

引用格式:陈明君,唐星宇,王玉斌,等.鄂尔多斯盆地东缘低压致密砂岩气储层敏感性实验研究[J].油气藏评价与开发,2025,15(6):983-994.

CHEN Mingjun, TANG Xingyu, WANG Yubin, et al. Sensitivity experimental study of low-pressure tight sandstone gas reservoirs in eastern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(6): 983-994.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.06.004

# 鄂尔多斯盆地东缘低压致密砂岩气储层敏感性实验研究

陈明君<sup>1</sup>, 唐星宇<sup>1</sup>, 王玉斌<sup>2</sup>, 康毅力<sup>1</sup>, 郭智栋<sup>2</sup>, 颜茂凌<sup>1</sup>, 陈雪妮<sup>1</sup>

(1.西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室,四川成都 610500;

2.中石油煤层气有限责任公司工程技术研究院,陕西西安 710082)

**摘要:**鄂尔多斯盆地东缘致密气储量丰富,但储层压力系数低、物性差、黏土矿物等敏感性矿物大量赋存、孔隙结构复杂,导致储层潜在损害程度较高,制约了气井高产稳产。为了明确研究区致密气储层敏感性特征,以二叠系山西组1段、石盒子组8段致密砂岩为研究对象,利用铸体薄片、扫描电镜、X射线衍射和岩心流体驱替实验等手段开展了储层敏感性实验研究,并提出了针对性的储层保护对策。实验结果表明:研究区岩石类型为细—中粒岩屑砂岩,黏土矿物占比平均为21.59%,以伊蒙间层为主;储层孔隙主要类型为剩余粒间孔与次生溶蚀孔,纳米孔发育,且微—纳孔隙连通性差;盒8段岩心中值孔隙度为6.43%,中值渗透率为 $0.149 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;山1段岩心中值孔隙度为6.46%,中值渗透率为 $0.387 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;地层水pH值介于5.47~6.83,平均总矿化度为118 077.21 mg/L。研究区气藏属低温、低压致密气藏,具有弱速敏、弱—中等偏弱水敏、弱—中等偏弱盐敏、中等偏弱—中等偏强酸敏、弱—中等偏强碱敏、中等偏强—强应力敏感的特点。平均临界流速为0.3 mL/min,临界矿化度为60 000 mg/L,平均临界pH值为7.79。开发过程中应关注储层低压、低温、纳米孔占比高等特点,着重考虑酸敏、碱敏和应力敏感,并在钻完井、压裂和生产制度中进行完善与优化。研究结果对低压致密砂岩气高效开发具有指导意义。

**关键词:**鄂尔多斯盆地;致密砂岩气;流体敏感性;应力敏感性;储层保护

中图分类号:TE357

文献标识码:A

## Sensitivity experimental study of low-pressure tight sandstone gas reservoirs in eastern margin of Ordos Basin

CHEN Mingjun<sup>1</sup>, TANG Xingyu<sup>1</sup>, WANG Yubin<sup>2</sup>, KANG Yili<sup>1</sup>, GUO Zhidong<sup>2</sup>, YAN Maoling<sup>1</sup>, CHEN Xueni<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Engineering Technology Research Institute, PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China)

**Abstract:** The eastern margin of the Ordos Basin is rich in tight gas resources. However, the reservoirs are characterized by low pressure coefficients, poor physical properties, a high concentration of sensitive minerals such as clay minerals, and complex pore structures. These features result in a high degree of potential reservoir damage, which constrains stable and high gas production. To clarify the sensitivity characteristics of tight gas reservoirs in the study area, the study used tight sandstones from the first member of the Permian Shanxi Formation (Shan-1 member) and the eighth member of the Permian Shihezi Formation (He-8 member) as the research objects. Cast thin-section analysis, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction, and core fluid displacement tests were employed to investigate reservoir sensitivity. Based on the results, targeted strategies for reservoir protection were proposed. Experimental results indicated that the reservoir rocks were fine to medium grained lithic sandstones, with an average clay mineral content of 21.59%, primarily consisting of mixed-layer illite-smectite. The main pore types were residual intergranular pores and secondary dissolution pores. Nanopores were well-developed, with poor connectivity between micro- and nanopores. In cores from the He-8 member, the median porosity and permeability were 6.43% and  $0.149 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , respectively. In cores from the Shan-1 member, the median porosity and permeability were 6.46% and  $0.387 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , respectively. The pH values of the formation water ranged from 5.47 to 6.83, with an average total salinity of 118 077.21 mg/L. The reservoirs in the study area were low-temperature, low-pressure tight gas reservoirs, exhibiting weak velocity sensitivity, weak to moderately weak water sensitivity, weak to moderately weak salt sensitivity, moderately weak to moderately strong acid sensitivity, weak to moderately strong alkali sensitivity, and moderately strong to strong stress sensitivity. The average critical flow velocity was 0.3 mL/min, the

收稿日期:2024-07-04。

第一作者简介:陈明君(1988—),男,博士,副教授,从事储层保护理论和非常规油气开发研究与教学方面的工作。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail: chenmj1026@163.com

基金项目:中国石油前瞻性、基础性科研攻关项目“煤系地层‘三气合采’立体开发技术研究”(2021DJ2304);中国石油煤层气有限责任公司工程技术研究院项目“大吉区块山1、盒8段致密砂岩及本溪组8号深层煤岩物性评价及储层保护对策研究”(2022-GCYKJ-03)。

critical salinity was 60 000 mg/L, and the average critical pH value was 7.79. During development, attention should be paid to the low pressure, low temperature, and high nanopore proportion of the reservoirs. Acid sensitivity, alkali sensitivity, and stress sensitivity should be prioritized, and improvements and optimizations should be made in drilling, completion, fracturing, and production practices. The research findings provide significant guidance for the efficient development of low-pressure tight sandstone gas resources.

**Keywords:** Ordos Basin; tight sandstone gas; fluid sensitivity; stress sensitivity; reservoir protection

中国致密气资源丰富,分布范围广泛,是非常规天然气勘探开发的重要组成部分,对于改善能源结构和保障国家能源安全具有重要战略意义<sup>[1-5]</sup>,是中国最具现实潜力的非常规天然气资源之一<sup>[6-8]</sup>。

致密砂岩储层具有低孔低渗、高黏土矿物含量、微裂缝发育等特征<sup>[9]</sup>,导致工作液损害和应力敏感损害较强,并难以解除。国内外针对致密砂岩储层敏感性评价开展过大量研究。康毅力等<sup>[10]</sup>以塔里木盆地超深致密砂岩气藏为研究对象,提出了改进的流体敏感性稳态实验评价方法,开展了水敏、盐敏和碱敏实验评价,并且对比了室温条件下的评价结果。柴光胜等<sup>[11]</sup>以致密砂岩储层为例,利用铸体薄片鉴定、X射线衍射和岩心流体驱替实验等手段,对储层敏感性开展了定量评价,并分析了主要影响因素。王巧智等<sup>[12]</sup>以山西临兴致密砂岩为研究对象,开展了基于CT实时扫描的裂缝岩样加压、卸压实验,分析了储层应力敏感性随孔隙和裂缝形态的变化。黎明等<sup>[13]</sup>推导了改进幂律渗透率模型,用于评价致密砂岩储层应力敏感性,并与室内实验结果进行对照。

之前的研究大多针对常压或超压致密气藏,低压致密气藏的研究很少。鄂尔多斯盆地东缘(以下简称鄂东缘)是中国重要的产气盆地,其上古生界致密砂岩气藏大部分流体压力梯度小于1 MPa/hm,表现为低压<sup>[14]</sup>。由于开发过程中存在地层压力下降快、井筒携液能力弱等问题,储层敏感性、液相圈闭、液锁和应力敏感损害极易发生。因此,开展鄂东缘低压致密砂岩气藏储层敏感性实验研究,研究结果对气井低产原因诊断具有重要的现实意义。如果采用传统稳态流体驱替方法开展致密岩石储层敏感性评价实验,致密岩石可能致使实验压降和流量等参数极小,计量结果存在较大误差<sup>[15]</sup>,但是采用瞬态压力衰减法和压力脉冲法仅计量压力衰减时间,渗透率可测值低至 $10^{-5} \mu\text{m}^2$ ,研究结果对致密砂岩储层敏感性评价更具针对性。

选取鄂东缘二叠系石盒子组8段(以下简称盒8段)和山西组1段(以下简称山1段)致密砂岩样品,通过开展铸体薄片、扫描电镜、X射线衍射等实验,测试了储层特征参数,并分析了储层潜在损害因素。设计并开展了岩心流体敏感性和应力敏感性实验,揭示了流体敏感和应力敏感特征。最后结合研究区致密气藏工程地质特征,提出了储层保护技术对策,为鄂东缘低压致密砂岩气藏高效开发提供储层保护建议。

## 1 研究区工程地质特征

### 1.1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地作为中国重要含油气盆地,其上古生界致密气资源量约 $(5.88\sim 8.15)\times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占全国致密气资源量的34%<sup>[6]</sup>。研究区位于鄂东缘,构造条件较复杂,含煤层系受后期构造、断裂控制明显,区块总面积达 $5\,784.175 \text{ km}^2$ <sup>[6]</sup>。研究区致密气地质储量丰富,主力产层为盒8段与山1段。研究区部分致密气井获得工业气流,展现了煤系地层致密气勘探开发的巨大潜力,但该区块致密气开发总体还不够成熟,储量有效动用程度仍然偏低<sup>[17-20]</sup>。

### 1.2 储层特征和潜在损害因素分析

#### 1) 岩石学特征

通过对研究区致密砂岩储层进行铸体薄片鉴定,可以对储层岩石进行分类。结果表明:研究区致密砂岩储层岩石类型差异性不大,主要为细一中粒岩屑砂岩,并包含少量石英砂岩和岩屑石英砂岩。砂岩的碎屑组分主要包括岩屑和石英,长石普遍含量不高,且大部分被溶蚀,占比小于5%。从山1段至盒8段,石英占比随地层由老到新而逐渐降低,一般占全岩矿物组分的2%~60%,最高可达80%。岩屑含量随埋深增加而降低,90%的岩屑已向黏土矿物转化,泥化的黏土矿物在经历中等一较强程度压实作用下发生塑性变形,容易在超过临界流速条件下发生速敏,引发微粒运移,从而堵塞孔喉。全直径岩心描述结果也表明天然裂缝较为发育。上述孔隙结构特征使储层具有潜在应力敏感损害,并且可以进一步加剧流体敏感性损害程度。

通过开展X射线衍射实验,对15组研究区致密砂岩样品进行矿物组分分析,并计算平均值,结果表明:矿物组成以石英为主(山1段占比70.16%、盒8段占比66.76%),黏土矿物占比总体较高(山1段占比18.77%、盒8段占比21.59%)。不同层位、不同井的黏土矿物类型和含量差异较大,表现出黏土矿物分布的非均质性。山1段黏土矿物以伊蒙间层、伊利石为主(占比28.33%),其次依次为绿泥石(占比23.93%)、高岭石(占比10.67%)。主要潜在损害类型为水敏、速敏和酸敏,其次为碱敏。盒8段黏土矿物以伊蒙间层为主(占比26.60%),其次依次为高岭石(占比19.67%)、伊利石(占比14.07%)、绿泥石

(占比14.00%),主要潜在损害类型为水敏和速敏,其次为酸敏和碱敏。

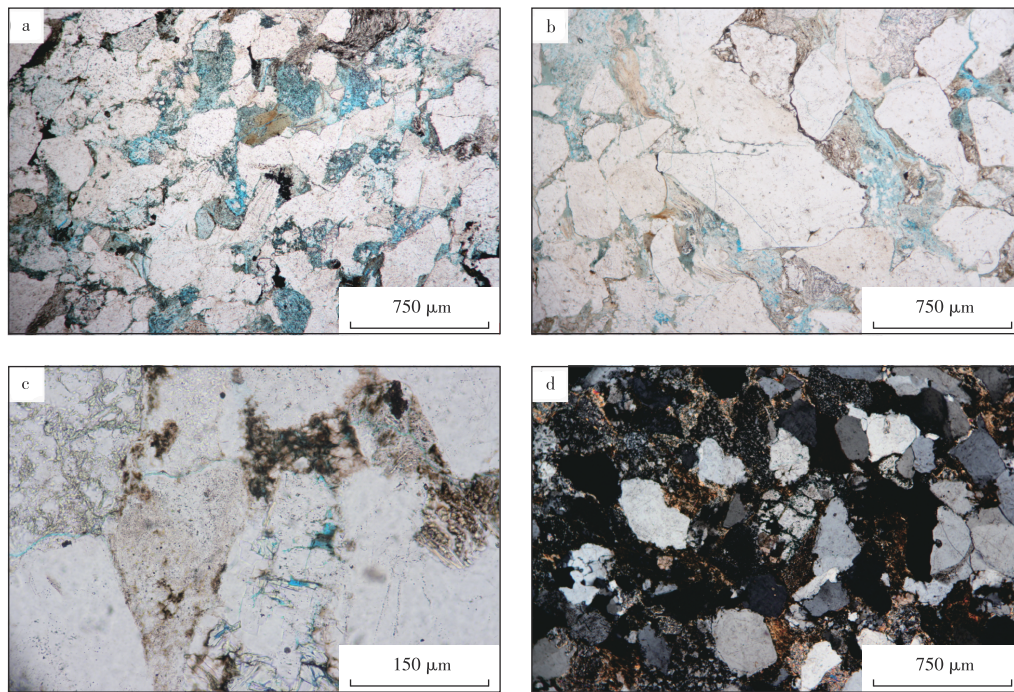
### 2) 孔隙结构特征

从微观尺度对孔喉分布、大小、几何形态和连通性等进行直观表征。研究区致密砂岩主力产层的主要孔隙类型为剩余粒间孔与次生溶蚀孔<sup>[18, 21-23]</sup>。铸体薄片和扫描电镜观测结果表明(图1、图2):盒8段孔隙类型以岩屑溶孔为主,次要为晶间孔;山1段孔隙类型以长石溶孔和岩屑溶孔为主,发育少量晶间孔。从岩心核磁共振测试结果可以看出(图3): $T_2$ (弛豫时间)谱峰值主要分布介于1~10 ms,后续信号强度大幅降低,谱峰趋于平缓,且双峰间的“鞍部”偏低。这表明纳米级孔隙(孔径小于100 nm)占比高(对比山1段为49.76%,盒8为68.50%),且连通性差,不利于气-水渗流,具有潜在的速敏和水相

圈闭损害。

### 3) 物性特征

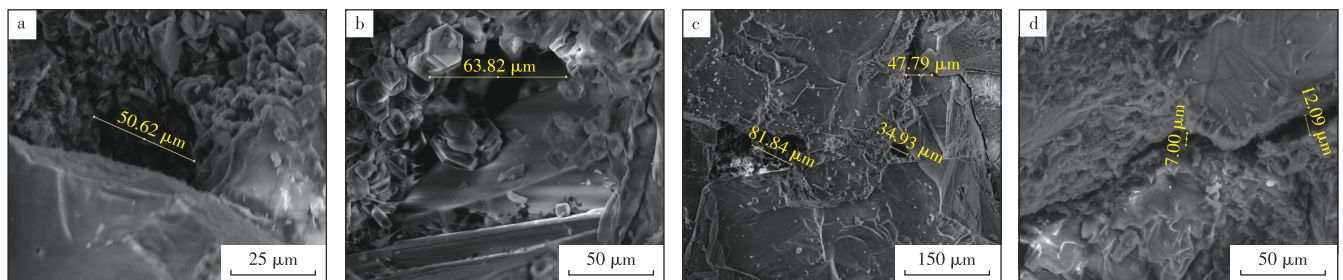
岩心物性测试结果表明(图4a、图4b):山1段岩心孔隙度介于2.10%~17.23%,中值孔隙度6.43%;渗透率介于 $(0.001\sim 1.847)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,中值渗透率 $0.149\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。盒8段岩心孔隙度介于1.0%~12.2%,中值孔隙度6.46%;渗透率介于 $(0.0001\sim 1.335)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,中值渗透率 $0.387\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。研究区主力产层物性较差,为典型的致密砂岩储层,地层由老到新(从山1段到盒8段),孔隙度呈逐渐增大趋势,而渗透率呈逐渐减小趋势。图4c所示的孔渗交汇图表明:孔隙度和渗透率之间具有一定的正相关性,并在相同孔隙度条件下,山1段渗透率普遍大于盒8段。上述低孔低渗特征会加剧储层的流体敏感和应力敏感损害。



注:a为盒8段,岩屑溶孔,单偏光,蓝色铸体,未染色;b为盒8段,黏土矿物晶间孔,单偏光,蓝色铸体,未染色;c为山1段,黏土矿物晶间孔,单偏光,蓝色铸体,未染色;d为山1段,岩屑溶孔,正交偏光,蓝色铸体,未染色。

图1 鄂东缘二叠系盒8段和山1段铸体薄片观测结果

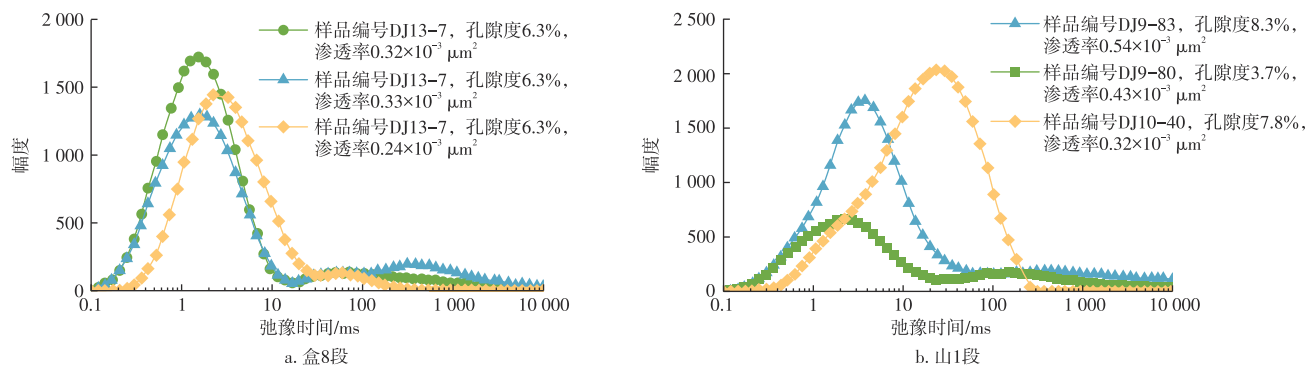
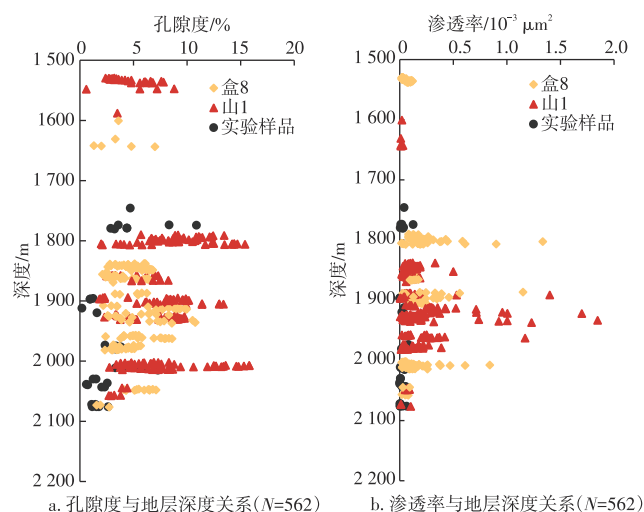
Fig. 1 Cast thin section observation results of tight sandstones from Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin



注:a为盒8段,粒间孔;b为盒8段,黏土矿物晶间孔;c为山1段,粒内溶孔;d为山1段,微裂缝。

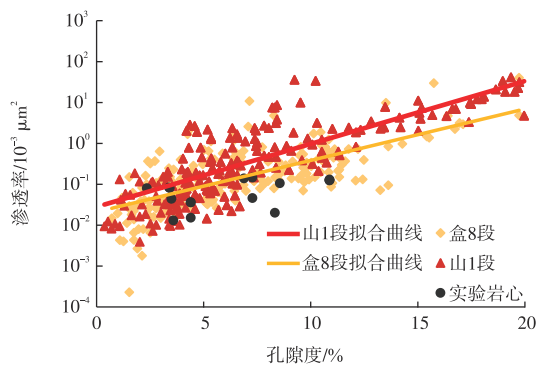
图2 鄂东缘二叠系盒8段和山1段扫描电镜观测结果

Fig. 2 Scanning electron microscopy observation results of Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

图3 鄂东缘二叠系盒8段和山1段核磁共振 $T_2$ 谱测试结果Fig. 3 Nuclear magnetic resonance measurement results for  $T_2$  spectra of Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

a. 孔隙度与地层深度关系(N=562)

b. 渗透率与地层深度关系(N=562)



c. 不同层位孔渗交汇图(N=562)

注:N为样品个数。

图4 鄂东缘二叠系盒8段和山1段孔隙度和渗透率测试结果

Fig. 4 Porosity and permeability measurement results of Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

## 4) 气藏流体与温压特征

研究区致密砂岩气藏地层压力介于11.8~17.2 MPa, 平均地层压力15.6 MPa; 地层压力系数偏低, 介于0.6~0.8, 属低压气藏; 气藏温度介于53.2~65.4 °C, 属低温气藏。地层孔隙压力低反映储层初始能量低, 工作液侵入后难以返排。低温条件也将增大压裂液破胶难度, 具有潜在的水相圈闭和固相残渣损害。

地层水类型为CaCl<sub>2</sub>水型, 沉积构造环境属深层封闭环

境, 利于天然气聚集与保存; pH值介于5.47~6.83, 呈弱酸性; 地层水矿化度较高, 介于32 284.00~217 912.00 mg/L, 平均118 077.21 mg/L, 其中含有大量Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等成垢离子, 高矿化度地层水易与工作液不配伍, 产生无机垢堵塞孔喉。

## 2 实验材料和实验流程

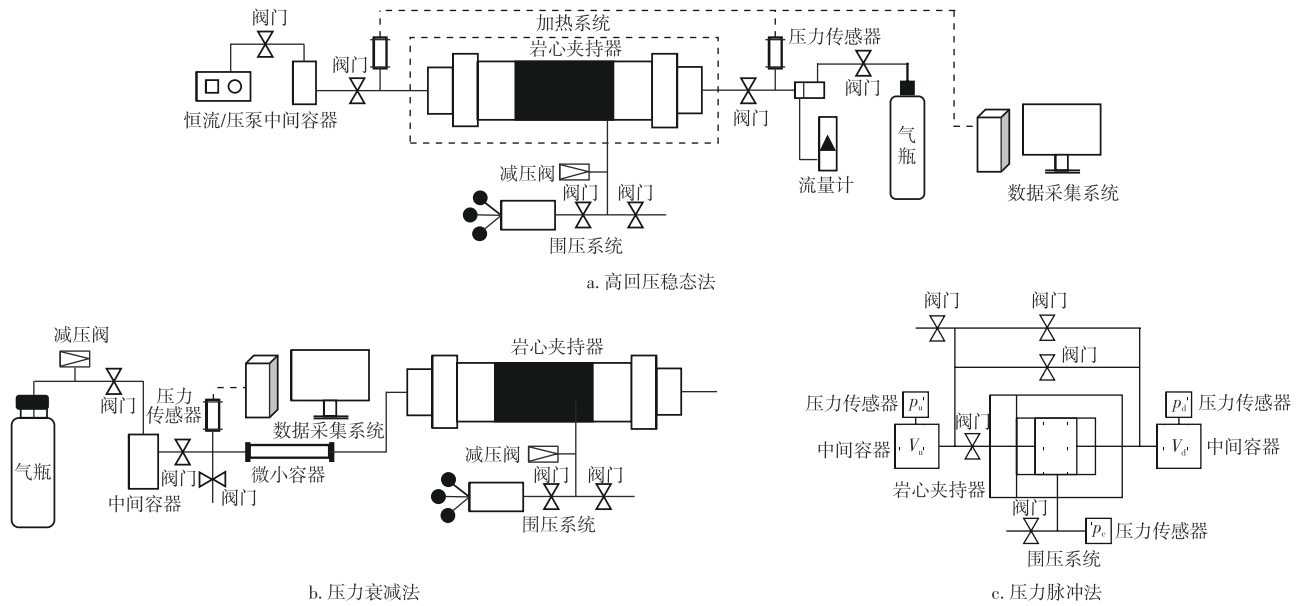
选取研究区盒8段、山1段共16块岩心, 采样深度为1 773.58~2 015.35 m, 直径为2.54 cm, 长度为4~5 cm, 开展储层敏感性评价实验, 包括速敏、水敏、盐敏、酸敏、碱敏、应力敏感。对致密砂岩适用性差等问题, 采用高回压稳态法(回压为1.25 MPa)进行速敏实验, 采用压力脉冲法(压差为0.3 MPa)进行应力敏感实验, 其余敏感性实验均采用压力衰减法(初始入口压力为0.8 MPa), 实验装置示意图如图5所示。

依据中华人民共和国石油天然气行业标准《储层敏感性流动实验评价方法》(SY/T 5358—2024)划分的敏感性等级, 对储层敏感程度进行评价。为了消除一定围压下岩心孔隙结构变形的时间效应, 在开始施加围压5 h后开展岩心实验<sup>[24-25]</sup>。实验用模拟地层水的离子组分见表1, 实验岩心基础数据见表2。

## 3 储层流体敏感损害评价

## 3.1 速敏评价结果

速敏是指在钻井、采油/气、增产和注水等作业, 或生产过程中由于流体流动引起微粒运移并堵塞孔喉, 造成渗透率下降的现象。通过开展速敏实验, 可以明确渗透率与流速的关系, 确定发生速敏反映的临界流速, 为确定合理注采速度提供依据。由于实验样品属于低孔低渗裂缝岩心, 因此采用高回压稳态法开展实验, 保持围压始终大于岩心上游压力2.00 MPa, 并施加回压



注:  $p_u$  为上游中间容器压力, 单位 MPa;  $p_d$  为下游中间容器压力, 单位 MPa;  $V_u$  为上游中间容器体积, 单位  $\text{cm}^3$ ;  $V_d$  为下游中间容器体积, 单位  $\text{cm}^3$ ;  $p_c$  为围压, 单位 MPa。

图5 鄂东缘二叠系盒8段和山1段储层敏感性评价实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of experimental setup for reservoir sensitivity evaluation of Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

表1 鄂东缘二叠系盒8段和山1段地层水矿化度设计

Table 1 Formation water salinity design for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	类别	总矿化度/ (mg/L)	(K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup> )/ (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> / (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> / (mg/L)	Cl <sup>-</sup> / (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / (mg/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> / (mg/L)
盒8段	地层水	66 214.1	11 910.8	10 338.9	1 006.6	39 325.8	860.6	13.5	0
山1段	地层水	66 214.1	11 910.8	10 338.9	1 006.6	39 325.8	860.6	13.5	0

表2 鄂东缘二叠系盒8段和山1段实验岩心基础数据

Table 2 Basic data of experimental core samples from Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	样品编号	实验类别	深度/m	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
盒8段	DJ28-4-1	速敏	1 774.30	10.88	0.130
	DJ28-5	水敏	1 774.30	8.56	0.106
	DJ28-4	盐敏	1 774.30	10.88	0.125
	DJ28-6-2	盐敏	1 779.08	4.40	0.036
	DJ28-2-2	酸敏	1 773.84	8.33	0.020
	DJ28-4-2	碱敏	1 774.30	10.88	0.125
	DJ28-6-2	碱敏	1 779.08	4.40	0.036
	DJ28-6-3	应力敏感	1 779.08	4.40	0.015
山1段	DJ19-4-2	速敏	2 015.35	7.28	0.146
	DJ24-2	水敏	1 975.11	3.39	0.083
	DJ24-1	盐敏	1 973.58	2.35	0.080
	DJ24-4	盐敏	1 978.45	3.42	0.081
	DJ19-4-1	酸敏	2 015.35	6.89	0.139
	DJ24-3-1	碱敏	1 976.69	3.50	0.044
	DJ19-4	碱敏	2 015.35	7.28	0.046
	DJ28-3-3	应力敏感	1 774.03	3.59	0.013

1.25 MPa。实验前对岩心抽真空饱和模拟地层水 24 h。所用驱替流速依次为 0.10、0.25、0.50、0.75、1.00 mL/min。

速敏实验结果如表 3、图 6 所示, 山 1 段速敏指数为 16.67%, 表现为弱速敏, 临界流速为 0.1 mL/min; 盒 8 段速敏指数为 5.55%, 表现为弱速敏, 临界流速为 0.5 mL/min。对渗透率损害率加权计算, 平均临界流速为 0.3 mL/min。开发过程中, 应控制入井流体流速和返排流速, 并选择合理压差, 使储层中的流体流速不超过临界流速的 0.8 倍。

### 3.2 水敏评价结果

在储层被钻开之前, 黏土矿物与地层水已达物理化学平衡。当外来流体离子组成或总矿化度与地层水存在差异时, 会打破这种平衡, 引起黏土微结构破坏, 降低储层渗透率。水敏实验的目的是评价黏土矿物遇水膨胀、分散和运移导致的渗透率损害程度。由于基块岩心渗透率较低, 实验采用压力衰减法, 将围压加载至 5.0 MPa, 通过氮气瓶给微小容器充气加压至初始压力 0.8 MPa, 实验流体依次为地层水、次地层水和蒸馏水, 通过岩心入口端压力传感器监测压力半衰期变化, 评价水敏感损害程度。

表3 鄂东缘二叠系盒8段和山1段速敏评价实验结果

Table 3 Experimental results of velocity sensitivity evaluation for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	临界流速/(mL/min)	速敏指数/%	速敏程度
山1段	DJ19-4-2	2 015.35	7.28	0.146	0.1	16.67	弱
盒8段	DJ28-4-1	1 774.30	10.88	0.130	0.5	5.55	弱

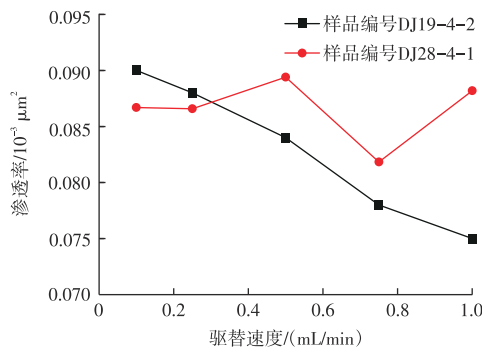


图6 鄂东缘二叠系盒8段和山1段速敏评价实验结果曲线  
Fig. 6 Curves of experimental results of velocity sensitivity evaluation on Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

实验流体离子组成和矿化度如表4所示。

水敏实验结果如表5、图7所示,盒8段水敏指数为31.00%,表现为中等偏弱水敏;山1段水敏指数为29.56%,表现为弱水敏。在钻完井和水力压裂过程中,应控制入井流体矿化度,并优化黏土矿物稳定剂占比。

### 3.3 盐敏评价结果

盐敏是不同矿化度的外来流体进入储层时引起黏土膨胀、脱落、分散、运移等导致孔喉堵塞,造成渗透率下降的现象。盐敏实验的目的是找出盐敏发生的条件,引起储层损害的程度,为工作液的设计提供依据。盐敏、水敏的损害机理和潜在损害矿物基本一致,区别在于盐敏实验流体矿化度梯度更小,且能确定流体临界矿化度。实验流体矿化度和离子组成如表6所示。

表4 鄂东缘二叠系盒8段和山1段水敏实验流体矿化度设计

Table 4 Fluid salinity design for water sensitivity experiments on Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	类别	总矿化度/(mg/L)	(K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup> )/(mg/L)	Ca <sup>2+</sup> /(mg/L)	Mg <sup>2+</sup> /(mg/L)	Cl <sup>-</sup> /(mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /(mg/L)
盒8段、山1段	地层水	66 214.1	11 910.8	10 338.9	1 006.6	39 325.8	860.6	13.5	0
	次地层水	33 107.1	5 955.4	5 169.5	503.3	19 662.9	430.3	6.8	0
	蒸馏水	0	0	0	0	0	0	0	0

表5 鄂东缘二叠系盒8段和山1段水敏评价实验结果

Table 5 Experimental results of water sensitivity evaluation for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	水敏指数/%	水敏程度
山1段	DJ24-2	2 015.35	3.39	0.083	29.56	弱
盒8段	DJ28-5	1 774.30	8.56	0.106	31.00	中等偏弱

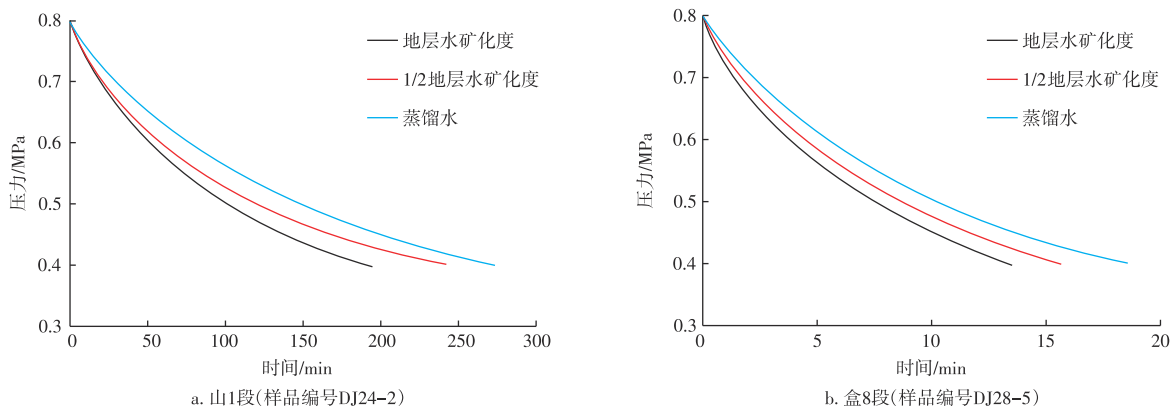


图7 水敏评价实验过程中不同流体驱替时压力与时间的关系

Fig. 7 Relationships between pressure and time during displacement by different fluids in water sensitivity evaluation experiments

表6 鄂东缘二叠系盒8段和山1段盐敏实验流体矿化度设计

Table 6 Fluid salinity design for salt sensitivity experiments on Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	类别	总矿化度/ (mg/L)	(K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup> )/ (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> / (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> / (mg/L)	Cl <sup>-</sup> / (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (mg/L)	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> / (mg/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> / (mg/L)
盒8段、 山1段	地层水	66 214.1	11 910.8	10 338.9	1 006.6	39 325.8	860.6	13.5	0
	3/4矿化度地层水	49 660.6	8 933.1	7 754.2	755.0	29 494.4	645.5	10.1	0
	1/2矿化度地层水	33 107.1	5 955.4	5 169.5	503.3	19 662.9	430.3	6.8	0
	1/4矿化度地层水	16 553.5	2 977.7	2 584.7	251.7	9 831.5	215.2	3.4	0
	蒸馏水	0	0	0	0	0	0	0	0

盐敏实验结果如表7、图8所示,山1段盐敏指数为21%~29%,表现为弱盐敏。盒8段盐敏指数为31%~36%,表现为中等偏弱盐敏。山1、盒8段的临界矿化度均为60 000 mg/L。实际开发过程中应注意控制入井流体矿化度不低于临界矿化度。

### 3.4 酸敏评价结果

在开发生产中,为了解堵或增产,可向储层注入酸液。但是酸化具有损益双重效应,一方面酸液可能溶解部分矿物和堵塞物,提高渗透率和孔隙度,另一方面

表7 鄂东缘二叠系盒8段和山1段盐敏评价实验结果

Table 7 Experimental results of salt sensitivity evaluation for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	盐敏指数/%	盐敏程度	临界矿化度/ (mg/L)
山1段	DJ24-1	1 973.58	2.35	0.080	21.00	弱	60 000
	DJ24-4	1 978.45	3.42	0.081	29.00	弱	60 000
盒8段	DJ28-4	1 774.30	10.88	0.125	31.00	中等偏弱	60 000
	DJ28-6-2	1 779.08	4.40	0.036	36.00	中等偏弱	60 000

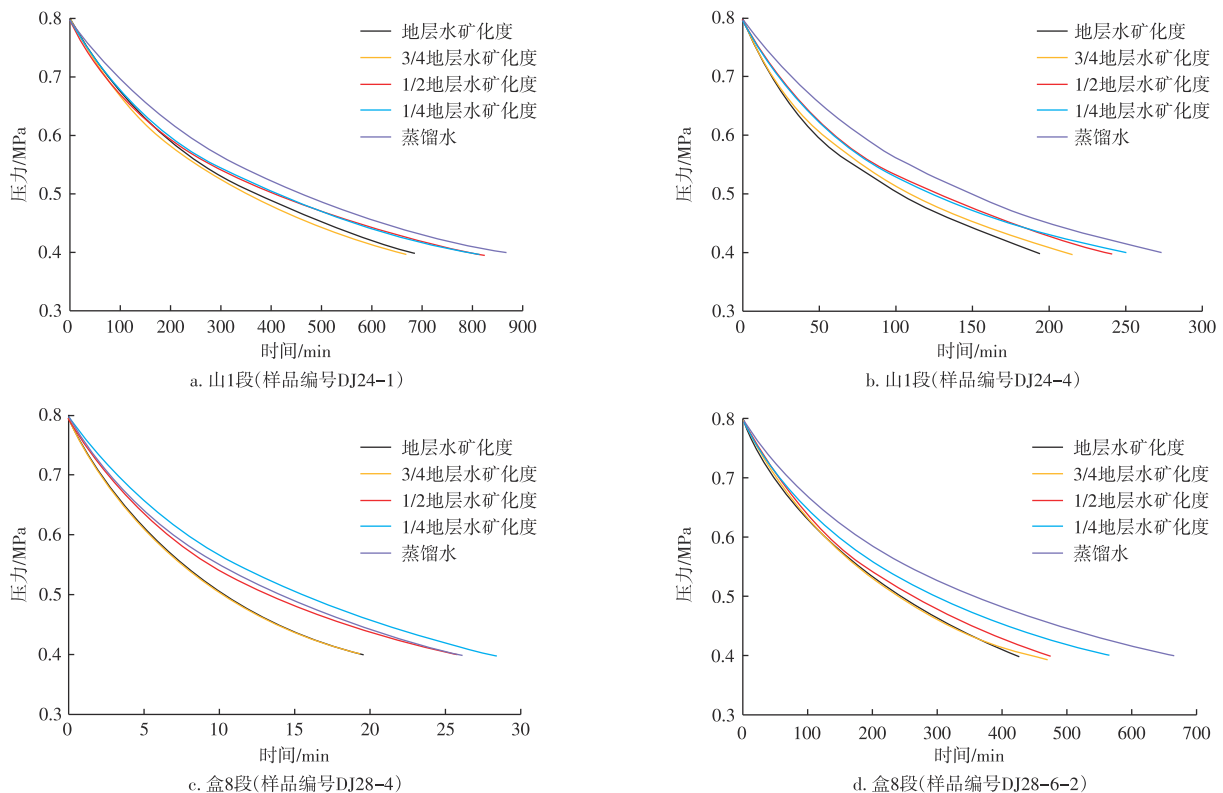


图8 鄂东缘二叠系盒8段和山1段盐敏评价实验过程中不同流体驱替时压力与时间的关系

Fig. 8 Relationships between pressure and time during displacement by different fluids in salt sensitivity evaluation experiments for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

也可能与酸敏性矿物反应生成沉淀,导致渗透率降低。针对研究区解堵常用的酸液开展酸敏评价实验,评估酸液对储层的损害程度。将岩心样品放入15%盐酸中

酸敏评价实验结果如表8所示,盒8段酸敏指数为64.3%,酸敏程度中等偏强。山1段酸敏指数为46.0%,酸敏程度表现为中等偏弱。因此,实际开发过程中,在使用酸液进行解堵时,应注意用量并快进快出。

### 3.5 碱敏评价结果

研究区所用钻完井液的pH值大于地层水。当高pH值工作液侵入地层后,流体间的不配伍可能造成黏土矿物与硅质胶结的结构破坏,或生成沉淀堵塞孔喉,造成渗透率下降。开展碱敏评价实验,对各类工作液设计有一定的指导意义。将一定量的NaOH加入模拟地层水中配置成不同pH值的流体,实验流体pH值依次为7.0、8.0、8.5、9.0、10.0。采用压力衰减法,通过监测压力半衰期随pH值的变化开展碱敏损害评价。碱敏评价实验结果如表9、图9所示。山1段碱敏指数介于60%~62%,表现为中等偏强碱敏,临界pH值介于7.0~8.0;盒8段碱敏指数介于21%~41%,表现为中等偏弱一弱碱敏,临界pH值介于8.0~8.5。对碱敏指数加权计算平均临界pH值为7.79。实际开发过程中应注意控制入井流体的pH值不超过临界pH值。

## 4 储层应力敏感损害评价

研究区致密气藏低孔低渗,且孔隙压力低,实际开发时一般需增大地层与井底压差以提高生产效率。因此,明确应力敏感性对于设计合理的生产制度和预测产能具有重要意义。实验采用压力脉冲法测试不同有效应力下的渗透率,有效应力依次设置为3、5、10、20、30、

浸泡2 h后烘干,采用高回压稳态法,对比前后渗透率变化。

40、30、20、10、5 MPa。为了消除时间效应对应力敏感的影响,在到达每个应力点时,应保持4 h以上再测渗透率。通过应力敏感指数法计算应力敏感指数,评价损害程度<sup>[26-28]</sup>。

鄂东缘二叠系盒8段和山1段实验结果如表10、图10所示。应力敏感指数( $S_s$ )评价标准: $S_s \leq 0.05$ ,无应力敏感程度; $0.05 < S_s \leq 0.30$ ,应力敏感程度弱; $0.30 < S_s \leq 0.50$ ,应力敏感程度中等偏弱; $0.50 < S_s \leq 0.70$ ,应力敏感程度中等偏强; $0.70 < S_s \leq 1.00$ ,应力敏感程度强; $S_s > 1.00$ ,应力敏感程度极强。根据式(1)和应力敏感指数评价标准可以看出:山1段岩心渗透率损害率为95.91%,应力敏感指数为0.55,表现为中等偏强应力敏感;盒8段岩心渗透率损害率为99.41%,应力敏感指数为0.80,表现为强应力敏感。随着有效应力增加,岩心渗透率保持率迅速下降;当有效应力恢复时,岩心渗透率部分恢复,但远低于初始渗透率,反映出岩心较强的应力敏感性。

$$S_s = \frac{1 - (k/k_0)^{1/3}}{\lg(\sigma/\sigma_0)} \quad (1)$$

式中: $S_s$ 为应力敏感指数; $k$ 为实验有效应力下的渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $k_0$ 为岩心初始渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\sigma$ 为实验有效应力,单位MPa;  $\sigma_0$ 为初始有效应力,单位MPa。

## 5 储层保护对策和矿场应用

选取鄂东缘D区块低压致密砂岩气低产井XY-1井进行敏感性损害分析。XY-1井累计产气量4 400 029  $\text{m}^3$ ,累计产水量17  $\text{m}^3$ ,钻井时采用固相钻井液(固相占比7%)进行钻井,气层浸泡时间为336 h,压裂液返排率为

表8 鄂东缘二叠系盒8段和山1段酸敏评价实验结果

Table 8 Experimental results of acid sensitivity evaluation for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	酸敏指数/%	酸敏程度
山1段	DJ19-4-1	2 015.35	6.89	0.139	46.0	中等偏弱
盒8段	DJ28-2-2	1 773.84	8.33	0.020	64.3	中等偏强

表9 鄂东缘二叠系盒8段和山1段碱敏评价实验结果

Table 9 Experimental results of alkali sensitivity evaluation for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	碱敏指数/%	碱敏程度
山1段	DJ19-4	2 015.35	7.28	0.046	60.00	中等偏强
	DJ24-3-1	1 976.69	3.50	0.044	62.00	中等偏强
盒8段	DJ28-4-2	1 774.30	10.88	0.125	21.00	弱
	DJ28-6-2	1 779.08	4.40	0.036	41.00	中等偏弱

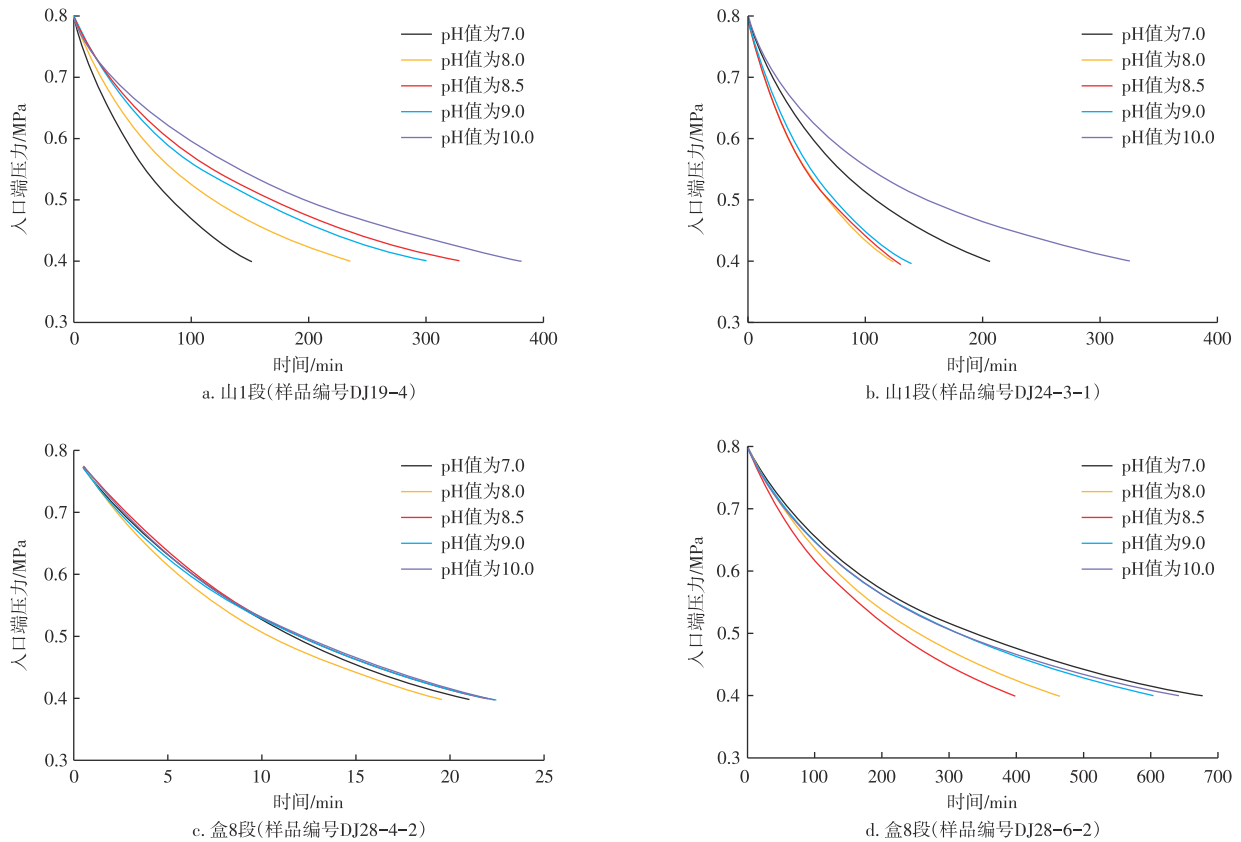


图9 鄂东缘二叠系盒8段和山1段碱敏评价实验过程中不同流体驱替时压力与时间的关系

Fig. 9 Relationship between pressure and time during displacement by different fluids in alkali sensitivity evaluation experiments for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

表10 鄂东缘二叠系盒8段和山1段应力敏感评价实验结果

Table 10 Experimental results of stress sensitivity evaluation for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

层位	样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	应力敏感指数	渗透率损害率/%	应力敏感程度
山1段	DJ28-3-3	1 774.03	3.59	0.013 0	0.55	95.91	中等偏强
盒8段	DJ28-6-3	1 779.08	4.40	0.015 2	0.80	99.41	强

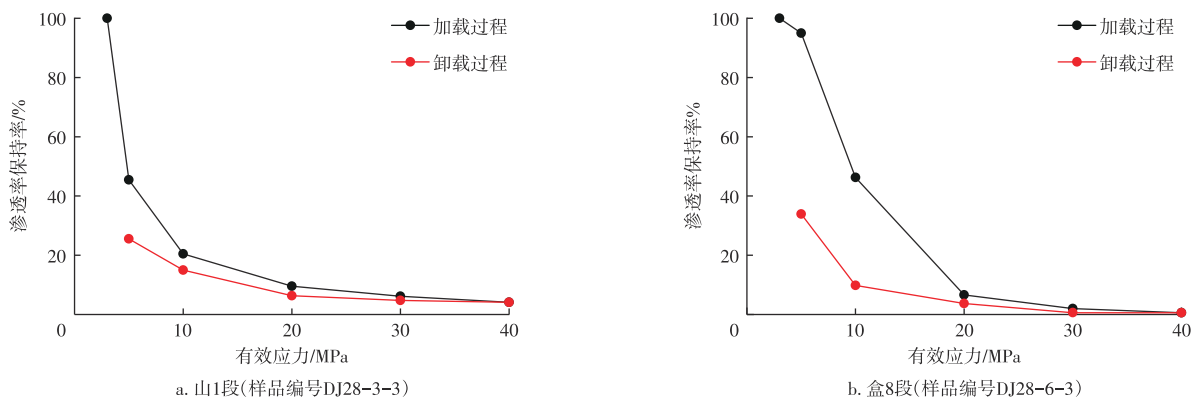


图10 鄂东缘二叠系盒8段和山1段渗透率保持率与有效应力的关系

Fig. 10 Relationships between permeability retention rate and effective stress for Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

42.82%(胍胶压裂液),目前已停产。

XY-1井生产井段整体表现为岩屑砂岩发育,黏土矿

物含量高,储层具有典型的低孔、低渗、低温、低压和纳米孔发育等特征。通过之前的实验研究表明:该类储层具

有潜在的流体敏感、应力敏感和水相圈闭损害,其中水敏、速敏、应力敏感损害最为突出,并且加剧了外来工作液侵入引发的水相圈闭损害。

在XY-1井的钻井过程中,一开井段漏失严重,且在气层前200 m,为提高钻井性能,泥浆中额外加入了聚合物,固相颗粒大量增加,加剧了储层固相残渣损害。气层段施工时间较长,浸泡时间高达336 h,水相侵入严重。在压裂过程中,射孔作业前压力检测不充分,射孔后井口发生溢流,发生速敏和应力敏感损害。地层温度介于60~65 °C,胍胶压裂液破胶程度不理想,且地层低压导致排液困难,并且压后返排压裂液氯根含量迅速上升,推测为压裂裂缝在近井带沟通了低压水层或井筒附近存在小断层引起水窜,进一步导致返排率低,大量水相滞留地层。

上述钻完井、水力压裂的工程特征和研究区储层地质特征,使气井开发过程中存在地层压力下降快、井筒携液能力弱等问题,并且极易发生储层敏感性、液相圈闭和液锁、应力敏感损害,是XY-1井产量递减快的重要原因。基于室内实验与矿场实际,提出以下针对低压致密砂岩气藏的储层保护对策:

1) 研究区致密砂岩气藏属低压气藏,地层能量不足,压力下降较快,且纳米级孔隙占比高,毛管力较大,导致气井生产压差和返排压差受限,极易造成水相滞留。地层温度较低,将增加压裂液破胶难度,堵塞孔隙,增大工作液侵入后的返排难度,造成水相圈闭损害。由于地层能量较低,如果为了获得高产而盲目增大压差,则可能引发速敏损害,同时孔隙压力的快速下降易导致严重的应力敏感损害。因此,应选择合理的注入、压后返排速率和生产压差,促使束缚水向可动水转化;合理添加助排剂,优化压裂液破胶剂加量和破胶时间,明确低损害压裂液合理的固相粒径范围;尽量提高机械钻速,减少钻井液对储层的浸泡时间,并且在起下钻作业时避免较大的压力波动。

2) 储层黏土含量总体较高,低压导致的储层液相

滞留可能使黏土矿物与外来流体发生更为充分的物理、化学反应,加重水敏、盐敏、碱敏、酸敏的损害程度。此外,主力产层黏土矿物均以伊蒙间层为主,外来流体滞留易导致孔隙与裂缝压缩或闭合,降低渗透性。因此,应增强入井流体与地层水和不同入井流体之间的配伍性。避免入井流体矿化度低于60 000 mg/L,并且优化工作液黏土稳定剂加量,以弱化水敏和盐敏损害。控制工作液pH值不高于7.79,避免产生二次损害。此外,酸敏程度为中等偏弱—中等偏强,在开发过程中需谨慎酸化。

3) 水力压裂是当前研究区的主要增产改造手段,但对比投入与产出,效果普遍不理想,储层矿物组分和孔隙结构特征决定了水相圈闭损害较为严重。可以考虑物理和化学2种方式缓解压后水锁损害,物理方式包括液氮伴注和注醇等工艺措施,能够在致密砂岩中进行润湿性修饰和降低气、水界面张力。

基于上述原则,对钻完井和水力压裂过程,尤其是入井工作液的性能参数进行了一系列优化,并且适当使用液氮伴注、注醇类液体等措施,效果显著。研究区储层损害特征和保护对策如表11所示。在实施了储层保护措施之前,XY-1井的储层段(山1段与盒8段)压裂后的压力系数降至0.3,导致产量快速递减,直至无产量。在实施了上述储层保护措施之后,压力系数升至0.6,XY-1井日产气量超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,表明储层保护效果显著。

## 6 结论

1) 鄂东缘低压致密砂岩产层具有较高的储层损害潜力。岩石类型为细—中粒岩屑砂岩,黏土矿物占比平均21.59%,以伊蒙间层为主。储层孔隙类型主要为剩余粒间孔与次生溶蚀孔,纳米孔发育,且微—纳孔缝连通性差。盒8段岩心中值孔隙度为6.43%,中值渗透率为 $0.149 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;山1段岩心中值孔隙度为6.46%,中值渗

表11 鄂东缘二叠系盒8段和山1段研究区致密气储层敏感性和储层保护对策

Table 11 Sensitivity and corresponding reservoir protection strategies for tight gas reservoirs in study area of Permian He-8 and Shan-1 members, eastern margin of Ordos Basin

类型	山1段		盒8段		储层保护对策	
	敏感性指数/%	程度	敏感性指数/%	程度		
流体敏感 损害	速敏	16.67	弱	5.55	弱	控制流体注入流速和返排流速,控制压力梯度,流速不高于0.3 mL/min
	水敏	29.56	弱	31.00	中等偏弱	
	盐敏	25.00	弱	33.50	中等偏弱	入井流体矿化度不低于60 000 mg/L,优化压裂液黏土稳定剂加量
	酸敏	46.00	中等偏弱	64.30	中等偏强	
	碱敏	61.00	中等偏强	31.00	中等偏弱	
应力敏感损害	55.00	中等偏强	80.00	强	控制入井流体pH值不高于7.79 控制生产压差	

透率为 $0.387 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;地层水pH值介于5.47~6.83,平均总矿化度为118 077.21 mg/L。

2) 研究区储层具有弱速敏、弱—中等偏弱水敏、弱—中等偏弱盐敏、中等偏弱—中等偏强酸敏、弱—中等偏强碱敏、中等偏强—强应力敏感。平均临界流速为0.3 mL/min,平均临界矿化度为60 000 mg/L,平均临界pH值为7.79。

3) 工作液性能调控时应避免水敏、碱敏和酸敏损害;制定生产制度时应考虑压后储层的多尺度应力敏感和速敏损害,钻完井液与压裂液顺序接触引发的储层损害。

4) 水相圈闭是该类储层的损害防控重点。现场试验表明:在优化工作液pH值、矿化度等性能参数的同时,强化钻完井液屏蔽暂堵效果,适当使用液氮伴注、注醇类液体等措施提高压裂液返排率,对于释放气井产能具有积极意义。

#### 参考文献

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.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, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [2] 邹才能,张国生,杨智,等.非常规油气概念、特征、潜力及技术:兼论非常规油气地质学[J].石油勘探与开发,2013,40(4):385-399.  
ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399.
- [3] 戴金星,倪云燕,吴小奇.中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J].石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.  
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [4] 魏国齐,张福东,李君,等.中国致密砂岩气成藏理论进展[J].天然气地球科学,2016,27(2):199-210.  
WEI Guoqi, ZHANG Fudong, LI Jun, et al. New progress of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 199-210.
- [5] 马尚伟,魏丽,赵飞,等.鄂尔多斯盆地南部石盒子组盒8下段砂岩物源分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(4):1-11.  
MA Shangwei, WEI Li, ZHAO Fei, et al. Provenance analysis of sandstone in lower segment of He 8 member of Shihezi formation, Southern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science), 2023, 38(4): 1-11.
- [6] 李建忠,郭彬程,郑民,等.中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(4):607-615.  
LI Jianzhong, GUO Bincheng, ZHENG Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615.
- [7] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.  
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [8] 李宪文,杨波,赵倩云,等.气悬浮支撑剂技术在长庆致密气压裂中的应用[J].钻采工艺,2023,46(1):64-70.  
LI Xianwen, YANG Bo, ZHAO Qianyun, et al. Application of bubble-suspending proppant technology used for fracturing in Changqing's tight gas reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(1): 64-70.
- [9] 湛丽,王才志,宁从前,等.基于机器学习的鄂尔多斯盆地陇东地区长7段岩相测井识别方法[J].油气藏评价与开发,2023,13(4):525-536.  
SHEN Li, WANG Caizhi, NING Congqian, et al. Well-log lithofacies classification based on machine learning for Chang-7 member in Longdong area of Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 525-536.
- [10] 康毅力,张杜杰,游利军,等.塔里木盆地超深致密砂岩气藏储层流体敏感性评价[J].石油与天然气地质,2018,39(4):738-748.  
KANG Yili, ZHANG Dujie, YOU Lijun, et al. Fluid sensitivity evaluation of ultra-deep tight sandstone gas reservoirs, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 738-748.
- [11] 柴光胜,师永民,杜书恒,等.致密砂岩储层敏感性评价及影响因素分析:以鄂尔多斯盆地盐池地区长8储层为例[J].北京大学学报(自然科学版),2020,56(2):253-261.  
CHAI Guangsheng, SHI Yongmin, DU Shuheng, et al. Sensitivity evaluation and influencing factors analysis of tight sandstone reservoirs: A case study of the Chang-8 Reservoir in Yanchi Area of Ordos Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(2): 253-261.
- [12] 王巧智,江安,苏延辉,等.用CT扫描技术分析致密砂岩储层应力敏感性[J].钻采工艺,2022,45(4):56-60.  
WANG Qiaozhi, JIANG An, SU Yanhui, et al. Stress sensitivity analysis for tight sandstone reservoir by CT scanning technology[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(4): 56-60.
- [13] 黎明,周福建,田亚凯,等.致密砂岩储层应力敏感模型建立与验证[J].天然气与石油,2021,39(6):75-81.  
LI Ming, ZHOU Fujian, TIAN Yakai, et al. Establishment and verification of stress-sensitive model for tight sandstone reservoirs[J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(6): 75-81.
- [14] 冯乔,耿安松,徐小蓉,等.鄂尔多斯盆地上古生界低压气藏成因[J].石油学报,2007,28(1):33-37.  
FENG Qiao, GENG Ansong, XU Xiaorong, et al. Genesis of low-pressure gas reservoir of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 33-37.
- [15] 胡进军,肖伟伟,邓义成,等.致密性气藏储层损害实验方法探讨与评价[J].钻井液与完井液,2020,37(4):488-493.  
HU Jinjun, XIAO Weiwei, DENG Yicheng, et al. Investigation on experimental methods and evaluation of tight gas reservoir Damage

- [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(4): 488-493.
- [16] 聂志宏, 巢海燕, 刘莹, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气生产特征及开发对策:以大宁—吉县区块为例[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1738-1746.  
NIE Zhihong, CHAO Haiyan, LIU Ying, et al. Development strategy and production characteristics of deep coalbed methane in the east Ordos Basin: Taking Daning-Jixian block for example[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1738-1746.
- [17] 程敏华, 雷丹凤, 张连群, 等. 苏里格致密砂岩气田效益开发技术对策研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(3): 475-483.  
CHENG Minhua, LEI Danfeng, ZHANG Lianqun, et al. Technical strategy for beneficial development of tight sand gas in Sulige Gas Field[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(3): 475-483.
- [18] 党佳城, 赵靖舟, 耳闯, 等. 大宁—吉县地区盒8段储层特征及其控气作用[J]. *断块油气田*, 2023, 30(4): 529-534.  
DANG Jiacheng, ZHAO Jingzhou, ER Chuang, et al. Reservoir characteristics and its gas control of He 8 Member in Daning-Jixian area[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(4): 529-534.
- [19] 宋雨纯, 黄昊, 周创飞, 等. 姬源油田麻黄山地区长4+5和长6储集层敏感性差异评价[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(5): 546-553.  
SONG Yuchun, HUANG Hao, ZHOU Chuangfei, et al. Evaluation on sensitivity difference between Chang 4+5 and Chang 6 reservoirs in Mahuangshan Area of Ji Yuan Oilfield[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(5): 546-553.
- [20] 李五忠, 陈刚, 孙斌, 等. 大宁—吉县地区煤层气成藏条件及富集规律[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(2): 352-360.  
LI Wuzhong, CHEN Gang, SUN Bin, et al. Geological controls of coalbed methane enrichment in Daning-Jixian Area, Southeastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(2): 352-360.
- [21] 宗廷博, 陈德照, 杨颀, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗西部山西组致密砂岩储层特征及物性控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(4): 608-622.  
ZONG Tingbo, CHEN Dezhaohao, YANG Di, et al. Tight sandstone reservoir characteristics and physical property control factors of Shanxi Formation in western Hangjinqi, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(4): 608-622.
- [22] 何涛, 王芳, 汪伶俐. 致密砂岩储层微观孔隙结构特征:以鄂尔多斯盆地延长组长7储层为例[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(4): 23-26.  
HE Tao, WANG Fang, WANG Lingli. Characteristics of micropore structure of tight sandstone reservoir: A case study from Chang 7 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(4): 23-26.
- [23] 李爱芬, 任晓霞, 王桂娟, 等. 核磁共振研究致密砂岩孔隙结构的方法及应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(6): 92-98.  
LI Aifen, REN Xiaoxia, WANG Guijuan, et al. Characterization of pore structure of low permeability reservoirs using a nuclear magnetic resonance method[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2015, 39(6): 92-98.
- [24] 杨建. 川中地区致密砂岩气藏损害机理及保护技术研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2006.  
YANG Jian. Study on the formation damage mechanisms and protective techniques of tight sandstone gas reservoirs in the center of Sichuan Basin[D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2006.
- [25] 陈明君, 康毅力, 游利军, 等. 饱和水致密砂岩电学参数对有效应力变化的响应[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(3): 1128-1132.  
CHEN Mingjun, KANG Yili, YOU Lijun, et al. The response of electrical parameters of saturated tight sandstone to effective stress changes[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(3): 1128-1132.
- [26] 杜新龙. 低渗透微裂缝砂岩油层损害评价方法及损害机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2009.  
DU Xinlong. Evaluation methods and mechanism of formation damage in low-permeability sandstone reservoirs with micro fractures [D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2009.
- [27] 康毅力, 赖哲涵, 陈明君, 等. 基于压力衰减法的页岩气体扩散系数应力敏感性实验[J]. *天然气工业*, 2022, 42(2): 59-70.  
KANG Yili, LAI Zhehan, CHEN Mingjun, et al. Stress sensitivity experiments of shale gas diffusion coefficients based on the pressure decay method[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(2): 59-70.
- [28] 康毅力, 赖哲涵, 陈明君, 等. 页岩储层应力敏感性的时间效应[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(1): 53-63.  
KANG Yili, LAI Zhehan, CHEN Mingjun, et al. Time effects of stress sensitivity in shale reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2024, 46(1): 53-63.

(编辑 黄颖)