

文章编号:0253-9985(2012)06-0923-09

低渗砂岩储层岩石学特征与应力敏感性耦合关系 ——以鄂尔多斯盆地苏里格-吉尔地区下石盒子组八段下亚段为例

何江¹, 付永雷², 沈桂川³, 朱晓燕³, 伍启林¹(1. 西南石油大学, 四川 成都 610500; 2. 中国石油 青海油田分公司 采油一厂, 青海 花土沟 816400;
3. 中国石油 长庆油田分公司, 陕西 西安 710018)

摘要:低渗油气藏主要采取衰竭式开发, 地层压力得不到补充, 储层的应力敏感性问题显得尤为突出。以鄂尔多斯盆地苏里格-吉尔地区下石盒子组八段下亚段为例, 依靠详细的井下地质调查、岩心精细描述、系统取样配套测试及室内对比分析等方法, 对岩石学特征与应力敏感性耦合关系进行精细解剖, 发现目的层位岩石类型主要为岩屑石英砂岩, 其次为硅质石英砂岩以及少量岩屑砂岩。样品采用 CMS-400 型高压孔渗分析仪测试, 初始渗透率普遍偏低, 应力敏感性中等偏强, 两者呈明显的正相关关系。岩石组分中, 柔性岩屑和基质硬度及稳定性低, 在外力作用下易变形、破碎和位移, 其含量与应力敏感性呈正相关关系。碎屑石英、刚性岩屑及石英、铁绿泥石等胶结物硬度和稳定性高, 在外力作用下变形弱, 其含量与应力敏感性呈负相关关系。不同岩类因岩石学特征差异间接导致应力敏感性不同, 在开发过程中可采用不同级别的生产压差求得油田的最优产能。

关键词:岩石学特征; 应力敏感性; 耦合关系; 低渗储层; 苏里格气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Coupling relations between the petrologic characteristics and stress-sensitiveness in low-permeability sandstone reservoirs: an example from the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area, Ordos Basin

He Jiang¹, Fu Yonglei², Shen Guichuan³, Zhu Xiaoyan³ and Wu Qilin¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. No. 1 Oil Production Plant, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Huatugou, Qinghai 816400, China; 3. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Low-permeability reservoirs are usually developed through natural depletion and the loss of formation pressure is not restored, causing stress sensitivity of reservoirs. We chose the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area, the Ordos Basin as a case study. Through downhole geological survey, core observation, systematic sampling and testing, and lab correlation and analysis, we studied the coupling relation between the petrologic characteristics and stress-sensitivity and found out that the rock types of the layers of interest are mainly lithic quartz sandstone, followed by siliceous quartz sandstone and small amount of lithic sandstone. The samples were tested with model CMS-400 high-pressure porosity and permeability analyzer. The initial permeability was low and stress-sensitivity was medium to strong and the two presented an obvious positive correlation. Among the rock components, the soft debris and matrix that have low hardness and stability are easily deformed, crushed and displaced under exogenic action. Their contents have positive correlations with the stress-sensitivity. Detrital quartz, rigid debris and cements such as quartz and daphnite have higher hardness and stability and remain stable under exogenic action. And their contents have negative correlations with stress-sensitivity. Different rocks have various stress-sensitivities because of their different petrologic characteristics. During the development of oilfields, we suggest to optimize deliverability by using production pressure differentials at different levels.

收稿日期: 2012-07-30; 修订日期: 2012-10-31。

第一作者简介: 何江(1981—), 男, 讲师, 沉积岩石学和储层地质学。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05001-005); 四川省重点学科建设项目(SZD0414)。

Key words: petrologic characteristics, stress-sensitivity, coupling relationship, low-permeability reservoir, Sulige gasfield, Ordos Basin

近年来,低渗储层开发已成为生产与科研热点,许多学者针对不同类型储层的应力敏感性作了详细研究^[1-8],取得了大量重要认识,普遍认为油气藏未开发时,岩石应力受骨架结构支撑力、孔隙流体压力、上覆岩层压力三者影响,处于稳定平衡状态^[9-19]。油气藏开发后,上覆岩层压力不变,而储集体中油水等流体产出,造成孔隙流体压力明显下降,破坏了原有应力平衡,岩石骨架结构受力增强导致各种变化,产生应力敏感性间接影响储层物性参数及各种开发特征。特别是致密油气藏主要采用衰竭式开发,地层压力得不到补充,储层的应力敏感性显得尤其突出。前人的研究工作多侧重于评价应力敏感性与间接变量储层物性参数、开发效果的相关性,缺少对应力敏感性与本质变量岩石学特征(即岩石骨架结构)的耦合关系进行精细解剖。笔者以鄂尔多斯盆地苏里格-吉尔地区下石盒子组八段下亚段(盒₈^下亚段)为例,在岩心精细观察、描述的基础上,针对不同岩石类型进行系统取样,同一样品栓作铸体薄片、渗透率、岩石应力敏感性测试,解剖了岩石学特征与应力敏感性耦合关系。

苏里格-吉尔地区位于苏里格气田区中北部,构造上位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡西侧,西接天环坳陷,东邻乌审旗地区^[20](图1)。区内二叠系三分,下统细分为太原组与山西组,中统为下石盒子组 and 上石盒子组,上统为石千峰组。中统下石盒子组与下伏山西组呈假整合接触。主要沉积了一套滨浅湖和河流-三角洲相的砂、泥岩不等厚互层的岩性组合,自下而上分为盒₈^下、盒₈^上、盒₇、盒₆和盒₅亚段。盒₈^下亚段低渗砂岩是区内最为重要的储产层,即本次研究重点。

1 储层岩石学特征

苏里格-吉尔地区下石盒子组盒₈^下亚段低渗砂岩储层中长石绝大多数已发生次生溶解,仅从溶模孔形态可以辨别少量(图2a)。砂岩类型主要为岩屑石英砂岩,其次为含硅质石英砂岩、少量岩屑砂岩,粒度以中-粗粒为主,多含石英质细砾石。此外,垂向剖面结构兼有正粒序和逆粒序两种,主要为滨、浅湖滩、坝相砂岩沉积^[13]。

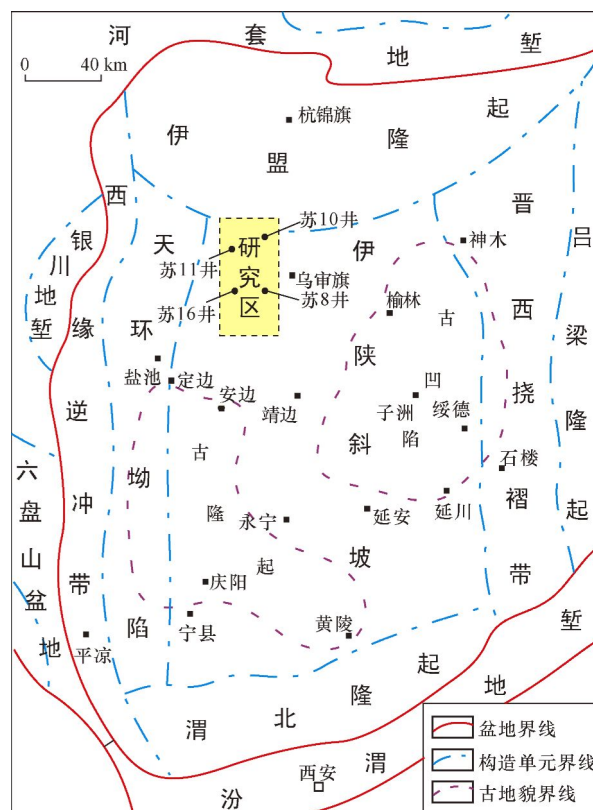


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分

Fig. 1 Structure division of Ordos Basin

1.1 石英砂岩

石英砂岩类以浅灰白色中-粗粒含硅质石英砂岩(硅质胶结物10%~15%)为主(图2b),未见纯石英砂岩,分选好;结构组分中,碎屑石英含量90%~93%,深水硅质岩屑、变质石英岩屑、白云母石英片岩屑、燧石屑、岩浆岩屑和石英片岩等刚性岩屑含量3%~7%,电气石、石榴子石等重矿物少见;千枚岩屑和白云母屑等柔性岩屑少或不含。特别值得注意的是,石英骨架颗粒的自生加大可达2~3级(加大边含量12%~20%),加大后残余粒间孔被铁绿泥石、自生石英、高岭石、铁绿泥石和/或方解石一期或多期不同程度的充填或半充填(图2c),孔隙类型以高岭石晶间孔或充填后残余粒间孔为主。

1.2 岩屑石英砂岩

浅灰白色中-细粒岩屑石英砂岩(图2d)为区内主要岩石类型,分选中等,结构成分中有75%~

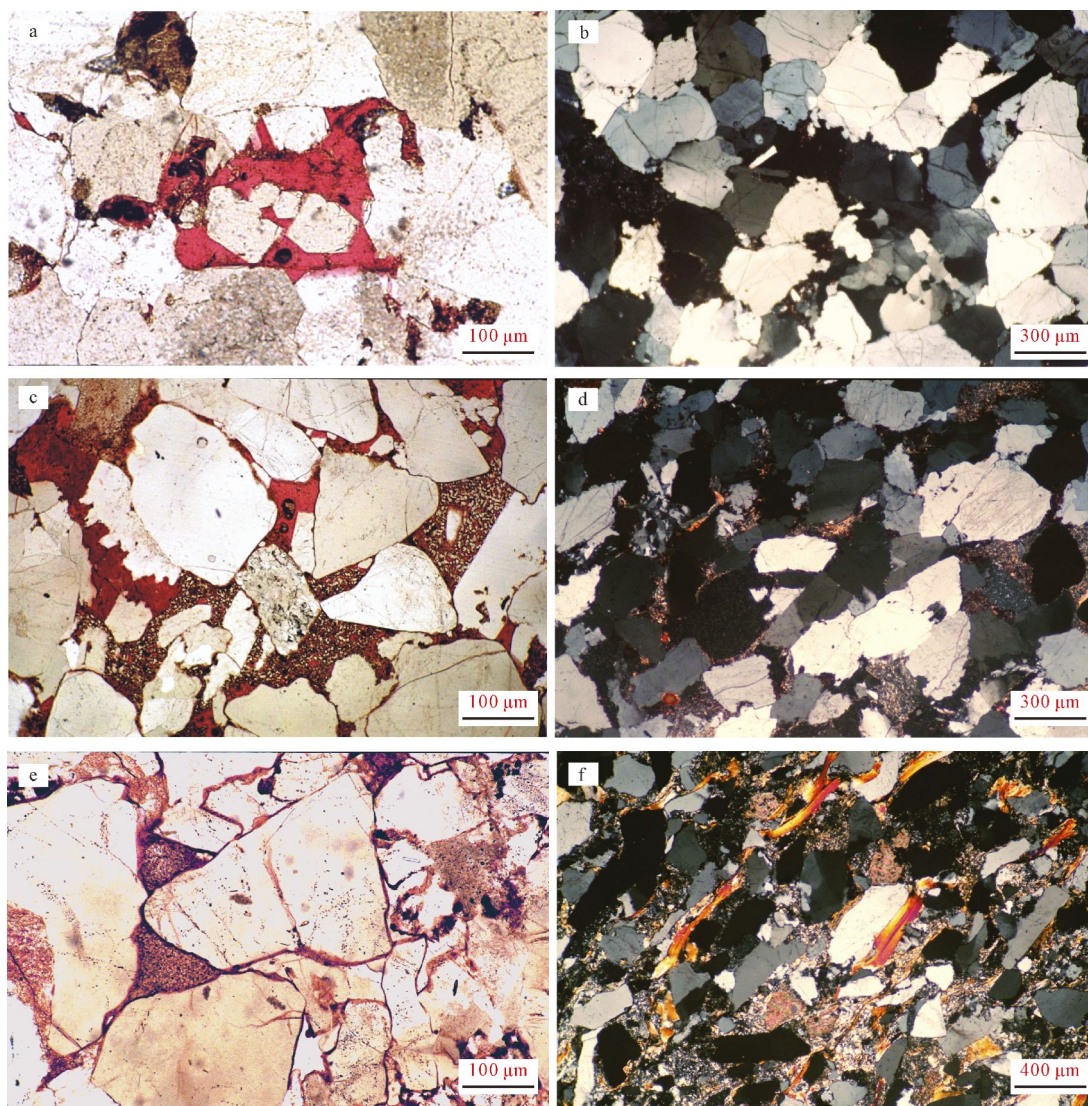


图2 苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段低渗砂岩储层岩石类型及特征

Fig. 2 Rock types and features of the low-permeability reservoirs in the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area

a. 自形长石,溶模孔中仅被自形石英半充填,乌22-7井,单偏光,铸体片;b. 粗-中粒石英砂岩,碎屑石英93%,自生加大3级,加大边多焊接,残余粒间孔隙又被粉晶级的它形和自形石英充填或半充填,苏16井,正交偏光,铸体片;c. 碎屑石英自生加大1级后有弱(薄)的铁绿泥石衬边胶结,残余粒间孔有的被自形、半自形石英半充填,有的被自形、半自形石英和高岭石半充填,照片左边部分残余粒间孔又有方解石(深红色部分)充填,苏16井,单偏光、铸体片;d. 中粒岩屑石英砂岩,碎屑石英85%,自生加大1~3级,部分加大边焊接,12%的岩屑,照片中见变质石英岩屑、深水硅质岩屑和压实变形的千枚岩屑,局部有少量基质,苏11井,正交偏光,铸体片;e. 含高岭石及铁绿泥石岩屑石英砂岩,碎屑石英自生加大1~2级后又有铁绿泥石衬边胶结,若干残余粒间孔隙均被晶径0.015 mm左右的高岭石半充填,晶间微孔发育,苏16井,单偏光,铸体片;f. 含泥质粗粉砂-细粒岩屑砂岩,碎屑石英60%,刚性岩屑2%,柔性岩屑36%,碎屑定向分布,分选差,苏10井,正交偏光,铸体片

88%的碎屑石英,5%~15%的刚性岩屑,9%~14%柔性岩屑。柔性岩屑在压实过程中易形成假基质,其类型主要为千枚岩屑,次为黑、白云母屑,极少量煤屑、泥岩屑和浅变质泥质细粉砂岩屑;此外,少数薄片的骨架颗粒间可见2%~6%的水云母、绢云母基质;石英自生加大0~2级(加大量

3%~10%);长石溶模孔隙和残余粒间孔隙充填情况同含硅质石英砂岩。

根据高岭石、硅质、钙质、含铁绿泥石等胶结物含量的差异,岩屑石英砂岩可细分为含高岭石岩屑石英砂岩、含硅质岩屑石英砂岩、含高岭石及铁绿泥石岩屑石英砂岩(图2e)、含硅质及高岭石岩

屑石英砂岩、(含)钙质岩屑石英砂岩、含硅质(含)钙质岩屑石英砂岩、含铁绿泥石岩屑石英砂岩。

1.3 岩屑砂岩

岩屑砂岩(图2f)大多为特低渗储层,区内局部可见,以(浅)绿灰色为主,棱角状-半棱角状。结构组分中一般含有4%~8%的刚性岩屑,20%~32%的柔性岩屑,少数薄片见3%~6%水云母、绢云母基质;石英自生加大0~2级(加大量4%~6%),长石溶模孔隙和残余粒间孔隙充填情况同含硅质石英砂岩。同样根据高岭石、硅质、钙质、含铁绿泥石等胶结物含量的差异,可细分为含高岭石岩屑砂岩、含硅质岩屑砂岩等。

2 应力敏感性实验

苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段碎屑岩储集层为典型的低孔、低渗砂岩,受物源、沉积环境和成岩后生作用变化影响,砂岩组分、结构和储集性能变化很大。样品埋深一般在3150~3400 m,地层压力23.06~28.81 MPa,平均为25.17 MPa。气藏开发过程中,孔隙流体压力变低导致上覆岩层压力大于岩石骨架结构支撑力形成对岩石骨架结构的净围压,其变化会影响岩石的渗流能力,存在潜在的应力敏感性损害。

本次在区内苏11井、苏16井及苏10井盒₈^下亚段分别选取了58个不同岩性的实验样品,其中石英砂岩类7个、岩屑砂岩类15个、岩屑石英砂岩类36个,样品规格为2.5 cm×5 cm,同一样品栓作铸体薄片、渗透率、岩石应力敏感性测试。应力敏感性实验分析设备采用CMS-400型高压孔渗分

析仪,参照中国石油天然气行业标准SY/T5358—2002设计实验,模拟因孔隙流体压力变化产生的净围压变化范围为2~40 MPa。首先给样品设定初始净围压为2 MPa,测定初始渗透率值(K_0),随后对每个岩样先施加由小到大的8种净围压(2,4,7,10,15,20,30和40 MPa),评价应力变化导致渗透率损害程度,后再施加由大到小的同样8种回返压力,以评价岩石的滞回效应即渗透率恢复情况。实验过程中,在净围压等于或低于20 MPa时每个压力刻度点时稳定约30 min,高于20 MPa时稳定时间延长至1 h,测定样品在该净围压下的物性参数(图3)。

实验结果表明,在净围压为2 MPa时,各样品初始渗透率值在 $0.00232 \times 10^{-3} \sim 3.390 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值 $0.295 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,整体属于低渗范围。当净围压由2 MPa升至40 MPa时,各样品渗透率(K_{40})下降至初始渗透率的32.9%~1.7%,平均为初始渗透率的9.64%,渗透率损害较大;当净围压从40 MPa降压至2 MPa时,压力回返过程中某净围压点所测得渗透率均低于升压过程同一净围压点所测得渗透率,渗透率损害的恢复出现滞后现象,根本原因在于升压过程中储层的孔喉结构发生了变化,产生了永久性的、不可逆的储层伤害。所测各样品的渗透率净围压恢复至2 MPa时渗透率(K_2)仅恢复初始渗透率的79.9%~30%,平均为初始渗透率的63.48%,总体上储层岩石的应力敏感性中等偏强。此外,初始渗透率值(K_0)与加载围压至40 MPa时相应的渗透率/初始渗透率值(K_{40}/K_0)、卸载围压至2 MPa时相应的渗透率/初始渗透率值(K_2/K_0)均呈明显的正相关(图4),亦即说,越是低渗致密的储层岩石应力敏感性越强。

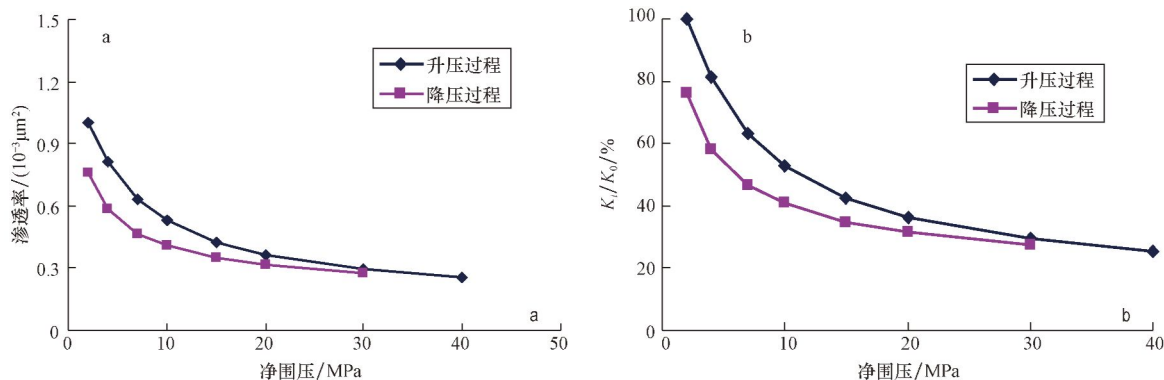


图3 苏里格-吉尔地区苏16井1-15/132样品应力敏感性实验曲线

Fig. 3 Curves showing the stress-sensitivity of sample 1-15/132 from Well Su-16 in Sulige-Jier area

(K_0 为初始渗透率,取 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i 为围压为 i MPa 时相应的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。)

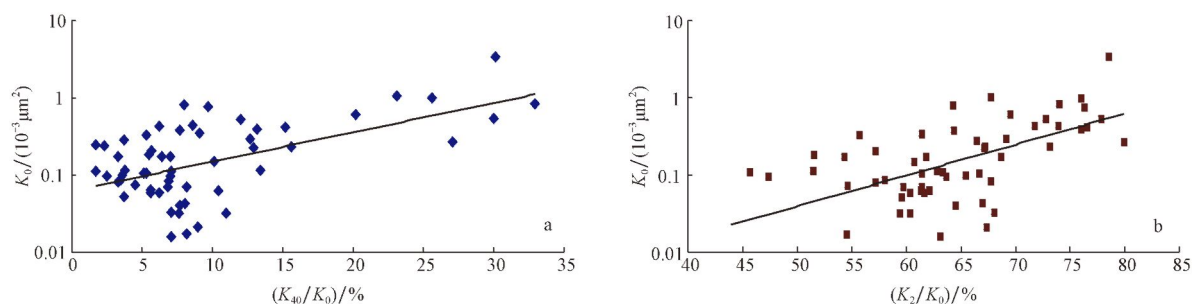


图4 苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段各样品初始渗透率与应力敏感性相关关系

Fig. 4 Correlation of initial permeability and stress-sensitivity of the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area

(K_0 为初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_2 为卸载围压 2 MPa 时相应的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{40} 为加载围压至 40 MPa 时相应的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。)

3 低渗砂岩储层岩石学特征与应力敏感性耦合关系

基于区域地质背景及岩石学特征的分析,结合应力敏感性实验结果,明确了目的区块低渗砂岩储层岩石学特征与应力敏感性的耦合关系。

3.1 骨架颗粒成分与应力敏感性耦合关系

区内岩石骨架颗粒成分中长石均已发生次生

溶解(图 2a),主要为碎屑石英和岩屑。碎屑石英在盒₈^下亚段中含量 55% ~ 93%,主要来自深变质的石英岩和石英片岩类。而岩屑成分较为复杂,一般按岩屑的强度可划分为刚性岩屑和柔性岩屑两类。①刚性岩屑在石英砂岩中含量 3% ~ 7%,岩屑石英砂岩中含量 5% ~ 15%,岩屑砂岩中含量 2% ~ 32%,个别达 46%。主要有变质石英岩(图 5a)、深水硅质岩屑(图 5b)、燧石屑、岩浆岩屑、白云母石英片岩屑。②柔性岩屑在石英砂岩中含量 0 ~ 3%,在岩屑石英砂岩中含量 1% ~ 15%,在岩屑砂岩中含

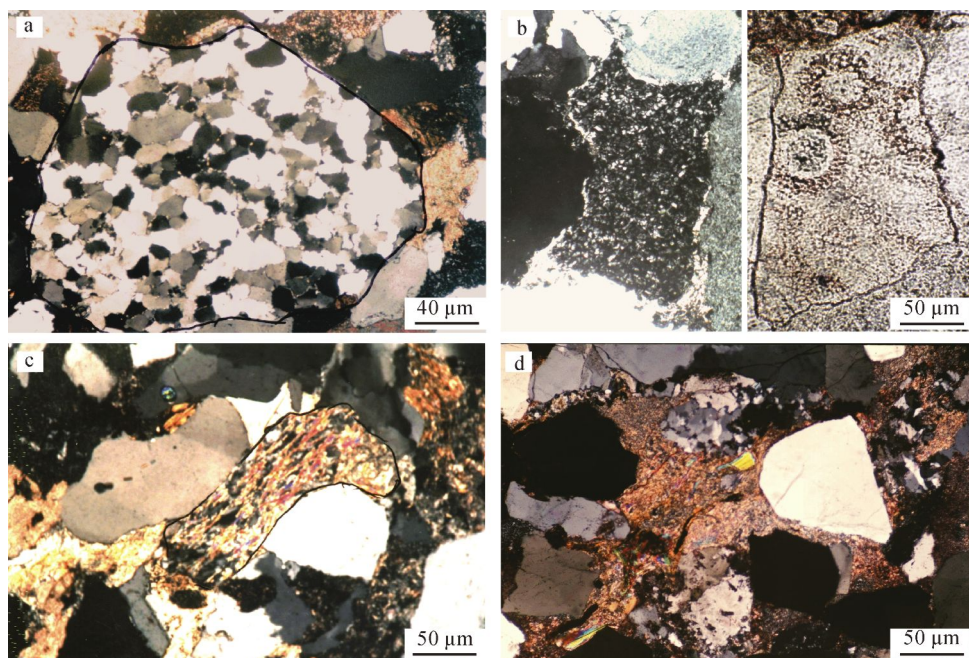


图5 苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段低渗砂岩储层岩屑类型

Fig. 5 Lithic types of the low-permeability sandstone reservoirs in lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area

a. 变质石英岩屑, 陕 232 井, 正交偏光, 铸体片; b(左). 深水硅质岩屑, 由微晶石英组成, 陕 240 井, 正交偏光, 铸体片; b(右). 含深水硅质放射虫的硅质岩屑, 陕 231 井, 单偏光, 铸体片; c. 压实变形的白云母石英片岩屑, 陕 240 井, 正交偏光, 铸体片; d. 两粒结晶程度不一致的千枚岩屑, 压实变形强的部分已成假基质, 苏 16 井, 正交偏光, 铸体片

量最高时达45%。主要有石英白云母片岩屑、弱变质的泥质粉砂岩屑、云母片岩屑(图5c)、千枚岩屑(图5d)、炭质板岩屑、云母屑等。

不同骨架颗粒具有不同的硬度^[1,6]。外力作用下,碎屑石英、刚性岩屑等硬度高的骨架颗粒,在升压-降压过程中可压缩性小,应力敏感性较弱。千枚岩、黑-白云母等柔性岩屑硬度低,在外力作用下,易形变破碎挤压进入孔隙,还可能产生微细颗粒运移而堵塞喉道,使储层渗透率明显降低。实验中选取了苏10井2-85/128、苏10井2-94/128样品比较了柔性岩屑对应力敏感性的影响(图6),苏10井2-85/128样品岩性为浅灰白色细粒含高岭石岩屑石英砂岩。骨架颗粒中石英86%,刚性岩屑7%,柔性岩屑2%,原长石5%。长石溶模孔、残余粒间孔先后被自生石英含晶间孔的高岭石半充填,仅保留极少量的粒间残余孔隙。苏10井2-94/128样品岩性为浅灰白色细粒岩屑石英砂岩,骨架颗粒中石英80%,柔性岩屑12%,其中3%黑、白云母屑,尤以白云母屑居多。原长石4%。溶模孔及残余粒间孔同样被自生石英和高岭石充填,有0.5%粒间残余微孔。上述两个样品岩性、刚性岩屑含量、粒度相似,仅柔性岩屑的含量存在较大差别,分别为2%和12%。

两个样品在净围压为2 MPa时初始渗透率分别为 0.268×10^{-3} 和 $0.173 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;加载围压至40 MPa时相应的渗透率依次降至初始渗透率的27.1%和7%,卸载围压至2 MPa时相应的渗透率依次恢复至初始渗透率的79.9%和61.8%。应力敏感性图中也可以看出,围压从2 MPa加载到10 MPa过程中,苏10井2-94/128样品渗透率下降速度快于苏10井2-85/128样品。结果表明,苏10井2-85/128样品应力敏感性明显弱于苏10井2-94/128样品。可见柔性岩屑含量是骨架颗粒中控制应力敏感性的重要因素。

3.2 填隙物与应力敏感性耦合关系

区内岩石填隙物分为基质和胶结物两类,基质可细分为原基质和假基质。①原基质以浅变质岩系的绢云母为主,少量绿泥石和水云母。含量随砂岩成熟度和结构成熟度增高而递减,一般0~20%,岩屑砂岩中含量较高。(图7a)。②假基质以柔性岩屑为主,千枚岩屑等柔性岩屑在压实过程中会发生不同程度的变形,部分挤入粒间孔成假基质(图5d),同样在岩屑砂岩分布较多。此外,胶结物成因差异较大,是孔隙水在成岩期于原生粒间孔隙及次生孔隙中沉淀而成,在纯石英砂

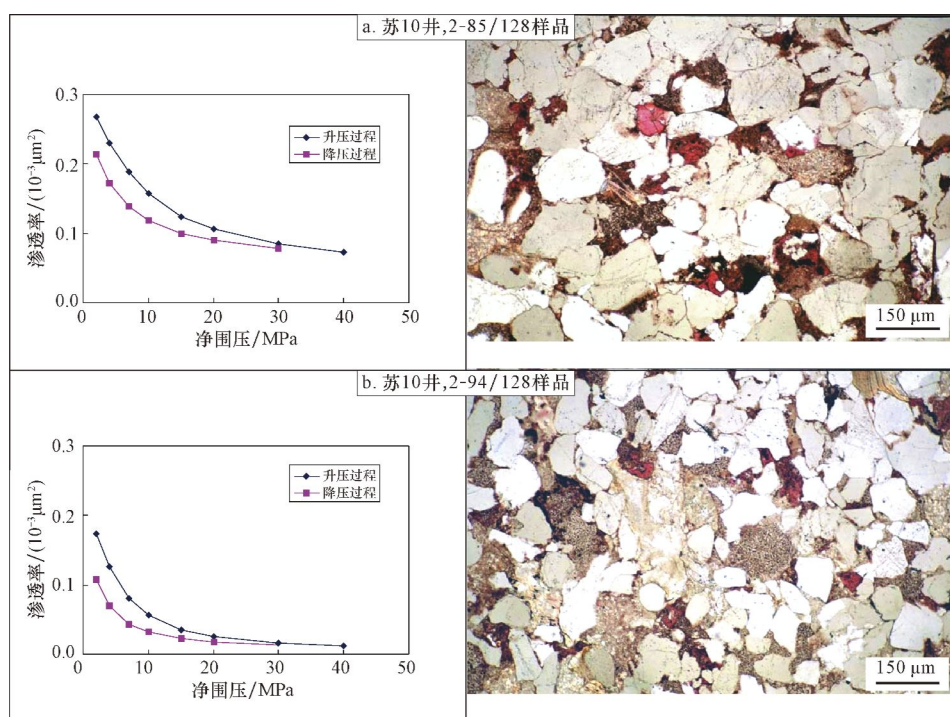


图6 苏里格-吉尔地区柔性岩屑含量不同的样品应力敏感性曲线及铸体薄片

Fig. 6 Stress-sensitivity curves and cast thin section of samples with different content of soft debris in Sulige-Jier area

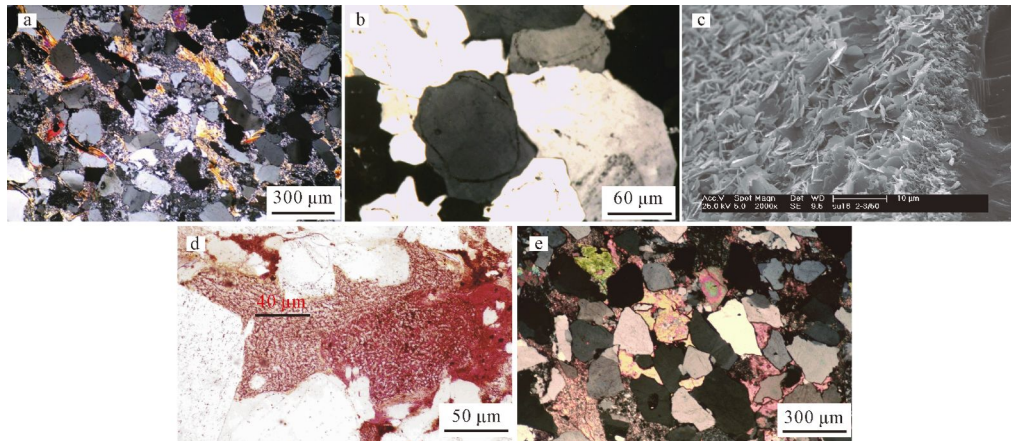


图7 苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段低渗砂岩储层填隙物类型

Fig. 7 Thematrix types of the low-permeability sandstone reservoirs in the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area

a. 灰色细粒含泥质岩屑砂岩,残余粒间孔被泥质基质和千枚岩屑压实变形形成的假基质填隙,苏10井,单偏光,铸体片;b. 中粒石英砂岩,石英自生加大3~4级,互相嵌合,焊接,陕240井,正交偏光,铸体片;c. 扫描电镜下的沿粒间孔隙壁衬边胶结的铁绿泥石,苏16井;d. 两期高岭石淀出,长石溶模孔被晶径较细小的蠕虫状高岭石半充填,晶间孔隙含量高,残余粒间孔隙被晶径较大、较长蠕虫状高岭石半充填,晶间孔隙含量低,苏10井,单偏光,铸体片;e. 含钙质中-粗粒岩屑砂岩中连晶方解石交代碎屑,填隙物,苏8井,正交偏光,铸体片

岩和石英砂岩中含量大,可高达20%~30%,岩屑石英砂岩相对较少,一般10%~20%,而岩屑砂岩中仅0~5%左右。胶结物类型以石英(图7b)、铁绿泥石衬边胶结(图7c)、高岭石(图7d)、连晶铁方解石(图7e)为主。

填隙物的类型和含量既能影响岩石的本体变形也能影响岩石的结构变形,其中基质以泥质原基质或柔性岩屑假基质为主,容易破碎变形,细小的颗粒易随流体运动,可能会运移甚至堵塞喉道,其含量与应力敏感性呈正相关,而主要以自生加大形式出现的石英硅质、主要以环边形式出现的铁绿泥石、交代充填孔隙形式出现的连晶方解石等胶结物硬度较大,结构稳定,含量越高,应力敏感性反而越弱。区内选取了5个含泥质岩屑砂岩样品、7个含硅质岩屑砂岩样品,在净围压为2 MPa时渗透率为 0.107×10^{-3} 和 $0.226 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,净围压增大至40 MPa时相应的渗透率依次降至原来的4.86%和11.53%;由40 MPa降压至2 MPa时相应的渗透率依次恢复至原来的53.06%和63.21%,可见基质含量高造成渗透率应力损失明显较强(表1)。

3.3 岩石类型与应力敏感性耦合关系

苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段岩石骨架颗粒中

柔性岩屑以及填隙物中基质等硬度低的岩石组分,在外力作用下易变形、破碎、位移,其含量与应力敏感性呈正相关。骨架颗粒中碎屑石英、刚性岩屑,填隙物中石英、铁绿泥石、连晶方解石等硬度、稳定性高的岩石组分在外力作用下变形弱,其含量与应力敏感性呈负相关。岩石学特征差异间接导致不同岩类具不同的应力敏感性,通过本区柔性岩屑和基质含量明显不同的岩类与应力敏感性耦合关系分析(表2),岩屑砂岩中硬度较低的柔性岩屑和基质含量一般为20%~32%,明显高于石英砂岩和岩屑石英砂岩,其应力敏感性也最强,升压和降压过程中渗透率仅恢复到初始渗透率的5.11%、53.55%。而柔性岩屑和基质含量较低的岩屑石英砂岩和石英砂岩应力敏感性相对较弱。

4 结论

1) 苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段低渗砂岩储层岩石类型主要为岩屑石英砂岩,其次为硅质石英砂岩以及少量岩屑砂岩。骨架颗粒成分以碎屑石英、岩屑为主,其中岩屑可细分为刚性和柔性岩屑,前者主要有变质石英岩、深水硅质岩屑等,后者常见石英白云母片岩屑、弱变质的泥质粉砂

表1 苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段不同基质含量砂岩与应力敏感性耦合关系Table 1 Coupling relations between sandstone with different matrix content and stress-sensitivity in the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area

岩性	样品数 /个	基质平均 含量/%	渗透率初始平 均值/(10 ⁻³ μm ²)	2~40 MPa 渗透率降至 初始渗透率比例/%	40~2 MPa 渗透率升至 初始渗透率比例/%
含泥质岩屑砂岩	5	25	0.107	4.86	53.06
含硅质岩屑砂岩	7	6	0.226	11.53	63.21

表2 苏里格-吉尔地区盒₈^下亚段不同岩石类型的与应力敏感性耦合关系Table 2 Coupling relations between rock types and stress-sensitivity in the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area

岩性	样品数 /个	柔性岩屑及 基质含量/%	初始渗透率平均值/ (10 ⁻³ μm ²)	2~40 MPa 渗透率降至 初始渗透率比例/%	40~2 MPa 渗透率升至 初始渗透率比例/%
石英砂岩	7	0~3	0.326	11.53	67.21
岩屑石英砂岩	36	3~21	0.274	10.47	61.97
岩屑砂岩	15	23~35	0.114	5.11	53.55

岩屑等。填隙物成分中基质有原基质(以浅变质岩系的绢云母为主,少量绿泥石和水云母)、假基质(柔性岩屑占优),胶结物类型多见石英、铁绿泥石衬边胶结、高岭石、连晶铁方解石。

2) 本次应力敏感性实验分别选取了58个不同岩性的岩心样品,渗透率平均值为 $0.295 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低渗范围。净围压由2 MPa升至40 MPa时,岩心渗透率平均下降至初始渗透率的9.64%;当净围压从40 MPa降压至2 MPa后,渗透率平均值恢复至初始渗透率的63.48%,应力敏感性中等偏强,初始渗透率与加载围压至40 MPa时相应的渗透率/初始渗透率值、卸载围压至2 MPa时相应的渗透率/初始渗透率值均呈明显的正相关。

3) 岩石样品骨架颗粒中柔性岩屑以及填隙物中基质等硬度低的岩石组分在外力作用下易变形、破碎、发生位移,其含量与应力敏感性呈正相关。骨架颗粒中碎屑石英、刚性岩屑,填隙物中石英、铁绿泥石、连晶方解石等硬度、稳定性高的岩石组分在外力作用下变形弱,其含量与应力敏感性呈负相关。岩石学特征差异间接导致区内不同岩类具不同的应力敏感性,岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、含硅质石英砂岩应力敏感性依次降低。在低渗油藏开发过程中,如果为提高油井产能而大幅度降低井底流压,会使井底附近地层压力快速降低,造成严重的压力敏感性伤害。因此,在开发过程中针对不同岩类储层可采用不同级别的生产压

差,协调产能与应力敏感性的关系,精细化管理以求得油田的最优产能。

参 考 文 献

- [1] 石玉江,孙小平. 长庆致密碎屑岩储集层应力敏感性分析[J]. 石油勘探与开发,2001,28(5):85-87.
Shi Yujang, Sun Xiaopin. Stress sensitivity analysis of Changqing tight clastic reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5):85-87.
- [2] 高辉,解伟,杨建鹏,等. 基于恒速压汞技术的特低-超低渗砂岩储层微观孔喉特征[J]. 石油实验地质,2011,33(2):206-211.
Gao Hui, Xie Wei, Yang Jianpeng, et al. Pore throat characteristics of extra-ultra low permeability sandstone reservoir based on constant rate mercury penetration technique[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(2):206-211.
- [3] 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 Liangang. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3):73-76.
- [4] 向阳,向丹,杜文博. 致密砂岩气藏应力敏感的全模拟试验研究[J]. 成都理工学院学报,2002,29(6):618-620.
Xiang Yang, Xiang Dan, Du Wenbo. An experimental study of simulating high-speed production in tight sandstone gas reservoir[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(6):618-620.
- [5] 苏娜,段永刚,于春生. 微CT扫描重建低渗气藏微观孔隙结构——以新场气田上沙溪庙组储层为例[J]. 石油与天然气地质,2011,32(5):792-796.
Su Na, Duan Yonggang, Yu Chunsheng. Reconstruction of microscopic pore structure in low permeability gas reservoir by

- micro-CT scanning: an example from the Upper Shaximiao Formation in Xinchang gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 792-796.
- [6] 张浩, 康毅力, 陈一健, 等. 岩石组分和裂缝对致密砂岩应力敏感性影响[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 55-57.
- Zhang Hao, Kang Yili, Chen Yijian, et al. Features on tight sandstone stress sensitivity[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 55-57.
- [7] 兰林, 康毅力, 陈一健, 等. 储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(3): 1-4.
- Lan Lin, Kang Yili, Chen Yijian, et al. Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low Permeability and tight sandstone reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(3): 1-4.
- [8] 李传亮. 低渗透储层不存在强应力敏感[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(4): 62-63.
- Li Chuanliang. Low permeability rocks are less sensitive to stress[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(4): 62-63.
- [9] 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 Ruilan. 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.
- [10] 于忠良, 熊伟, 高树生, 等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 96-98.
- Yu Zhongliang, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. Stress sensitivity of tight reservoir and its influence on oilfield development. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 96-98.
- [11] 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): 96-98.
- Wang Liqiang, Liu Huiqing, Zhen Siguang, et al. Quantitative research on stress sensitivity of low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 96-98.
- [12] 焦春艳, 何顺利, 谢全, 等. 超低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 490-494.
- Jiao Chunyan, He Shunli, Xie Quan, et al. Experimental study on stress-dependent sensitivity of ultra-low permeability sandstone reservoirs. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 490-494.
- [13] 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社. 苏里格地区致密砂岩地层水赋存状态和产出机理探讨[J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 400-405.
- Wang Xiaomei, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe. Occurrence state and production mechanism of formation water in tight sandstone reservoirs of Sulige area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(4): 400-405.
- [14] 叶成林, 王国勇, 何凯, 等. 苏里格气田储层宏观非均质性——以苏53区块石盒子组8段和山西组1段为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 236-244.
- Ye Chenglin, Wang Guoyong, He Kai, et al. Macro heterogeneity of reservoirs in Sulige gasfield—a case study of the 8th member of the Shihezi Formation and the 1st member of the Shanxi Formation in the Su53 Block[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 236-244.
- [15] 张永贵, 刘振峰. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩气藏储层建模[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 560-567.
- Zhang Yonggui, Liu Zhenfeng. Reservoir modeling of tight gas sands in the Upper Palaeozoic of the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 560-567.
- [16] 茹婷, 刘易非, 范耀, 等. 低渗砂岩气藏开发中的压敏效应问题[J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 95-96.
- Ru Ting, Liu Yifei, Fan Yao, et al. Pressure-sensitive effect in development of low permeability sandstone gas reservoir[J]. Fault-Block & Gas Field, 2011, 18(1): 95-96.
- [17] 张旭, 胡常忠, 刘建仪, 等. 河坝飞仙关气藏储层应力敏感性及其对产能的影响[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(6): 69-72.
- Zhang Xu, Hu Changzhong, Liu Jianyi, et al. Gas reservoir stress sensitivity and its effect on productivity in Feixianguan of Heba block, [J]. Petroleum geology and engineering, 2009, 23(6): 69-72.
- [18] 潘伟义, 伦增琨, 王卫红, 等. 异常高压气藏应力敏感性实验研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2): 212-214.
- Pan Weiye, Lun Zengmin, Wang Weihong, et al. Experimental study of stress sensitivity in abnormal overpressure gas reservoir [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(2): 212-214.
- [19] 刘启国, 唐伏平, 冯国庆, 等. 开关井不同程度应力敏感效应对井底压力动态的影响[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 524-527.
- Liu Qiguo, Tang Fuping, Feng Guoqing, et al. Influence of different stress sensitivities on bottom hole pressure behaviors during well opening and shut-in [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 524-527.
- [20] 何江, 方少仙, 侯方浩, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组岩溶型储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 351-356.
- He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Characteristics of Karst Reservoirs of Majiagou Formation (Middle Ordovician) in Central Gasfield Area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 351-356.

(编辑 董立)