 MPa 增加到5 ~7.5 MPa 的过程中,裂缝发生明显闭合,裂缝机械 宽度明显变窄,微凸体先后接触(图7(a)~(d)), 相应的裂缝渗透率大幅下降。在有效应力大于10 MPa 以后,由于裂缝两表面微凸体形成的接触点数 量增多,支撑作用增强,裂缝宽度不再发生明显变 化,但仍由于微凸体本身的弹塑性变形(图7(e)), 裂缝的渗透率有一定的降低。随着有效应力的进一 步增加(10~15 MPa),不同部位的微凸体基本完全 接触另一裂缝面(图7(f))。这表明随着有效应力 的逐渐增大,裂缝空间逐渐被分割成多个相互连通 程度不同的次级裂缝空间。在有效应力增加过程 中,裂缝表面结构遭受破坏以及裂缝的力学性能发 生了变化,导致卸载后裂缝的宽度和渗透率恢复率 低。

3.2 裂缝宽度变化规律

当有效应力增加时,裂缝渗透率不断降低,本质 上是由于裂缝发生闭合,即宽度变窄。因此,研究裂 缝宽度的变化是探索裂缝应力敏感性的重点。

由于裂缝表面通常有许多大小不同的微凸体, 这些微凸体将裂缝内部空间划为一系列大小不同的 毛管,因而可将整条裂缝视为由多个大小不一的毛 管组成的毛管束^[16],即裂缝宽度的变化实际上体现 为毛管束直径分布的变化。本次研究裂缝宽度的变 化主要采用毛管流动孔隙结构仪(Capillary flow porometer,以下简称 CFP),该仪器是以水相作为非润 湿相,根据气、水两相流动原理,可对同一岩心样品 的孔径分布进行多次测试。因此,可利用 CFP 测定 裂缝内部的毛管直径分布情况,进而得到裂缝的机 械宽度分布^[11]。

试验步骤为选取有效应力点,分别为2.5、5.0、 7.5、10.0、15.0 MPa,利用 CFP 测量在不同有效应 力下裂缝机械宽度的分布规律。

图 8 为采用 CFP 测定的裂缝宽度变化规律。 研究表明:当有效应力为 2.5 MPa 时,裂缝宽度主要 分布在 36~46 μm;有效应力为 5 MPa 时,裂缝宽度 主要分布在 26~36 μm;有效应力为 7.5 MPa 时,裂 缝宽度主要分布在 16~30 μm;有效应力为 10 MPa 时,裂缝宽度主要分布在 18~26 μm;有效应力为 15 MPa 时,裂缝宽度主要分布在 12~22 μm。

随着有效应力的增大,裂缝宽度呈减小趋势,且 减小趋势逐渐减弱。在应力加载的初期和中期 (2.5~7.5 MPa),裂缝闭合速度较快,说明大裂缝 不断闭合形成小裂缝;在应力加载的后期(7.5~15 MPa),随着裂缝中相互接触的微凸体数量越来越 多,裂缝闭合的阻力越来越大,小裂缝闭合形成更小 的裂缝难度增大,在应力加载的后期裂缝机械宽度 的变化不太明显。但是,随着有效应力的不断增加, 相互接触后的微凸起会发生一定的弹塑性变形,所 以裂缝仍会发生一定程度的闭合。有效应力增加的 初期和中期,渗透率迅速下降;有效应力增加的后 期,渗透率下降幅度明显减小,且渗透率趋于稳定。



different effective stresses

4 应力敏感性损害模式的建立

根据岩石的变形理论¹⁹,岩石在载荷的作用下 首先发生的物理现象就是变形。岩石的形变类型主 要有弹性变形、塑性变形以及弹塑性变形3种。其 中弹性变形可逆,而塑性变形以及弹塑性变形3种。其 中弹性变形可逆,而塑性变形以及弹塑性变形不可 逆。根据孔喉的变形特征,岩石在受到有效应力作 用时岩石的喉道开始闭合。随着有效应力的增加, 岩石逐渐压实,孔隙体积收缩。在卸载过程中,随着 有效应力的降低,受到压缩的喉道不能迅速恢复,最 终也不能恢复到原来的孔喉尺寸。加载、卸载过程 导致岩心渗透率的降低不可恢复,对储层造成的伤 害也不可修复^[20]。因此,有必要建立研究区的应力 敏感性损害模式,为长 8 油层的高效开发提供依据。

4.1 孔隙的应力敏感性损害模式

基于试验结果及岩样的微观特征分析,笔者认 为研究区孔隙的应力敏感性主要受控于:①广泛发 育的孔隙衬里绿泥石;②在孔隙衬里绿泥石不发育 的地方局部分布的石英加大;③在绿泥石发育的孔 隙中,自形程度高、相对较孔隙衬里绿泥石晚形成的 石英雏晶。当有效应力增加时喉道首先受到应力作 用,发育于喉道处的绿泥石薄膜、石英加大边及石英 雏晶发生弹性形变,这些矿物增强了岩石的抗压性, 使得大部分喉道在有效应力减小后能够恢复,而缺 少此类矿物的喉道处则发生闭合(图9)。



4.2 裂缝的应力敏感性损害模式

通过以上裂缝的应力敏感性试验和裂缝闭合规 律及裂缝宽度的研究,建立裂缝的应力敏感性损害 模式^[21](图10)。裂缝的表面由不同粗糙程度和大 小的微凸体构成,当有效应力增加时裂缝表面的微 凸体发生弹性变形,微凸体间的间距分布也随之改 变,进而表现为渗透率下降;一旦微凸体发生塑性变 形,即使卸载有效应力后,渗透率恢复也极低。



Fig. 10 Damage mode of fracture's stress sensitivity in Chang 8 oil formation

5 结 论

(1)西峰油田长8油层是以残余粒间孔、粒内 溶孔为主,发育裂缝的特低渗透砂岩油藏。黏土矿 物以伊利石和绿泥石为主,主要呈粒表衬垫和桥接 式产状产出。

(2)长8油层具有较弱的孔隙应力敏感性和极强的裂缝应力敏感性。

(3)广泛发育的孔隙衬里绿泥石增强了颗粒的 抗压性,对喉道有一定的保护作用;局部分布的石英 加大增加了骨架颗粒的强度;发育于喉道处的自形程 度高、相对孔隙衬里绿泥石晚形成的石英雏晶作为支 点,保护喉道。这3种因素是长8油层孔隙型岩石应 力敏感损害率低、渗透率恢复高的主要原因。 (4)裂缝宽度的变化实际上体现为毛管束直径 分布的变化,表面的微凸起在有效应力作用下发生 弹塑性形变是裂缝应力敏感性损害极强、裂缝宽度 和渗透率恢复率低的主要原因。

参考文献:

- [1] 裘亦楠.油气储层评价技术[M].北京:石油工业出版社,2002:52-57.
- [2] TERZAGHI K. Theoretical soilmechanics [M]. New-York: John Wiley & Sons, 1943.
- [3] FATT L, DAVIS D H. Reduction in permeability with overburden pressure[J]. JPT, 1952(16):34-41.
- [4] 贾文瑞,李福垲,肖敬修,等.低渗透油田开发部署
 中几个问题的研究[J].石油勘探与开发,1995,22
 (4):47-51.

JIA Wen-rui, LI Fu-kai, XIAO Jing-xiu, et al. A study on some issues of development disposition of a low permeability oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995,22(4):47-51.

[5] 伍向阳,陈祖安,孙德明,等.静水压力下砂岩孔隙 度变化实验研究[J].地球物理学报,1995,38(增刊 1):275-280.

WU Xiang-yang, CHEN Zu-an, SUN De-ming, et al. An experimental study of changes of porosity of sandstones with pressures [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38 (sup I):275-280.

- [6] 王厉强,刘慧卿,甄思广,等.低渗透储层应力敏感 性定量解释研究[J].石油学报,2009,30(1):96-99.
 WANG Li-qiang, LIU Hui-qing, ZHEN Si-guang, et al. Quantitative research on stress sensitivity of low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(1): 96-99.
- [7] 罗瑞兰.对"低渗透储层不存在强应力敏感"观点的质疑[J].石油钻采工艺,2006,28(2):78-80.
 LUO Rui-lan. Queries to the viewpoint low permeability reservoirs have not the characteristics of strong stress sensitivity [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(2):78-80.
- [8] 刘晓旭,胡勇,朱斌,等.储层应力敏感性影响因素研究[J].特种油气藏,2006,13(3):18-21. LIU Xiao-xu, HU Yong, ZHU Bin, et al. Influential factor analysis of reservoir stress sensitivity[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2006,13(3):18-21.
- [9] 李传亮. 储层岩石应力敏感性认识上的误区:回应刘 晓旭博士[J]. 特种油气藏, 2008,15(3):26-28.
 LI Chuan-liang. A misunderstanding in reservoir rock stress sensitivity: in reply to Dr Liu Xiao-xu[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2008,15(3):26-28.

- [10] 曾联波,史成恩,王永康,等.鄂尔多斯盆地特低渗透砂岩储层裂缝压力敏感性及其开发意义[J].中国工程科学,2007,11(9):35-38.
 ZENG Lian-bo, SHI cheng-en, WANG Yong-kang, et al. The pressure sensitivity of fractures and its development significance for extra low-permeability sandstone reservoirs in Ordos Basin [J]. Engineering Science, 2007,11(9):35-38.
- [11] 赵峰, 唐洪明, 孟英峰, 等. 低渗透致密气藏水基欠 平衡钻井损害评价技术[J]. 石油勘探与开发, 2009,36(1):113-119.

ZHAO Feng, TANG Hong-ming, MENG Ying-feng, et al. Damage evaluation for water-based underbalanced drilling in low-permeability and tight sandstone gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(1):113-119.

- [12] 阮敏,王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石 油学报, 2002,23(3):73-76.
 RUAN Min, WANG Lian-gang. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002,23(3):73-76.
- [13] 黄思静,谢连文,张萌,等.中国三叠系陆相砂岩中 自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系
 [J].成都理工大学学报:自然科学版,2004,31
 (3):273-281.

HUANG Si-jing, XIE Lian-wen, ZHANG Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004,31(3):273-281.

- [14] 朱平,黄思静,李德敏,等.粘土矿物绿泥石对碎屑 储集岩孔隙的保护[J].成都理工大学学报:自然科 学版,2004,31(2):153-156.
 ZHU Ping, HUANG Si-jing, LI De-min, et al. Effect and protection of chlorite on clastic reservoir rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004,31(2):153-156.
- [15] 王新民, 郭彦如, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 长 8 段相对高孔渗砂岩储集层的控制因素分析[J].

石油勘探与开发, 2005, 32(2): 35-38.

WANC Xin-min, GUO Yan-ru, FU Jin-hua, et al. Control factors for forming higher porosity and permeability sandstone reservoirs in Chang 8 member of Yanchang formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(2):35-38.

· 33 ·

- [16] 谢武仁,杨威,赵杏媛,等.川中地区须家河组绿泥 石对储集层物性的影响[J].石油勘探与开发, 2010,37(6):674-679.
 XIE Wu-ren, YANG Wei, ZHAO Xing-yuan, et al. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiahe formation in the central part of Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37 (6):674-679.
- [17] 吕正祥,刘四兵.川西须家河组超致密砂岩成岩作 用与相对优质储层形成机制[J].岩石学报,2009, 25(10):2373-2383.

LV Zheng-xiang, LIU Si-bing. Utra-tight sandstone diagenesis and mechanism for the formation of relatively high-quality reservoir of Xujiahe group in western Sichuan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (10); 2373-2383.

- [18] 袁士义,宋新民,冉启全.裂缝性油藏开发技术
 [M].北京:石油工业出版社,2004.
- [19] 蔡美峰,岩石力学与工程[M].北京:科学出版社, 2002:52-57.
- [20] 孙玉学,孔翠龙,王瑛琪. 低渗透砂岩储层应力敏感 性研究[J]. 科学技术与工程,2009,9(15):4448-4450.

SUN Yu-xue, KONG Cui-long, WANG Ying-qi. Stress sensitivity of low-permeability sandstone reservoir [J]. Science Technology and Engineerin, 2009, 9 (15): 4448-4450.

[21] 胡泽根,王永清,陈晖.砂岩储层裂缝宽度预测新方法[J].石油工业计算机应用,2008,60(4):9-12.
HU Ze-gen, WANG Yong-qing, CHEN Hui. New method for prediction of width of fractures in sandstone reservoirs[J]. Computer Applications of Ptroleum, 2008,60 (4):9-12.

(编辑 徐会永)