

STJ植物胶冲洗液滤饼强化研究

田禹¹, 李之军², 唐伟旭¹, 于翼嘉¹

(1. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130012; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:复杂破碎地层钻进时常出现孔壁坍塌等问题, 为了防止此类事故发生, 提高岩心采取率, 常采用绳索取心钻进, 需要使用防塌性能强的无固相冲洗液。STJ植物胶冲洗液为环保型无固相冲洗液, 但其形成的滤饼稀疏, 不足以满足护壁需要。本文针对STJ植物胶冲洗液滤饼稀疏这一问题, 以STJ植物胶冲洗液为基础, 结合理想充填理论, 采用室内实验、微观分析等研究手段, 优选填充材料并优化配比, 研究植物胶冲洗液的滤饼强化机理。实验研究表明, 由2% STJ+3% YT-1+2% YT-2+3% YT-3配制成的无固相冲洗液滤失量显著降低, 其形成的滤饼更为致密平坦, 护壁性能大幅提升。微米级填充材料通过颗粒级配形成致密滤饼, 符合理想充填理论, 为复杂地层钻进提供了环保高效的解决方案。

关键词:STJ植物胶; 强化型环保钻井液; 滤饼强化; 防塌护壁; 微米材料

中图分类号:P634.6; TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)06-0026-08

Study on filter cake strengthening of STJ plant gum drilling fluid

TIAN Yu¹, LI Zhijun², TANG Weixu¹, YU Yijia¹

(1. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun Jilin 130012, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: Borehole wall collapse and other issues frequently occur during drilling in complex fractured formations. To prevent such accidents and improve core recovery, wireline coring drilling is commonly used, which requires solid-free drilling fluids with excellent anti-collapse performance. The STJ plant gum drilling fluid is an environmentally friendly solid-free drilling fluid; however, the filter cake formed by it is sparse, which fails to meet the requirements of borehole wall protection. Aiming at the problem of sparse filter cake of the STJ plant gum drilling fluid, this study took the STJ plant gum drilling fluid as the base fluid, combined with the ideal packing theory, and employed research methods such as laboratory experiments and microscopic analysis to optimize the selection of filling materials and their proportions, as well as to investigate the filter cake strengthening mechanism of the plant gum drilling fluid. Experimental results indicate that the solid-free drilling fluid formulated with 2% STJ+3% YT-1+2% YT-2+3% YT-3 exhibits a significant reduction in filtration loss. The filter cake formed by this drilling fluid is denser and flatter, and its borehole wall protection performance is greatly enhanced. Micron-sized filling materials form a dense filter cake through particle gradation, which is consistent with the ideal packing theory. This research provides an environmentally friendly and efficient solution for drilling in complex formations.

Key words: STJ plant gum; enhanced environmentally friendly drilling fluids; filter cake strengthening; anti-collapse and borehole wall protection; micron-scale materials

0 引言

在复杂地层进行深孔钻进时, 绳索取心钻进工

艺具有钻进效率高、取心速度快、劳动强度低、辅助时间少等优势^[1]。然而, 由于绳索取心钻进环状间

收稿日期: 2025-03-29; 修回日期: 2025-07-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.003

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术与装备(编号: 2024ZD1003100)

第一作者: 田禹, 男, 汉族, 1996年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事工程地质技术研究工作, 吉林省长春市朝阳区工农大路888号, 1360029697@qq.com。

引用格式: 田禹, 李之军, 唐伟旭, 等. STJ植物胶冲洗液滤饼强化研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 26-33.

TIAN Yu, LI Zhijun, TANG Weixu, et al. Study on filter cake strengthening of STJ plant gum drilling fluid[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 26-33.

隙小,致使循环压力大^[2],需使用无固相冲洗液。但无固相冲洗液的固相颗粒少,防塌性能较差^[3-5],因而需研究防塌性能好的新型无固相冲洗液。

植物胶冲洗液成分源于天然高分子植物资源^[6],在无固相冲洗液的基础上发展而来。相比于传统冲洗液,植物胶冲洗液具有绿色环保、低密度、高流动性等特点^[7-8],被广泛应用于复杂地层钻探实践中^[9]。然而,有研究表明,单纯的植物胶冲洗液直接用于地质钻探并不能发挥良好的防塌作用,其护心稳壁效果也不明显^[10]。本研究围绕植物胶冲洗液滤饼强化这一目的出发,深度剖析植物胶冲洗液的滤饼强化机理,优选填充材料进行配制,得出一种防塌性能好的环保型无固相冲洗液。

冲洗液的防塌性能会受到很多因素影响,如冲洗液类型、压力差、侵入时间、孔隙度、毛细管压力、滤饼质量等^[11-12],其中滤饼质量是决定防塌性能的关键。因此,世界各地的专家围绕滤饼强化进行了很多研究。Chenevert等^[13]提出了一种测量滤饼孔隙率的方法;Dangou等^[14]使用相同的方法测量滤饼孔隙率时发现,滤饼孔隙率直接取决于滤饼中的粒度分布,间接取决于滤饼厚度;Eikatatny等^[15]利用CT扫描确定滤饼孔隙度,得出冲洗液边界处外滤饼孔隙度接近于零,而岩石表面处内滤饼孔隙度在10%~20%之间。

滤饼渗透率在冲洗液侵入中起着重要作用。Dangou等^[14]发现滤饼渗透率在 10^{-5} ~ 10^{-7} D之间,控制静态和动态滤失量,并受剪切速率影响严重。滤饼的渗透率可通过不同的模型确定,Ezeakacha等^[16]从累积过滤体积和时间平方根之间的关系推导出滤饼渗透率的计算公式;Fordham等^[17]和Dewan等^[18]利用超低渗透岩心进行了水基冲洗液侵入的物理模拟研究,发现滤饼形成速度与储层渗透率有显著关系。因此,在复杂的地层中,更需要依靠高质量的滤饼来防止冲洗液的侵入,有效保持地层的稳定性,防止孔壁坍塌。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本研究使用的材料见表1,主要材料STJ植物胶和微米填充材料纯度均为工业级。STJ植物胶是基础材料,用于与优化后的植物胶冲洗液进行对比。微米填充材料主要起降低冲洗液滤失量且改

善其流变性能的作用,同时与植物胶颗粒实现良好的颗粒级配,得到致密平坦的滤饼,达到强化滤饼、提高防塌能力的目的。

表1 本研究实验材料

Table 1 Experimental materials for this study

实验材料	代 号	生 产 厂 家
STJ植物胶		河南省九金科技有限公司
碳酸钠	Na ₂ CO ₃	深圳金富源生物科技有限公司
微 米 材 料 (CaCO ₃)	YT-1	
	YT-2	上海水田科技有限公司
	YT-3	

1.2 实验方法

1.2.1 STJ植物胶配制

将适量STJ植物胶加入水中,配制出质量分数分别为1%、2%、3%的植物胶溶液,再加入0.2%的Na₂CO₃固体,调节冲洗液的酸碱度,并且使植物胶进行水化。配制好的溶液搅拌30 min,并静置12 h,使植物胶冲洗液完全水化。

1.2.2 STJ植物胶冲洗液流变性能

使用ZNN-D6型六速旋转黏度计测量植物胶冲洗液的流变性能,相关流变参数计算:

$$\mu_a = 0.5N_{600} \quad (1)$$

$$\mu_p = N_{600} - N_{300} \quad (2)$$

$$\tau_d = 0.511(N_{300} - \mu_p) \quad (3)$$

$$\tau_{初} = 0.511N_3' \quad (4)$$

$$\tau_{终} = 0.511N_3'' \quad (5)$$

式中: μ_a ——表观黏度; N_{600} ——600转的读数; μ_p ——塑性黏度; N_{300} ——300转的读数; τ_d ——动切力; $\tau_{初}$ ——初切力; N_3' ——冲洗液静止10 s后3转的读数; $\tau_{终}$ ——终切力; N_3'' ——冲洗液静止10 min后3转的读数。

1.2.3 STJ植物胶冲洗液滤失性能及砂盘滤失实验

取水化后的植物胶冲洗液倒入泥浆杯,调整渗透压差为0.7 MPa,开启中压失水仪,分别测量冲洗液的瞬时滤失量和经过0.5、1、3、5、7、10、15、20、30 min的滤失量。测量结束后,用缓慢水流冲洗滤纸上的滤饼,同时观察滤饼外观。同理,用更接近地层环境的砂盘代替实验中的滤纸进行砂盘滤失实验,方法同前。砂盘为加工定制,砂盘尺寸为 $\Phi 80$ mm,主要孔径为150~200 μ m。

1.2.4 扫描电镜分析

将STJ植物胶冲洗液的滤饼在常温条件下自然干燥,并将其切割成极小的试样,然后置于扫描台上抽真空 15 min。最后用扫描电镜(蔡司 Sigma500 场发射扫描电镜)对植物胶及滤饼进行微观分析。

2 实验结果与讨论

2.1 STJ植物胶冲洗液流变性能

六速旋转黏度计测定的不同质量分数植物胶冲洗液的流变性能参数见表 2。STJ 植物胶冲洗液的漏斗黏度、表观黏度、塑性黏度及动切力都随植物胶质量分数的增长而提高。质量分数为 1% 的 STJ 植物胶冲洗液表观黏度及塑性黏度较小,说明其固相含量少且黏滞性能较差,不足以形成滤饼。质量分数为 3% 的 STJ 植物胶冲洗液动塑比为 1.36,漏斗黏度过大,且在后续填充其他材料时易发生交联,导致冲洗液极其黏稠,流动性变差。质量分数为 2% 的 STJ 植物胶冲洗液有较好的流变性能,动塑比为 0.84,因此以质量分数 2% 的 STJ 植物胶冲洗液作为基础材料。

表 2 STJ 植物胶冲洗液流变性能参数

Table 2 Rheological properties of STJ plant gum drilling fluid

质量分 数/%	漏斗黏 度/s	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	动塑 比
1	28	8.5	5.5	3.07	0.56
2	60	21	11.5	9.71	0.84
3	187	38.5	16.5	22.48	1.36

2.2 STJ植物胶冲洗液滤失性能

对不同质量分数的 STJ 植物胶冲洗液进行 API 滤失实验,结果见表 3。

由表 3 可知,STJ 植物胶冲洗液的滤失量随植物胶质量分数的增加而减少。植物胶质量分数为 1% 时,STJ 植物胶冲洗液的 30 s 滤失量最大,达到了 13 mL;质量分数 2% 时,30 s 滤失量降低到了 5.5 mL,相比于质量分数 1% 时滤失性能有了显著提高;质量分数 3% 时,30 s 滤失量达到了 3.4 mL,滤失性能进一步提高,但不显著。实验到达 30 min 时,质量分数 2% 和 3% 的植物胶冲洗液滤失量分别为 18.9、18 mL/30 min,滤失性能相差较小。综合考虑选用质量分数 2% 的 STJ 植物胶冲洗液作为基

表 3 STJ 植物胶冲洗液滤失量

Table 3 Filtration loss of STJ plant gum drilling fluid

时间/min	滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]		
	质量分数 1%	质量分数 2%	质量分数 3%
0	0	0	0
0.5	13	5.5	3.4
1	18	7.8	6.2
3	21.2	11.3	11.9
5	23.2	12.8	13.3
7	24.7	13.6	14
10	26.3	14.6	14.9
15	28.5	16	15.9
20	29.9	17.3	16.6
30	32.5	18.9	18

础材料。
STJ 植物胶冲洗液在 API 滤失实验后形成的滤饼形态如图 1 所示。STJ 植物胶冲洗液滤饼表面疏松粗糙,且凹凸不平,难以在孔壁形成致密坚韧的薄膜封堵孔喉,无法满足护壁堵漏要求。



图 1 滤饼形态
Fig.1 Filter cake shape

通过扫描电子显微镜(SEM)得到 STJ 植物胶冲洗液滤饼微观形貌和放大不同倍数的结构如图 2 所示。由图 2 可见,STJ 植物胶冲洗液滤饼表面存在着胶膜结构以及大量的纤维状结构,在滤饼表面交错复杂,形成了网状结构,同时在纤维的空隙中间还存在着不规则颗粒物质将空隙填充,但仍存在着大量细小空隙。这些细小空隙的存在降低了滤饼的致密性,仅靠胶膜结构无法阻止冲洗液内的自由水侵入地层,无法较好地维持孔壁稳定。

2.3 STJ植物胶冲洗液滤饼强化材料优选

2.3.1 正交试验设计

正交试验是研究多因素多水平的一种试验方法,可用部分实验替代全部实验,通过部分的实验

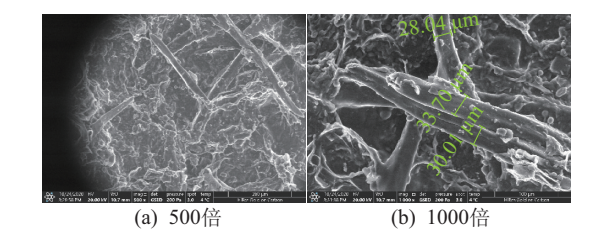


图 2 滤饼微观结构

Fig.2 Microstructure of filter cake

结果分析获取较全面的信息,减少人力物力投入。对 3 种不同粒径的 CaCO_3 材料 YT-1(400 目)、YT-2(800 目)、YT-3(1250 目)进行正交试验,对植物胶冲洗液滤饼进一步强化研究。正交试验设计和试验结果见表 4、表 5。

由表 5 可知,实验组 2 的滤失量最低,为 11.3 mL/30 min,实验组 7 的滤失量最高,达到了 15.5 mL/30 min。通过实验组 2 与实验组 7 的参数对比,发现

表 4 正交试验表			
Table 4 Orthogonal experiment			
试验序号	YT-1 质量 分数/%	YT-2 质量 分数/%	YT-3 质量 分数/%
1	4	3	2
2	3	2.5	3
3	4	2	3
4	3	3	2.5
5	3.5	3	3
6	4	2.5	2.5
7	3.5	2.5	2
8	3.5	2	2.5
9	3	2	2

表 5 正交试验结果						
Table 5 Orthogonal experimental results						
试验序号	API 滤失量/ [mL·(30 min) ⁻¹]	漏斗黏度/s	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/Pa	动塑比
1	15.5	65	21	11.5	9.71	0.84
2	11.3	58	20.5	11	9.56	0.87
3	11.4	63	20.5	11.5	8.62	0.75
4	11.5	53	21	11.5	9.56	0.83
5	12.4	58	21.5	11	8.83	0.80
6	12.8	60	20.5	12	8.94	0.75
7	15.5	63	21	12.5	9.35	0.75
8	12.4	55	20.5	11	9.26	0.84
9	13.3	59	21	11.5	9.71	0.84

随 YT-1 质量分数增加和 YT-3 质量分数减少,滤失量反而上升。由此可见,要降低滤失量需对固相颗粒的加量进行合理匹配,使不同粒径的颗粒达到理想的堆积效率,形成致密结构。实验组 2 效果最好,其配方为 3% YT-1+2.5% YT-2+3% YT-3。从植物胶冲洗液的流变性能看,所有实验组 STJ 植物胶冲洗液的漏斗黏度都在 55~65 s 之间,且表观黏度和动切力也都在较小的范围,植物胶冲洗液的流变性能在实验中无显著变化。

2.3.2 正交试验方差分析

正交试验设计及其结果能通过实验结果找出最优水平组合,但无法区分与各个因素水平对实验结果影响的差异。为了弥补直观分析方法的不足,采用方差分析法对实验结果进行计算和分析,见表 6。

由表 6 可知,3 种材料的Ⅲ型平方和中 YT-3 数值最大,说明 YT-3 组数据分散度最大,对植物胶冲洗液的影响最显著。同理,YT-1 的显著性明显强于 YT-2,弱于 YT-3。因此 3 种材料对植物胶冲洗液滤失量影响的主次关系是:YT-3>YT-1>YT-2。

通过方差分析,得到 3 种材料对滤失量影响效果的直观图,如图 3 所示。

通过图 3 可看出 3 种材料对滤失量的影响,其中 YT-1 的最优加量为 3%,YT-2 的最优加量为 2%,YT-3 的最优加量为 3%。因此 3 种材料复配配方为 3% YT-1+2% YT-2+3% YT-3,后文中以此配方称为填充配方。

2.3.3 优化后的冲洗液性能参数

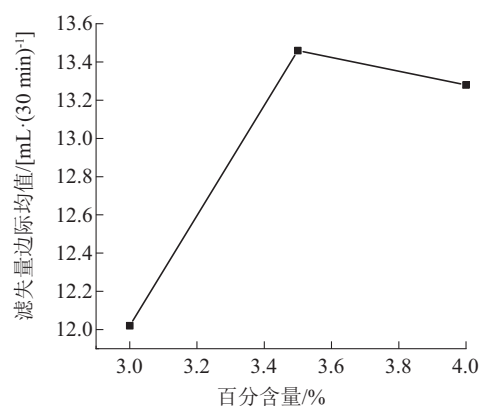
通过正交试验得出的填充配方与 STJ 植物胶冲洗液强化前的性能参数进行对比,见表 7。可见,

表6 正交试验方差分析

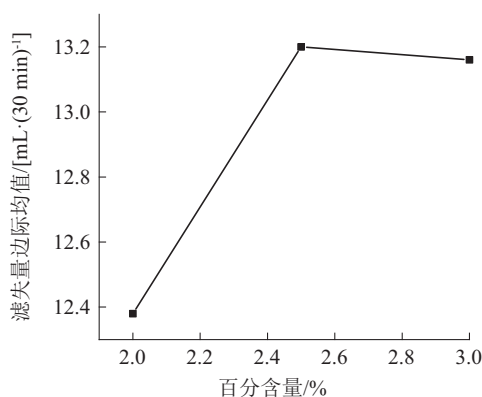
Table 6 Orthogonal experimental variance analysis

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F值	Sig
YT-1	3.440	2	1.720	27.158	0.036
YT-2	1.287	2	0.643	10.158	0.090
YT-3	16.107	2	8.053	127.158	0.008
误差	0.127	2			

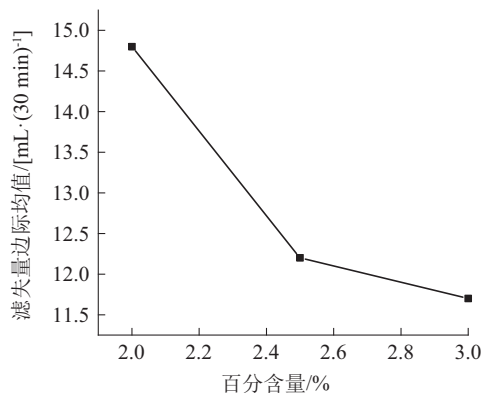
注:df—自由度;F值—构造统计量;Sig—显著性。



(a) YT-1



(b) YT-2



(c) YT-3

图3 滤失效果

Fig.3 Filter failure results

加入填充配方后植物胶冲洗液的滤失性能得到显著增强,滤失量达到11.2 mL/30 min,流变性能无显著变化,动塑比为0.72,在较适宜的范围内。

2.4 STJ植物胶冲洗液砂盘滤失实验结果分析

2.4.1 STJ植物胶冲洗液滤饼强化前后宏观分析

植物胶冲洗液强化前后在砂盘上形成的滤饼见图4,可见,由于滤失介质换成了孔隙较大的砂盘,导致滤失量变大,强化前的植物胶冲洗液无法形成胶膜状滤饼,所以通过砂盘基本全部渗出。如果在孔隙较大的地层中会直接渗入地层,引起地层水化膨胀,造成孔壁失稳。而强化后植物胶冲洗液在砂盘上形成了致密滤饼,有效阻止冲洗液及其滤液渗出,防止冲洗液进一步渗透砂盘,起到了良好的防塌效果。

2.4.2 STJ植物胶冲洗液滤饼强化前后微观分析

STJ植物胶冲洗液强化前后封堵砂盘微观结构见图5。由图5(a)、(b)可见,STJ植物胶冲洗液在砂盘表面生成了薄且多孔的滤饼,还有部分砂盘裸露在外,且放大后滤饼仍然存在着很多孔隙,植物胶内纤维状物质在表面交错,通过植物胶封堵后表面孔隙基本分布在100 μm左右,砂盘孔隙变小,但仍存在空隙。说明砂盘表面形成的滤饼无法阻止植物胶向砂盘内部侵入,最终导致植物胶全部侵入砂盘,所以STJ植物胶冲洗液无法满足地层防塌需求。

由图5(c)可见,滤饼表面非常致密光滑且无明显孔隙。砂盘表面形成了一层厚且致密的滤饼,内部充斥着大小不等的固相颗粒和纤维状结构,共同形成了滤饼。根据理想充填理论,在砂盘结构表面,部分冲洗液内较大的固相颗粒作为架桥粒子,细小颗粒作为填充粒子分布在砂盘的孔隙之间,充分填充了砂盘表面,使冲洗液无法进一步侵入砂盘内部,良好地隔绝冲洗液与地层,维护孔壁稳定。由图5(d)可见,滤饼中存在着大块的架桥颗粒,架桥颗粒之间又充斥着不同粒径的细小填充颗粒,形成了颗粒紧密堆积的结构,有效隔绝了冲洗液中液相对地层的侵入,实现良好的堵漏效果。

2.5 植物胶冲洗液滤饼强化机理

2.5.1 滤饼强化材料颗粒尺寸研究

根据理想充填理论,需确定各滤饼强化材料的粒径大小与颗粒累积体积分数之间的关系,测试结果以粒度分布数据表、分布曲线、比表面积、 d_{10} 、 d_{50} 、

表7 强化前后的性能参数						
Table 7 Experimental parameters before and after strengthening						
配 方	滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]	漏斗黏度/s	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比
2% STJ	18.9	60	21	11.5	9.71	0.84
2% STJ+填充配方	11.2	55	21	13.5	9.71	0.72



图4 强化前后在砂盘上形成的滤饼

Fig.4 Filter cake formed on the sand plate before and after plant gum reinforcement

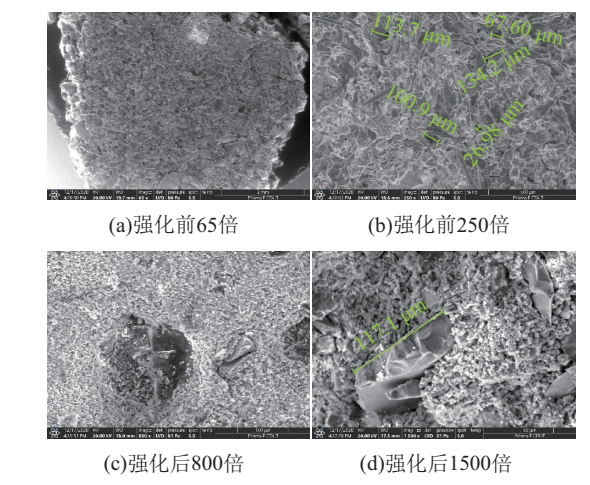


图5 强化前后封堵砂盘微观结构

Fig.5 Microstructure of plugging sand disc before and after strengthening

d_{90} 等方式显示,如图6所示。通过粒径分析结果得出各种颗粒的百分含量曲线和累计百分含量的曲线,其中各粒子的 d_{90} 值(指90%的颗粒粒径小于该值)见表8。

由表8可见,3种暂堵剂颗粒在其粒径累积分布曲线上的 d_{90} 值依次减小且相差不大,这说明3种物质在冲洗液中可以形成良好的级配,在冲洗液中进行颗粒堆叠,形成 $d_{\max}=25\sim30\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒组合。在之前的植物胶微观结构分析中,植物胶的空隙尺寸为 $150\sim200\text{ }\mu\text{m}$,根据理想充填理论中的 $\frac{1}{4}\sim\frac{1}{3}$ 的充填规则,3种物质满足理想充填理论的粒径范围,对STJ植物胶进行空隙填充。

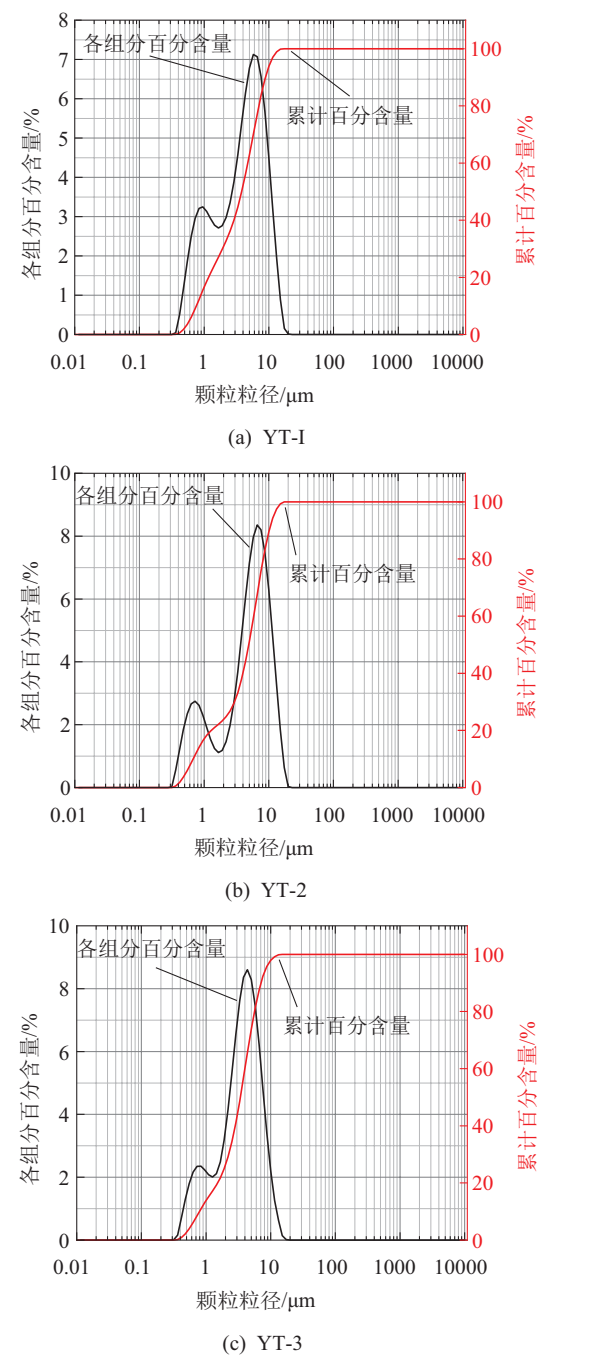


图6 粒径分布

Fig.6 Particle size distribution

表8 各粒子 d_{90}
Table 8 Particles d_{90}

颗粒种类	YT-1	YT-2	YT-3
$d_{90}/\mu\text{m}$	10	8.7	6.6

2.5.2 STJ植物胶冲洗液滤饼强化机理

为封堵储层中孔径不等的各种孔喉及暂堵颗粒之间的孔隙,需要在防塌护壁的冲洗液中加入具有连续粒径序列分布的暂堵颗粒。通过这种合理的粒径分布,确保形成滤失量极低的致密滤饼,防止冲洗液和固相颗粒侵入储层。经研究,暂堵剂颗粒累积体积分数与粒径的平方根成正比时,可实现颗粒的理想充填。实现理想充填的关键,在于地层空隙与冲洗液中固相颗粒在粒径及其分布上的合理匹配,且及时在地层表面形成致密的滤饼结构。

STJ植物胶冲洗液滤饼强化机理如图7所示。如前所述,STJ植物胶主体为纤维状结构,相互交叠,形成了三维网状结构,在此结构中存在着大小不一的空隙空间。根据 $\frac{1}{4}\sim\frac{1}{3}$ 的充填规则,不同粒径的微米材料对植物胶的空隙进行填充,提高了STJ植物胶的颗粒密度,减小了胶体结构中的孔隙度,降低了冲洗液在孔喉中形成的滤饼的渗透性能,有效防止冲洗液中的固相和液相进一步侵入地层,为储层提供了良好保护。且滤饼表面结构平整、致密,形成了一体化的膜结构,良好隔绝冲洗液和固相颗粒对地层的渗入,实现地层堵漏效果。

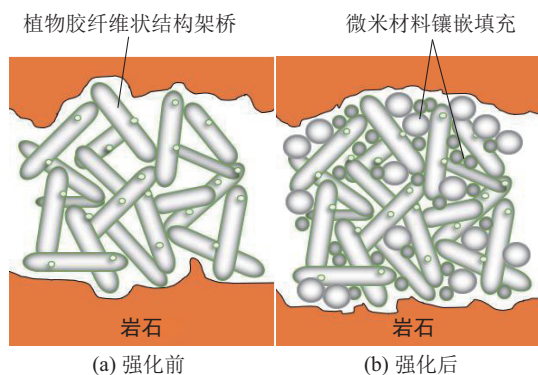


图7 滤饼强化机理示意

Fig.7 Schematic diagram of filter cake strengthening mechanism

3 结论

本研究的目的是进行STJ植物胶冲洗液的滤饼强化,从而提高其护壁堵漏能力。通过对STJ植

物胶冲洗液的配方优化实验、微观结构分析、强化机理研究等,得出以下结论:

(1) 加入 2% STJ+3% YT-1+2% YT-2+3% YT-3 配制成的植物胶冲洗液具有较好的流变性能和较低的滤失量,能够很好地保护孔壁。

(2) 根据理想充填理论配制出的新型植物胶冲洗液,可在孔壁形成致密平坦的滤饼,通过对滤饼结构进行宏观及微观观察,其具有良好的颗粒级配。

(3) 本研究使用的滤饼强化材料局限于近似球状的固相材料,未来可以用片状、柱状、丝状等材料进行植物胶冲洗液滤饼强化的研究,进一步提高滤饼质量,完善新型环保无固相植物胶冲洗液体系。

参考文献(References):

- [1] 杨芳,曹凡,刘振新,等.川西甲基卡锂矿3000m科学深钻高效钻进措施分析[J].钻探工程,2025,52(1):47-53.
YANG Fang, CAO Fan, LIU Zhenxin, et al. Analysis of efficient drilling measures for 3000m scientific deep drilling in Jiajika Lithium Mine, western Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1):47-53.
- [2] 冯美贵,刘启栋,郭伟,等.钻井液离心机预防绳索取心钻杆内壁结垢研究[J].钻探工程,2024,51(3):118-124.
FENG Meigui, LIU Qidong, GUO Wei, et al. Research on the prevention of scaling on the inner wall of the wire-line drill rod by drilling fluid centrifuge[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3):118-124.
- [3] 庞少聪,安玉秀,田野.抗高温钻井液体系国内外研究进展与发展建议[J].钻探工程,2024,51(4):82-92.
PANG Shaocong, AN Yuxiu, TIAN Ye. Research progress and development suggestions of high-temperature resistant drilling fluid systems at home and abroad[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):82-92.
- [4] 苏力才,谢健全,李永卫,等.PVA1788无固相冲洗液体系的研究与应用[J].钻探工程,2022,49(4):68-73.
SU Licai, XIE Jianquan, LI Yongwei, et al. Research and application of PVA1788 solid-free drilling fluid system[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):68-73.
- [5] 麻朗朗,陶士先,邹志飞.白银市土红湾-李家沟煤炭资源详查23-2孔冲洗液技术[J].钻探工程,2023,50(5):81-87.
MA Langlang, TAO Shixian, ZOU Zhifei. Drilling fluid technology for Hole 23-2, detailed investigation of coal resources in Tuhongwan-Lijiagou, Baiyin City[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5):81-87.
- [6] 李凤霞,王郑库,田云英.植物胶钻井液完井液体系研究[J].科学技术与工程,2012,20(35):9672-9674.
LI Fengxia, WANG Zhengku, TIAN Yunying. Study on the system of the vegetable gum drilling and completion fluid[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 20(35):9672-9674.

- [7] 邢希金,王荐,何松,等.关于我国环保钻井液标准的探讨[J].石油工业技术监督,2018,34(5):18-22.
XING Xijin, WANG Jian, HE Song, et al. Discussion on standard for environment-friendly drilling fluid in China[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2018,34(5):18-22.
- [8] 顾雪凡,高龙,冉照辉,等.基于天然产物的环保型钻井液体系研究[J].石油化工应用,2018,37(5):25-29, 33.
GU Xuefan, GAO Long, RAN Zhaohui, et al. Study of eco-friendly drilling fluid based on natural product[J]. Petrochemical Industry Application, 2018,37(5):25-29, 33.
- [9] 杨仕伟,吕威东,杨国兴,等.膜材料与乳液双效封堵防塌冲洗液体系在中江区块两口井的应用[J].地质与勘探,2017,53(1):164-170.
YANG Shiwei, LV Weidong, YANG Guoxing, et al. Application of the plugging anti-sloughing drilling fluid system containing membrane material and emulsion in two wells of the Zhongjiang Block[J]. Geology and Exploration, 2017,53(1):164-170.
- [10] 王胜,陈礼仪,黄猛,等.新型KL植物胶无固相环保钻井液体系[J].煤田地质与勘探,2010,38(3):76-80.
WANG Sheng, CHEN Liyi, HUANG Meng, et al. New type KL plant glue solid free drilling fluid system for environmental protection[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38 (3) : 76-80.
- [11] 王伟吉.页岩地层核壳结构纳米封堵剂研制及应用[J].科学技术与工程,2020,20(9):3585-3590.
WANG Weiji. Development and application of nano plugging agent with core-shell structure for shale strata[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(9):3585-3590.
- [12] 许成元,张敬逸,康毅力,等.裂缝封堵层结构形成与演化机制[J].石油勘探与开发,2021,48(1):202-210.
XU Chengyuan, ZHANG Jingyi, KANG Yili, et al. Structural formation and evolution mechanisms of fracture plugging zone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(1) : 202-210.
- [13] Chenevert M E, Dewan J T. A model for filtration of water-based mud during drilling: determination of mud cake parameters [J]. Petrophysics, 2001, 42 (3) : SPWLA-2001-v42n3a4.
- [14] Dangou M, Chandler H, et al. Potential increase of formation damage at horizontal wells as a result of changing dynamic filter cake parameters with the shear rate[C]//8th European Formation Damage Conference. Scheveningen: Society of Petroleum Engineers, 2009:SPE-120867-MS.
- [15] Elkhatny S M, Mahmoud M A, Nasr-El-Din H A. A new approach to determine filter cake properties of water-based drilling fluids[C]//SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition. Al-Khobar: Society of Petroleum Engineers, 2011:SPE-149041-MS.
- [16] Ezeakacha C, Salehi S, Ghalambor A, et al. An integrated study of mud plastering effects for reducing filtrate's invasion [C]//SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette: Society of Petroleum Engineers, 2016:SPE-179016-MS.
- [17] Fordham E J, Ladvá H K J, Hall C, et al. Dynamic filtration of bentonite muds under different flow conditions [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1988:SPE-18038-MS.
- [18] Dewan J T, Chenevert M E. Mudcake buildup and invasion in low permeability formations; application to permeability determination by measurement while drilling [C]//SPWLA 34th Annual Logging Symposium. Calgary: Society of Petrophysicists & Well Log Analysts, 1993:SPWLA-1993-NN.

(编辑 王跃伟)