

## 镶嵌剂与成膜剂协同增效保护储层钻井液室内研究

李海涛<sup>1</sup>, 赵修太<sup>2</sup>, 龙秋莲<sup>3</sup>, 任 熵<sup>2</sup>, 吕开河<sup>2</sup>

(1. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究所, 山东东营 257015; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**在钻井过程中, 为了减少钻井液对油气储层的损害, 通常采用储层暂堵技术, 而该技术的关键是要求暂堵粒子尺寸与地层孔喉合理匹配, 这种匹配关系很难把握, 从而影响保护油气层效果。针对传统暂堵技术在应用中的不足, 提出了镶嵌剂与成膜剂协同增效保护储层技术。采用钻井液传统评价与砂心试片评价相结合的方法, 筛选出了保护油气层的镶嵌剂 XQ-3 和成膜剂 DL-7, 室内试验结果表明, 将两者复配后加入钻井液中, 岩心渗透率暂堵率达到 99.6%, 岩心切片渗透率恢复率达到 99.4%, 与传统的暂堵剂相比分别提高了 20.6% 和 15.3%, 表现出良好的协同增效暂堵效果及对不同孔喉更好的适应性能。因此, XQ-3 和 DL-7 是保护油气储层的理想钻井液添加剂。

**关键词:**防止地层损害 镶嵌剂 成膜剂 协同增效 砂心试片

**中图分类号:** TE254<sup>+.6</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)04-0065-07

### Laboratory Study on Drilling Fluid of Mosaic Agent-Membrane Agent Synergistic Interaction for Reservoir Protection

Li Haitao<sup>1</sup>, Zhao Xiutai<sup>2</sup>, Long Qiulian<sup>3</sup>, Ren Shang<sup>2</sup>, Lü Kaihe<sup>2</sup>

(1. Geoscience Research Institute of Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong, 257015, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 3. Petroleum Exploration and Development Research Institute, Sinopec, Beijing, 100083, China)

**Abstract:** In order to reduce the damage by drilling fluid to oil and gas formation during drilling, the temporary plugging technology for reservoir is usually selected and the key is that temporary plugging particle size reasonably matches the pore throat. The matching is difficult to grasp, thus affecting the reservoir protection. According to the drawback of traditional temporary plugging technology in application, the technology of mosaic agent-membrane agent synergistic interaction for reservoir protection was proposed. Mosaic agent XQ-3 and membrane agent DL-7 for reservoir protection were developed and selected based on the combination of traditional evaluation of drilling fluid and evaluation of sand core test piece. If both were compounded, the temporary blocking rate was 99.6% and the slicing core permeability recovery was 99.4%. Comparing with the traditional blocking technique, they were increased by 20.6% and 15.3% respectively, showing good synergistic interaction temporary blocking effect and stronger adaptability to different pores, which can be used as a new drilling fluid system for formation protection.

**Key words:** formation damage prevention; mosaic agent; membrane agent; synergistic interaction; sand core test piece

钻井过程中的储层伤害不但影响油井的初期产量, 而且还影响后续作业效果, 因此钻井过程中的油气层保护工作非常重要, 且一直深受重视。1977年, A. Abrams<sup>[1]</sup>首次提出了保护油气层的 1/3 粒径架桥规则。在此基础上, 国外提出了理想充填理

收稿日期: 2011-11-10; 改回日期: 2012-06-16。

作者简介: 李海涛(1984—), 男, 山东寿光人, 2008年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 2011年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位, 助理工程师, 现主要从事提高采收率与采油化学方面的研究工作。

联系方式: (0546) 8798280, haitao841219@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题5“中西部地区碎屑岩领域勘探关键技术”(编号: 2008ZX05002-005)部分研究成果。

论和  $d_{90}$  规则,国内学者也提出了屏蔽暂堵分形理论和屏蔽暂堵技术,他们无不在寻求一种可以达到理想暂堵效果的保护油气层理论与技术。这些理论与技术由于均采用架桥充填原理来实现屏蔽暂堵,要求必须准确获知储层的孔喉尺寸及分布,从而选择合适尺寸的暂堵剂粒子与之匹配。而在实际应用过程中,由于油气层的非均质性,这种匹配关系很难把握,因此很可能会影响保护油气层的效果,甚至造成油气层损害<sup>[2-5]</sup>。为此,笔者针对传统保护油气层技术存在的问题,研究了镶嵌剂与成膜剂协同增效保护储层的钻井液,该钻井液在应用中可无须明确预知孔喉的直径,不考虑与储层孔喉严格匹配,无需进行解堵作业,可通过后期原油返排自动解除,对孔径分布范围较大的储层具有很好的保护效果。

## 1 镶嵌剂与成膜剂协同增效机理

镶嵌剂与成膜剂协同增效保护储层技术,是将屏蔽暂堵剂中的镶嵌剂与成膜剂复合加入到钻井液中,利用各自对储层的自适应性特点,进行优势互补,达到协同增效的目的,从而提高钻井液的适用性。镶嵌剂中的粒子可以通过挤压变形在不同孔喉的表面都形成单向封堵的镶嵌屏蔽带,但单纯的粒子封堵易出现微小空隙,使封堵不是很彻底;成膜剂可以在井壁岩石表面迅速大量吸附、缔合,形成空间网络结构的封闭膜,阻止流体侵入储层。而在储层孔喉或微裂缝较大的情况下,由于得不到足够的支撑作用,在压差的作用下形成的封闭膜易被破坏。因此,将镶嵌剂和成膜剂配合使用,在压差作用下,镶嵌剂可首先部分镶嵌进入较大的孔喉或微裂缝中,使孔喉和裂缝的尺寸减小,在此基础上,成膜剂可通过聚合物胶束的作用,形成有效的聚合物封堵膜,有效阻挡钻井液侵入储层,达到协同增效的目的。

## 2 镶嵌剂与成膜剂筛选

### 2.1 镶嵌剂筛选

由于储层非均质性强、孔喉分布范围很宽,现场无法对整口井的油层段进行很好的屏蔽暂堵,针对该问题国内提出了镶嵌屏蔽暂堵技术<sup>[6-7]</sup>。该技术通过镶嵌粒子的变形、吸附和镶嵌作用,在

井壁上形成一层韧性强、渗透性极低的单向暂堵屏障,阻止钻井液进入油气层,达到满足保护油气层的目的。镶嵌粒子对孔喉的形状和大小均具有良好的适应性,克服了刚性颗粒因不能变形而适应性差的缺点。

将聚合物微球胶液、聚合物微球乳液、弹性聚合物微粒及镶嵌剂 XQ-3 分别加入钻井液基浆(4.0%膨润土浆,下同)中,考察其流变性与滤失性能。通过试验发现,聚合物微球胶液和乳液对钻井液的黏度和切力影响较小,降滤失性能有限;弹性聚合物微粒加入基浆以后,由于其自身具有一定的吸水膨胀性,因此其增黏能力较强,加量为 0.5% 时,钻井液已失去流动性;镶嵌剂 XQ-3 为“外柔内刚”型弹性粒子,对钻井液具有较好的增黏和降滤失效果(见图 1),随着 XQ-3 用量的增加,表观黏度与塑性黏度逐渐增大,滤失量逐渐减小,当加量超过 0.5% 时,滤失量曲线趋于平缓,而黏度明显增大。

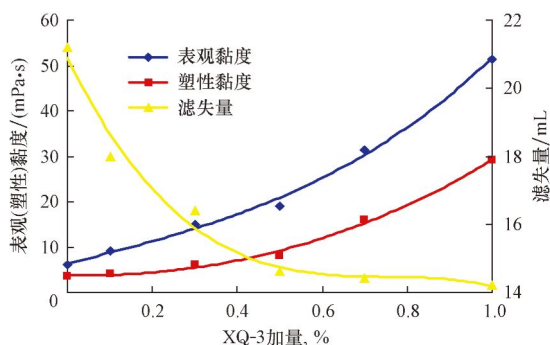


图 1 镶嵌剂 XQ-3 对钻井液性能的影响

Fig. 1 Effect of mosaic agent XQ-3 on drilling fluid performance

### 2.2 成膜剂筛选

为了提高钻井过程中井壁的稳定性和更好地保护油气层,有时在一定条件下要求水基钻井液具有良好的成膜性能。水基钻井液成膜技术就是在井壁上形成一层半透膜或是致密的隔离膜,阻止钻井液侵入地层,有效防止地层水化膨胀,避免井壁坍塌,起到保护油气层的作用<sup>[8-9]</sup>。

通过室内试验考察了成膜剂 DL-7、XT-2 和 HT-1 的性能,即在基浆中分别加入 3 种不同的成膜剂,然后对钻井液的流变性与滤失性能进行评价,结果见表 1。

从表 1 可以看出:加入 3 种成膜剂之后钻井液的滤失量明显减小,且随着成膜剂加量的增大,滤失

表 1 成膜剂评价试验结果

Table 1 Experimental evaluation results of membrane agents

序 号	钻井液配方	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	API 滤失/mL
1	基浆	6.0	3.5	2.5	21.2
2	基浆+1.0%DL-7	8.0	7.0	1.0	10.2
3	基浆+2.0%DL-7	12.5	10.0	2.5	8.6
4	基浆+3.0%DL-7	18.5	14.0	4.5	8.0
5	基浆+1.0%XT-2	11.0	8.0	3.0	12.8
6	基浆+2.0%XT-2	18.0	12.0	6.0	10.4
7	基浆+3.0%XT-2	30.0	21.0	9.0	9.2
8	基浆+1.0%HT-1	9.0	6.0	3.0	11.6
9	基浆+2.0%HT-1	14.5	9.0	5.5	9.6
10	基浆+3.0%HT-1	23.0	15.0	8.0	8.6

量越来越小;成膜剂 DL-7 的加量为 2%~3% 时,钻井液的滤失量较小,与另外 2 种成膜剂相比,具有更好的降滤失效果。

3 镶嵌剂与成膜剂协同性能评价

3.1 钻井液性能评价

在基浆中分别加入不同种类和加量的屏蔽暂堵剂,形成不同的钻井液,然后对各钻井液进行性能评价,结果见表 2。其中,传统屏蔽暂堵剂主要由油溶性树脂与超细碳酸钙组成,是近年来在东部油田普

遍使用的一种常规屏蔽暂堵剂。

从表 2 可以看出:加入屏蔽暂堵剂后钻井液的黏度及切力增大,滤失量减小;相对而言,加入镶嵌剂和成膜剂的钻井液的降滤失性能,优于只加传统屏蔽暂堵剂的钻井液。

3.2 保护油层性能评价

3.2.1 暂堵与恢复性能评价

采用人造岩心,进行各配方钻井液对岩心的污染评价试验,结果见表 3。污染试验条件为:压差 3.5 MPa,温度 80 ℃,污染时间 60 min。

表 2 钻井液配方及性能试验结果

Table 2 Experimental results of the drilling fluid formula and performance

序 号	配 方	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	API 滤失/mL
1	基浆	6.0	3.5	2.5	21.2
2	基浆+2.5% DL-7	15.0	12.0	3.0	8.4
3	基浆+0.5% XQ-3+2.0% DL-7	28.5	16.0	12.5	8.0
4	基浆+2.5%传统屏蔽暂堵剂	24.0	14.0	10.0	9.2

表 3 岩心暂堵与恢复效果评价试验结果

Table 3 Experimental results for the evaluation of blocking and recovery effect

序 号	配 方	污染前渗透率/mD	渗透率暂堵率, %	污染端切长/mm	渗透率恢复率, %
1	基浆	345.8	43.5	5.2	61.7
2	基浆+2.5% DL-7	358.6	93.2	5.1	92.6
3	基浆+0.5%XQ-3+2.0% DL-7	387.4	99.6	5.3	99.4
4	基浆+2.5%传统屏蔽暂堵剂	360.2	82.6	5.2	86.2

从表 3 可以看出:与基浆相比,加入屏蔽暂堵剂的钻井液,岩心渗透率暂堵率有明显提高,即对污染端形成了较有效的封堵;同时含镶嵌剂和成膜剂的钻井液比单独加传统屏蔽暂堵剂和单独加成膜剂的钻井液封堵程度更高,比传统暂堵剂提高了 20.6%(17.0 百分点);在切去污染端后,各岩样的渗透率恢复率有了明显提高,其中被含镶嵌剂和成膜剂的

钻井液污染的岩心其渗透率恢复率更高,比传统暂堵剂提高了 15.3%(13.2 百分点),表明采用该技术可在井壁附近形成一层薄而致密的屏蔽暂堵层,从而阻止钻井液中的固相颗粒和滤液进入油气层。

3.2.2 自适应性能评价

为了评价屏蔽暂堵剂对不同孔径分布的油气层

是否都具有良好的封堵作用,采用基浆+0.5%镶嵌剂 XQ-3+2.0%成膜剂 DL-7,分别对不同渗透率的岩心进行了封堵试验,结果见表4。

表4 岩心暂堵效果评价试验结果

Table 4 Experimental evaluation results of blocking effect

序号	污染前岩心渗透率/mD	渗透率暂堵率, %
1	125.5	98.4
2	234.5	99.1
3	387.4	99.6
4	562.6	97.2
5	868.5	95.6
6	1 065.0	92.0

从表4可以看出,加入镶嵌剂和成膜剂的钻井液对不同渗透率的岩心均具有较好的封堵效果,封堵后的岩心渗透率暂堵率都在90%以上,证明镶嵌剂和成膜剂复配可以在一定范围内对不同孔径分布的油层产生良好的封堵作用,克服了传统屏蔽暂堵技术对地层孔喉尺寸的依赖,显示出较好的自适应特征。

### 3.2.3 暂堵强度评价

取不同渗透率的人造岩心,用基浆+0.5%镶嵌剂 XQ-3+2.0%成膜剂 DL-7对其进行污染,通过测定不同驱替压力下的渗透率评价暂堵强度,结果见表5。

表5 暂堵强度评价试验结果

Table 5 Experimental evaluation results of temporary blocking intensity

序号	污染前岩心渗透率/mD	不同驱替压力下的渗透率/mD		
		3.5 MPa	5.0 MPa	8.0 MPa
1	168.7	0.067	0.004	0
2	273.1	0.085	0.005	0.002
3	348.3	0.095	0.007	0.002
4	413.5	0.125	0.010	0.005

从表5可以看出,随着驱替压力的增大,岩心的渗透率逐渐降低,当驱替压力达到8.0 MPa时,岩心的渗透率接近或等于零,即当压力为8.0 MPa时,未见渗透率突然增大,说明暂堵带并没有受到破坏,即在不同渗透率岩心上形成的暂堵带至少能承受8.0 MPa的压力。

## 4 屏蔽暂堵剂砂心试片评价

### 4.1 砂心试片

为了对各类入井流体(钻井液、完井液等)损害

与保护油气层做出全方位准确评价,仅从滤失量、渗透率恢复率等参数来评价是不够的,对入井流体作用于地层后引起的地层孔隙结构变化进行分析也十分重要。对入井流体的评价通常采用滤失仪结合岩心驱替设备的方法,但该方法有一定缺陷,即无法准确分析出入井流体中各处理剂的作用机理;无法准确判断处理剂对岩心结构的匹配性、吸附性、孔隙结构变化及作用效果;对于岩心或砂床试样也不能做到无损评价;评价过程复杂、重现性差、无法可视化。为此,设计了一套针对入井流体的新评价方法,即利用砂心试片(人工砂片或岩心切片,见图2)结合改进后的滤失仪(见图3)和微观成像系统,从孔隙结构微观变化和滤失量测量2方面对入井流体进行分析评价。该方法不但解决了传统评价方法的不足,其操作过程也十分简单。

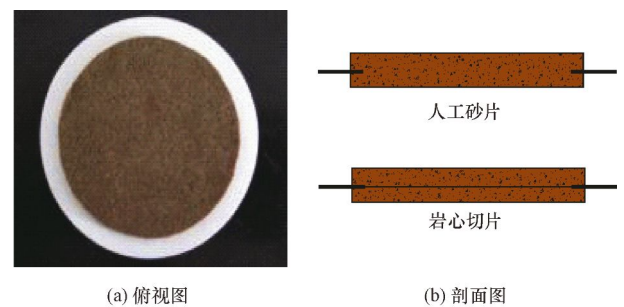


图2 砂心试片结构

Fig. 2 Sand core test piece structure

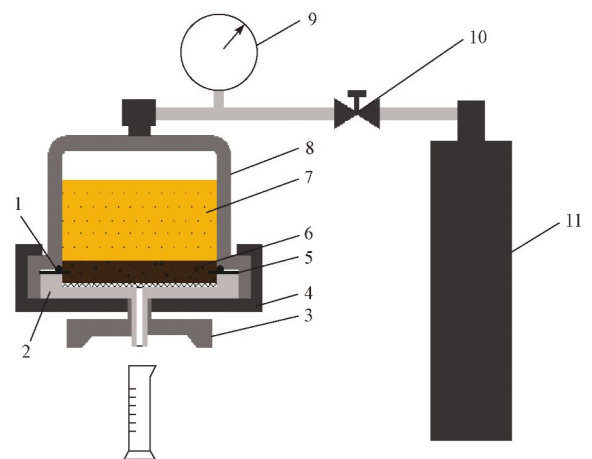


图3 改进的滤失量评价装置

Fig. 3 Modified evaluation device of filtrate loss

1. O形密封圈;2. 凹形端盖;3. 螺扣;4. 卡扣;5. 环形垫圈;6. 砂片;7. 钻井液;8. 钻井液筒;9. 压力表;10. 开关;11. 加压装置

砂心试片评价方法的优点<sup>[10]</sup>:1)用砂子压制试片或直接采用天然岩心切片作为渗漏介质,测定钻井液的渗滤性能,较传统的渗漏介质滤纸对井下情



况的模拟更贴近实际;2)砂心试片采用垫圈密封,结构简单,试片可以任意反转,可以进行返排从而评价渗透率恢复率,增强了仪器的实用功能;3)对砂心试片表面进行显微成像分析,可以对钻井液处理剂进行微观机理分析(如钻井液镶嵌剂、成膜剂等处理剂对地层保护机理的分析)。

4.2 砂心试片制备

将清洗后的石英砂、河砂或海砂干燥筛分,取一定粒度的砂子与酚醛树脂或环氧树脂按 100 : (5~10)的质量比混合,并加入与砂子质量比为 1%~2%的固化剂,搅拌均匀成砂浆料,然后加入到压片

装置中,将砂浆料与环形垫圈压制成一体,并置于恒温烘箱中固结,制得人工砂心试片;或采用天然岩心切片,通过胶结剂与环形垫圈胶结成一体结构。砂心试片的厚度及所选砂子的粒径可根据具体情况而定。

4.3 砂心试片评价

4.3.1 空白砂心试片图像采集

不同粒度空白砂心试片的表面结构如图 4 所示。以空白试片图像为参照,钻井液封堵后与其进行对比,有助于从微观角度做出评价。

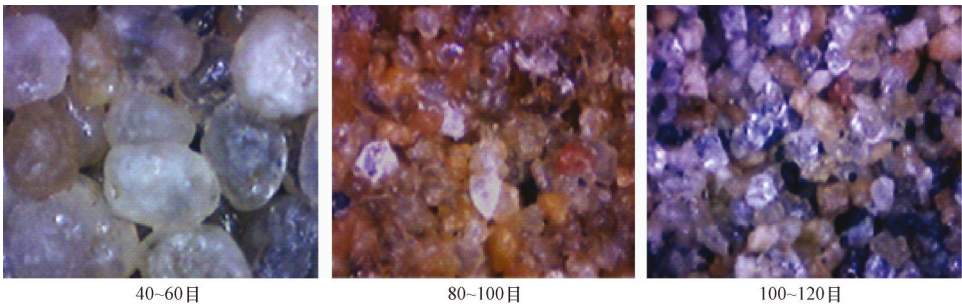


图 4 空白砂心试片表面结构  
Fig. 4 Surface structure of blank sand core test piece

4.3.2 滤失性能测试与图像采集

考察成膜剂、镶嵌剂及复合剂加入钻井液后的滤

失性能,并与加入传统刚性粒子碳酸钙的钻井液进行对比,结果见表 6。滤失性测定后取出砂心试片,用数字显微镜观察其孔喉的变化,如图 5—图 8 所示。

表 6 各配方钻井液滤失量试验结果

Table 6 Test results of drilling fluid filtration loss for different formula					mL
砂心试片粒径/目	基 浆	基浆+3.0%CaCO <sub>3</sub>	基浆+3.0%成膜剂	基浆+0.5%镶嵌剂	基浆+复合剂 <sup>1)</sup>
40~60	19.6	18.6	7.8	11.6	6.8
80~100	17.2	16.2	5.8	9.4	5.6
100~120	13.2	12.8	5.4	8.8	5.2

1) 复合剂为 0.5%镶嵌剂 XQ-3+2.0%成膜剂 DL-7。

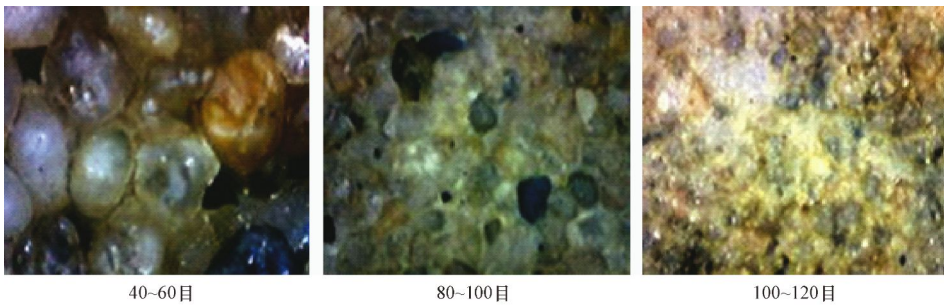


图 5 基浆在砂心试片表面的情况  
Fig. 5 Surface condition of basic mud in sand core test piece

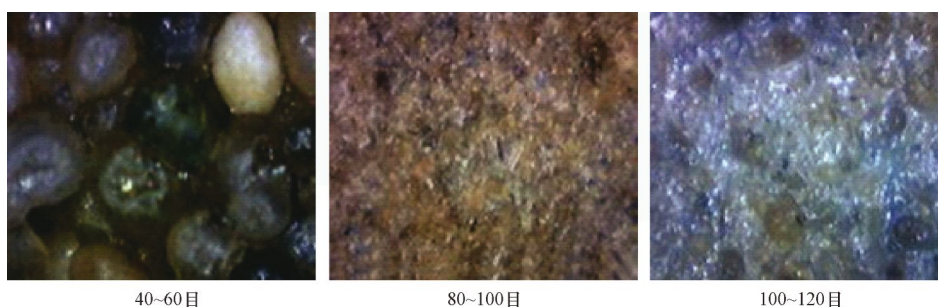


图6 成膜剂在砂心试片表面的情况

Fig. 6 Surface condition of membrane agent in sand core test piece

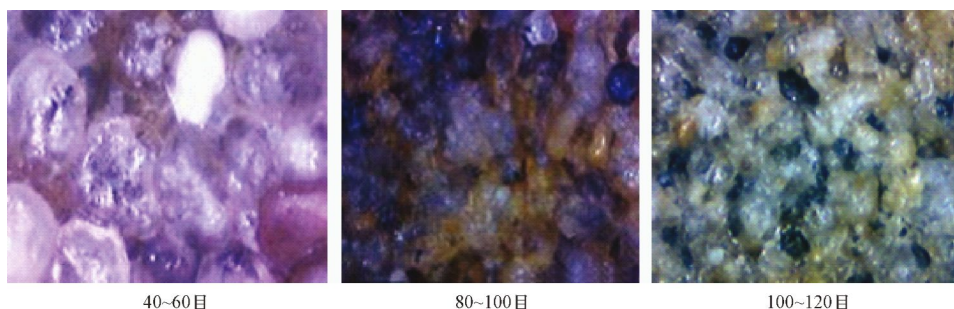


图7 镶嵌剂在砂心试片表面的情况

Fig. 7 Surface condition of mosaic agent in sand core test piece

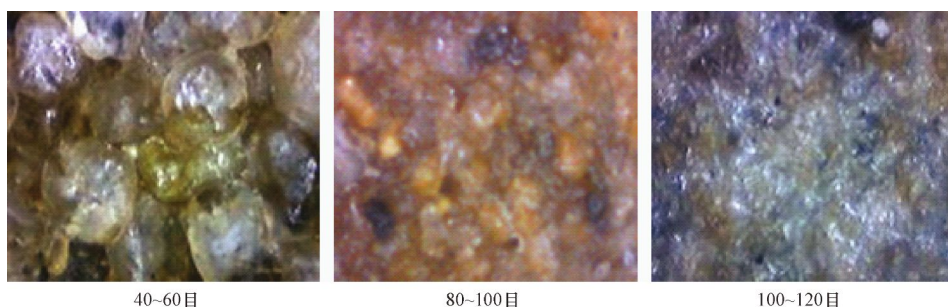


图8 复合剂在砂心试片表面的情况

Fig. 8 Surface condition of complex agent in sand core test piece

从表6及图5—图8可以看出:单纯的刚性粒子碳酸钙通过架桥暂堵降滤失性能非常有限,钻井液成膜剂与镶嵌剂对不同渗透性的砂心试片有一定适应性;40~60目砂心试片孔喉尺寸较镶嵌粒子大,因此在压差作用下,镶嵌剂主要以架桥充填实现封堵,而成膜剂对试片表面的大孔喉未实现有效封堵;80~100目试片孔喉的分布,决定了镶嵌剂同时具有架桥充填与镶嵌作用,滤失量进一步降低,而成膜剂在试片表面成膜较均匀;对于100~120目砂心试片,镶嵌剂主要以镶嵌暂堵为主,镶嵌粒子通过挤压变形镶嵌进入试片表面孔喉,形成镶嵌层,从而产生较好的封堵作用,成膜剂在试片表面成膜致密均匀,封堵性较好;同时发现,将成膜剂与镶嵌剂复配应用于钻井液后,在不同粒径的试片上,由于镶嵌剂为成膜剂提供了良好的支撑作用,使形成的屏蔽层

更为致密,封堵性与降滤失性能相比单剂更强,说明两者具有较好的协同效应。

#### 4.3.3 返排恢复测试结果

返排恢复是衡量处理剂等对地层损害程度的标准,也是对其解堵性能的判断。返排后用基浆测试,滤失量与空白试片滤失量越接近说明解堵效果越好,对地层损害越小。返排恢复的过程:采用改进的滤失量评价装置,用清水代替钻井液,将滤失试验后的砂心试片反转放置,在一定压力(0.2 MPa)下进行反冲洗,冲洗后用基浆进行滤失量测量,将测量值与空白试片滤失试验数据进行对比,得到解堵恢复率。返排冲洗2~3次即可,试验时必须保证冲洗次数一致。表7与图9是对砂心试片进行3次返排冲洗后的恢复情况。



表 7 返排解堵恢复率

砂心试片粒径/目	成膜剂	镶嵌剂	复合剂
40~60	95.9	91.8	92.9
80~100	97.6	93.0	94.2
100~120	98.5	97.0	98.5

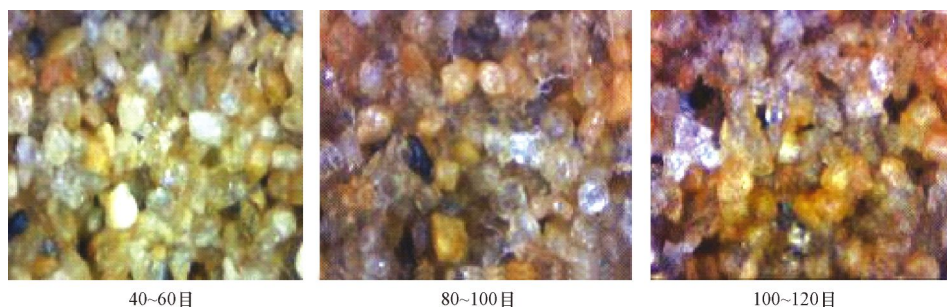


图 9 80~100 目砂心试片返排后的效果

Fig. 9 Effect of 80~100 mesh sand core test piece after reverse discharging

## 5 结 论

1) 针对传统屏蔽暂堵在油田应用中存在的问题,提出了镶嵌剂与成膜剂协同增效的油气储层保护技术,并通过可视化试验进行了研究和验证,为研制开发新型油气层保护剂提供了理论依据。

2) 镶嵌剂 XQ-3 与成膜剂 DL-7 具有较好的降滤失性能。将镶嵌剂与成膜剂复配加入到钻井液中,配制的钻井液封堵效果更好,暂堵率达到 99.6%,岩心切片渗透率恢复率达到 99.4%,与传统的暂堵剂相比分别提高了 20.6% 和 15.3%,并且对地层孔喉尺寸的适应性更强。

3) 镶嵌剂中的镶嵌粒子通过挤压变形镶嵌进入试片表面孔喉,形成镶嵌层,从而产生较好的封堵作用;成膜剂在小孔隙的试片表面形成致密均匀的屏蔽膜,封堵性较好;将成膜剂与镶嵌剂复配应用于钻井液后,封堵性与降滤失性能相比单剂更强,说明两者具有较好的协同增效作用。

## 参 考 文 献

### References

- [1] Abrams A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion[J]. JPT, 1977, 29(2): 87-89.
- [2] 王富华, 邱正松, 冯京海, 等. “超广谱”屏蔽暂堵钻井液新技术室内研究[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(5): 39-42.  
Wang Fuhua, Qiu Zhengsong, Feng Jinghai, et al. Lab study on the new techniques of superior shielding and temporary plugging drill-in fluids[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001, 29(5): 39-42.
- [3] 吕开河, 邱正松, 王在明. 自适应屏蔽暂堵钻井液技术[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 68-71.
- [4] 徐同台, 陈永浩, 冯京海, 等. 广谱型屏蔽暂堵保护油气层技术的探讨[J]. 钻井液与完井液, 2003, 20(2): 39-41.  
Xu Tongtai, Chen Yonghao, Feng Jinghai, et al. The general-purpose temporary shield plugging technology in protecting hydrocarbon reservoir[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2003, 20(2): 39-41.
- [5] 黄达全, 许少营, 田增艳. 广谱型屏蔽暂堵保护油层技术在大港油田的应用[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(6): 23-27.  
Huang Daquan, Xu Shaoying, Tian Zengyan. Application of general-purpose shielding temporary plugging technology in Dagang Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 21(6): 23-27.
- [6] 樊世忠, 窦红梅. 保护油气层技术发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 78-84.  
Fan Shizhong, Dou Hongmei. The development trend of reservoir protection technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 78-84.
- [7] 刘大伟, 康毅力, 雷鸣, 等. 保护碳酸盐岩储层屏蔽暂堵技术研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(5): 57-61.  
Liu Dawei, Kang Yili, Lei Ming, et al. Research progresses in temporary plugging technology for carbonate reservoir protection[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25(5): 57-61.
- [8] 白小东, 蒲晓林. 水基钻井液成膜技术研究进展[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 75-77.  
Bai Xiaodong, Pu Xiaolin. Evolution of membrane forming technology of water-based mud[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 75-77.
- [9] 艾贵成. 封堵成膜钻井液技术在昆 2 井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(1): 89-91.  
Ai Guicheng. Application of plugging and film forming drilling fluid technology in Kun-2 Well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(1): 89-91.
- [10] 赵修太, 李海涛, 任楠, 等. 砂心试片评价钻井液性能的方法[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 251-253.  
Zhao Xiutai, Li Haitao, Ren Shang, et al. Evaluation method of drilling fluid properties with sand core test piece[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 251-253.

从表 7 可以看出,在对砂心试片进行反冲洗后,由 3 种处理剂处理过的试片均具有较高的恢复性能,恢复率在 90% 以上。从图 9 可以看出,处理剂对砂心试片孔道的堵塞大部分已经解开,对试片的损害较小。