

# Study on Reservoir Damage Mechanism and Protection Drilling Fluid of Jingbian Ordovician Carbonate

Mingna Bai<sup>1</sup>, Bo Li<sup>1</sup>, Yong Ouyang<sup>1</sup>, Zhifeng Duan<sup>1</sup>, Baojun Li<sup>2</sup>, Yu Zhang<sup>2</sup>, Weian Huang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Oil and Gas Technology Institute, Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong  
Email: bmn\_cq@petrochina.com.cn

Received: Jun. 16<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 16<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The fabric analysis, poroperm composition analysis, surface wettability analysis and sensitivity test were conducted with cores out of Jingbian Ordovician carbonate reservoir by X-ray diffraction, SEM, image logging and mercury penetration method. Experimental results show that the core of Jingbian which was belonged to the typical low porosity, fractured reservoir, had the characteristics of developed micro-cracks and strong heterogeneity. The main reason for formation damage was stress sensitivity and water blocking. Aimed at the characteristic of Ordovician carbonate reservoir damage, the size grading of temporary plugging materials was optimized, the anti-water blocking additive was selected and the anti high temperature reservoir protection drilling fluid was developed.

## Keywords

Carbonate Reservoir, Damage Mechanism, Stress Sensitivity, Water Blocking, Jingbian Gas Oilfield

---

# 靖边奥陶系碳酸盐岩储层损害机理及保护钻井液研究

白明娜<sup>1</sup>, 李波<sup>1</sup>, 欧阳勇<sup>1</sup>, 段志锋<sup>1</sup>, 李宝军<sup>2</sup>, 张宇<sup>2</sup>, 黄维安<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国石油长庆油田油气工艺研究院, 陕西 西安

<sup>2</sup>川庆钻探工程有限公司工程技术研究院, 陕西 西安

<sup>3</sup>中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛

Email: bmn\_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020年6月16日; 录用日期: 2020年7月16日; 发布日期: 2020年9月15日

## 摘要

利用X-衍射、电镜扫描、成像测井资料分析、压汞分析等实验手段对靖边奥陶系碳酸盐岩储层岩心进行了储层组构分析、孔渗结构分析、敏感性实验评价以及表面润湿性分析, 实验结果表明, 靖边奥陶系碳酸盐岩储层岩心发育有微裂缝、不均质性强, 属于典型的低孔隙度、裂缝性储层, 造成储层伤害的主要原因是应力敏感和水锁。针对碳酸盐岩储层损害特点, 基于解水锁剂优选、暂堵材料粒径级配优化, 研制出了抗高温碳酸盐岩储层保护钻井液。

## 关键词

碳酸盐岩储层, 损害机理, 应力敏感, 水锁, 靖边气田

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

靖边气田位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中部、中央古隆起东北侧的靖边—横山一带, 北至召4井—陕199井、南到陕108井, 东起陕200井一线、西接陕53井, 走向为北北东向, 长约240 km、宽约130 km、面积逾 $3.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是与奥陶系海相碳酸盐岩有关的风化壳型低渗透、低丰度、低产的大型复杂气田[1]。目前国内外关于碳酸盐岩储层损害机理的研究比较局限, 主要是针对敏感性损害、应力损害和圈闭损害等方面。经过各油田多年的生产实际情况显示, 因储层敏感性造成的储层产量下降依然是一个普遍显现[2]。Ayoub等人通过研究发现当岩样含有粒间孔时, 有效应力增加, 渗透率呈缓慢下降的趋势, 如果岩样含有溶蚀孔时, 随着有效应力的增加, 渗透率首先呈急剧下降的趋势, 随后又呈缓慢下降的趋势[3][4]。刘均一等人根据南海东方油气田的储层物性和开发要求, 研制出了一套甲酸铯无固相完井液体体系[5]。杨兰田等针对塔里木盆地玉北区块裂缝性碳酸盐储层, 提出该区块损害机理主要为碱性液体、水锁和应力敏感性对储层的伤害, 并优选了三种性能优异的储层保护剂, 建立了储层保护钻井液体体系[6]。杨培龙针对米桑油田碳酸盐岩储层采用NaCl, HCOONa复合盐水调节密度并加入一定量缓蚀剂建立了一套

酸化完井液体系, 具有很好的储层保护性能[7]。充分认识储层特征, 评价储层的损害类型与程度, 揭示储层的潜在损害因素, 研究储层损害的机理, 并提出勘探开发过程中的储层保护措施与建议, 对减轻开发过程的储层损害, 改善该油田的勘探开发效果和效益, 具有重要意义[8]。

## 2. 储层潜在损害机理分析

### 2.1. 碳酸盐岩储层组构分析

#### 2.1.1. X-衍射分析

如表 1 及表 2 的 X-射线衍射分析结果表明, 靖边区块储层矿物组成主要为石英、方解石、白云石和粘土矿物, 矿物组成变化较大; 粘土矿物中主要为伊利石和伊/蒙混层, 但伊/蒙间层比含量较低有潜在速敏。

**Table 1.** X-ray diffraction total mineral analysis results of rock samples from Ordovician carbonate reservoirs in Jingbian (%)

**表 1.** 靖边奥陶系碳酸盐岩储层岩样 X-射线衍射全矿物分析结果(%)

样号	层位	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	白铁矿	粘土矿物总量
1	马家沟	1	-	-	95	2	-	-	-	2
2	马家沟	39	-	-	9	20	-	4	-	28
3	马家沟	2	-	-	94	3	-	-	-	1
4	马家沟	1	-	-	91	7	-	-	-	1
5	马家沟	4	-	-	92	3	-	-	-	1
6	马家沟	26	-	-	5	3	1	38	8	19
7	马家沟	94	-	-	1	2	-	1	-	2
8	马家沟	3	-	-	94	-	-	-	-	3
9	马家沟	3	1	-	91	4	-	-	-	1

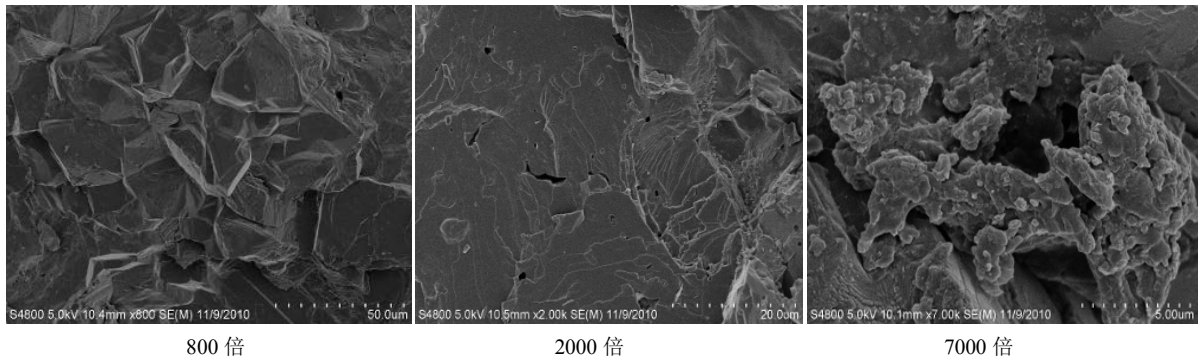
**Table 2.** X-ray diffraction clay mineral analysis results of Jingbian ordovician carbonate reservoir rock samples

**表 2.** 靖边奥陶系碳酸盐岩储层岩样 X-射线衍射粘土矿物分析结果

样号	层位	高岭石 (K)	绿泥石 (Ch)	伊利石 (I)	伊/蒙间层 (I/S)	伊/蒙间层比 (%S)
样号	层位	1	1	75	23	10
1	马家沟	0	0	80	20	10
2	马家沟	1	1	71	27	10
3	马家沟	0	0	91	9	10
4	马家沟	0	0	93	7	10
5	马家沟	27	5	0	68	50
6	马家沟	0	0	79	21	10
7	马家沟	0	0	75	25	10
8	马家沟	0	0	90	10	10

#### 2.1.2. 扫描电镜分析

扫描电镜分析结果表明, 堡区块储层发育有微裂缝, 但基质构造致密, 微裂缝中填充有伊利石和伊/蒙混层, 微裂缝相互交叉错断, 连通性较好, 见图 1。

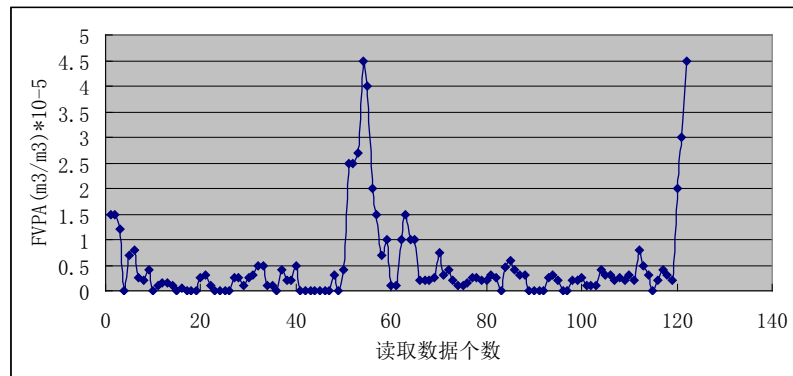


**Figure 1.** Scanning electron micrograph of Majiagou Formation No. 1 rock sample  
**图 1.** 马家沟组 1 号岩样扫描电镜图片

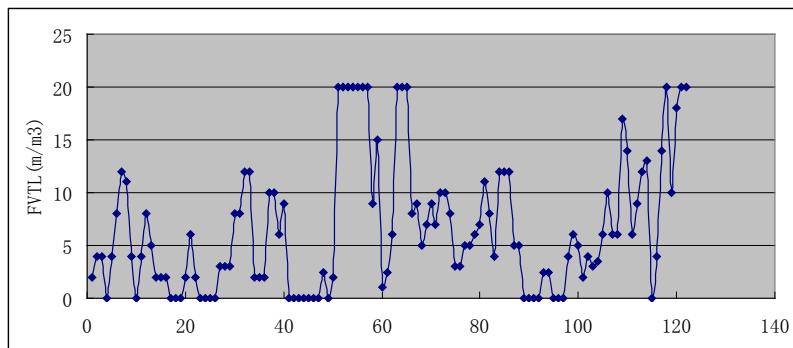
## 2.2. 孔渗结构分析

### 2.2.1. 成像测井资料分析

从图 2 看出, JB-1 井裂缝相对最发育、裂缝渗透能力相对最强的井段为 3758.5~3763.5 米(横坐标 60), 该段裂缝的条数多、角度高、连续性好, 多为网状缝, 且后期在裂缝发育的基础上, 又发育有溶蚀, 进一步提高了裂缝的渗透性, 计算的裂缝宽度为 11  $\mu\text{m}$ , 裂缝的孔隙度为 0.02%, 结合 DSI 处理结果综合评价为中等裂缝型储层。大部分井段无孔隙, 物性较差, 物性较好的储层段为 3740~3743 米和 3759~3763.5 米, 全井段只有一段孔隙相对最发育, 深度为 3740.0~3743.0 米。



(a) 视裂缝孔隙度



(b) 裂缝长度

**Figure 2.** Fracture parameters of 3734 m~3794.5 m in well JB-1 vary with well depth  
**图 2.** JB-1 井 3734 m~3794.5 m 裂缝参数随井深变化

### 2.2.2. 压汞分析

实验(图 3)测得 JB-1 井 3739.96 m 岩样的孔隙度为 10%，排驱压力 0.30646 MPa，最大孔喉半径 2.400  $\mu\text{m}$ ，孔喉半径平均值 0.7784  $\mu\text{m}$ ，最大汞饱和度为 12.38%，退汞效率为 101.914%。测试结果表明，JB-1 井 3739.96 m 岩样为典型的低孔隙度、裂缝性储层，不均质性较强。

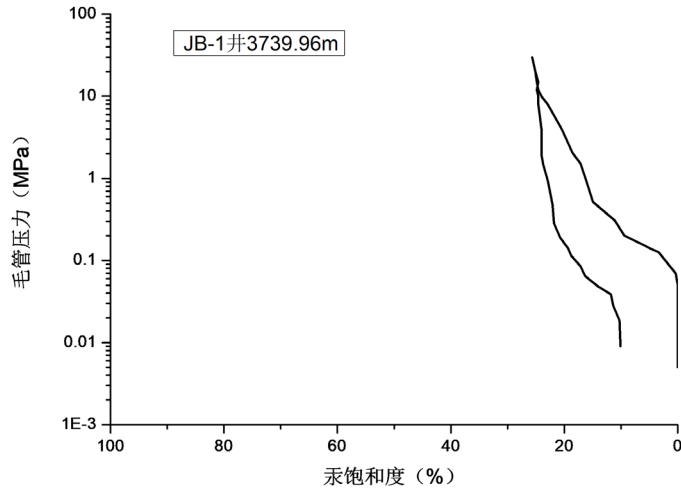


Figure 3. Analysis result of mercury intrusion of 3739.96 m rock sample in Well JB-1

图 3. JB-1 井 3739.96 m 岩样压汞分析结果

## 2.3. 敏感性评价

### 2.3.1. 应力敏感性分析

测试结果(图 4)表明，随围压增加，JB-1 井 3739.96 m 岩样渗透率损害系数先增加后下降。当净压为 3.5 MPa 时，渗透率损害系数达到最大值，而后渗透率损害系数逐渐下降，这说明靖边构造储层岩样的应力敏感显著，应力敏感点为 3.5 MPa。

### 2.3.2. 速敏性评价

速敏性评价结果(图 5)表明，随实验流量的增加，JB-1 井 3739.96 m 岩样渗透率没有损害，岩心无速敏，无临界流速。

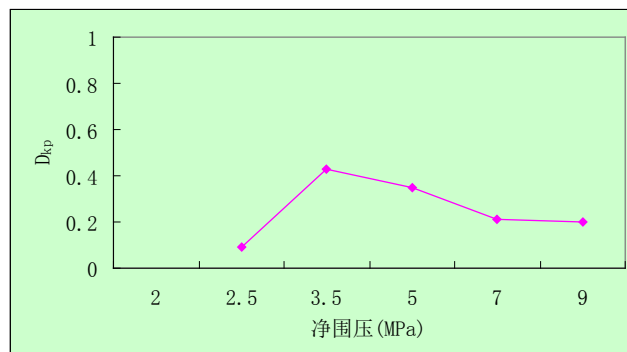


Figure 4. Evaluation Results of Stress Sensitive Damage of 3739.96 m Rock Sample in Well JB-1

图 4. JB-1 井 3739.96 m 岩样应力敏感伤害评价结果

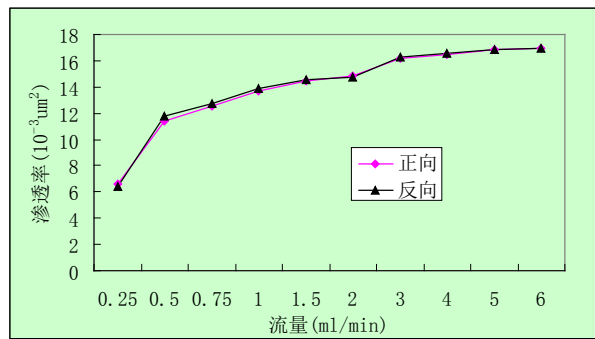


Figure 5. Evaluation result of quick-sensitivity injury of 3739.96 m rock sample in Well JB-1

图 5. JB-1 井 3739.96 m 岩样速敏性伤害评价结果

### 2.3.3. 水敏感性评价

水敏感性评价结果(图 6)表明, 岩心渗透率随流通液矿化度下降一直很稳定, 没有下降趋势, 直至矿化度减小到 5000 mg/L 时, 渗透率下降 7.58%, 所以该实验岩心临界矿化度 10,000 mg/L。具有弱水敏性。

### 2.3.4. 酸敏性评价

图 7 表明, 通土酸后岩心渗透率下降 15.8%, 属于弱酸敏, 但计量出口端有沉淀物通出, 推测为由于实验岩心过短, 岩心缝(人造缝)中的  $\text{GaF}_2$  沉淀物被部分冲出造成, 实际矿藏造成的伤害可能会更高。

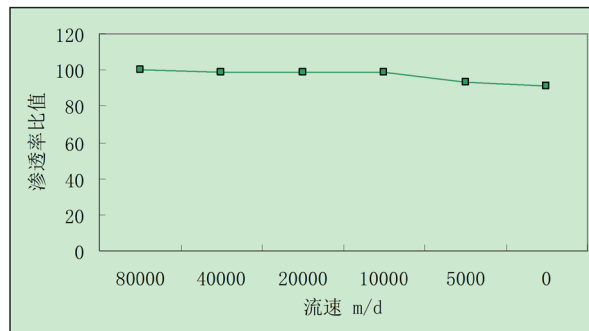


Figure 6. Evaluation results of water sensitivity damage of 3739.96 m rock sample in Well JB-1

图 6. JB-1 井 3739.96 m 岩样水敏性伤害评价结果

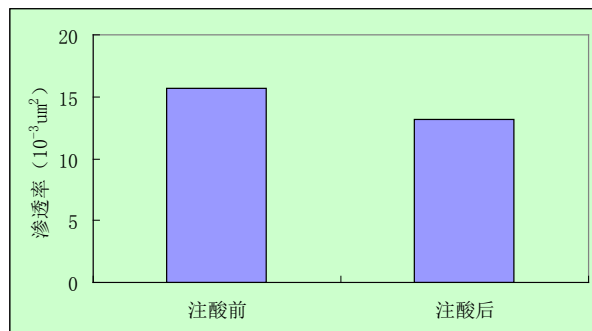


Figure 7. Evaluation results of acid sensitivity of rock sample soil of 3739.96 m in well JB-1

图 7. JB-1 井 3739.96 m 岩样土酸敏性评价结果

### 2.3.5. 碱敏性评价

碱敏性评价结果(图 8)表明, 储层岩心渗透率随实验流体 pH 值的增大, 渗透率基本没有变化, 当实验流体 pH 值增大至 13 时, 岩心渗透率下降 3.2%, 无碱敏。

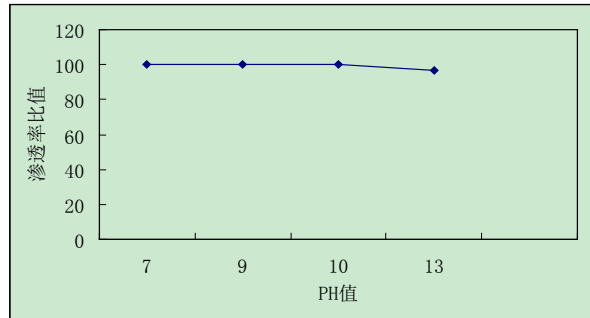


Figure 8. Evaluation results of alkali-sensitive damage of 3739.96 m rock sample in Well JB-1

图 8. JB-1 井 3739.96 m 岩样碱敏性伤害评价结果

### 2.4. 表面润湿性分析

接触角大小与油水对固体的润湿程度有关。因此, 测量油 - 水 - 油藏岩石系统的接触角, 可以了解油、水对油藏岩石的润湿性。测试结果表明, 靖边气田岩样 JB-1 井 3741.0 m 灰岩岩样具有中等偏弱的亲水性。测定结果见图 9 及表 3。

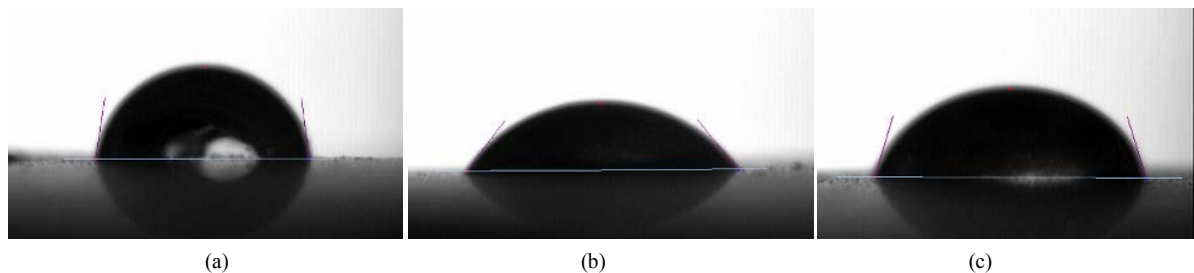


Figure 9. Wettability measurement results of 3739.96 m limestone sample in JB-1 well in Jingbian gas field

图 9. 靖边气田 JB-1 井 3739.96 m 灰岩岩样润湿性测定结果

Table 3. Wettability test results of 3741.0 m limestone sample in JB-1 well in Jingbian gas field

表 3. 靖边气田 JB-1 井 3741.0 m 灰岩岩样润湿性测试结果

序号	左接触角/°	右接触角/°	平均接触角/°	三次测定平均值/°
1	80.33	83.21	81.77	
2	49.43	48.54	48.99	68.66
3	75.11	75.31	75.21	

## 3. 储层保护钻井液技术

### 3.1. 屏蔽暂堵设计

根据孔渗结构参数分析结果, 设计屏蔽暂堵方案设计如下[9] [10] [11]:

按“2%~3%刚性粒子 + 2%纤维堵漏剂(可选) + 1.5%充填粒子 + 1%~2%软化粒子”的规则, 来确定

各类暂堵剂比例。

根据实验室现有各种暂堵剂的固相颗粒粒度分布测定结果,并综合考虑产品质量、成本的因素,推荐用细目碳酸钙(600目和800目,粒径分布见图10(a)和图10(b))为刚性粒子,油溶性树脂为充填和软化粒子。设计结果见表4。

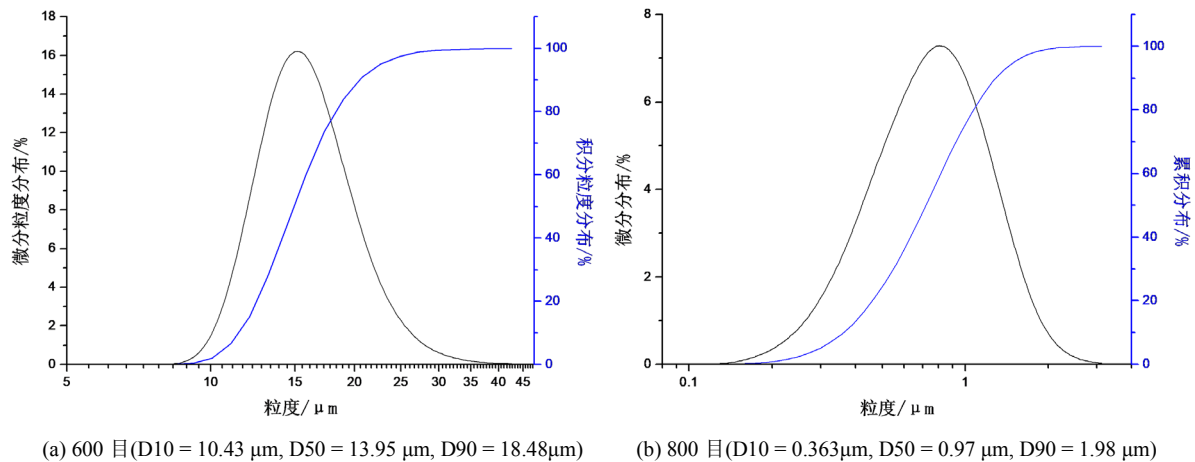


Figure 10. Test results of particle size distribution of calcium carbonate

图 10. 细目碳酸钙粒径分布测试结果

Table 4. Shielding temporary blocking design scheme

表 4. 屏蔽暂堵设计方案

储层	孔喉直径平均值 μm	刚性颗粒平均 直径/μm	软化、充填粒子 平均直径/μm	纤维状暂堵剂 平均直径/μm
JB-1 井 3739.96 m	2.40	1.63	0.81	1.63
JB-2 井 5226.4 m	0.30	0.20	0.10	0.20
JB-3 井 4507.5 m	11.2	7.47	3.73	7.47

### 3.2. 解水锁剂优选

考察了不同表面活性剂对靖边气田 JB-1 井 3739.96 m 灰岩岩样润湿性的影响(表 5),以优选出高效解水锁剂。测试结果表明,SD-905 能显著降低 JB-1 井 3739.96 m 灰岩岩样的润湿角,有利于减少“液珠”存在,降低水锁损害,并能增加驱油动力,有利于提高采收率。

Table 5. Effect of surfactants on the wettability of the limestone surface of 3739.96 m in well JB-1

表 5. 表面活性剂对 JB-1 井 3739.96 m 灰岩表面润湿性的影响

测试样品	蒸馏水	0.4%OP-10	0.4%ABS	0.4%SD-905	0.4%JDJSS
接触角/°	68.66	10.17	25.87	5.25	16.28

### 3.3. 抗高温碳酸盐岩储层保护钻井液配方

基于屏蔽暂堵设计及解水锁剂优选,并结合其他抗高温处理剂优选,构建了抗温达 210℃的低固相储层保护钻井液配方:2.5%膨润土浆 + 0.7%流型调节剂 SDKP + 6%酚醛树脂 SMP-I + 4%褐煤树脂 SPNH + 4.0%磺化沥青 FT3000 + 2%高效润滑剂 SD-505 + 0.3%SD-905 + 0.8%硅氟降粘剂 SDF-26 + 3.0%NaCl +



3%细目碳酸钙 + 2.5%双溶性树脂 JDSZ + 2%超细纤维 DL-93 (记为 JDDGX210 配方)。

对 JDDGX210 进行室内碳酸盐岩储层岩心污染实验评价, 分别测试其在 210℃ 下污染前后、不同状态下的渗透率, 得到该配方的应力敏感性、酸敏性、碱敏性、水敏性等达到现场钻井要求。

JDDGX210 配方对碳酸盐岩储层岩心污染前后的结果(表 6)表明, JDDGX210 配方污染后, 在污染端形成致密封堵带, 渗透率回复率仅为 8.02%; 切去 0.6 cm 后, 渗透率回复率为 90.88%, 表明钻井液侵入的深度浅, 屏蔽暂堵效果好。

**Table 6.** Evaluation results of JDDGX210 formula carbonate reservoir protection performance

**表 6.** JDDGX210 配方碳酸盐岩储层保护性能评价结果

污染前渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	污染后渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	渗透率恢复率 %	切去 0.6 cm 后渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	切去 0.8 cm 后渗透率 恢复率/%
43.64	3.50	8.02	39.66	90.88

## 4. 结论

1) 靖边奥陶系碳酸盐岩储层岩样粘土矿物中主要为伊利石和伊/蒙混层, 且储层发育有微裂缝, 但基质构造致密, 微裂缝中填充有伊利石和伊/蒙混层, 微裂缝相互交叉错断, 连通性较好。

2) 靖边构造储层不均质性强, 裂缝发育情况差别较大, 平均孔隙度较低, 属于典型的低孔隙度、裂缝性储层。

3) 靖边构造储层应力敏感和水锁损害性较为严重, 水敏、盐酸敏、土酸敏感性损害相对较弱, 无速敏和碱敏。

4) 基于屏蔽暂堵设计和解水锁剂优选构建的抗高温碳酸盐岩储层保护钻井液体系具有优良的储层保护效果。

## 基金项目

中国石油集团(股份)公司重大科技专项“长庆油田 5000 万吨持续高效稳产关键技术研究与应用”(2016E-05)。

## 参考文献

- [1] 魏丽. 靖边潜台西北侧马五段碳酸盐岩古岩溶储层的形成与天然气成藏规律[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2016.
- [2] 王丽萍. 浅析裂缝性碳酸盐岩储层保护机理[J]. 化工管理, 2015(26): 93.
- [3] Sadeghzad, A. and Beiranvand, B. (2003) Unusual Carbonate Rocks Showing Increasing Trends for Rock Compressibility as the Applied Net Stress Increases. SPE 80442.
- [4] 刘雪芬, 康毅力, 罗平亚, 游利军. 致密砂岩储层水相圈闭损害及防治方法探索[J]. 油田化学, 2017, 34(2): 211-216.
- [5] 刘均一, 邱正松, 黄维安, 邢希金, 王伟吉. 南海东方气田高密度抗高温钻井液完井液室内研究[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 78-82.
- [6] 杨兰田, 耿云鹏, 牛晓, 鄢捷年, 赵珊珊. 保护缝洞性碳酸盐岩储层的钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(6): 17-20+86.
- [7] 杨培龙, 刘卫红, 李强, 等. 保护碳酸盐储层的酸化完井液体系研究[J]. 油田化学, 2017, 34(1): 21-24.
- [8] 陈力. H 油田缝洞型碳酸盐岩储层损害及完井液研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [9] 杨枝. 塔中地区裂缝性碳酸盐岩储层保护技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [10] 杨枝, 孙金声, 张洁, 张希文, 王成彪. 裂缝性碳酸盐岩储层保护技术研究进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),

2009, 36(11): 4-10.

- [11] 何良泉, 蒋红梅, 王延民, 崔健, 杨国涛, 莒拉提. 裂缝-溶洞型碳酸盐岩储层保护[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2008(4): 19-22.