**修改说明**

尊敬的审稿专家及各位编辑老师，您们好！

感谢对本文提出的宝贵意见和建议，我们已经按照专家意见对本文进行了认真的修改和补充，具体修改部分见上传至编辑部的修改稿。现将修改说明告知如下：

（1）论文在2.2.2部分中，最后一句建议修改，学术论文不建议将小结序号写入文中，这种表述更像项目报告。可直接表述上一节中的结果，不需要提到序号。2.3.3也存在类似问题。

修改说明：已按专家意见进行修改。

（2）文中多处提高了不存在的小节序号，如2.1.2，2.1.3等。

修改说明：2.1.2和2.1.3已经修改为“2.2.2和2.2.3”，这是初审修改时忘记将小节序号进行修改了。已在本次修改稿中进行更正，谢谢老师指正。

（3）论文在2.3.2部分指出，“但是在高温、高压以及剪切的条件下表面活性剂AFSG-1能否有效解决混浆稠化时间缩短的问题，还需要进一步的实验评价。“，但是文中所有实验均未使用高温高压条件，此处表述不合适，并且需要补充完整的实验条件。

修改说明：稠化时间的测定实验是在高温高压条件下进行的，实验条件在2.2.2中有表述。已按专家意见，在2.3.2中补充了完整的实验条件。

（4）2.3.3中，结果分析最后一句“混浆水泥石中大孔洞的数量明显减少”，作者是如何通过孔隙度和渗透率判断出大孔洞减少的？需要MIP测试才能得出孔径分布的规律。

修改说明：此处表述确有不妥，已按专家老师建议，将最后一句删除。

（5）2.3.3部分最后一段建议删掉，此处是对前文结果的总结，属于结论，在此处做单独一段的总结是不合适的。

修改说明：已按专家意见将本段删除。

（6）2.4这一部分的三级标题中，直接指出了作用效果，标题应是概括实验内容或目的，不应出现结论，与前文标题格式不一致。

修改说明：已按专家老师意见，对此部分的标题进行了修改。

（7）文章制备了一种表面活性剂，并对提高水泥浆抗污染能力有一定的效果。作者是否与常用的表面活性剂进行过对比？常用的表面活性剂存在哪些缺陷？作者并未提到这些内容。若常用的表面活性剂也可以有效改善水泥浆抗污染性能，那本文研究的意义是有限的。

修改说明：前期也开展了AFSG-1与其他常用表面活性剂的对比评价，结果表明AFSG-1的效果明显优于其他常用表面活性剂。已按专家建议补充了此部分内容，见修改稿中的2.3.4部分。

（8）论文进行了详细的研究工作，是否有现场应用？如果有建议加上。

修改说明：目前尚无现场应用数据，后期计划先进行一口井的现场试验。待现场应用试验之后，再对该技术做进一步的推广。

编辑意见：

部分图片和参考文献格式不符合期刊要求，请参见投稿须知和本刊已发表文章修改。

修改说明：已按老师意见对文中图片进行了修改（图8补充了比例尺）。并对部分参考文献格式进行了修改，见修改稿中标红部分。谢谢！

再次感谢各位老师的辛勤工作。

祝各位老师：工作顺利，万事如意！

**表面活性剂提高页岩气井固井水泥浆抗污染性能研究**

何冠羲[[1]](#footnote-1)，姜洪斌1，梁悦1，杨扬1，韩龙2

1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司第二固井分公司，天津，300280；2. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司海洋物探分公司，天津，300280

**摘要：**页岩气储层采取水平井开发时由于套管偏心以及井径不规则等原因，通常会导致油基钻井液的顶替效率较低，不可避免的会有部分油基钻井液掺入到固井水泥浆中，对水泥浆的性能造成污染。因此，为了提高页岩气固井水泥浆的抗污染能力，室内以现场油基钻井液和固井水泥浆为研究对象，开展了表面活性剂AFSG-1提高页岩气井固井水泥浆抗污染性能的研究。结果表明：现场油基钻井液的掺入会严重影响固井水泥浆的流动度、稠化时间以及混浆水泥石性能，油基钻井液的掺入比例越大，污染越严重；随着固井水泥浆中表面活性剂AFSG-1加量的不断增大，水泥浆自身的抗污染能力逐渐增强，当固井水泥浆中表面活性剂AFSG-1的质量浓度达到2%时，再掺入20%的油基钻井液，混浆的流动度、稠化时间以及水泥石性能与未加表面活性剂时相比均有明显改善；另外，表面活性剂AFSG-1对固井水泥浆抗油基钻井液污染性能的改善效果明显优于其他常用表面活性剂。研究结果认为表面活性剂AFSG-1可以有效提高页岩气固井水泥浆抗油基钻井液污染的能力，能够提高固井质量，保障固井安全。

**关键词：**页岩气储层水平井；固井水泥浆；表面活性剂；抗污染；油基钻井液

**Study on improving anti-pollution performance of shale gas well cementing cement slurry with surfactant**

HE Guanxi1, JIANG Hongbin1, LIANG Yue1, YANG Yang1, HAN Long2

*1. No.2 Cementing Branch of Bohai Drilling Engineering Co., Ltd, CNPC, Tianjin, 300280, China; 2. BGP INC, China National Petroleum Corporation Tianjin, 300280, China*

**Abstract：**When shale gas reservoir is developed by horizontal wells, due to casing eccentricity and irregular well diameter, the displacement efficiency of oil-based drilling fluid is usually low. It is inevitable that some oil-based drilling fluid will be mixed into cementing cement slurry and pollute the performance of cement slurry. Therefore, in order to improve the anti-pollution ability of shale gas cementing cement slurry, the indoor research on improving the anti-pollution performance of shale gas well cementing cement slurry with surfactant AFSG-1 was carried out with on-site oil-based drilling fluid and cementing cement slurry as the research object. The results show that the addition of on-site oil-based drilling fluid will seriously affect the fluidity, thickening time and slurry water mud properties of cementing cement slurry. The greater the proportion of oil-based drilling fluid, the more serious the pollution is; With the increasing amount of surfactant AFSG-1 in the cementing cement slurry, the anti-pollution ability of the cement slurry is gradually enhanced. When the mass concentration of surfactant AFSG-1 in the cementing cement slurry reaches 2%, and then 20% oil-based drilling fluid is added, the fluidity, thickening time and cement stone properties of the slurry are significantly improved compared with those without surfactant. In addition, the effect of surfactant afsg-1 on improving the oil-based drilling fluid pollution resistance of cementing cement slurry is significantly better than that of other commonly used surfactants. The results show that surfactant AFSG-1 can effectively improve the anti oil-based drilling fluid pollution ability of shale gas cementing cement slurry, improve cementing quality and ensure cementing safety.

**Keywords：**Horizontal well in shale gas reservoir; Cementing slurry; Surfactant; Anti-pollution; Oil based drilling fluid

前言

由于页岩气储层通常具有水敏性较强的特点，在钻井过程中往往采用抑制性较强的油基钻井液体系，油基钻井液与固井水泥浆的相容性较差，固井水泥浆中混入油基钻井液后会导致混浆的流动性变差，稠化时间缩短，水泥石强度降低，严重威胁固井施工的安全[1-4]。因此，研究如何提高固井水泥浆抗油基钻井液污染的能力，对保障固井安全、提高固井质量具有十分重要的意义。

目前，针对防止油基钻井液对固井水泥浆产生接触污染方面的研究主要是采取顶替隔离液或者前置液的方法，国内外关于隔离液以及前置液的研究已开展了大量的工作，并取得了较多的研究成果和经验[5-11]。但由于页岩气储层特殊的地层条件，往往需要采用水平井钻井技术才能取得较好的商业开发价值，水平井的井身结构与常规井相比具有水平段较长、井眼曲率大、井径不规则以及套管下入比较困难等特点，并且由于套管的自身重力作用极容易产生套管偏心的现象，这就会造成油基钻井液的顶替效率低下，采取隔离液顶替的方式无法确保油基钻井液被完全顶替干净，井筒中仍可能存留一定量的钻井液[12-15]。因此，固井水泥浆不可避免的会接触到部分油基钻井液，这就需要固井水泥浆自身具备良好的抗污染性能，才能降低油基钻井液污染对固井施工的影响。然而，目前国内外针对提高固井水泥浆自身抗污染能力方面的研究仍相对较少[16-18]，缺少系统性和针对性的研究方法。因此，本文从提高固井水泥浆自身抗污染性能的角度入手，以页岩气井现场用油基钻井液和水泥浆体系为主要研究对象，开展了表面活性剂AFSG-1提高页岩气井固井水泥浆抗污染性能的研究，并对其作用机理进行了分析，为提高页岩气井固井质量，保障固井安全提供一定的技术支持。

1 实验部分

1.1 主要材料及仪器

实验材料：表面活性剂AFSG-1（有效质量分数为85%，主要成分为非离子表面活性AFO-2和阴离子表面活性剂LAS-30，其中非离子表面活性剂AFO-2为实验室自制，阴离子表面活性剂LAS-30为市售产品）；阳离子表面活性剂CTAB、非离子表面活性剂6501、两性离子表面活性剂CAB-35，均为市售产品；长链烷基酚、环氧乙烷，均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；多聚甲醛、氢氧化钠、氢氧化钾、浓硫酸、石油醚、醋酸异丙酯，均为分析纯，天津科密欧试剂有限公司；高纯氮气，石家庄福利特气体有限公司；实验用油基钻井液取自国内某页岩气井水平段油层套管，其配方为：白油+25%CaCl2盐水+1.5%主乳化剂+2%辅乳化剂+1.5%润湿剂+3%有机土+3%降滤失剂+重晶石至密度为2.15g/cm3。实验用水泥浆配方为：G级水泥+30%硅粉+4%微硅+4%降失水剂+0.5%分散剂+0.15%缓凝剂+0.2%消泡剂+1.5%有机纤维+40%水。

实验仪器：BRUKER VECTOR22型红外光谱仪，德国Bruker公司；常压稠化仪、高温高压稠化仪、高温高压养护釜，青岛森欣机电设备有限公司；水泥浆流动度测定仪，苏州中路通试验仪器有限公司；高精度压力试验机，苏州天氏库力精密仪器有限公司；孔渗联测仪，海安县石油科研仪器有限公司；FST300C型全自动界面张力仪，上海艾飞思精密仪器有限公司；CA200自动型光学接触角测量仪，广东北斗精密仪器有限公司；Zeta电位分析仪，大塚电子（苏州）有限公司；赛默飞SEM扫描电子显微镜，北京欧波同光学技术有限公司。

1.2 表面活性剂AFO-2和AFSG-1的制备

将一定量的长链烷基酚和浓硫酸加入到四口烧瓶中，搅拌混合均匀后，持续通入氮气，然后升高反应温度至40℃~60℃，在搅拌状态下缓慢加入一定比例的多聚甲醛，反应3h~5h，除去多余单体后再加入氢氧化钠将pH值调节至7左右，再使用石油醚和醋酸异丙酯的混合溶液洗涤分离，即得到中间产物X；将一定比例的中间产物X和KOH混合加入到反应釜中，通入高纯氮气除氧20min，然后再加入一定量的环氧乙烷，升高反应温度至120℃~140℃，并使用氮气加压至2MPa左右，在此条件下反应3h左右，反应产物经过中和、脱色处理后即得到非离子表面活性剂AFO-2。将非离子表面活性剂AFO-2与阴离子表面活性剂LAS-30按照质量比为2:1进行混合，即得到表面活性剂AFSG-1。

1.3 实验方法

红外光谱分析实验采用溴化钾压片法对非离子表面活性剂AFO-2的红外光谱图进行了分析，实验仪器为BRUKER VECTOR22型红外光谱仪。

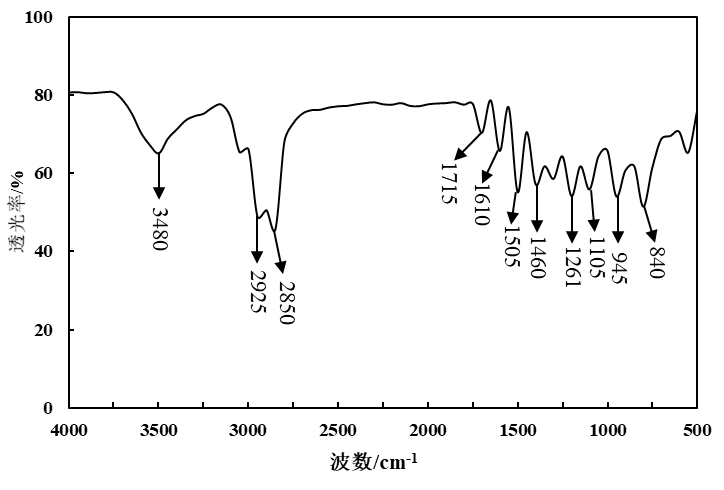
油基钻井液对水泥浆的污染评价实验以及表面活性剂提高水泥浆抗污染能力评价实验均参照石油与天然气行业标准SY/T 6466-2016《油井水泥石性能试验方法》中的相关规定进行，主要测定油基钻井液掺入对混浆流动度、稠化时间以及水泥石性能的影响。

界面张力测定实验采用FST300C型全自动界面张力仪测定表面活性剂AFSG-1溶液与白油之间的界面张力值。接触角测定实验采用CA200自动型光学接触角测量仪测定蒸馏水在不同混浆水泥石表面的接触角。Zeta电位测定实验采用Zeta电位分析仪测定表面活性剂对混浆中水泥颗粒Zeta电位的影响。扫描电镜实验采用赛默飞SEM扫描电子显微镜对不同水泥石的微观结构进行扫描。

2 结果与讨论

2.1 非离子表面活性AFO-2红外光谱分析结果

图1为非离子表面活性AFO-2的红外光谱图测试结果，由图1可以看出，3480cm-1处附近是-OH基团的伸缩振动吸收峰，2925cm-1和2850cm-1处附近是烷烃链上C-H键的伸缩振动吸收峰，1715m-1处附近是C=O键的伸缩振动吸收峰，1610cm-1、1505cm-1和1460cm-1处附近是苯环骨架中C-H键的伸缩振动吸收峰，1261cm-1和1105cm-1处附近是C-O-C键的伸缩振动吸收峰，945cm-1和840cm-1处附近是苯环骨架的弯曲振动吸收峰。在图1中均能找到代表合成产物（非离子表面活性AFO-2）分子结构的特殊官能团的吸收峰，证明合成产物为目标产物。



**图1非离子表面活性AFO-2的红外光谱图**

2.2 油基钻井液对水泥浆的污染评价

2.2.1 不同比例混浆的流动度

水泥浆中掺混不同比例的油基钻井液后的流动度实验结果见图2，实验温度分别选择为25℃和93℃。由图2实验结果可知，随着油基钻井液掺量的不断增大，混浆在25℃和93℃下的流动度均呈现出逐渐降低的趋势，当油基钻井液的掺混比例达到20%时，混浆在25℃和93℃的流动度分别为11cm和9cm，流动度已经较差，再继续增大油基钻井液的掺混量，混浆会慢慢的丧失流动性。这说明油基钻井液在常温或者高温条件下均会对水泥浆的流动性能产生比较严重的影响，水泥浆流动性的恶化会造成施工泵压的升高，对固井施工安全带来严重的危害。

**图2油基钻井液掺混比例对混浆流动度的影响**

2.2.2不同比例混浆的稠化时间

水泥浆中掺混不同比例的油基钻井液后的稠化时间实验结果见图3，实验条件为：在80min内将实验温度升高为125℃，压力升高为120MPa。由图3实验结果可知，随着油基钻井液掺量的不断增大，混浆的稠化时间呈现出逐渐缩短的趋势，而初始稠度则呈现出逐渐升高的趋势。当油基钻井液的掺混比例达到20%时，混浆的稠化时间即可由初始的389min缩短至48min，而初始稠度则可由初始的19.6Bc升高至41.8Bc，混浆出现了明显的包心现象，流动性较差。这与油基钻井液的掺混会导致水泥浆流动度变差的结果相吻合，进一步说明油基钻井液的掺入会对水泥浆造成比较严重的污染损害。

**图3油基钻井液掺混比例对混浆稠化时间的影响**

2.2.3不同比例混浆对水泥石性能的影响

水泥浆中掺混不同比例的油基钻井液后所形成的水泥石性能评价结果见表1，抗压强度和抗折强度养护温度均为125℃，养护时间为3d和7d，其中孔隙度和渗透率的测定实验均采用的是养护7d的水泥石。由表1实验结果可知，随着油基钻井液掺量的不断增大，不同养护时间后水泥石的抗压强度和抗折强度均呈现出逐渐降低的趋势，并且降低的幅度较大。当油基钻井液的掺混比例达到20%时，水泥石养护3d和7d后的抗压强度值分别由初始的26.5MPa和32.6%MPa降低至4.9MPa和7.2MPa，降低幅度分别为81.5%和77.9%，水泥石养护3d和7d后的抗折强度值分别由初始的8.7MPa和12.1%MPa降低至1.5MPa和2.6MPa，降低幅度分别为82.8%和78.5%，远远不能达到目标页岩气井水力压裂施工对固井质量的要求。同时水泥浆中油基钻井液的掺混量越大，水泥石的孔隙度和渗透率就越大，当油基钻井液的掺混比例大于20%以后，水泥石中会生成大量的孔洞，这不仅会对水泥石的强度造成严重的影响，还会使井下流体形成窜流通道，严重影响固井质量和施工安全。

**表1油基钻井液掺混比例对混浆水泥石性能的影响**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 油基钻井液掺混比例/% | 抗压强度/MPa | | 抗折强度/MPa | | 孔隙度/% | 渗透率/mD |
| 3d | 7d | 3d | 7d |
| 0 | 26.5 | 32.6 | 8.7 | 12.1 | 10.8 | 0.032 |
| 5 | 22.4 | 28.5 | 6.5 | 10.2 | 15.2 | 0.098 |
| 10 | 16.3 | 19.1 | 3.9 | 6.4 | 19.4 | 0.148 |
| 15 | 9.2 | 11.8 | 2.2 | 3.8 | 25.7 | 0.305 |
| 20 | 4.9 | 7.2 | 1.5 | 2.6 | 30.9 | 0.446 |
| 25 | 3.6 | 5.4 | 0.9 | 1.7 | 36.2 | 0.558 |
| 30 | 2.1 | 3.8 | 0.3 | 0.8 | 41.8 | 1.357 |

综合以上实验结果可以看出，在页岩气井固井作业施工过程中，未被隔离液顶替完全的油基钻井液可能会对固井水泥浆产生比较严重的污染，当油基钻井液的比例达到一定程度时（>20%），可能会导致固井水泥浆性能严重恶化，出现流动度丧失、稠化时间缩短以及水泥石强度显著下降等现象，影响固井施工的安全进行。因此，需要研究如何提高页岩气井固井水泥浆抗油基钻井液污染的能力，为提高页岩气井的固井质量提供保障。

2.3 表面活性剂提高水泥浆抗污染能力评价

2.3.1 表面活性剂AFSG-1对混浆流动度的影响

将研制的复合型表面活性剂AFSG-1添加到固井水泥浆体系中，然后再评价掺入油基钻井液后混浆流动度的变化情况，油基钻井液的掺混比例均为20%，实验温度分别选择为25℃和93℃，重点考察了表面活性剂AFSG-1质量浓度对混浆流动度的影响，实验结果见图4。

**图4表面活性剂加量对混浆流动度的影响**

由图4实验结果可知，随着表面活性剂AFSG-1在水泥浆中加量的不断增大，混浆在25℃和93℃下的流动度基本上均呈现出逐渐增大的趋势，当表面活性剂AFSG-1的质量分数达到2%时，混浆在25℃和93℃下的流动度分别可以达到20cm和23cm，这与水泥浆自身的流动度基本相同，混浆的流动性能较好。这说明表面活性剂AFSG-1的加入能够有效缓解油基钻井液对固井水泥浆的污染损害，防止混浆在常温和高温下流动性的恶化，提高水泥浆的抗污染能力。

2.3.2 表面活性剂AFSG-1对混浆稠化时间的影响

表面活性剂AFSG-1的加入能够有效缓解油基钻井液对水泥浆流动性能的影响，但是在高温、高压以及剪切的条件下表面活性剂AFSG-1能否有效解决混浆稠化时间缩短的问题，还需要进一步的实验评价。因此，在水泥浆中加入不同质量浓度的表面活性剂AFSG-1，在油基钻井液掺混比例为20%的条件下，评价了表面活性剂AFSG-1对混浆稠化时间的影响，实验条件同2.2.2所述，为125℃×120MPa×80min。实验结果见图5。

**图5表面活性剂加量对混浆稠化时间的影响**

由图5实验结果可知，随着表面活性剂AFSG-1在水泥浆中加量的不断增大，混浆的稠化时间呈现出先上升后逐渐趋于平稳的趋势，而初始稠度则呈现出先降低后逐渐趋于平稳的趋势，当表面活性剂AFSG-1的质量分数达到2%时，混浆的稠化时间即可由未添加表面活性剂时的48min延长至381min，而初始稠度则可由41.8Bc降低至18.3Bc，基本与水泥浆自身的稠化时间和初始稠度相当。这说明表面活性剂AFSG-1的加入能够有效改善油基钻井液混入后水泥浆稠化时间缩短的问题。

2.3.3 表面活性剂AFSG-1对水泥石性能的影响

进一步评价了不同质量浓度表面活性剂AFSG-1对混浆水泥石性能的影响，油基钻井液的掺混比例均为20%，其他实验条件同2.2.3所述，其中孔隙度和渗透率的测定实验均采用的是养护7d的水泥石。实验结果见表2。

**表2表面活性剂加量对混浆水泥石性能的影响**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| AFSG-1质量浓度/% | 抗压强度/MPa | | 抗折强度/MPa | | 孔隙度/% | 渗透率/mD |
| 3d | 7d | 3d | 7d |
| 0 | 4.9 | 7.2 | 1.5 | 2.6 | 30.9 | 0.446 |
| 0.5 | 7.2 | 10.8 | 2.7 | 5.9 | 22.7 | 0.405 |
| 1 | 11.8 | 15.7 | 4.2 | 7.2 | 18.3 | 0.267 |
| 1.5 | 15.7 | 21.8 | 5.8 | 8.7 | 15.7 | 0.105 |
| 2 | 20.6 | 26.3 | 7.2 | 10.5 | 12.8 | 0.051 |
| 2.5 | 20.8 | 26.5 | 7.4 | 10.8 | 12.2 | 0.049 |
| 3 | 21.2 | 26.9 | 7.8 | 11.0 | 11.8 | 0.045 |

由表2实验结果可知，表面活性剂AFSG-1在水泥浆中的加量越大，混浆水泥石养护3d和7d后的抗压强度以及抗折强度值均呈现出逐渐增大的趋势，当表面活性剂AFSG-1的质量分数达到2%时，混浆水泥石的养护3d和7d的抗压强度值分别可以达到20.6MPa和26.3MPa，抗折强度值分别可以达到7.2MPa和10.5MPa，与未添加表面活性剂AFSG-1时相比均有大幅度的提高。与此同时，随着水泥浆中表面活性剂AFSG-1加量的逐渐增大，混浆水泥石的孔隙度和渗透率均呈现出逐渐减小的趋势，当表面活性剂AFSG-1的质量分数达到2%时，混浆水泥石的孔隙度可以达到12.8%，渗透率可以达到0.051mD，与未掺混油基钻井液时水泥石的实验结果基本相当。这说明表面活性剂AFSG-1的加入能够有效改善混浆水泥石的性能，确保固井施工的安全。

2.3.4 AFSG-1与其他常用表面活性剂性能对比

在上述实验结果的基础之上，室内还对比评价了表面活性剂AFSG-1与其他几种常用表面活性剂对水泥浆抗污染性能的影响，其中油基钻井液的掺混比例均为20%，表面活性剂的质量分数均为2%，流动度实验温度均为93℃，稠化时间实验条件均为125℃×120MPa×80min，水泥石性能评价实验的养护时间均为7d。实验结果见表3。

**表3 不同类型表面活性剂对水泥浆抗污染性能的影响**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 表面活性剂类型 | 混浆性能 | | 水泥石性能 | | | | |
| 流动度/cm | 稠化时间/min | 抗压强度/MPa | 抗折强度/MPa | 孔隙度/% | 渗透率/mD |
| 空白 | 9 | 48 | 7.2 | 2.6 | 30.9 | 0.446 |
| AFSG-1 | 22 | 381 | 26.3 | 10.5 | 12.8 | 0.051 |
| LAS-30 | 14 | 269 | 16.1 | 5.9 | 18.4 | 0.115 |
| CTAB | 3 | 30 | 10.3 | 3.8 | 28.7 | 0.435 |
| 6501 | 16 | 341 | 18.7 | 7.7 | 16.9 | 0.097 |
| CAB-35 | 11 | 252 | 15.2 | 6.1 | 15.3 | 0.109 |

由表3实验结果可知，只有阳离子表面活性剂CTAB的加入不仅没能改善混浆的流动度和稠化时间，反而使混浆性能出现了进一步的恶化。其他不同类型的表面活性剂加入后，均能不同程度的改善混浆的流变性能和水泥石性能，提高水泥浆的抗污染能力，但综合对比来看，表面活性剂AFSG-1提高水泥浆抗污染性能的效果明显优于其他几种常用表面活性剂。

2.4 表面活性剂提高水泥浆抗污染能力作用机理

2.4.1 表面活性剂对油水界面张力的影响

固井水泥浆中掺入油基钻井液后，在高速剪切作用力下会形成一种水包油型的水泥浆混浆，但其稳定性较差，在地层温度和压力条件下混浆极易产生乳化增稠的现象，影响其流动性能和稠化时间。表面活性剂AFSG-1的加入能够通过降低油水界面张力的作用使得水包油型水泥浆混浆的结构更加稳定，一定程度上起到改善混浆流动性能和稠化时间的作用。其中表面活性剂AFSG-1降低油水界面张力的效果见表4，可以看出，随着表面活性剂AFSG-1加量的不断增大，其油水界面张力值逐渐降低，当其质量浓度大于2%时，可使油水界面张力降低至10-3mN/m数量级，具有良好的界面活性。

**表4不同表面活性剂加量时的油水界面张力**

|  |  |
| --- | --- |
| AFSG-1质量浓度/% | 界面张力/mN/m |
| 0.5 | 0.9290 |
| 1 | 0.2084 |
| 1.5 | 0.0267 |
| 2 | 0.0075 |
| 2.5 | 0.0051 |
| 3 | 0.0024 |

2.4.2 表面活性剂对混浆中水泥颗粒表面润湿性的影响

油基钻井液的掺入会使固井水泥浆中水泥颗粒表面的润湿性由亲水性转变为亲油性，从而影响了水泥浆中水泥颗粒之间的正常胶结过程，严重降低了混浆水泥石的强度。表面活性剂AFSG-1的加入能够有效改变混浆中水泥颗粒表面的润湿性，阻止其由亲水性向亲油性的转变，改善了水泥颗粒的水化作用，一定程度上提高混浆水泥石的强度。其中表面活性剂AFSG-1改变混浆中水泥颗粒表面润湿性的实验结果见图6（表面活性剂对混浆水泥石表面接触角的影响）和图7表面活性剂对混浆中水泥颗粒Zeta电位的影响），其中油基钻井液的掺混比例均为20%。

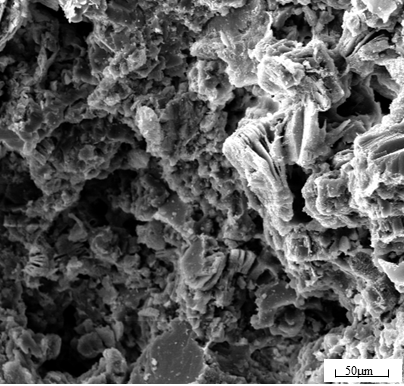
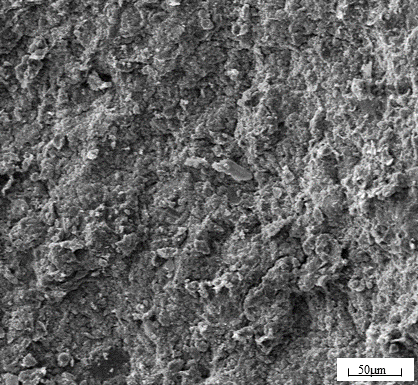
**图6表面活性剂对混浆水泥石表面接触角的影响**

**图7表面活性剂对混浆中水泥颗粒Zeta电位的影响**

由图6和图7结果可知，随着表面活性剂AFSG-1加量的逐渐增大，混浆水泥石表面的接触角以及混浆中水泥颗粒的Zeta电位值均呈现出逐渐减小的趋势，当表面活性剂AFSG-1的质量浓度达到2%时，混浆水泥石表面的接触角可由初始的125.3°减小至70.6°，而水泥颗粒的Zeta电位值则可由初始的15.6mV降低至-15.2mV，这是由于表面活性剂AFSG-1可以吸附在水泥颗粒的表面，使混浆中水泥颗粒表面由亲油性转变为亲水性，有效阻止油基钻井液中的处理剂进一步的吸附在水泥颗粒表面，提高固井水泥浆抗油基钻井液的污染的能力。

2.4.3 表面活性剂对混浆水泥石微观结构的影响

油基钻井液的掺入不仅会影响固井水泥浆的流动性和稠化时间，还会在混浆水泥石中形成大量的孔洞，并且油相的混入会使水泥石骨架结构更易受力变形，进而造成水泥石强度的显著下降。表面活性剂AFSG-1的加入能够减小混浆乳状液的粒径，提高混浆的稳定性，改善混浆水泥石的微观结构，降低油基钻井液对混浆水泥石性能的影响。图8为加入表面活性剂前后混浆水泥石的SEM图，可以看出，未加表面活性剂时，混浆水泥石中存在较多的孔洞，而加入2%的表面活性剂AFSG-1后，混浆水泥石中的大孔洞明显消失，水泥石的胶结状态较好。

**a.未加表面活性剂 b.加入表面活性剂后**

**图8表面活性剂对混浆水泥石微观结构的影响**

3 结论

（1）随着固井水泥浆中油基钻井液掺入比例的不断增大，混浆性能逐渐变差，当油基钻井液的掺混比例达到20%时，混浆的流动度明显降低、稠化时间显著缩短、混浆水泥石强度显著降低、孔隙度和渗透率明显升高，油基钻井液的掺入对固井水泥浆产生了严重的污染。

（2）表面活性剂AFSG-1的加入能够显著提高固井水泥浆抗油基钻井液的污染能力，当其质量浓度达到2%时，对于掺入20%油基钻井液的水泥浆混浆而言，流动度明显升高、稠化时间显著延长、水泥石强度也有所增大、孔隙度和渗透率有所降低。并且AFSG-1提高水泥浆抗污染能力的效果明显优于其他常用表面活性剂。

（3）表面活性剂AFSG-1提高固井水泥浆抗油基钻井液污染能力的作用机理主要包括降低油水界面张力、改变混浆中水泥颗粒表面润湿性（减小接触角和Zeta电位值）以及改善混浆水泥石的微观结构等。

（4）当页岩气水平井钻井施工完成后，油基钻井液无法完全顶替时，可以通过在固井水泥浆中加入表面活性剂AFSG-1来提高其抗油基钻井液的污染能力，减少混浆流动性恶化以及水泥石强度降低的程度，确保固井施工的安全，提高固井质量。

### 参考文献

[1] 李明,杨雨佳,李早元,等.固井水泥浆与钻井液接触污染作用机理[J].石油学报,2014,35(6):1188-1196.

[2] 袁中涛,杨谋,李晓春,等.油基钻井液与水泥浆接触污染内因探讨[J].石油钻采工艺,2017,39(5):574-579.

[3] 李早元,柳洪华,郭小阳,等.油基钻井液组分对水泥浆性能的影响及其机理[J].天然气工业,2016,36(3):63-68.

[4] 李早元,辜涛,郭小阳,等.油基钻井液对水泥浆性能的影响及其机理[J].天然气工业,2015,35(8):63-68.

[5] TABATABAEE MORADI S S, NIKOLAEV N I. Optimization of Cement Spacer System for Zonal Isolation in High-Pressure High-Temperature Wells[C]//SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia, 2014: 171282.

[6] SHADRAVAN A, NAEVAEZ G, ALEGRIA A, et al. Engineering the Mud-Spacer-Cement Rheological Hierarchy Improves Wellbore Integrity[C]//SPE E&P Health, Safety, Security and Environmental Conference-Americas. Denver, Colorado, USA, 2015: 173534.

[7] PERNITES R, KHAMMAR M, SANTRA A. Robust Spacer System for Water and Oil based Mud[C]// SPE Western Regional Meeting. California, USA, 2015: 174005.

[8] 赵启阳,张成金,严海兵,等.提高油基钻井液固井质量的冲洗型隔离液技术[J].钻采工艺,2017,40(5):88-90+94+6-7.

[9] 武治强,岳家平,幸雪松,等.一种新型抗污染固井前置液体系研究及应用[J].石油化工应用,2021,40(8):48-52.

[10] 欧红娟.油基钻井液条件下高效隔离液选材机理研究[D].成都：西南石油大学,2016.

[11] 刘丽娜,李明,谢冬柏,等.一种适用于油基钻井液的表面活性剂隔离液[J].钻井液与完井液,2017,34(3):77-80.

[12] 沈彬亮.油基钻井液条件下页岩气侧钻水平井固井技术[J].新疆石油天然气,2021,17(1):29-33+2.

[13] 张顺平,张森,覃毅,等.威远页岩气水平井高密度防窜水泥浆固井技术[J].钻井液与完井液,2016,33(1):63-67.

[14] 赵常青,谭宾,曾凡坤,等.长宁-威远页岩气示范区水平井固井技术[J].断块油气田,2014,21(2):256-258.

[15] 王建龙,于志强,苑卓,等.四川盆地泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2021,49(6):17-22.

[16] 钟声.油基钻井液下水泥浆抗污剂的研究与应用[J].钻井液与完井液,2016,33(5):84-87.

[17] 李晓春,李宁,刘锐,等.有机盐钻井液与水泥浆接触污染机理探讨及防止对策[J].钻采工艺,2019,42(6):102-104+109+7.

[18] 张刚刚.长宁—威远页岩气固井水泥浆抗污染研究[D].成都：西南石油大学,2019.

1. **基金项目：**渤海钻探工程有限公司重大工艺专项“泸州、渝西深层页岩气水平井安全优快钻完井及配套技术研究”（2021ZD18Y-01）。

   **作者简介：**何冠羲（1990—），男，汉族，四川营山人，本科，工程师，主要从事固井工艺方面的研究工作。Email：m16622844138@163.com. [↑](#footnote-ref-1)