

地质钻探用白色型环保防塌剂 GHF 制备及性能评价

邹志飞^{1,2,3}, 熊正强^{1,2}, 付帆^{1,2}

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质调查局绿色钻探技术创新中心, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 随着环保法规要求日益严格, 黑色外观、环保性能不足等缺点, 是限制冲洗液防塌材料应用的关键问题。为此, 通过合成小分子聚丙烯酸钠, 再与黏性树脂等材料捏合反应, 制备出一种冲洗液用白色型环保防塌剂 GHF。研究发现, 0.5% GHF 加入 LBM、环保双聚、环保成膜等常用冲洗液体系中, 不会影响冲洗液流变性能, 且还有一定降滤失效果。1% GHF 具备良好的封堵降滤失作用, 其 30 min 内渗透滤失量仅 7 mL, 侵入砂床深度为 1.5 cm, 结果表明其对于低渗透地层具有良好的封堵作用。与清水相比, 1% GHF 水溶液页岩膨胀降低率为 55.6%, 表明 GHF 能够防止孔壁坍塌等复杂事故。

关键词: 防塌冲洗液; 环保防塌剂; 白色型; 环保性能; 封堵性能; 绿色勘查

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0183-06

Preparation and performance evaluation of an environmentally friendly white anti-collapse agent GHF for geological drilling

ZOU Zhifei^{1,2,3}, XIONG Zhengqiang^{1,2}, FU Fan^{1,2}

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. Technology Innovation Center of Green Drilling, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: As the environmental regulations become increasingly stringent, drawbacks such as the dark appearance and inadequate environmental performance of conventional materials have emerged as the key issues restricting the application of anti-collapse agents in drilling fluids. To address this challenge, as an environmentally friendly white anti-collapse agent, GHF was developed by synthesizing low-molecular-weight sodium polyacrylate and subsequently subjecting it to a kneading reaction with materials such as viscous resin. Research indicates that the addition of 0.5% GHF to commonly used drilling fluids, including LBM, environmentally friendly dual-polymer, and environmentally friendly film-forming, exerts no adverse effect on the rheological properties of the drilling fluids, while also providing a certain degree of filtration loss reduction. At a concentration of 1%, GHF exhibits favorable plugging and filtration-control performance, with a filtration loss of only 7 mL within 30 min and a penetration depth of 1.5 cm into the formation, demonstrating its excellent plugging capability for low-permeability formations. Furthermore, compared with clean water, the aqueous solution containing 1% GHF achieves a shale swelling reduction rate of 55.6%, indicating that this environmentally friendly anti-collapse agent can effectively prevent complex downhole incidents such as borehole wall collapse.

Key words: anti-collapse drilling fluids; environmental anti-collapse agent; white type; environmental performance; plugging performance; green exploration

收稿日期: 2026-06-30; 修回日期: 2026-08-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.021

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD202402053)

第一作者: 邹志飞, 男, 苗族, 1992年生, 工程师, 材料科学与工程专业, 博士研究生在读, 从事钻井液技术研究与应用工作, 北京市海淀区学院路29号探工楼606, zzf_711@163.com。

引用格式: 邹志飞, 熊正强, 付帆. 地质钻探用白色型环保防塌剂 GHF 制备及性能评价[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 183-188.

ZOU Zhifei, XIONG Zhengqiang, FU Fan. Preparation and performance evaluation of an environmentally friendly white anti-collapse agent GHF for geological drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 183-188.

0 引言

冲洗液防塌剂是钻探工程中用于稳定孔壁、封堵地层孔隙和微裂缝的关键材料。目前常用的防塌剂以褐煤树脂、沥青和广谱护壁剂等黑色材料为主,虽可以满足基本的稳定孔壁需求,但是其深色外观和环保性能不足带来的弊端日益突出。一方面,深色材料加入冲洗液后会影 响岩心的观察与识别;另一方面,黑色外观对于环保作业人员的视觉感受不友好,尤其是在浅层绿色勘查钻探工程中,冲洗液漏失会引起环保争议。更为重要的是,部分传统防塌剂中含有大量难以降解的苯环、芳烃类有机物,在环保法规日益完善的背景下,正逐步被限制应用^[1-3]。

针对冲洗液防塌剂在颜色和环保性能方面的局限,近年来国内外学者围绕浅色化和环保型防塌剂开展了大量研究。最具代表性的产品是白沥青,该产品在保留沥青类材料良好封堵防塌性能的基础上,通过化学改性工艺降低了沥青材料的颜色和荧光级别。柏红梅^[4]研制了白沥青W-ASP,其具有沥青及其改性材料的性能,又具备低毒性和低荧光优点。聚合物类冲洗液防塌剂也取得了一定进展,张县民等^[5]根据防塌材料与黏土及地层矿物之间的吸附机理,以丙烯酰胺、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸和吸附单体为原料制备了一种白色黏稠状防塌剂QFT,其水溶液中岩心线性膨胀降低率达44.56%,可有效保障岩心在溶液中不分散,减少孔内坍塌掉块。王力等^[6]以亲水单体和亲油单体合成了一种乳液型封堵防塌剂,粒径在0.1~1.5 μm 之间,可实现对煤层微裂缝有效封堵。除了白沥青和聚合物防塌剂,植物胶类材料因其结构特点,天然具有一定的护壁护心作用,因而也受到学者关注^[7]。研究表明,以微泡剂改性魔芋胶制备的一种植物胶冲洗液,当微泡剂加量0.7%时,改性魔芋胶抑制页岩膨胀的性能最好^[8]。

然而,上述研究仍存在不足。白沥青虽相比于传统沥青材料颜色有所改善,但是其仍属于沥青类材料,部分材料外观偏黄色或微黄色,并非真正的白色型防塌材料。研究表明,白沥青生产原料仍来源于石油化工产品,其中所含环烃物质对环境仍有一定影响;聚合物类防塌材料和植物胶类材料虽然性能优异,且具有良好的环保性能,但是其制备成本较高,常规钻探尤其是地质勘探工程一般难以推

广应用。

综上所述,在绿色勘查要求背景下,冲洗液防塌剂面临着双重考验:既需要在复杂地层钻进中保持护壁防塌性能,又需要减少对周边地层环境影响,且不干扰地质信息编录。然而,高性能材料常常伴随着高生态风险,纯环保型材料又难以满足护壁要求。因此,亟需开发兼具护壁性能、环保性能且不影响地质编录的新型防塌材料,以适应新一轮找矿突破战略行动及深部找矿技术要求^[9]。

1 材料制备与评价方法

1.1 环保防塌剂的制备

将适量丙烯酸单体、链转移剂溶于蒸馏水中,低速搅拌至溶解,通入氮气。将溶液加热至65℃后,加入引发剂,保温反应4 h,制得小分子聚丙烯酸。待溶液冷却后,再加入10%氢氧化钠溶液中和,直至溶液pH变为中性,制得聚丙烯酸钠溶液。向聚丙烯酸钠溶液中加入辅料和黏性树脂进行捏合反应,烘干粉碎即可制得白色型环保防塌剂GHF,样品见图1。



图1 环保防塌剂GHF

1.2 性能评价方法

1.2.1 常规性能测试

按照配方配制冲洗液,参考国家标准《石油天然气工业 钻井液现场测试 第1部分:水基钻井液(GB/T 16783.1—2025)》中测试方法,采用HTD13145型六速旋转黏度计测试冲洗液的流变性能,并计算表观黏度(AV)、塑性黏度(PV)、动切力(YP)、动塑比(YP/PV)和静切力(Gel);采用SD-6

型多联中压滤失仪测试冲洗液的 API 滤失量 (FL_{API})。

1.2.2 抑制性能测试

称取 10 g 钻井液膨胀试验用膨润土,在 4 MPa 压力下压制 5 min 制备人造岩心,采用 NP-02A 型页岩膨胀仪测试人造岩心在冲洗液中的膨胀量。

1.2.3 环保性能测试

按照行业标准《钻井液环保性能评价技术规范 (SY/T 7467—2020)》中方法制备滤液,采用 HM-DX 型生物毒性测定仪测试滤液的生物毒性 EC_{50} ;采用 DR3900 型分光光度计、BPC-150F 型生化培养箱、DRB200 型消解器和 LBOD 型测定仪测试滤液的生物降解性 BOD_5/COD 。

1.2.4 封堵性能测试

按照相应配方配制冲洗液,选用 20~40 目石英砂模拟近孔壁地层的非均质、低渗透砂层环境,采用 FA 型无渗透滤失仪评价冲洗液封堵性能。仪器测试压力 0.69 MPa,记录 30 min 内冲洗液在砂床中渗透深度和滤失量。

2 环保防塌剂性能测试结果与讨论

2.1 GHF 对钠膨润土冲洗液性能的影响

按照配方“5% 钠膨润土+GHF”配制冲洗液,测试不同环保防塌剂加量下钠膨润土冲洗液的流变性能和滤失性能等,测试结果见图 2。由图 2 可知,随着 GHF 加量增加,钠膨润土冲洗液表观黏度先下降后升高。分析认为,GHF 加量较低时,冲洗液固相含量增幅较小,且 GHF 中小分子聚丙烯酸钠的降黏作用明显,从而使冲洗液黏度整体降低。但是,随着 GHF 加量增加,冲洗液中固相含量上升,固相颗粒之间间距减小,颗粒间摩擦作用增强,小分子聚丙烯酸钠的降黏作用逐渐减弱,导致冲洗液黏度逐渐上升,当 GHF 加量为 2% 时,表观黏度增幅达到 50%。随着 GHF 加量增加,冲洗液 API 滤失量逐渐降低,分析认为是由于 GHF 中多级配固相材料提升了冲洗液对于孔隙的封堵能力。此外,尽管冲洗液表观黏度有所上升,但冲洗液动塑比整体呈下降趋势,且未超过原浆水平,分析认为 GHF 具有一定稀释作用,减小了固相颗粒在冲洗液中形成网络空间结构的能力。

为了评价环保防塌剂在近孔壁低渗透砂层中形成致密、薄泥饼的能力,对所配制的冲洗液开展

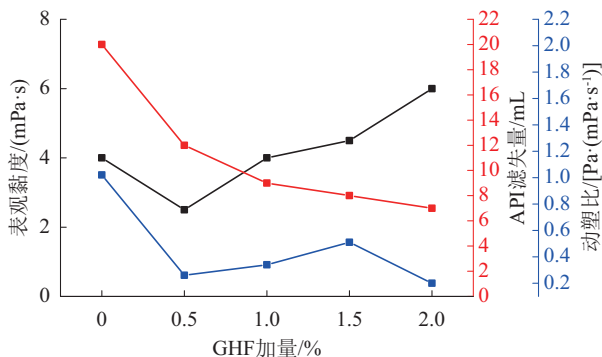


图 2 不同 GHF 加量对钠膨润土冲洗液性能的影响

渗透性能测试,测试结果见表 1。由表 1 可知,5% 钠膨润土冲洗液渗透滤失量达到 305 mL(滤失时间为 4 s),表明该冲洗液对低渗透地层没有任何封堵作用。作为对比,随着 GHF 的加入,冲洗液渗透滤失量大幅度下降,冲洗液侵入砂层深度也大幅度减少,表明 GHF 对于该类型地层具有良好的封堵作用,可有效减少漏失。

表 1 不同加量 GHF 对钠膨润土冲洗液封堵性能影响

序号	冲 洗 液	渗透滤失量/mL	侵入深度/cm
1	5% 钠膨润土	305	19
2	5% 钠膨润土+0.5% GHF	52	2.5
3	5% 钠膨润土+1% GHF	0	1.7
4	5% 钠膨润土+1.5% GHF	0	0.5
5	5% 钠膨润土+2% GHF	0	0.5

2.2 抑制性能评价

量取 400 mL 清水 3 份,其中两份分别加入 0.5% GHF 和 1% GHF 配制水溶液,测试人造岩心分别在清水和两种水溶液中 6 h 内的页岩膨胀量,如图 3 所示。由图 3 可知,随着 GHF 含量的增加,GHF 对页岩抑制作用逐渐增强,页岩膨胀量降低;当 GHF 加量为 1% 时,页岩膨胀量降低率达到 55.6%,说明 GHF 对页岩的线性膨胀具有良好的抑制作用。

2.3 环保性能评价

环保性能评价主要包括生物毒性检测和生物降解性检测。按照配方“5% 钠膨润土+1% GHF”配制冲洗液后制备测试所需滤液,测试冲洗液滤液环保性能,结果见表 2。

从表 2 可知,GHF 的生物毒性和生物降解性测试结果均达到行业标准要求,表明 GHF 具有良好的

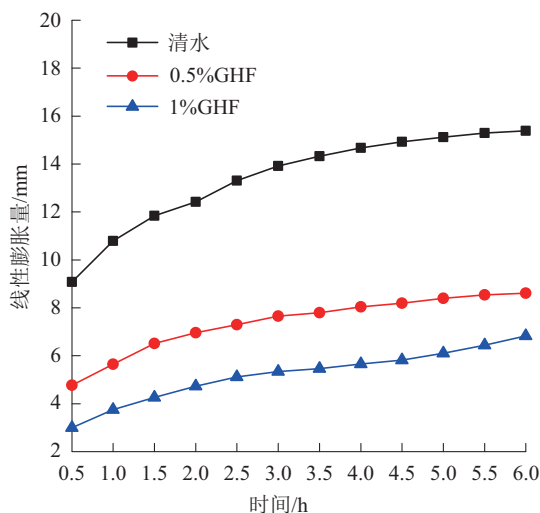


图3 GHF对岩心线性膨胀量的影响

表2 GHF环保性能测试结果

检测项目	生物毒性 $EC_{50}/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	生物降解性 $BOD_5/COD/\%$
检测结果	122×10^4	35.28
指标要求	$\geq 3 \times 10^4$	≥ 5

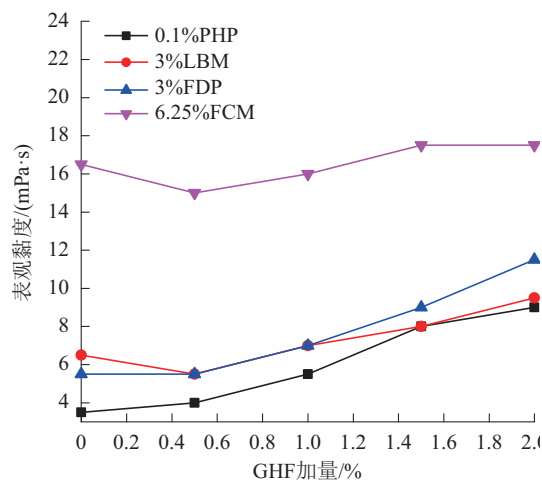
环保性能,适用于生态环境脆弱区或者其他环保法规要求严格地区施工作业。

2.4 配伍性评价

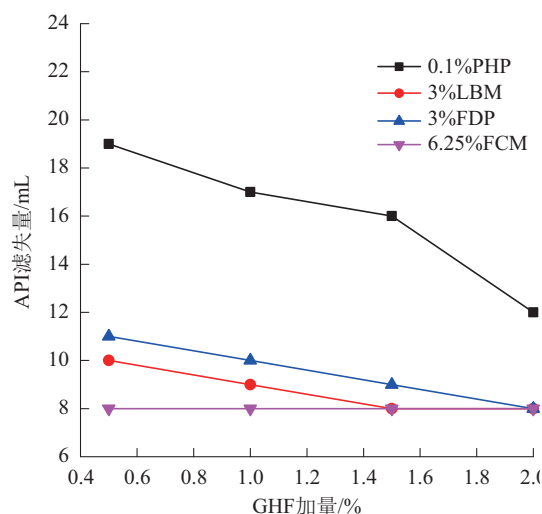
为了更好地评价GHF与不同冲洗液体系的配伍性,将不同加量的GHF加入四个冲洗液体系中,分别测试其流变性能、滤失性能等。按照配方0.1%水解聚丙烯酰胺PHP、3%低黏增效粉LBM、3%环保双聚冲洗液FDP和6.25%环保成膜冲洗液FCM配制不同的冲洗液体系,测试不同GHF加量对冲洗液性能的影响,测试结果见图4。从图4(a)可知,随着GHF加量增加,冲洗液表观黏度逐渐上升,当加量超过1%时,增幅比较明显;由图4(b)、(c)可知,GHF有助于减少冲洗液滤失量,但同时也会降低冲洗液动塑比。综上所述,GHF配伍性好,可直接应用于地质钻探中多种常用冲洗液体系。针对地质取心钻探工程钻井液低黏度、高切力的特点,GHF加量 $\geq 1\%$ 时,冲洗液性能更符合地质钻探作业要求。

3 不同防塌剂性能对比

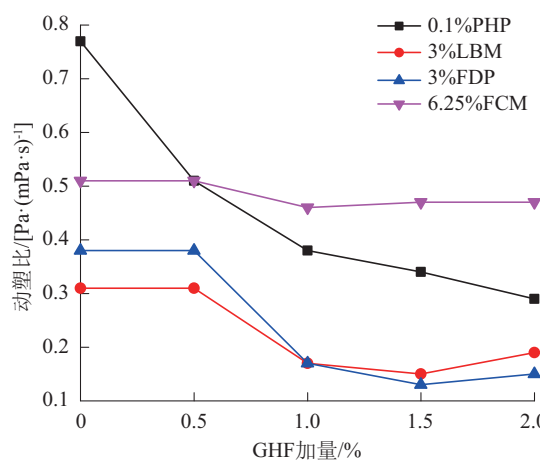
为验证GHF在地质钻探中的应用可行性,将其与市售常用防塌材料进行平行对比评价。试验中,各类防塌材料均以相同加量分别掺入不同配方的冲



(a)表观黏度随GHF加量的变化结果



(b)滤失量随GHF加量的变化结果



(c)动塑比随GHF加量的变化结果

图4 GHF在不同冲洗液体系中配伍性评价结果

洗液中,系统开展流变性能、滤失性能等关键指标测试,并整理汇总试验数据;通过横向对比各材料对冲

洗液性能的影响,明确不同产品的性能特征,为 GHF 替代现有常用防塌剂提供试验依据。具体测试方案如下:以 5% 钠膨润土 BM、3% 低黏增效粉 LBM、3% 环保双聚冲洗液 FDP 和 6.25% 环保成膜

冲洗液 FCM 分别配制四种原浆,再向各原浆中加入 0.5% 防塌剂进行性能测定,测试结果见表 3 和图 5。

表 3 不同防塌剂在冲洗液中性能对比

冲洗液	防塌剂	AV/(mPa·s)	PV/(mPa·s)	YP/Pa	YP/PV/[Pa·(mPa·s) ⁻¹]	Gel/Pa	FL _{API} /mL
5% 钠膨润土冲洗液		4	2	2.04	1.02	1/2	20
	GHF	2.5	2	0.51	0.26	0.1/1	12
	改性沥青	5.5	4	1.53	0.38	0.25/2	13
	广谱护壁剂	7.5	6	1.53	0.26	0.25/4	11
	白沥青	3	2	1.02	0.51	0.25/0.5	15
3% 低黏增效粉		6.5	5	1.53	0.31	0.25/0.5	13
	GHF	5.5	5	0.51	0.10	0.25/0.5	10
	改性沥青	5.5	5	0.51	0.10	0.25/0.5	11
	广谱护壁剂	5.5	5	0.51	0.10	0.25/0.5	11
	白沥青	4.5	4	0.51	0.13	0.25/0.5	13
3% 环保双聚冲洗液		5.5	4	1.53	0.38	0.25/0.5	11
	GHF	6	5	1.02	0.20	0.25/0.5	10
	改性沥青	6.5	6	0.51	0.09	0.25/0.5	11
	广谱护壁剂	6.5	4	2.56	0.64	0.25/0.5	11
	白沥青	6	6	0.00	0.00	0.25/0.5	13
6.25% 环保成膜冲洗液		16.5	11	5.62	0.51	1/1	8
	GHF	15	9	6.13	0.68	1/1	8
	改性沥青	15	10	5.11	0.51	1/1	8
	广谱护壁剂	14	9	5.11	0.57	1/1	9
	白沥青	13.5	8	5.62	0.70	1/1	8

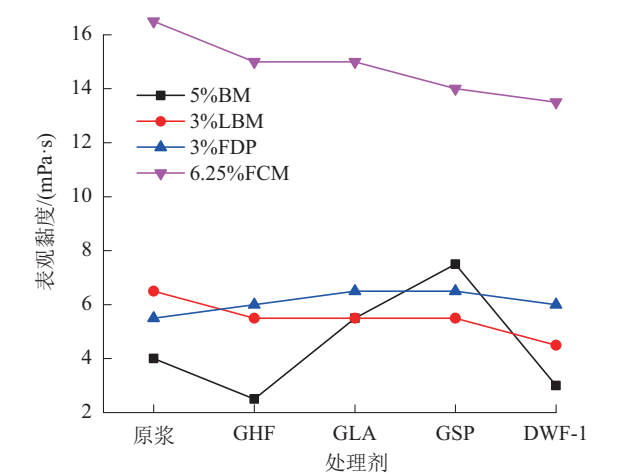


图 5 不同防塌剂对冲洗液表观黏度的影响

由图 5 可知,GHF 在钠膨润土冲洗液、低黏增效粉和环保成膜冲洗液中均不增黏,分析认为这是由

于合成的 GHF 中接枝有小分子聚丙烯酸钠,其对于固相中含有造浆黏土成分的冲洗液具有一定的稀释作用。四种防塌剂在环保双聚冲洗液中均有少量增黏效果,但是增幅较小。分析认为环保双聚冲洗液是低固相聚合物冲洗液体系,防塌剂的加入提高了冲洗液固相含量,并增加了高分子聚合物分子对固相颗粒的吸附能力,造成冲洗液黏度小幅上涨。由图 6 可知,GHF 在钠膨润土冲洗液、低黏增效粉和环保成膜冲洗液中均有一定的降滤失作用,且其效果优于白沥青等防塌剂产品。但在环保成膜冲洗液中,四种防塌材料对滤失性能的影响均较小。

取心钻探中钻杆外壁与孔壁以及钻杆内壁与取心管之间的环空间隙非常小,冲洗液黏度增大容易造成泵压过高等问题,因此地质取心钻探冲洗液需保持低黏度、高切力特性。与其他常用的防塌材

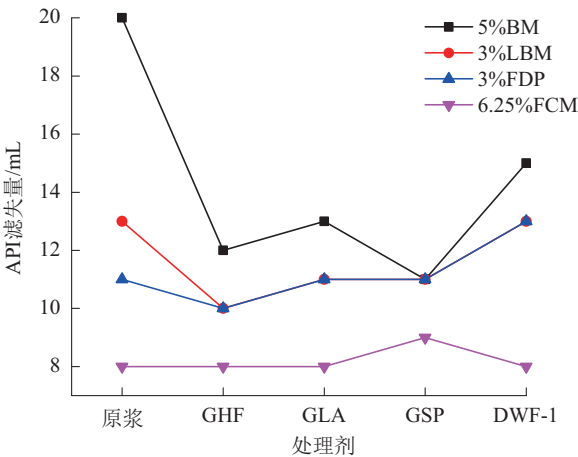


图6 不同防塌剂对冲洗液API滤失量的影响

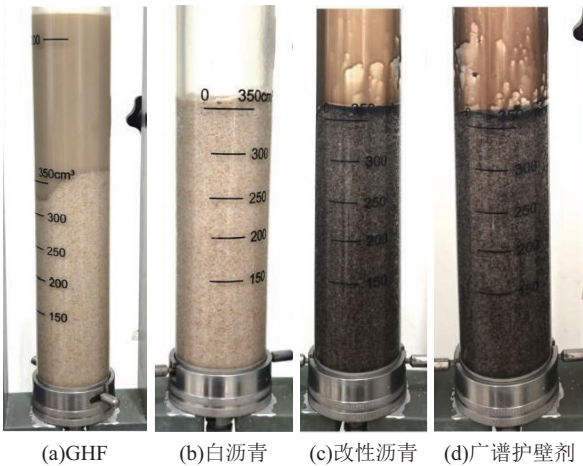


图7 不同防塌剂配制的冲洗液渗透性能测试

料相比,GHF的加入不会造成冲洗液黏度和切力剧增,同时具有一定的降滤失作用,满足地质取心钻探工程使用需求。因此,GHF可以作为其他常用防塌材料的替代产品,具有良好的市场前景。

按照配方“3%低黏增效粉LBM+1%防塌剂”配制冲洗液,测试其渗透滤失量,评价冲洗液封堵能力,结果见表4和图7。由表4可知,含有GHF的冲洗液在30 min内渗透滤失量为7 mL,侵入砂床深度仅1.5 cm,并成功在砂床驻留,表明该冲洗液具有良好的封堵效果。作为对比,其他冲洗液在20 s内滤失量均超过300 mL,表明大部分冲洗液渗透过砂床,未能有效驻留。图7展示的是不同冲洗液在FA无渗透滤失仪中测试30 min后状态。分析认为,GHF组分中粒径尺寸分布较为合理,其平均粒径小,可适应不同裂缝宽度的低渗透地层,且胶结性强,因而具有良好的封堵防塌作用。

4 结论

本研究通过合成小分子聚丙烯酸钠,再与树脂

表4 不同防塌剂配制的冲洗液渗透滤失量

序号	冲洗液配方	渗透滤失量/mL	侵入深度/cm
1	3%低黏增效粉+1% GHF	7	1.5
2	3%低黏增效粉+1%白沥青	308	19
3	3%低黏增效粉+1%改性沥青	315	19
4	3%低黏增效粉+1%广谱护壁剂	310	19

等材料捏合,制备出一种白色型环保防塌剂GHF,该防塌剂加入冲洗液后不会使体系颜色加深。室内试验结果表明,适量GHF与地质钻探常用冲洗液体系配伍性良好,不仅不会引起冲洗液黏度大幅上升,还具有一定的降滤失作用;同时具有较好的页岩膨胀抑制性,对低渗透型漏失地层具有一定封堵能力,且环保性能优异。综合而言,GHF可替代沥青等传统防塌材料应用于钻探工程,尤其适用于生态敏感地区或环保要求严格区域的复杂地层作业。

参考文献:

[1] 柴金鹏,刘均一,邱正松,等.含油污泥资源化制备钻井液用封堵防塌剂与应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(2):172-180.

[2] 孔勇,金军斌,林永学,等.封堵防塌钻井液处理剂研究进展[J].油田化学,2017,34(3):556-560.

[3] 丁锐.钻井液防塌剂的作用方式及分类[J].中国石油大学学报(自然科学版),1998(6):125-128.

[4] 柏红梅.无荧光防塌剂白沥青W-ASP的评价与应用[J].钻井液与完井液,2004,21(4):21-25.

[5] 张县民,蒋官澄,宣扬,等.钻井液用高效桥联型防塌剂的研发及现场应用[J].钻井液与完井液,2017,34(1):39-44.

[6] 王力,孟尚志,陈万钢,等.提高煤层强度的钻井液防塌封堵剂的研制[J].钻井液与完井液,2018,35(5):46-49.

[7] 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.

[8] 袁华东.高聚物改性钻井液在复杂地层钻探施工中的应用[J].中国煤炭地质,2023,35(9):44-47.

[9] 潘丽娟,孔勇,牛晓,等.环保钻井液处理剂研究进展[J].油田化学,2017,34(4):734-738.

(编辑 王文)