

旋转导向钻进中改性植物纤维随钻堵漏室内研究及评价

贾永红¹, 郭友², 张蔚¹, 叶安臣¹, 贺垠博^{2*}

1 中国石油集团西部钻探工程有限公司钻井液分公司, 克拉玛依 834000

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

* 通信作者, heyb@cup.edu.cn

收稿日期: 2024-07-17; 修回日期: 2024-10-23

国家自然科学基金项目“深海深井钻井液漏失机理与防治方法研究”(U23B2082)资助

摘要 随着油气资源开采难度加大, 旋转导向钻井已经成为控制井眼轨迹和连接油藏的重要技术。旋转导向钻井过程中, 遇到地层漏失时常需添加随钻封堵剂, 但目前主要采用的小尺寸堵漏材料可能降低堵漏效果, 尤其是纤维类材料, 因其长径比大且易交织, 会导致钻井液黏度增加, 严重时引发卡钻。本文研发了一种随钻堵漏纤维, 并与现场堵塞旋导筛网的纤维材料进行了对比分析。研究表明, 研发纤维符合行业标准, 具备良好的过旋导性能和承压封堵性能。在钻井液体系中添加 3% 改性纤维后, 能在 150 °C、6 MPa 的条件下能够有效封堵 20~40 目石英砂, 30 min 累计漏失量仅为 4 mL。该研究对于旋转导向钻井用随钻堵漏材料的选择有重要现场指导意义。

关键词 堵漏剂; 防漏堵漏; 水基钻井液; 旋转导向钻井; 改性植物纤维

中图分类号: TE28; TQ35

Development and mechanism of plugging agent while drilling for rotary guide

JIA Yonghong¹, GUO You², ZHANG Wei¹, YE Anchen¹, HE Yinbo²

1 Drilling fluid Branch of CNPC Western drilling Engineering Co., Ltd., Karamay 834000, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Received: 2024-07-17; Revised: 2024-10-23

Abstract With the increasing difficulty of oil and gas resources extraction, rotary guided drilling has become an important technology for controlling the trajectory of the borehole and connecting the reservoir. In the process of rotary guided drilling, it is often necessary to add plugging agent with drilling when encountering formation leakage, but the small-sized plugging materials mainly used nowadays may reduce the plugging effect, especially fiber-based materials, which, due to their large length-to-diameter ratios and easy to be intertwined, will lead to an increase in the viscosity of the drilling fluid, and in serious cases, trigger stuck drilling. In this paper, a kind of plugging fiber with drilling was developed and compared with the fiber material for plugging rotary guide screen in the field. The results show that the developed fiber complies with the industry standard and has good performance of over-spinning conductivity and pressure-bearing plugging performance. After adding 3% modified fiber

引用格式: 贾永红, 郭友, 张蔚, 叶安臣, 贺垠博. 旋转导向钻进中改性植物纤维随钻堵漏室内研究及评价. 石油科学通报, 2025, 10(01): 144–155

JIA Yonghong, GUO You, ZHANG Wei, YE Anchen, HE Yinbo. Development and mechanism of plugging agent while drilling for rotary guide. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(01): 144-155. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.03.002

to the drilling fluid system, it can effectively block 20~40 mesh quartz sand at 150 °C and 6 MPa, and the cumulative leakage is only 4 mL in 30 min. This study is of great significance for the selection of plugging materials for rotary guided drilling tools.

Keywords plugging agent; leak prevention and plugging; water-based drilling fluid; rotary steering drilling; modified plant fiber

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.03.002

0 引言

随着油气资源勘探难度不断加深,定向钻井技术逐渐成为首选。然而,传统滑动导向钻井方式存在轨迹控制精度差、井身质量差、井眼净化不好、位移延伸能力低、为满足导向目的必须频繁起下钻等缺点^[1-3]。旋转导向钻井技术的出现具有重要意义,对于各种特殊地形钻井有着十分显著的优势,不仅能提高钻井效率降低开发成本,还能降低对环境的污染等^[4-9]。

在旋转导向钻井过程中钻遇漏层时,需在钻井液中添加随钻堵漏剂从而实现随钻封堵的效果^[10-12]。随钻堵漏不仅可以减少停钻堵漏过程中起下钻等非生产时间和钻井液漏失量,降低对地层的污染,还可以提高钻井效率,降低钻井成本。孙欢等^[13](2022)分析了随钻堵漏技术难点,要求随钻堵漏材料粒径小于1.5 mm,并以刚性粒子FX-1(40/70目改性石英砂)、水分散纤维XW-5和弹性材料TX-3(橡胶颗粒)作为随钻堵漏材料,在60 °C下承压3 MPa,封闭滤失量为15 mL,在钻井液体系中经高温老化后高温高压滤失量为2.8 mL。郝惠军等^[14](2012)在基浆中加入不同配比的随钻堵漏材料(粒径均小于0.13 mm)模拟随钻堵漏过程中粒径为0.13~0.15 mm的砂床。实验结果表明,砂床的API滤失量为零,高温高压砂床滤失量最低仅为2.5 mL。董洪栋^[15](2018)分析了随钻堵漏材料筛选时应遵循9点要求,其中在材料尺寸方面,颗粒类材料尺寸以大于18目为宜,纤维类材料长度不宜长于5 mm,片状堵漏材料直径也不宜大于5 mm。并根据纤维尺寸要求,以5%颗粒性堵漏材料、2%云母片、2%石棉纤维为堵漏材料,在4 MPa、1.5 mm钢珠床条件下,现场钻井液体系累计漏失量为5 mL,漏失率为0.1%。Lili Yang等^[16](2023)以纳米二氧化硅为原料,通过反向乳液聚合合成了一种具有动态交联能力的两性离子聚合物/纳米二氧化硅微凝胶(P(MPTC-co-NaSS)@SiO₂),它们在水分散体中表现出约40 μm的窄尺寸分布的球形颗粒,加入2%凝胶的钻井液体系在150 °C老化16 h后,砂盘承压6 MPa,累计漏失量约为4 mL。

上述随钻堵漏材料尺寸远小于旋转导向筛网最小尺寸(1.5 mm)。对于刚性堵漏材料,如碳酸钙、云母片等,尺寸小于旋导筛网尺寸,同时具有较好分散性可以降低堵塞旋导筛网几率。但是,纤维类材料通常易弯曲、具有较大的长径比,即使较小尺寸的堵漏纤维也会在钻井液中交织成网并捕集吸附其他固相材料,使钻井液黏度大幅上涨^[17]。同时,相互交织聚集的材料会出现粒径增大的现象,容易堵塞旋导筛网,造成钻井液循环受阻,井下仪器信号传递中断,严重时甚至会导致卡钻的发生。此外,更小的堵漏材料虽会降低堵塞筛网的风险,但也会影响随钻封堵的效果。

针对以上问题,本文对随钻堵漏植物纤维进行了疏水改性,评价了其疏水改性效果、作为随钻堵漏纤维的基本性能、过旋导能力和堵漏效果,并对其作用机理进行了分析研究。另外,针对旋转导向钻具用随钻堵漏纤维建立了一种过旋导能力评价方法,为旋转导向钻具用随钻堵漏浆的筛选和优化提供了技术支持。

1 随钻堵漏纤维研发与表征

在随钻堵漏材料中核桃壳粉被广泛使用^[18-20]。但植物纤维表面含有大量的极性基团,如羟基等,具有较强的亲水性^[21-24],在钻井液中会交织成网,大幅提升钻井液的黏度。因此,对核桃壳纤维疏水改性,提高其分散性,降低对钻井液黏度的影响是随钻堵漏纤维研发过程中的重要一环。

1.1 纤维改性过程

目前常见的植物纤维疏水改性方法有KH560改性^[25-28]、环氧氯丙烷改性^[29-32]以及表面活性剂改性^[33-35]等。本文采用KH560对核桃壳进行改性,改性步骤如下:首先,将核桃壳使用高速粉碎机粉碎成细小粉末,筛出粒径小于100目的纤维。其次,配置300 mL 95%的乙醇溶液加入到烧杯中,向溶液中缓慢加入盐酸,不断调节溶液pH值到5,加入5 g KH560,搅拌使其水解2 h。然后,加入30 g核桃壳纤维,反应2 h后,过滤出纤维,置于干燥箱中105 °C干燥2 h。最后,冷却、重新粉碎,筛出小于100目纤维即

改性纤维。

1.2 改性纤维结构表征

(1) FT-IR

核桃壳纤维改性前后的红外光谱见图2。纤维在 3369 cm^{-1} 处的特征峰归因于植物纤维中羟基的伸缩振动；在 1040 cm^{-1} 和 1246 cm^{-1} 附近的红外吸收峰归属于植物纤维C-O伸缩振动，在 1659 cm^{-1} 处具有羰基谱带。经改性处理后的纤维具有原纤维的骨架吸收峰，主体没有发生明显变化，在 3340 cm^{-1} 处的-OH特征峰出现增强及红移归因于纤维表面的羟基与硅醇发生了脱水反应；在 $1450\text{ cm}^{-1}\sim 1650\text{ cm}^{-1}$ 间的特征峰明显增强归因于纤维表面接枝上了硅醇的环氧基团；在

1251 cm^{-1} 处特征峰发生红移与增强归因于硅醇与植物表面发生了接枝反应生成了新的化学键——Si-O键。以上结果表明KH560已成功接枝到核桃壳表面。

(2) 纤维疏水性测试

将纤维平铺在玻璃片上，测试水与其接触时接触角。改性前纤维与水接触角为 70.1° ，说明纤维本身亲水，改性后纤维与水接触角为 130.0° 证明疏水基团已经接枝到了纤维表面，使其疏水性增强。

2 随钻堵漏纤维基本性能评价

使用中国石油与天然气集团公司企业标准Q/SY 17096-2016 钻井液用随钻堵漏剂—改性植物纤维中的

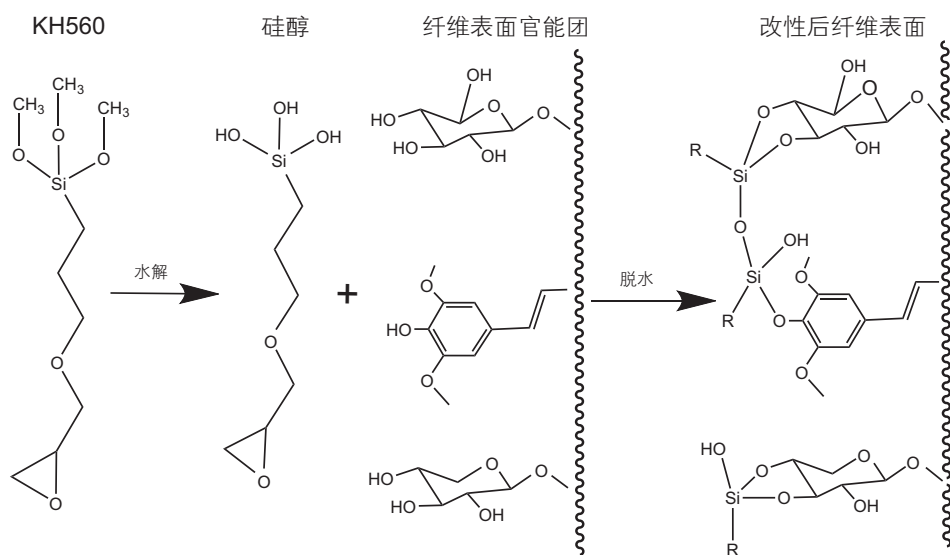


图1 纤维改性过程

Fig. 1 Modification process of fiber

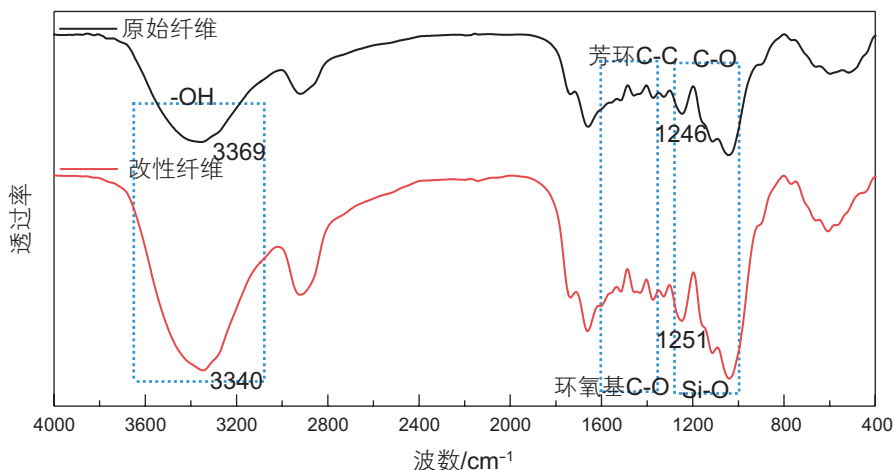


图2 纤维改性前后红外光谱

Fig. 2 Infrared spectrum of fiber before and after modification

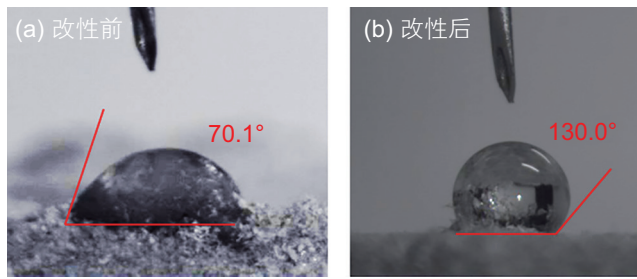


图3 纤维改性前后接触角
Fig.3 Contact angle before and after fiber modification

方法评价改性纤维是否符合行业标准^[36]。同时,对比分析改性纤维和现场堵塞旋导筛网的纤维形貌可以初步判断纤维的堵漏能力。

2.1 随钻堵漏纤维行业指标性能评价

由表1可知,改性纤维表观黏度增长率为17.6%、封闭滤失量为23 mL,较原始纤维表观黏度增长率下降了77.8%,封闭滤失量下降了37.8%,其基本性能均符合随钻堵漏纤维行业标准,不仅对钻井液黏度影响较小,同时具有较强的降滤失能力。

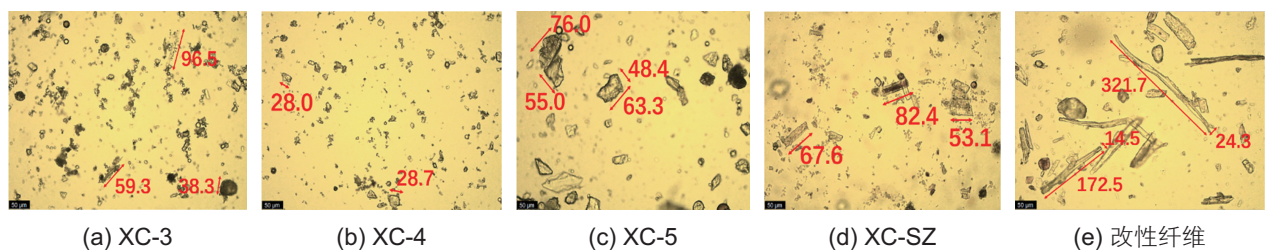
2.2 改性纤维与现场堵塞纤维微观形貌对比

纤维显微镜下放大100倍图像见图4。现场纤维形貌大多数为颗粒状(长径比 $L < 2$),纤维状较少,在堵漏过程中主要以堵塞为主,桥接成网能力较弱;改性纤维具有较好纤维形貌($L > 2$)与分散形态,在钻井液中易桥接成网,吸附固相材料形成致密封堵层。

表1 纤维改性前后行业指标性能

Table 1 Basic properties of fiber before and after modification

	筛余量/%	水分/%	灼烧残渣/%	表观黏度增长率/%	封闭滤失量(30 min)/mL
行业标准	≤10.0	≤8.0	≤7.0	≤20.0	≤30
原始纤维	6.9	5.0	4.6	79.3	37
改性纤维	0	6.5	6.3	17.6	23



现场堵塞纤维显微镜下图像:(a)、(b)、(c)、(d); 改性纤维显微镜下图像:(e)

图4 现场堵塞纤维与改性纤维微观形貌

Fig.4 Appearance of plugged fiber and modified fibre

3 随钻堵漏纤维过旋导能力评价及机理分析

本文建立了一种过旋导能力评价方法,使纤维过旋导能力得到了量化。同时,通过纤维流动过程中的形态、粒径、分散性综合评价,分析了纤维过旋导机理。

3.1 过旋导能力评价方法建立

为了模拟纤维在旋转导向钻井过程中的实际循环堵塞情况,改进压力传递评价装置,实现钻井液循环和压力监测,同时将旋转导向系统筛网模型(模型两侧筛网孔径为旋转导向工具筛网最小孔径尺寸1.5 mm)置于加压套筒内,钻井液在其中循环通过,图5为钻井液循环机理图及旋转导向系统筛网模型,若钻井液中纤维堵塞筛网,则上游压力将会上升,如图6(右),通过计算压力增幅即可判断纤维过旋导能力的大小。实验所用钻井液体系为现场水基钻井液体系:300 mL水+4%膨润土+0.3% Na_2CO_3 +4%低聚合物降滤失剂+0.1%包被剂+0.2% CaO +0.8% PAC-LV +2%白沥青+7% KCl +重晶石($\rho=1.5 \text{ g/cm}^3$)。

实验具体流程如下:首先,将旋转导向系统筛网模型和带有钻井液循环和压力检测的阀杆安装在夹持装置中间和两侧并固定好。其次,连接压力传递管线、平流泵、气瓶和钻井液容器,形成钻井液流动回路。然后,启动围压和加压装置,进行钻井液循环,时间为30 min,计算机记录期间上游压力 P_u 和下游压力 P_d 。最后,按公式(1)计算压力增幅 E ,判断1.5 mm网

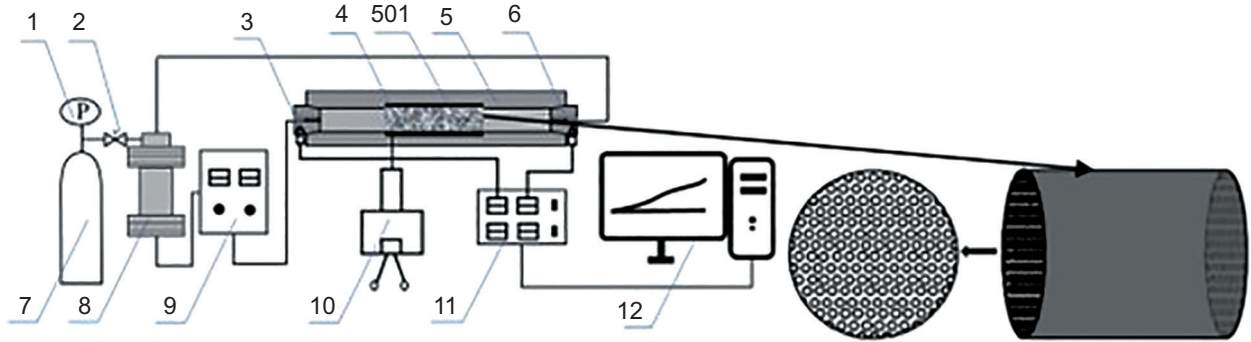
板堵塞情况:

$$E = \frac{P_{\text{umax}} - P_{\text{d0}}}{P_{\text{d0}}} \quad (1)$$

式中: E ——循环压力增幅, %; P_{umax} ——上游压力最大值, MPa; P_{d0} ——压力稳定后的下游压力, MPa。

3.2 改性纤维及现场纤维过旋导能力评价

现场水基钻井液体系+3%改性纤维压力传递曲线见图7(左), 循环开始后逐渐增大入口压力, 直至入口压力达到1.00 MPa, 上游压力先增大至1.02 MPa后



1-压力表; 2-回压阀; 3-左端三通阀杆; 4-旋转导向系统筛网模型; 5-旋转导向系统筛网夹持装置; 501-橡胶套; 6-右端三通阀杆; 7-气源; 8-中间容器; 9-平流泵; 10-围压装置; 11-压力传感器; 12-数据采集处理装置

图5 钻井液循环机理图及圆柱形过滤管

Fig. 5 drilling fluid circulation mechanism diagram and cylindrical filter tube

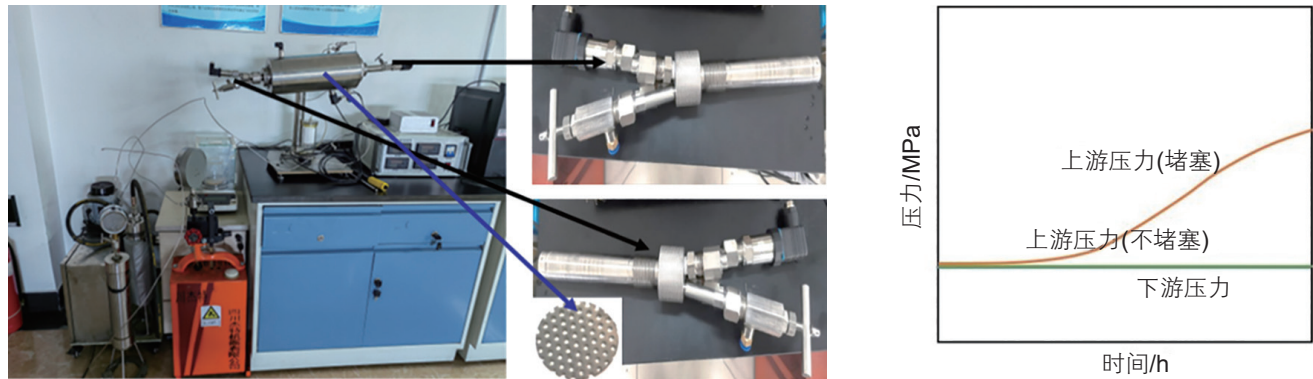


图6 压力传递装置及相关配件(左)、压力传递曲线(右)

Fig. 6 Pressure transfer device and related accessories(left)、pressure transfer curve(right)

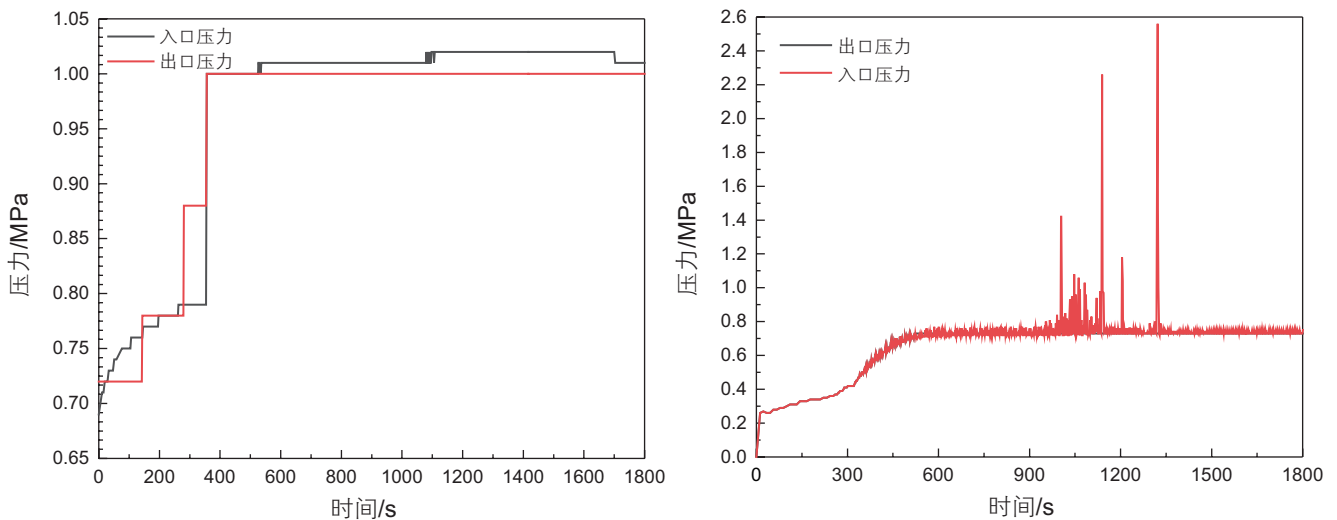


图7 改性纤维(左)和纤维XC-SZ(右)压力传递曲线

Fig. 7 Pressure transfer curve of modified fiber (left) and fiber XC-SZ (right)

减小并保持在 1.01 MPa 不变(压力增幅 $E=2.00\%$)，即管线中未发生堵塞。循环结束后模型堵塞情况见图 8b、c，可以观察到网板上没有纤维交结堵塞，网孔均保持通畅。因此，改性纤维可以通过旋导筛网，不会发生卡钻现象等。

现场水基钻井液体系+3%XC-SZ压力传递曲线见图 7(右)，会堵塞旋导筛网，但随着入口压力的不断上升堵塞层被突破，直至再次被堵塞，不断重复此过程(压力增幅 $E=250\%$)。XC-2、XC-3、XC-4

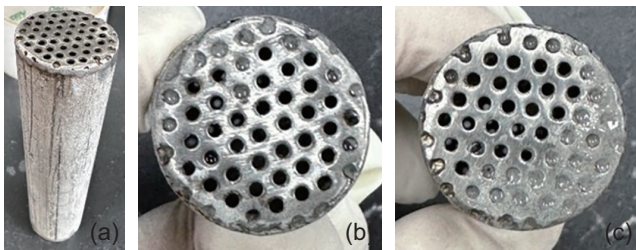


图 8 旋转导向系统筛网模型(a)及循环后网板堵塞情况(b)(c)
Fig. 8 Rotating guidance system sieve model (a) and blockage of mesh plates after circulation (b) (c)

和XC-5 由于大颗粒和易缠绕丝状物的存在，对网板(1.5 mm)和配件(孔径 3.08 mm)堵塞严重(图 9)，造成压力急速增加甚至不能继续使用，因此没有数据记录。

3.3 随钻堵漏纤维过旋导机理分析

3.3.1 改性纤维与现场堵塞纤维基本性能对比

现场纤维堵塞旋导筛网实物见图 10，改性纤维与现场堵塞纤维的基本性能见表 2。现场堵塞纤维XC-2~XC-5 属于矿物纤维，灼烧残渣均较高，同时本身粉碎的难度较大，因此粒径偏大，筛余量均大于 20%，并且纤维间桥接能力较差，不能形成致密的泥饼，滤失量均高于 50 mL，抗滤失能力非常差；纤维XC-SZ 属于改性植物纤维，由于疏水性过强，纤维在钻井液中桥接能力较弱，不能形成致密泥饼，因此抗滤失能力也较差。

3.3.2 随钻堵漏纤维流动过程形态观察

通过注射器缓慢加压使改性纤维溶液沿载玻片方向流动模拟纤维在钻具中流动形态，待其流动轨迹稍干后通过显微镜观察其表面纤维形态。由图 11 可知，



图 9 5 种现场纤维循环后堵塞的网板与仪器配件
Fig. 9 Five kinds of screen plates and instrument accessories blocked by on-site fiber circulation



图 10 现场纤维堵塞旋导筛网实物图
Fig. 10 Physical image of on-site fiber blockage rotary screen mesh

纤维成条状，由于质量分布不均匀，质心不在几何长度的中心而是偏向较重一侧，在流动过程中纤维受到沿流动方向的作用力，迫使纤维空间方位发生改变，使其沿流动方向平行分布。而在旋导装置筛网处存在沿筛网出口方向的离心力，使纤维能够更好的呈现“平行矫正”方位，顺利通过筛网。

3.3.3 堵漏纤维粒径分析

纤维粒径测试结果见图12，现场纤维除XC-3、

XC-4 粒径小于 1 mm 外，其他纤维粒径分布均较广，存在粒径大于 1.5 mm(旋导筛网最小孔径)的纤维，在随钻堵漏过程中过大尺寸(>1.5 mm)的纤维很容易堵塞旋导筛网。

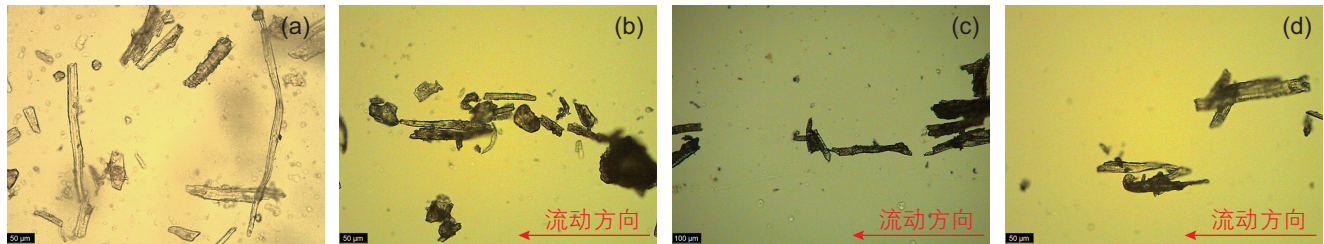
3.3.4 堵漏纤维分散性评价

通过zeta电位评价纤维的分散性，测试结果见图13，现场纤维(除纤维XC-SZ)zeta电位绝对值高于 29 mV，同时由于自身密度较大，在水溶液中均会

表 2 改性纤维与现场堵塞纤维基本性能

Table 2 basic properties of modified fiber and field plugged fiber

	筛余量/%	水分/%	灼烧残渣/%	表观黏度增长率/%	封闭滤失量(30min)/mL
行业标准	≤10.0	≤8.0	≤7.0	≤20.0	≤30
改性纤维	0	6.5	6.3	17.6	23
XC-2	98.9	2.5	58.5	18.9	132.0
XC-3	51.1	1.0	75.0	-5.6	95.0
XC-4	47.7	0.5	61.0	8.1	126.0
XC-5	26.1	2.5	67.0	0	51.0
XC-SZ	29.5	6.0	1.5	-51.3	52.0



(a) 改性纤维静止时的形态; (b)、(c)、(d) 改性纤维流动时的形态

图 11 纤维静止和流动过程中的形态

Fig. 11 The morphology of fibers in the process of rest and flow

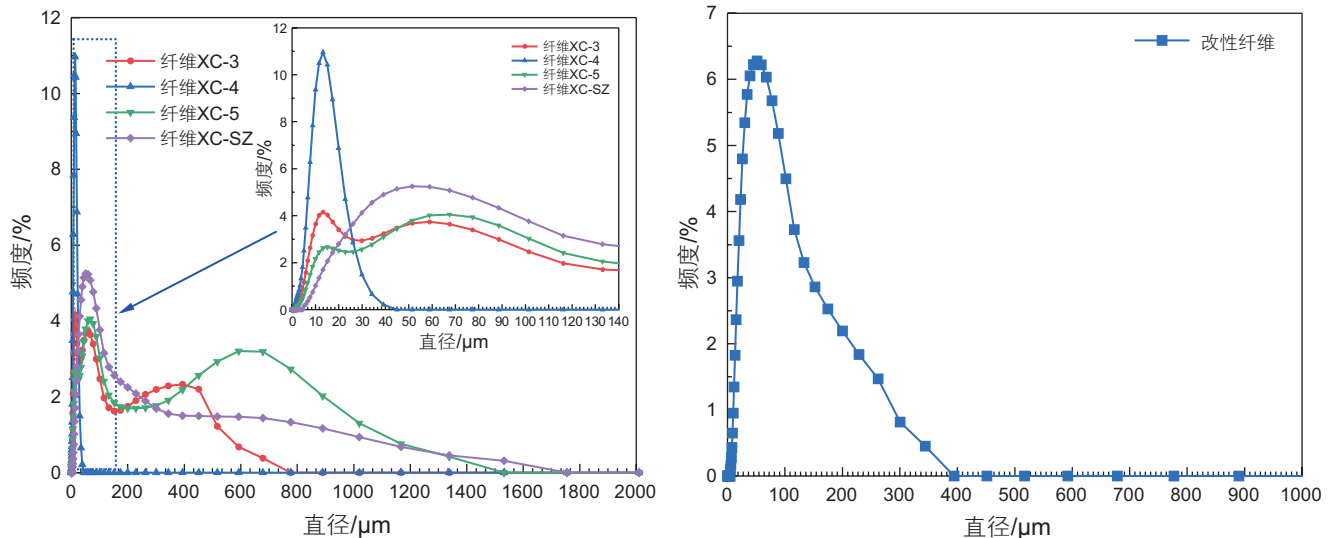


图 12 现场纤维与改性纤维粒径分布曲线

Fig. 12 Size distribution curve of field fiber and modified fiber particle

发生沉降，分散性较差(图 14)，因此当纤维密度较大时，纤维的沉降会对旋导筛网造成堵塞。改性纤维粒径均小于 400 μm ，同时 zeta 电位绝对值小于 29 mV，在钻井液中分散性较好，不会出现沉降现象。由图

13(右)可知，加入纤维的基浆 zeta 电位绝对值增大了 38.5%，纤维在基浆的分散性也变得更好(图 15)，其过旋导能力也会大大提升。

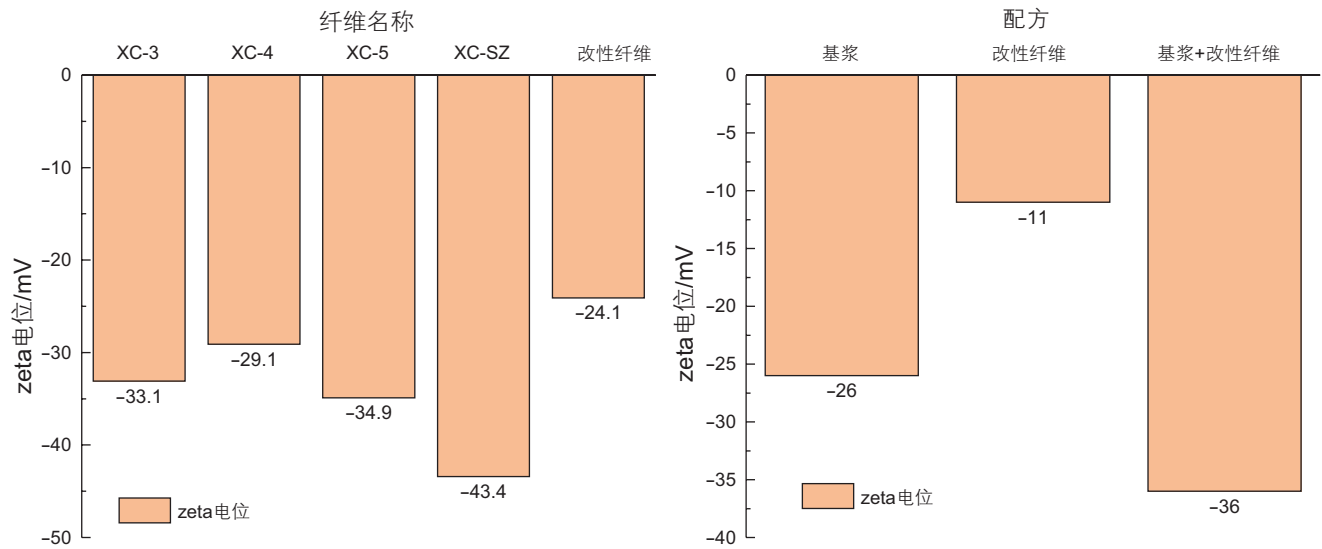


图 13 纤维与基浆 zeta 电位

Fig. 13 Zeta potential of fiber and base slurry

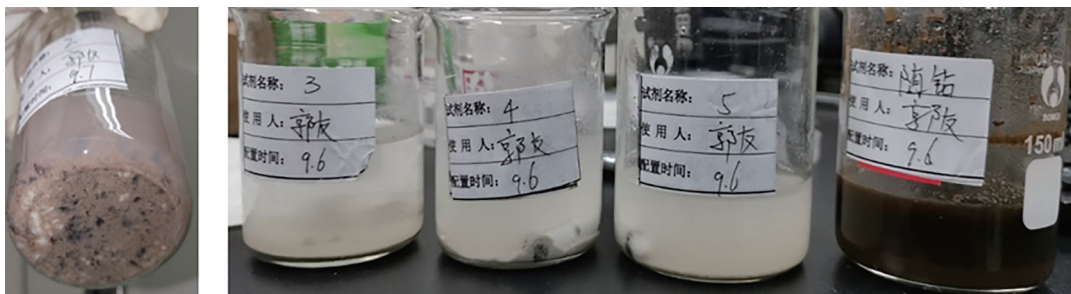


图 14 现场纤维在水中的分散情况

Fig. 14 Dispersion of plugging fibers in water in the field

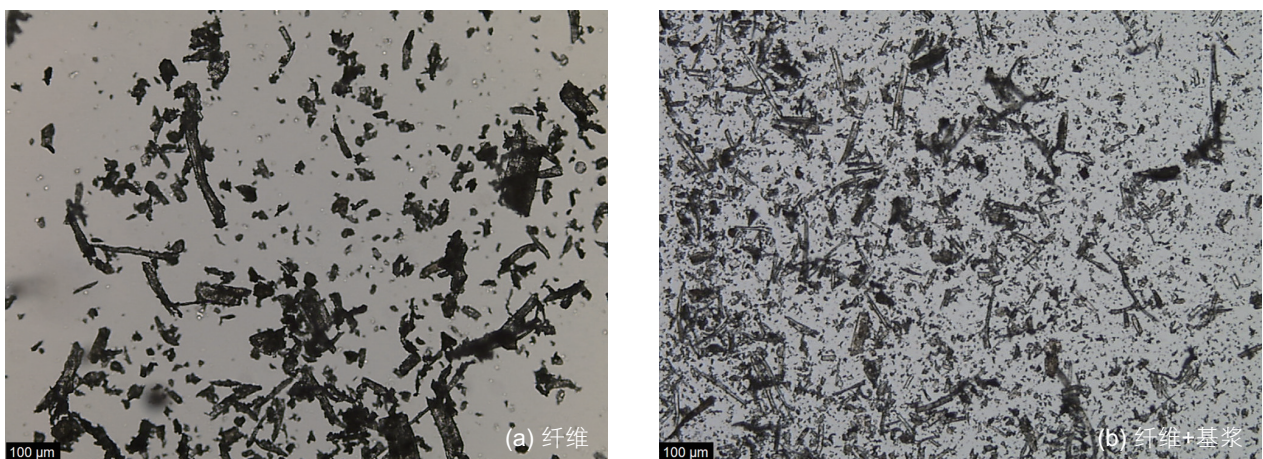


图 15 改性纤维加入基浆前后的微观形貌

Fig. 15 Micro-morphology of fiber before and after adding base slurry

4 随钻堵漏纤维堵漏能力评价及机理分析

4.1 随钻堵漏纤维堵漏能力评价

改性纤维在基浆和现场水基钻井液体系中的承压堵漏能力见表4。实验用20~40目石英砂床,150℃老化16h后,测量其在150℃、6MPa条件下的高温高压漏失量。对比配方1和2,加入4%改性纤维的基浆单剂能够有效封堵20~40目砂床,且对基浆黏度影响较小。对比配方3~6,随着改性纤维的加入现场钻井液体系累计漏失量开始快速减少。加入3%改性纤维后现场钻井液体系堵漏能力提升了81.8%,30min累计漏失量仅有4mL。

4.2 随钻堵漏纤维微观堵漏机理分析

4.2.1 随钻堵漏纤维剪切稀释性与触变性分析

利用哈克流变仪测试基浆中加入纤维前后的流变曲线,结果见图16a,发现其具有剪切稀释性,经拟合后发现符合幂律流型(见表5),加入纤维的基浆n值

变小,说明纤维可以改善基浆的剪切稀释性;钻具内部以及钻头喷嘴处剪切速率极高,加入纤维的钻井液在高剪切作用下,在该处流动阻力变小,更加容易通过钻具筛网或钻头喷嘴进入地层,并通过纤维织网提高低剪切速率黏度,提高钻井液封堵能力。由图16b可知,加入纤维的基浆储能模量呈指数级上升,在经过3个周期的“低剪切—高剪切”的动荡剪切测试后,仍具有较高储能模量,且结构恢复速度快(<1min),有利于随钻堵漏浆进入漏层后快速形成一定强度的网状堵漏结构。

4.2.2 随钻堵漏纤维分散性及SEM评价

通过3.3.4节中Zeta电位测试可知,纤维带有负电,与膨润土相互排斥,可在水基钻井液中良好分散;通过流变性和SEM分析可知,钻井液与纤维在高剪切速率下可快速顺利通过旋导筛网进入裂缝和孔洞,在漏层低剪切流速下,纤维通过氢键吸附在裂缝壁面以及堆积、缠结、拉筋等方式形成网状结构(图17),并且不断捕捉周边固体颗粒并填充到纤维网的孔隙中,使封堵层不断变得均匀密实,最终形成致密的封堵层。

表3 随钻堵漏纤维堵漏评价所用配方

Table 3 Formula for evaluation of fiber plugging while drilling

配方	具体配方
1#(空白):	300 mL 4% 膨润土
2#:	300 mL 4% 膨润土+4% 改性纤维
3#(空白):	300 mL 4% 膨润土+0.3%Na ₂ CO ₃ +4% 低聚物降滤失剂+0.1% 包被剂+0.2%CaO+0.8%PAC-LV+2% 白沥青+7%KCl+ 重晶石($\rho=1.5\text{ g/cm}^3$)
4#:	3#+1% 改性纤维
5#:	3#+2% 改性纤维
6#:	3#+3% 改性纤维

表4 随钻堵漏纤维堵漏结果

Table 4 Plugging results of fiber plugging while drilling

体系	条件	表观黏度/mPa·s	塑性黏度/mPa·s	动切力/Pa	动塑比/(Pa/mPa·s)	累计漏失量/mL
1# (空白)	老化前	13.0	5	8.18	1.64	/
	老化后	10.0	6	4.09	0.68	全失
2#	老化前	15.5	6	5.70	0.95	/
	老化后	12.0	7	3.64	0.52	76.0
3# (空白)	老化前	52.5	48	14.82	0.30	/
	老化后	60.5	46	14.82	0.32	22.0
4#	老化前	82.5	65	17.89	0.27	/
	老化后	80.0	61	19.42	0.31	12.2
5#	老化前	94.0	73	21.46	0.28	/
	老化后	80.0	63	17.37	0.27	6.0
6#	老化前	95.0	78	17.37	0.22	/
	老化后	85.0	68	17.37	0.25	4.0

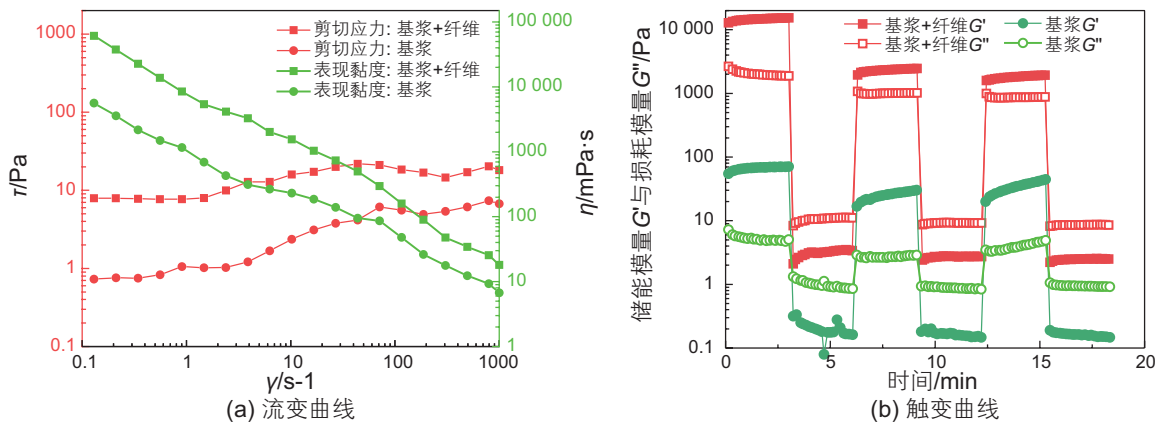


图 16 基浆与加入 4% 纤维前后的流变曲线和触变曲线

Fig. 16 Rheological and thixotropic curve of base slurry and before and after adding 4% fiber

表 5 基浆与纤维的幂律模式拟合参数

Table 5 Power law model fitting parameters of base slurry and fiber

	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n	R^2
基浆	1.09	0.30	0.94
基浆+4% 改性纤维	9.54	0.12	0.90

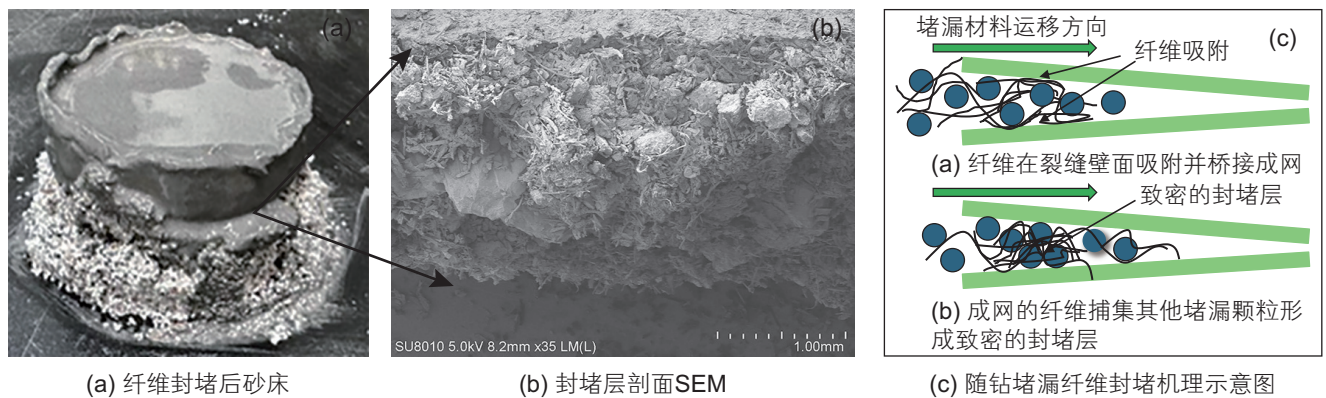


图 17 纤维封堵后砂床的微观形貌及封堵机理

Fig. 17 Micro-morphology and plugging mechanism of sand bed after fiber plugging

5 结论

1) 研发了一种随钻堵漏纤维，符合行业指标要求。该纤维的表观黏度增长率仅为 17.6%，封闭滤失量仅为 23 mL，表明其对钻井液黏度影响较小，且具有良好的承压堵漏效果。此外，设计了一种过旋导能力评价实验方法，并证实了改性纤维具有良好的过旋

导能力(循环压力增幅 $E=2\%$)。

2) 评价了改性纤维承压封堵能力和过旋导承压封堵机理。水基钻井液体系中加入 3% 改性纤维能够封堵 20~40 目砂床，累计漏失量仅为 4 mL。流变测试表明，纤维具有较好的剪切稀释性和触变性，进入漏层后能够快速恢复空间网架结构；纤维能够在裂缝壁面上吸附，并不断捕捉周边的颗粒并填充到纤维的孔隙中，最终实现致密封堵。

参考文献

[1] 王中华. 复杂漏失地层堵漏技术现状及发展方向[J]. 中外能源, 2014, 19 (01): 39-48. [WANG Z H. The Status and Development Direction of Plugging Technology for Complex Formation Lost Circulation[J]. China and Foreign Energy, 2014, 19 (01): 39-48.]

- [2] 孙金声, 白英睿, 程荣超, 等. 裂缝性恶性井漏地层堵漏技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(03): 630–638. [SUN J S, BAI Y R, CHENG R C, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(03): 630–638.]
- [3] 王卫. 旋转导向钻井系统执行机构关键技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010. [WANG W. The Study of The Key Technology of The RSS Actuator[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.]
- [4] 车卫勤, 庞茂源, 毕丽娜, 等. 页岩油上下地层漏失井控漏提速钻井技术[J/OL]. 石油钻采工艺: 1–11[2024–07–11]. <https://doi.org/10.13639/j.odpt.202405075>. [CHE W Q, PANG M Y, BI L N, et al. Shale oil drilling technology for leakage control and ROP enhancement of absorption wells in upper and lower formation[J/OL]. Petroleum Drilling and Production Technology: 1–11[2024–07–11]. <https://doi.org/10.13639/j.odpt.202405075>.]
- [5] 王一端, 闫建文, 李中, 等. “贪吃蛇”与深水海洋勘探生产技术[J]. 石油知识, 2021(6): 12–13. [WANG Y D, YAN J W, LI Z, et al. “Snake” and deep water marine exploration and production technology[J]. Petroleum Knowledge, 2021(6): 12–13.]
- [6] 王松. 东海大位移井导向钻井技术[J]. 石化技术, 2021, 28(10): 150–152. [WANG S. Directional drilling technology for extended reach wells in the east China Sea[J]. Petrochemical Technology, 2021, 28(10): 150–152.]
- [7] 尹福来. 新型指向式旋转导向钻井工具导向控制研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021. [YIN F L. A new type of directional rotary-guided drilling tool-oriented control research[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.]
- [8] 刘朝. 水平井旋转导向技术现状与现场应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(19): 152–154. [LIU C. Current status and field application of horizontal well rotary steering technology[J]. China Petroleum & Chemical Standards & Quality, 2020, 40(19): 152–154.]
- [9] 闫园园, 解庆, 胡林, 等. 旋转导向钻井系统发展概述[J]. 石化技术, 2019, 26(10): 228. [YAN Y Y, XIE Q, HU L, et al. Overview of the development of rotary steerable drilling system[J]. Petrochemical Technology, 2019, 26(10): 228.]
- [10] 陈冬毅. 渤海钻井防漏堵漏技术研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(4): 67–69. [CHEN D Y. Research on leak prevention and sealing technology for Bohai drilling[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(4): 67–69.]
- [11] 潘洁, 朱序富, 殷亚军. 随钻防漏堵漏强封堵钻井液在密度窄窗口区块的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(21): 136–138. [PAN J, ZHU X F, YIN Y J. Application of drilling fluid for leak prevention and plugging in the area with narrow density window[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2022, 42(21): 136–138.]
- [12] 唐明明, 张红梅, 苏明, 等. 鄂尔多斯盆地延北区块刘家沟组堵漏措施应用与分析[J]. 清洗世界, 2022, 38(5): 9–11. [TANG M M, ZHANG H M, SU M, et al. Application and analysis of plugging measures for Liujiagou Formation in Yanbei Block, Ordos Basin[J]. Cleaning the World, 2022, 38(5): 9–11.]
- [13] 孙欢, 朱明明, 王伟良, 等. 长庆页岩油水平井华H90–3井超长水平段防漏堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 16–21. [SUN H, ZHU M M, WANG W L, et al. Lost circulation prevention and plugging technologies for the ultra-long horizontal section of the horizontal shale oil well Hua H90–3 in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Technology, 2022, 50(2): 16–21.]
- [14] 郝惠军, 田野, 张健康, 等. 苏20K-P1储气库井超低压砂岩地层随钻堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 38–39. [HAO H J, TIAN Y, ZHANG J G, et al. Technology of mud loss control while drilling in ultra-low pressure sandstone formation of gas storage WellSu20K-PI[J]. Drilling Fluids and Completion Fluids, 2012, 29(3): 38–39.]
- [15] 董洪栋. 松科2井抗高温随钻堵漏材料优选及封堵效果评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [DONG H D. Selection of high temperature resistant plugging material and its plugging effect evaluation for SK2[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.]
- [16] YANG, L L, XIE C L, ZHANG Y W, et al. Performance of Self-healing microgel incorporating Nano-Silica as plugging material for drilling fluid[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 386, 122392.
- [17] 戴立瑶. 高吸油树脂随钻堵漏剂研制与作用机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2024. [DAI L Y. Research on development and action mechanism of high oil absorbent resin follow-drilling plugging agent[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2024.]
- [18] 李柏军, 张万亮, 闫纪帆, 等. 桥接堵漏法在通辽钱家店铀矿床地浸采铀工艺钻孔施工中的应用[J]. 铀矿地质, 2018, 34(3): 180–185. [LI B J, ZHANG W L, YAN J F, et al. Application of bridge leakage plugging method in drilling construction of in-situ leaching uranium mining process of Qianjiadian Uranium Deposit, Tongliao[J]. Uranium Geology, 2018, 34(3): 180–185.]
- [19] 黄瑞华. 胜利油田纯梁区块钻井防漏堵漏技术优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020. [HUANG R H. Study on Optimization of Drilling Lost Circulation Prevention and Plugging Technology in Chunliang Oil Field[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.]
- [20] 康毅力, 郭昆, 游利军, 等. 考虑地应力及缝宽/粒径比的钻井堵漏材料抗压能力评价[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(1): 39–47. [KANG Y L, GUO K, YOU L J, et al. Evaluation on the compression strength of lost circulation materials considering in-situ stress and fracture width/particle size ratio[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2021, 43(1): 39–47.]
- [21] 韩宁宇, 王训迺, 陈琦, 等. 植物纤维改性方法及其增强复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(3): 9–13. [HAN N N,

- WANG X Q, CHEN Q, et al. Research progress in modification of plant fiber and its application as reinforcing material in composite[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(3): 9–13.]
- [22] GUO, L, HUANG C, GUO J. Hydrophobic Modifications on Nanocellulose. Elsevier eBooks 2024, 263–295.
- [23] LEI L, ZHAO B, CHENG Z, et al. Improving the interfacial adhesion and mechanical properties of flax fiber reinforced composite through fiber modification and layered structure[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 221, 119305.
- [24] LOGANATHAN P, SIVANANTHAM G, A.G K, et al. Surface modification of leaf-based fibers and their composites[J]. *Surface Modification and Coating of Fibers, Polymers, and Composites*, 2025, 143–155.
- [25] 罗伟, 欧忠文, 黄正峰, 等. 改性核桃壳在砂浆中的应用[J]. *表面技术*, 2023, 52(4): 399–409. [LUO W, OU Z W, HUANG Z F, et al. Application of modified walnut shell in mortar[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(4): 399–409.]
- [26] 张永君, 闫格. 基于硅烷化预处理的AZ91D镁合金超疏水表面的喷涂法制备[J]. *材料保护*, 2021, 54(5): 67–71. [ZHANG Y J, YAN G. Preparation of AZ91D magnesium alloy superhydrophobic surface based on silanization pretreatment by spraying method[J]. *Journal of Materials Protection*, 2021, 54(5): 67–71.]
- [27] 蒋乐, 张鹤, 丁新更. KH560/PDMS改性硅酸锂疏水涂层的制备及疏水性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2014, 41(S1): 30–33. [JIANG L, ZHANG H, DING X G. Preparation and research of hydrophobic KH560/PDMS modified SiO₂ coating[J]. *New Building Materials*, 2014, 41(S1): 30–33.]
- [28] CHEN X, DING F, HOU X, et al. Halloysite-Based Inorganic–Organic Hybrid Coatings for Durable Flame Retardant, Hydrophobic and Antibacterial Properties of Cotton Fabrics. *International Journal of Biological Macromolecules* 2024, 277, 134357–134357.
- [29] 王福涛. 蔗渣纤维素疏水改性及纤维素基水凝胶的制备及应用[D]. 南宁: 广西大学, 2018. [WANG F T. Hydrophobic modification of cellulose and preparation and application of cellulose hydrogel[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.]
- [30] 王昭晖, 沈一丁, 费贵强, 等. 环氧氯丙烷对水溶性聚乙烯醇纤维的表面改性及增强机理[J]. *功能材料*, 2012, 43(20): 2785–2789. [WANG Z H, SHEN Y D, FEI G Q, et al. Surface modification of PVA fiber with epoxy chloropropane and its mechanism of curing reinforcement[J]. *Functional Materials*, 2012, 43(20): 2785–2789.]
- [31] 方正平. 仿生超疏水三维多孔吸油海绵的制备及其油水分离性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024. [FANG Z P. Preparation of Bionic Superhydrophobic Three-dimensional porous oil-adsorption sponges and its Oil-water Separation Performance[D]. Changchun: Jilin University, 2024.]
- [32] CHEN S, SHAO Q, HU L, et al. Hydrophobic and magnetic fabrication of hydroxyethyl cellulose-lignin aerogel through ultrasound enhancement for efficient oil/water separation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 52, 103503.
- [33] 刘蓉蓉. 基于Fenton反应的植物纤维改性与应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021. [LIU R R. Modification of plant fiber and its application based on Fenton Reaction[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.]
- [34] 龚雪梅, 蒋军, 王超, 等. 纳米纤维素疏水改性及其功能化应用研究进展[J]. *化工进展*, 2024, 43(6): 3187–3198. [GONG X M, JIANG J, WANG C, et al. Research progress on hydrophobicity modification and functional application of nanocellulose[J]. *Chemical Industry Progress*, 2024, 43(6): 3187–3198.]
- [35] GAO Y, KONG C, LU P, et al. Hydrophobic Bio-Based Foam Prepared from Recycled Pulp Fiber and Its Properties. *International Journal of Biological Macromolecules* 2024, 282, 136989.
- [36] 中国石油天然气集团公司. 钻井液用随钻堵漏剂——改性植物纤维: Q/SY 17096–2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016. [China National Petroleum Corporation. Plugging agents while drilling used in drilling fluids—Modified vegetable fibers: Q/SY 17096–2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.]

(编辑 杨雅露)

第一作者: 贾永红(1979年—), 本科, 高级工程师, 主要从事钻井液与完井液研究, jiayh2006@cnpc.com.cn。

通讯作者: 贺垠博(1989年—), 博士, 副教授, 研究方向为油气井化学与工程、储层损害与保护、油田化学等, heyb@cup.edu.cn。