

引用格式:孙藏军,黄磊,吴浩君,等.渤海海域B构造特低渗—低渗储层酸敏性评价[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):703-708.  
SUN Cangjun, HUANG Lei, WU Haojun, et al. Acid sensitivity evaluation of ultra-low permeability reservoir in structure-B of Bohai Bay[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5):703-708.  
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.006

## 渤海海域B构造特低渗—低渗储层酸敏性评价

孙藏军,黄磊,吴浩君,姜永,王迪

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津300459)

**摘要:**针对渤海B构造特低渗—低渗储层,开展酸敏性实验评价。结合铸体薄片、扫描电镜、核磁共振、X-衍射等分析化验资料,对酸岩反应前后岩石样品孔隙结构变化及其原因进行了分析,并探讨了土酸酸化储层的适用性。结果表明:研究区砂砾岩和片麻岩储层与土酸(7.2% $\text{HCl}+3\%\text{HF}$ )反应后,储层基本无伤害。酸岩后应后,研究区储层样品微孔隙发育,长石颗粒溶蚀孔发育,未见碳酸盐等易溶矿物,有效面孔率均增大,大、小孔隙数据增多, $T_2$ 截止值和束缚水饱和度均变小,孔隙结构变好;砂砾岩碎屑颗粒间仍呈线状—凹凸状接触,片麻岩储层矿物变晶仍呈粒状紧密接触,储层骨架稳定性仍较好。易溶型碳酸盐胶结物酸化溶蚀后,是造成储层孔隙结构变好的关键因素,因酸敏矿物绿泥石而产生的二次沉淀和不溶微粒堵塞孔喉对储层损害程度也较小。土酸与研究区储层反应后,孔隙结构得到改善,对改善储层渗透率具有一定的作用。

**关键词:**特低渗—低渗;酸敏性;微观孔隙结构;B构造;渤海海域

中图分类号:TE51

文献标识码:A

### Acid sensitivity evaluation of ultra-low permeability reservoir in structure-B of Bohai Bay

SUN Cangjun, HUANG Lei, WU Haojun, JIANG Yong, WANG Di

(Bohai Petroleum Institute of Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** The acid sensitivity test has been carried out to evaluate the ultra-low permeability reservoir in structure-B of Bohai Bay. Combined with the analysis and test data such as casting thin sections, scanning electron microscope, nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction, the reason of rock pore structure changes before and after the acid-rock reaction has been analyzed, and the applicability of the mud acid acidizing reservoir has been discussed. The results showed that the reservoirs of the glutenite and gneiss in the study area are basically unharmed after reacting with the soil acid (7.2% $\text{HCl}+3\%\text{HF}$ ). After the acid-rock reaction of the samples in the study area, the micropores and the dissolution pores of feldspar particles develop, no carbonate or other soluble minerals are found, the effective face rate and data of large and small pores increase, the cut-off value of  $T_2$  spectrum and irreducible water saturation decrease, and the pore structure become better. Meanwhile, the clastic grains of the glutenite are still in linear-convexity contact, the mineral metamorphic grains of gneisses reservoir are still in granular close contact, and the reservoir framework is still stable. The acidification and dissolution of soluble carbonate cement is the key factor to change the pore structure of reservoir in the study area. Secondary precipitation caused by acid-sensitive mineral chlorite and blockage of pore throat by insoluble particles have little damage to the reservoir. After the reaction of soil acid with the reservoir in the study area, the pore structure is improved, showing a constructive role, which has a certain applicability to improve the reservoir permeability.

**Keywords:** ultra low-low permeability, acid sensitivity, microscopic pore structure, structure-B, Bohai Bay

酸化是提高生产井产能的一项重要措施,但酸化过程中产生的二次沉淀物往往也会造成孔喉堵塞,从而降低储层渗透率,即酸敏损害<sup>[1-4]</sup>。近年来,

针对鄂尔多斯盆地、四川盆地等区域储层的酸敏机理、酸化适用性及敏感性影响因素等方面的分析<sup>[5-12]</sup>,前人已做了大量研究并取得了丰富成果,但其研究

收稿日期:2020-04-26。

第一作者简介:孙藏军(1988—),男,硕士,工程师,主要从事海上油气田开发地质研究工作。地址:天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局大厦B座,邮政编码:300459。E-mail:suncj2@cnooc.com.cn

基金项目:国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024-003)。

对象主要针对常规致密砂岩储层,而对特低渗—低渗砂砾岩和片麻岩储层的酸敏性评价研究甚少<sup>[13-15]</sup>,现有的研究成果难以指导渤海湾盆地中深层近源砂砾岩及深层片麻岩潜山油气藏的高效开发。

B构造储层具有埋藏深、岩性致密、黏土矿物类型多样且含量高等特殊地质特征,为典型特低渗—低渗储层,采用酸化增产措施,对于该构造后续高效开发显得尤为重要。为了解土酸(7.2% HCl+3% HF)对该构造特低渗—低渗砂砾岩和片麻岩储层是否会造成损害,利用酸敏实验评价结果资料,结合铸体薄片、扫描电镜、核磁共振、X-衍射等分析化验资料,进行酸岩反应前后岩石样品孔隙结构变化及其原因分析,并分析了酸敏损害机理,探讨了利用土酸酸化储层的适用性。

## 1 储层特征

B构造发育孔店组( $E_{1-2k}$ )和太古界(Ar)两套主力含气层段,埋深4 000 m左右,与上覆沙三段厚层泥岩构成良好的储盖组合。孔店组为近源扇三角洲沉积,岩性以砂砾岩为主,碎屑颗粒分选中等,呈次棱角一次圆状,颗粒间呈线状—凹凸状接触,填隙物主要见泥质、高岭石和少量碳酸盐胶结物,以溶蚀颗粒孔、粒内溶蚀孔为主,孔隙度介于2%~14.5%,平均为8.1%,渗透率介于 $(0.02 \sim 13.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $2.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为特低渗—低渗储层。太古界储层岩性主要为片麻岩,主要成分为斜长石、钾长石,少量石英,含量分别为:斜长石50%,钾长石45%,石英约5%,矿物变晶粒度约为0.8~2.7 mm,变晶呈粒状紧密接触,长石风化强烈,储集空间以裂缝为主,裂缝常见白云石所充填,孔隙度介于2.7%~12.8%,平均为5.2%,渗透率介于 $(0.01 \sim 11.81) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,

平均为 $0.733 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

## 2 黏土矿物特征

外来流体与储层中的黏土矿物常常会发生物理—化学反应,从而改变储层渗透率<sup>[16-19]</sup>。黏土矿物的类型、产状和分布是制约储层损害程度的关键因素<sup>[20]</sup>。

### 2.1 类型及含量

B构造储层的敏感性矿物较多,以自生矿物为主。通过X射线衍射和扫描电镜观察,敏感性矿物主要包括黏土矿物、碳酸盐矿物及硅质。黏土矿物主要有伊利石、绿泥石、高岭石、伊/蒙混层等。测试结果(表1)表明,孔店组砂砾岩黏土矿物中伊利石的质量分数最高,平均含量为79.7%,其次为绿泥石(9.3%)、高岭石(4.7%)及伊/蒙混层(6.3%)。太古界黏土矿物中伊利石的质量分数也最高,平均含量为39.3%,其次为伊/蒙混层(29.0%)、绿泥石(18.9%)、高岭石(12.8%)。

### 2.2 产状

扫描电镜下,伊利石常呈丝缕状或丝片状附着于颗粒表面,并向孔隙或喉道处延伸,或直接充填于钾长石或钠长石沿解理的粒内溶蚀孔(图1a)。丝片状伊利石会造成粒间大孔隙的分割变小或堵塞粒内溶蚀孔,从而降低储层渗透率,在外来流体作用下,还易造成伊利石晶粒碎片运移,进一步堵塞孔道。绿泥石呈针叶状附着于颗粒表面或堵塞粒内溶蚀孔隙(图1b),占据孔喉空间,降低储层渗透率。高岭石多呈鳞片状或书页状充填于岩石孔隙中(图1c)。碳酸盐胶结物主要为铁白云石、方解石,多胶结充填于孔隙。硅质主要是自生石英,次生石英加大少见。

表1 研究区储层黏土矿物X衍射分析  
Table 1 X-ray diffraction analysis of clay minerals in study area

井号	深度(m)	层位	岩性	参数	黏土矿物含量(%)					
					蒙皂石(S)	伊利石(I)	高岭石(K)	绿泥石(C)	伊/蒙混层(I/S)	绿/蒙混层(C/S)
				平均值	0	79.7	4.7	9.3	6.3	0
B-1	3 570~4 030	$E_{1-2k}$	砂砾岩	最大值	0	100.0	14.0	41.0	29.0	0
				最小值	0	39.0	0	0	0	0
				平均值	0	39.3	12.8	18.9	29.0	0
B-1	4 040~4 175	Ar	片麻岩	最大值	0	56.0	18.0	69.0	48.0	0
				最小值	0	13.0	6.0	4.0	11.0	0
				平均值	0	39.3	12.8	18.9	29.0	0

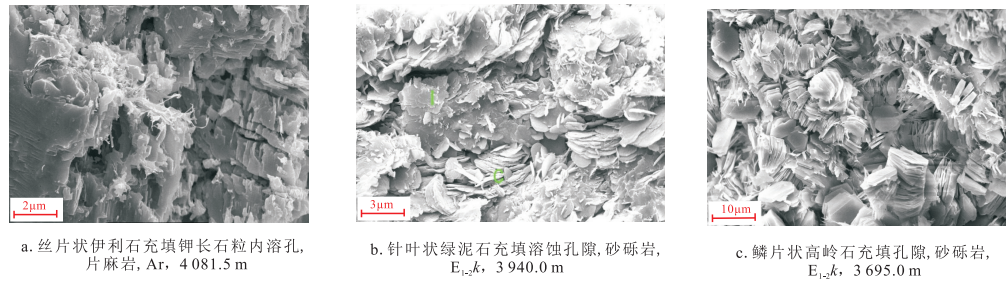


图1 研究区储层黏土矿物扫描电镜照片

Fig. 1 SEM images of clay minerals in study area

### 3 酸敏实验方法及结果

酸敏性评价主要是以岩心流动实验为基础,评价酸液注入岩石并反应后对储层渗透率的影响程度。该实验采用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—2010》,评价土酸(7.2% HCl+3% HF)对研究区储集层的敏感性损害程度。

酸敏性评价的实验流程:①配置与地层水矿化度相同的KCl盐水,静置1 d,过滤;②先称量岩心干重 $M_1$ ,加压饱和,取出岩心再称量其湿重 $M_2$ ,计算其液相孔隙度 $\varphi$ ;③测量酸化前岩样的液相渗透率 $K_1$ ;④注入酸液2 PV,在80℃温度下反应1 h;⑤测量酸化后岩样的渗透率 $K_2$ 。通过比较岩样在酸液处理前后地层水渗透率的变化情况,判断岩样遇酸的损害情况。

岩心酸敏实验结果(表2)表明:①酸化后岩心渗

透率变大,增大倍数介于0.21~2.85,并且片麻岩的酸化效果要好于砂砾岩;②酸化后正向驱渗透率略大于反向驱渗透率,说明有少量颗粒堵塞孔喉的现象;③酸化后, $K_{waf}/K_{ws}$ 均大于1,说明酸岩反应后,储层基本无伤害,渗透率得到改善。

### 4 储层酸岩反应探讨

#### 4.1 酸岩反应前后孔隙结构和骨架稳定性变化

为了研究酸液对岩石孔隙结构和骨架稳定性的影响,利用扫描电镜、铸体薄片和核磁共振等技术手段,采用与实验样品相邻或相同取样深度的酸岩反应前后的分析化验资料对比分析方法,进行孔隙结构和骨架稳定性对比分析。

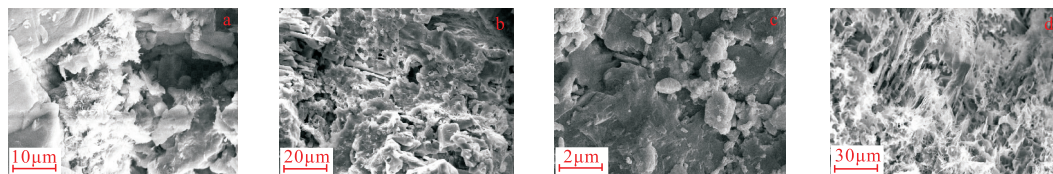
利用扫描电镜资料对比分析表明,与酸液反应前,岩石全貌整体较致密,偶见少量微孔隙,多见丝片状伊利石、方解石充填钠长石粒内溶蚀孔隙(图2a、

表2 研究区孔店组和太古界储层酸敏实验评价结果

Table 2 Acid sensitivity test evaluation results of the E<sub>1-2k</sub> formation and Ar reservoirs in study area

样品编号	井号	层位	深度(m)	岩性	酸液	$K_{ws}$ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	$K_{waz}$ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	$K_{waf}$ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	$K_{waf}/K_{ws}$	敏感程度
Y1	B-1	E <sub>1-2k</sub>	3 571	砂砾岩	7.2% HCl+3% HF	4.465 0	10.205	9.977	2.286	改善
Y2	B-1	E <sub>1-2k</sub>	3 735	砂砾岩	7.2% HCl+3% HF	2.380 0	2.887	2.725	1.213	改善
Y3	B-1	Ar	4 050	片麻岩	7.2% HCl+3% HF	0.037 1	0.143	0.125	3.854	改善
Y4	B-1	Ar	4 132	片麻岩	7.2% HCl+3% HF	0.013 9	0.023	0.015	1.655	改善

注: $K_{ws}$ 为酸前地层水渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{waz}$ 为酸后地层水正向驱替渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{waf}$ 为酸后地层水反向驱替渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{waf}/K_{ws}$ 为敏感强弱。



注:a.酸液反应前,整体致密,偶见少量微孔隙;丝片状伊利石充填钠长石粒内溶蚀孔隙,砂砾岩,3 576 m;b.a的酸液反应后,大量的微孔隙发育;丝片状伊利石充填长石颗粒溶蚀孔,Y1砂砾岩,3 571 m;c.酸液反应前,偶见微孔隙,方解石充填钠长石粒内溶蚀孔,Y3片麻岩,4 050 m;d.c的酸液反应后,微孔隙发育,多见长石颗粒溶蚀孔,未见碳酸盐等易溶矿物,Y3片麻岩,4 050 m。

图2 研究区酸化前后岩心孔隙结构对比(扫描电镜)

Fig. 2 Comparison of core pore structure before and after acidification in study area (SEM)

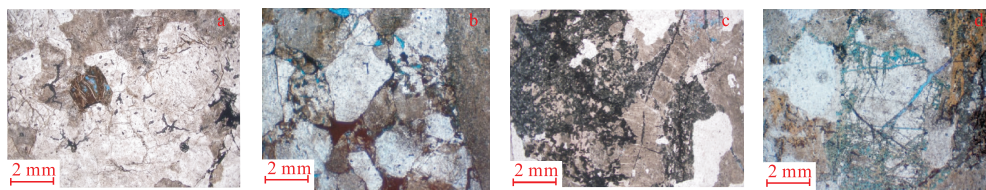
图2c);与酸液反应后,岩石见大量的微孔隙发育,丝片状伊利石充填长石颗粒溶蚀孔,未见碳酸盐等易溶矿物(图2b、图2d),从而导致样品渗透率变大。

利用铸体薄片资料对比分析表明,与酸液反应后,储层呈以下特征:①有效面孔率均呈增大趋势;②砂砾岩碎屑颗粒间仍呈线状—凹凸状接触,片麻岩储层矿物变晶仍呈粒状紧密接触,表明酸岩反应后,储层骨架稳定性仍较好。砂砾岩与酸液反应前,碎屑颗粒磨圆中等,呈次棱角—圆状,线状—凹凸状接触,颗粒支撑,粒间充填物主要为少量泥质和有机质,泥质主要分布在颗粒接触处,部分有机质被铁质浸染,岩石整体较致密,仅见少量长石溶蚀孔,有效面孔率为1%(图3a);与酸液反应后,砂砾岩样品见部分溶蚀颗粒孔和未被充填的微裂隙,有效面孔率约为10%,碎屑颗粒间仍呈线状—凹凸状接触(图3b)。片麻岩与酸液反应前,整体较致密,有效面孔率约为0.5%(图3c);与酸液反应后,斜长石和钾

长石多被部分溶蚀,样品发育溶蚀颗粒孔和未被充填的微裂隙,有效面孔率约为4%,矿物变晶仍呈粒状紧密接触(图3d)。

核磁共振实验表明(表3、图4),与酸液反应后,大、小孔隙的数量变多, $T_2$ 截止值变小,束缚水饱和度降低。如砂砾岩样品Y1酸化前束缚水饱和度为34.2%, $T_2$ 截止值为21.54 ms,孔隙度分量曲线具有三峰特点;与酸液反应后束缚水饱和度为21.4%, $T_2$ 截止值为8.11 ms(图4a)。片麻岩样品Y3酸化前束缚水饱和度为51.2%, $T_2$ 截止值为10.72 ms;与酸液反应后束缚水饱和度为32.9%, $T_2$ 截止值为5.33 ms(图4b)。

综合以上分析,认为研究区孔店组砂砾岩和太古界片麻岩储层与酸液反应后:①样品微孔隙发育,长石颗粒溶蚀孔发育,未见碳酸盐等易溶矿物,有效面孔率均增大,大、小孔隙数据增多, $T_2$ 截止值和束缚水饱和度均变小,孔隙结构变好;②砂砾岩碎屑颗粒间仍呈线状—凹凸状接触,片麻岩储层矿物变晶



注:a.酸化前整体致密,仅见少量长石溶蚀孔,砂砾岩,3 576 m;b.a的酸化后,部分溶蚀颗粒孔、微裂隙发育,Y1砂砾岩,3 571 m;c.酸化前整体致密,Y3片麻岩,4 050 m;d.c的酸化后,溶蚀颗粒孔和微裂隙发育,Y3片麻岩,4 050 m。

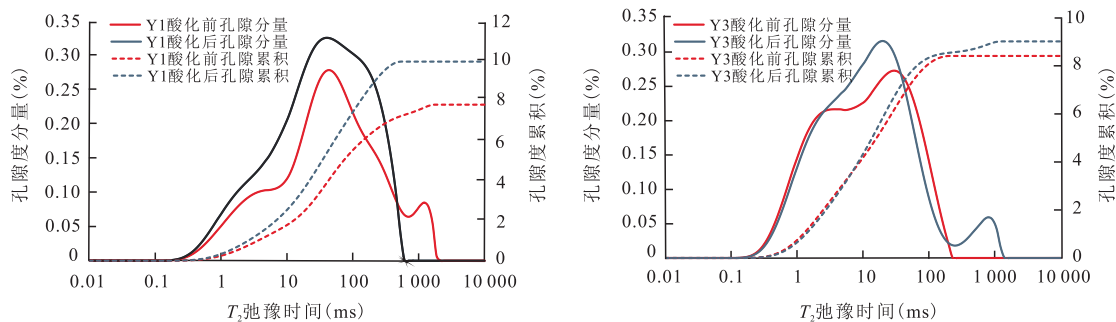
图3 研究区酸化前后岩心孔隙结构对比(铸体薄片)

Fig. 3 Comparison of core pore structure before and after acidification in study area (cast thin sections)

表3 研究区核磁共振可动流体实验测试结果

Table 3 Experimental results of nuclear magnetic resonance fluid in study area

样品 序号	井号	层位	深度 (m)	岩性	水测孔隙度(%)		可动流体饱和度(%)		可动流体孔隙度(%)		束缚水饱和度(%)		$T_2$ 截止值	
					酸化前	酸化后	酸化前	酸化后	酸化前	酸化后	酸化前	酸化后	酸化前	酸化后
Y1	B-1	E <sub>1-3k</sub>	3 571	砂砾岩	8.0	9.7	65.8	78.6	7.8	9.9	34.2	21.4	21.54	8.11
Y2	B-1	E <sub>1-3k</sub>	3 735	砂砾岩	8.3	10.9	69.6	79.9	8.2	10.8	30.4	20.1	14.17	12.50
Y3	B-1	Ar	4 050	片麻岩	8.3	9.0	48.8	67.1	8.4	9.0	51.2	32.9	10.72	5.33
Y4	B-1	Ar	4 132	片麻岩	2.8	4.5	32.9	45.0	3.1	4.3	67.1	55.0	18.74	9.33



a.Y1样品砂砾岩岩心与酸液反应前后核磁共振 $T_2$ 谱,E<sub>1-3k</sub>,3 571 m b.Y3样品片麻岩岩心与酸液反应前后核磁共振 $T_2$ 谱,Ar,4 050 m

图4 研究区酸化前后岩心孔隙结构对比(核磁共振 $T_2$ 谱)

Fig. 4 Comparison of core pore structure before and after acidification in study area (NMR  $T_2$  spectrum)

仍呈粒状紧密接触,储层骨架稳定性仍较好。

#### 4.2 酸敏损害机理分析

造成研究区储层酸敏损害的原因主要有2点:①化学因素,土酸与黏土矿物溶液发生化学反应生成二次沉淀损害储层;②物理因素,不溶于土酸的矿物颗粒运移到储层孔喉狭小处,堵塞孔喉,造成储层渗透率降低。

##### 4.2.1 土酸与黏土矿物发生化学反应生成二次沉淀

土酸与多数黏土矿物均可发生化学反应而溶解,但溶失率存在一定差别(表4),且土酸对绿泥石的溶失率最高<sup>[20]</sup>,即绿泥石含量越高,酸敏性损害程度越大。

表4 土酸与黏土矿物反应溶失率<sup>[20]</sup>  
Table 4 Reaction loss rate of soil acid with clay minerals<sup>[20]</sup>

矿物类型	纯矿物含量(%)	土酸溶失率(%)
伊利石	96	22
高岭石	93	39
绿泥石	90	40

土酸与黏土矿物反应,生成氢氟酸盐沉淀的同时,会析出Fe<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>等离子<sup>[13-15]</sup>。随着化学反应的进行,碎屑颗粒间流体环境逐渐由酸性转向碱性,OH<sup>-</sup>含量随之增加,这样容易造成Fe(OH)<sub>3</sub>或者Al(OH)<sub>3</sub>胶体沉淀<sup>[6]</sup>,堵塞喉道,从而造成储层伤害。通过X-衍射分析化验资料分析(表1),研究区两类储层的黏土矿物类型均主要为伊利石,高岭石和绿泥石含量低。因此,酸岩反应过程中,因酸敏矿物绿泥石而造成储层伤害的程度较低。

##### 4.2.2 不溶微粒堵塞孔喉造成储层损害

由于黏土矿物被土酸部分溶解后,酸液中仍含有不能被溶解的矿物颗粒。其随流体运移至孔喉狭小处,堵塞孔喉,造成储层渗透率降低。从表2中可以看出,酸化后正向驱渗透率略大于反向驱渗透率,并且反向驱渗透率均大于酸化前渗透率,说明酸化后有少量不溶微粒堵塞孔喉,但对储层损害较小。

#### 4.3 利用土酸酸化储层的适用性探讨

结合酸敏实验结果及酸岩反应综合分析,探讨利用土酸对研究区储层酸化的适用性。研究区储层与土酸反应后,储层基本无伤害,骨架稳定性仍较

好,渗透率得到改善。其影响因素主要有以下4个方面:①酸液条件下,粒间或粒内填充的碳酸盐胶结物容易发生反应溶解,从而改善储层孔隙结构;②组成岩石的碎屑颗粒或矿物变晶接触关系并未发生大的变化,酸岩反应后,储层骨架稳定性仍较好;③储层中酸敏性黏土矿物绿泥石含量低,酸岩反应后,对储层损害程度较小;④酸岩反应后,有少量不溶微粒堵塞孔喉,但对储层损害较小。可以看出,土酸与研究区储层反应后,孔隙结构得到改善,总体呈建设性作用,因此,对改善储层渗透率具有一定适用性的。

## 5 结论

1) 研究区砂砾岩和片麻岩储层与土酸(7.2% HCl+3% HF)反应后,储层基本无伤害,渗透率得到改善。

2) 研究区孔店组砂砾岩和太古界片麻岩与酸液反应后,样品微孔隙发育,长石颗粒溶蚀孔发育,未见碳酸盐等易溶矿物,有效面孔率均增大,大、小孔隙数据增多,T<sub>2</sub>截止值和束缚水饱和度均变小,孔隙结构变好;酸岩反应后,砂砾岩碎屑颗粒间仍呈线状—凹凸状接触,片麻岩储层矿物变晶仍呈粒状紧密接触,储层骨架稳定性仍较好。

3) 研究区储层中易溶型碳酸盐胶结物酸化溶蚀后,是造成储层孔隙结构变好的关键因素,因酸敏矿物绿泥石而产生的二次沉淀和不溶微粒堵塞孔喉对储层损害程度也较小。土酸与研究区储层反应后,孔隙结构得到改善,呈建设性作用,对改善储层渗透率具有一定的适用性。

#### 参考文献

[1] 王剑,周基贤,刘明,等.准噶尔盆地盐北地区下乌尔禾组储层敏感性形成机理及评价[J].非常规油气,2018,5(1):28-34. WANG Jian, ZHOU Jixian, LIU Ming, et al. Sensitivity mechanism and evaluation of Permian Lower Urho formation reservoir in Yanbei Area, Junggar Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(1):28-34.

[2] 吕佳蕾,吴因业.鄂尔多斯盆地中部地区致密砂岩储层敏感性及其损害机理[J].大庆石油地质与开发,2019,38(3):167-174. LYU Jialei, WU Yinye. Sensitivities and damage mechanisms of the tight sandstone reservoir in Central Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(3):167-174.

[3] 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.
- [4] 崔瑾,郑荣才,蒋宜勤,等.准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组储层特征及敏感性[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2):398-408.
- CUI Cui, ZHENG Rongcai, JIANG Yiqin, et al. Characteristics and sensitivity of the Middle Jurassic Toutunhe formation in Fudong slope, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2):398-408.
- [5] 蒋建方,高翔,王瑛,等.砂岩酸化用多氢酸体系螯合性实验分析[J]. *天然气与石油*, 2016, 34(4):55-59+96.
- JIANG Jianfang, GAO Xiang, WANG Ying, et al. Experimental analysis of chelating performance for sandstone acidizing fluid multi-hydrogen acid[J]. *Natural Gas and Oil*, 2016, 34(4):55-59+96.
- [6] 朱华银,蒋德生,安来志,等.川西地区九龙山构造砾岩储层敏感性实验分析[J]. *天然气工业*, 2012, 32(9):40-43.
- ZHU Huayin, JIANG Desheng, AN Laizhi, et al. An experimental analysis of sensitivity of the Jiulongshan conglomerate reservoirs in West Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(9):40-43.
- [7] 邢隆,崔军平,杨桂林,等.黄陵探区上矽子区块延长组长6储层敏感性研究[J]. *非常规油气*, 2019, 6(1):34-39.
- XING Long, CUI Junping, YANG Guilin, et al. Study on Chang-6 reservoir's sensitivity in Yangchang formation of Shangzhenzi Block in Huangling exploration area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2019, 6(1):34-39.
- [8] 卢欢,王清斌,杜晓峰,等.低渗透储层类型划分及储层敏感性主控因素——以渤海海域古近系为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(11):1331-1345.
- LU Huan, WANG Qingbin, DU Xiaofeng, et al. Low-permeability reservoir types classification and reservoir sensitivity controlling factors: a case study of Paleogene in Bohai Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11):1331-1345.
- [9] 王玉霞,周立发,焦尊生,等.鄂尔多斯盆地陕北地区延长组致密砂岩储层敏感性评价[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(4):981-990.
- WANG Yuxia, ZHOU Lifa, JIAO Zunsheng, et al. Sensitivity evaluation of tight sandstone reservoir in Yanchang formation in Shanbei area, Ordos basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(4):981-990.
- [10] 李冠男,孙卫,刘登科.鄂尔多斯盆地吴起薛岔地区长6储层敏感性研究及其主控因素[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(6):138-147.
- LI Guannan, SUN Wei, LIU Dengke, et al. Sensitivity of Chang 6 reservoir in Wuqi Xuecha area of Ordos basin and its main controlling factors[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(6):138-147.
- [11] 党彝,赵虹,康晓燕,等.鄂尔多斯盆地陕北斜坡中部延长组深部层系特低渗储层敏感性微观机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(3):1100-1107.
- DANG Ben, ZHAO Hong, KANG Xiaoyan, et al. Sensitivity microscopic mechanism study of super-low permeability reservoirs in depth of Yanchang Formation in central of Shanbei Slope Ordos Basin NW China[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(3):1100-1107.
- [12] 何辉,李军建,乞照,等.西峰油田N区长2<sub>3</sub>储集层特征及敏感性评价[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(3):278-287.
- HE Hui, LI Junjian, QI Zhao, et al. Reservoir characteristics and sensitivity evaluation of Chang 2<sub>3</sub> in N Area of Xifeng Oilfield[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(3):278-287.
- [13] 唐逊,胡文瑄,王剑,等.扇三角洲砂砾岩油藏储层敏感性研究——以准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(3):596-605.
- TANG Xun, HU Wenxuan, WANG Jian, et al. Fan-delta sandy conglomerate reservoir sensitivity: A case study of the Baikouquan formation in the Mahu sag, Junggar basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(3):596-605.
- [14] 王尤富.渤中25-1油田储层敏感性试验研究[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2009, 31(2):104-106.
- WANG Youfu. Experimental study on reservoir sensitivity of Bozhong25-1 Oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI)*, 2009, 31(2):104-106.
- [15] 李云,祁利祺,胡作维,等.准噶尔盆地阜东斜坡中侏罗统头屯河组储层敏感性特征[J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(1):52-57.
- LI Yun, QI Liqi, HU Zuwei, et al. Reservoir sensitivity of Middle Jurassic Toutunhe formation in Fudong slope, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(1):52-57.
- [16] 邱隆伟,于杰杰,郝建民,等.南堡凹陷高南地区东三段低渗储层敏感性特征的微观机制研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(1):78-86.
- QIU Longwei, YU Jiejie, HAO Jianmin, et al. A microscopic study of the formation mechanism of low permeability reservoir sensibility of Ed<sub>3</sub> in Gaonan area[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2009, 28(1):78-86.
- [17] 薛丹,张遂安,吴新民,等.下寺湾油田长7油层组页岩气储层敏感性实验[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(3):135-144.
- XUE Dan, ZHANG Sui'an, WU Xinmin, et al. Sensitivity experiment of shale gas reservoir of Chang 7 reservoir in Xiasiwan oilfield [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(3):135-144.
- [18] 薛小佳,宁治军,李志忠,等.“酸敏”砂岩储层的酸化适用性探讨[J]. *天然气工业*, 2012, 32(6):50-52.
- XUE Xiaojia, NING Zhijun, LI Zhizhong, et al. Adaptability of acidizing to acid-sensitive sandstone reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(6):50-52.
- [19] 王小军,陈栋,甄浩,等.黑山梁油区储层敏感性及解堵作用研究[J]. *非常规油气*, 2020, 7(1):65-70.
- WANG Xiaojun, CHEN Dong, ZHEN Hao, et al. Study on reservoir sensitivity and Unplugging in Heishanliang oil area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2020, 7(1):65-70.
- [20] 马智.鄂尔多斯盆地西南部延长组长6储层敏感性分析与评价[D].大庆:东北石油大学, 2018.
- MA Zhi. Sensitivity analysis and evaluation of Chang 6 reservoirs in Southwest of Ordos Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.

(编辑 李青)