

# 无固相冲洗液防塌护壁性能强化改进试验研究

史 铭<sup>1</sup>, 杨亚平<sup>1</sup>, 张席芝<sup>1</sup>, 雒焕祯<sup>1</sup>, 谭义军<sup>1</sup>, 蒋 炳<sup>2\*</sup>, 张统得<sup>2</sup>

(1. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737102; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

**摘要:** 为了改善地质岩心钻探中无固相冲洗液的护壁防塌性能, 筛选了脂环类固化剂 EPR, 脂肪类固化剂 DETA、AEP, 芳香类固化剂 PU, 酰胺类固化剂 PET 共 5 种固化剂。利用固化剂可以改进被固化物质的膜硬度、膜附着力、膜耐候性和增加光泽度的特性, 向无固相冲洗液中添加固化剂以改善其防塌护壁性能, 通过岩心浸泡试验和线性膨胀量试验, 确定固化剂 EPR 和 PU 具有较好的护壁防塌性能改善作用。然后对 EPR 和 PU 进行复配, 通过岩心浸泡试验结果得出最优比例为 EPR:PU=1:4, 最后通过线性膨胀量测试和流变性能测试, 确定固化剂配方的最优加量为 0.2%。确定无固相冲洗液配方为清水+0.5% 聚丙烯酰胺+0.04% EPR+0.16% PU, 该配方在对冲洗液流变性能影响较小的前提下, 改善了冲洗液的护壁防塌性能。

**关键词:** 地质岩心钻探; 固化剂; 岩心浸泡试验; 线性膨胀量试验; 防塌护壁性能

中图分类号: P634.6 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)S1-0191-05

## Experimental study on strengthening and improving the anti-collapse and wall protection performance of solid-free flushing fluid

SHI Ming<sup>1</sup>, YANG Yaping<sup>1</sup>, ZHANG Xizhi<sup>1</sup>, LUO Huanzhen<sup>1</sup>, TAN Yijun<sup>1</sup>, JIANG Bing<sup>2\*</sup>, ZHANG Tongde<sup>2</sup>

(1. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang Gansu 737102, China;

2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** In order to improve the wall protection and anti collapse performance of solid-free flushing fluid during geological core drilling, five types of curing agents were selected, including alicyclic curing agent EPR, fatty curing agent DETA, AEP, aromatic curing agent PU, and amide curing agent PET. The use of curing agents can improve the film hardness, adhesion, weather resistance, and increased glossiness of the cured material. Adding curing agents to solid-free flushing fluid can improve the anti collapse performance. Through core immersion tests and linear expansion tests, it was determined that curing agents EPR and PU have a good effect on improving the anti collapse performance of the wall protection. Then, EPR and PU were compounded, and the optimal ratio of EPR:PU=1:4 was determined through core soaking test results. Finally, the optimal dosage of curing agent was determined to be 0.2% through linear expansion test and rheological performance test. The dosage of the solid-free flushing fluid is water+0.5% polyacrylamide + 0.04% EPR +0.16% PU, which improves the anti-collapse and wall protection performance with little impact on the rheological property of the flushing fluid.

**Key words:** geological core drilling; curing agent; core immersion tests; linear expansion tests; anti collapse and wall protection performance

收稿日期: 2024-07-15; 修回日期: 2024-07-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.028

基金项目: 金川集团工程建设有限公司科技项目“金川矿区复杂地层超深孔钻进工艺研究”(编号: KSGCFGSKY202401)

第一作者: 史铭, 男, 汉族, 1990 年生, 高级工程师, 采矿工程专业, 主要从事矿山掘进与探矿工程技术研究和管理工作, 甘肃省金昌市金川区银川路 10 号, 514912104@qq.com。

通信作者: 蒋炳, 男, 汉族, 1995 年生, 工程师, 探矿工程专业, 主要从事钻井液及岩土钻掘技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路 139 号, 455671041@qq.com。

引用格式: 史铭, 杨亚平, 张席芝, 等. 无固相冲洗液防塌护壁性能强化改进试验研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 191-195.

SHI Ming, YANG Yaping, ZHANG Xizhi, et al. Experimental study on strengthening and improving the anti-collapse and wall protection performance of solid-free flushing fluid[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 191-195.

## 0 引言

无固相冲洗液的处理剂主要有流型调节剂、降滤失剂、可溶盐加重剂三大类,并依据钻遇地层特点、物理特性以及钻孔结构辅以抑制剂、润滑剂、防水锁剂等专有功能性处理剂<sup>[1]</sup>。因无固相冲洗液与传统冲洗液最根本的区别是无造浆膨润土,故只能采用流型调节剂或增粘剂来调节冲洗液的流变性能<sup>[2]</sup>,主要有黄原胶、魔芋胶、CMC等生物聚合物和PAM、聚丙烯酸钾等多元共聚物。无固相冲洗液的降滤失剂与传统水基冲洗液使用的降滤失剂区别较小,主要有淀粉类、纤维素类、磺化材料类、聚合物类<sup>[3]</sup>。若需提高无固相冲洗液的密度,主要依靠可溶加重盐,这类处理剂在石油钻井中常用,地质岩心钻探应用较少,主要分为无机盐类和有机盐类两种<sup>[4]</sup>。在地质岩心钻探过程中,常使用聚丙烯酰胺作为无固相冲洗液的添加剂,聚丙烯酰胺在冲洗液中主要起到了增粘的作用,其分子链上的基团经过水化作用后会在孔壁上形成致密的保护膜,同时基团会包裹自由水,限制自由水的渗透率,从而降低冲洗液的失水量,对钻孔坍塌起到一定的作用<sup>[5]</sup>。但在破碎复杂地层中钻进时,因无固相冲洗液中不含有膨润土,无法形成致密的泥皮,导致其护壁性能不足以满足钻探条件<sup>[6-9]</sup>。

在传统的无固相冲洗液中,目前也形成了较为完整的体系,王向阳<sup>[10]</sup>采用了无固相KCL聚合物钻井液体系,解决了地层坍塌、摩阻大、下套管难等问题,并形成以纤维素、磺化沥青辅以氯化钠和氯化钾的无固相聚合物钻井液,该体系具有较好的抗污染能力,润滑防卡能力和井壁稳定的性能。蒋官澄等<sup>[11]</sup>研究的低密度无固相海水钻井液以传统氯化钾聚合物钻井液体系改造,有效抑制了泥包卡钻、井漏等事故。张统得等<sup>[12]</sup>研发了以PA-1为主剂,加入交联剂形成的无固相环保冲洗液体系,该冲洗液具有护壁防塌能力强、对地层渗透性影响小、环保性好等特点,尤其适用于破碎地层探采结合水井钻探施工。苏力才等<sup>[13]</sup>通过添加成膜剂、封堵剂等,形成了成膜体系无固相冲洗液,降低了冲洗液的滤失量,同时提高了冲洗液的封堵性和抑制防塌能力。向浩天等<sup>[14]</sup>以清水加聚丙烯酰胺的无固相冲洗液为基浆,通过岩心浸泡和无侧限膨胀试验等手段,应用了低粘增效粉和乳化沥青等材料,强化了无固相冲洗液的防塌性能。李之军等<sup>[15]</sup>则采用

了微生物手段,通过巴士芽孢杆菌在无固相冲洗液中生长,构建了微生物无固相冲洗液体系,利用微生物诱导碳酸钙沉淀,获得了更好的护壁效果。目前看来,针对无固相冲洗液防塌护壁性能弱的问题,已经进行了许多研究,但大多采用了沥青类、磺化类等颜色较深的材料,对后续钻孔测试可能产生较大影响。

固化剂又名硬化剂,按用途分类一般分为常温固化剂和加热固化剂,添加固化剂可以使需粘合的物质更好的硬化粘合,通常用于土木建筑中的涂料和粘结剂等,也可用于电子、电器方面。固化剂加入后,主要作用有物理干燥、化学固化、加速固化时间等作用。固化剂通过与被固化物质发生化学反应,从而引发或加速固化进程。其作用机制主要包含以下几个方面,一是催化作用,固化剂作为催化剂参与到聚合或交联反应中,加速固化速度;二是引发自由基反应,固化剂与被固化物质中的自由基进行反应,引发自由基聚合或交联反应;三是增加溶剂的挥发性,某些固化剂中的成分具有较快的挥发性,能够加速溶剂的挥发,促进固化。固化剂的加入,可以改进被固化物质的膜硬度、膜附着力、膜耐候性并增加光泽度,同时缩短固化时间。

鉴于固化剂改善膜硬度和附着力的特性,尝试将其加入至无固相冲洗液体系中进行护壁防塌性能改善试验。通过无固相冲洗液中添加固化剂,完成缩合、闭环、加成或催化等化学反应,对无固相冲洗液形成的粘膜进行加强,从而提高无固相冲洗液的防塌护壁性能。固化剂一般分为脂肪类、脂环类、酰胺类和芳香类,固化剂的添加,原则上不会改变无固相冲洗液原有的透明度,对需要进行孔内测试的钻孔适用性较高。此外,固化剂所具有的光泽、柔软性、粘结性、耐酸性,对地质岩心钻孔施工也较为友好。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料主要有膨润土、砂、聚丙烯酰胺、脂环类固化剂EPR,脂肪类固化剂DETA、AEP,芳香类固化剂PU,酰胺类固化剂PET。

### 1.2 试验方法

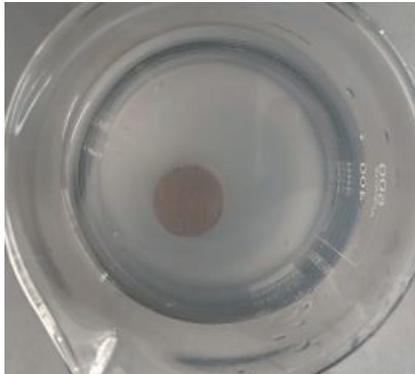
#### 1.2.1 岩心制作

采用岩心制样模具,按照膨润土和砂占比2:1

的比例混合后,加入适量水,置入模具中加压至10 MPa并保持5 min后取出。

### 1.2.2 冲洗液防塌护壁性能评价

分别通过岩心浸泡试验和线性膨胀量试验记录岩心的垮塌时间和线性膨胀量,以此评价不同固化剂的防塌护壁效果,见图1。



(a)岩心浸泡试验



(b)岩心线性膨胀量试验

图1 冲洗液防塌护壁性能评价试验

### 1.2.3 固化剂的复配及冲洗液流变性评价

筛选护壁效果较好的2~3种固化剂进行复配试验,得出无固相冲洗液护壁性能改进的最优配方,并进行配伍性试验,评价固化剂对无固相冲洗液的性能影响。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 岩心浸泡试验

在岩心浸泡试验中,共设置7组对照试验,见表1。

由表1可见,岩心置入相应的冲洗液中后,清水中的岩心最先出现裂缝,时间大约在浸泡后2 h,并于10 h后开始出现剥落现象,最终完全垮塌时间为26 h。2号样品出现裂缝时间约为6 h,18 h后开始出现剥落现象,最终坍塌时间达到了36 h,说明聚丙

表1 岩心浸泡试验对照结果

编号	冲洗液类型	出现裂纹时间/h	开始剥落时间/h	完全坍塌时间/h
1	清水	2	10	26
2	清水+0.5%聚丙烯酰胺	6	18	36
3	清水+0.5%聚丙烯酰胺+0.5%EPR	12	28	44
4	清水+0.5%聚丙烯酰胺+0.5%DETA	10	24	42
5	清水+0.5%聚丙烯酰胺+0.5%AEP	12	24	42
6	清水+0.5%聚丙烯酰胺+0.5%PU	22	38	48
7	清水+0.5%聚丙烯酰胺+0.5%PET	6	18	40

烯酰胺的加入,不仅增加了冲洗液的粘度,还使冲洗液的防塌护壁能力得到了一定的提升。3~7号样品,因为添加了不同的固化剂,坍塌时间相对无固相冲洗液延长了4~12 h,其中效果最好的为EPR和PU,分别延长了8 h和12 h。故初步筛选EPR和PU作为无固相冲洗液的添加剂。

### 2.2 线性膨胀量试验

为了更加直观且清晰地了解各添加剂的强化性能,对表1中7种冲洗液进行了线性膨胀量测试,记录时间为24 h,前10 h每隔0.5 h记录膨胀量数据,10 h后每隔2 h记录数据,最终结果见图2。

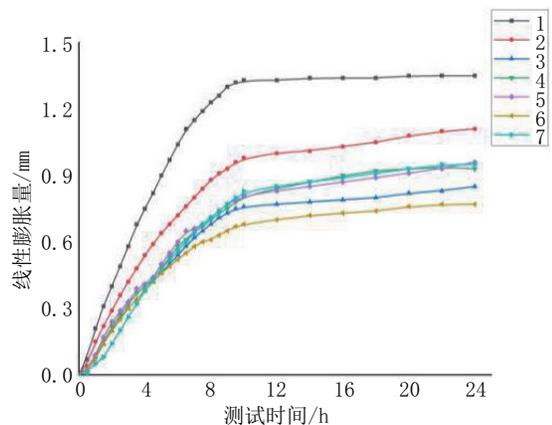


图2 不同冲洗液线性膨胀量

由图2可见,当岩心置入不同的冲洗液后,在前8~12 h内普遍膨胀较快,超过了12 h后,岩心的膨胀量开始趋于缓慢,其中清水浸泡的岩心,膨胀最

快,且膨胀量最大,其24 h膨胀量达到了1.35 mm,清水加聚丙烯酰胺次之,24 h膨胀量为1.11 mm,相对清水较低;在加入固化剂后,膨胀量进一步降低,其中最低的分别为加入了EPR和PU的两个样品,膨胀量分别为0.85 mm和0.77 mm,相对清水,二者的膨胀量下降了37.0%和43.0%,相对聚丙烯酰胺,则分别下降了23.4%和30.6%,说明二者对抑制岩心膨胀和强化无固相冲洗液的护壁能力均较强,可以作为无固相冲洗液的护壁添加剂进行使用。

### 2.3 固化添加剂复配试验

根据防塌护壁性能评价试验,筛选出EPR和PU两种固化剂,为了取得更好的防塌护壁效果,按总量0.5%对两种材料进行了复配,设置了4组对照组,见表2。

表2 固化剂复配情况

编号	EPR加量/%	PU加量/%	岩心浸泡坍塌时间/h
1	0.1	0.4	54
2	0.2	0.3	52
3	0.3	0.2	52
4	0.4	0.1	50

由表2可见,当EPR和PU同时加入无固相冲洗液之后,岩心坍塌时间均得到了延长,说明不同的固化剂同时加入后,对无固相冲洗液的防塌能力起到了正向作用,使用复配的固化剂改善无固相冲洗液的护壁防塌性能是可行的。当EPR加量为0.1%、PU加量为0.4%时,坍塌时间比只加入PU时延长了6 h,效果最好。为了确定复配配方的最佳加量,设置了6组试验,并对6组样品进行了线性膨胀量测试,总共加量分别为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%,结果见图3。

由图3可见,在不添加任何固化剂的时候,岩心的线性膨胀量达到了1.11 mm,且膨胀速度较快,在添加了复配的固化剂之后,其膨胀速度和膨胀量均有降低,表明复配固化剂增强了冲洗液的防塌护壁能力,同时随着固化剂加量的增加,岩心的膨胀速度和膨胀量也逐渐降低,最低为加量0.6%时,岩心线性膨胀量仅为0.67 mm,相比不添加任何固化剂时下降了39.6%。从试验结果来看,固化剂的加量越大,对无固相冲洗液的护壁性能提升越大,但考

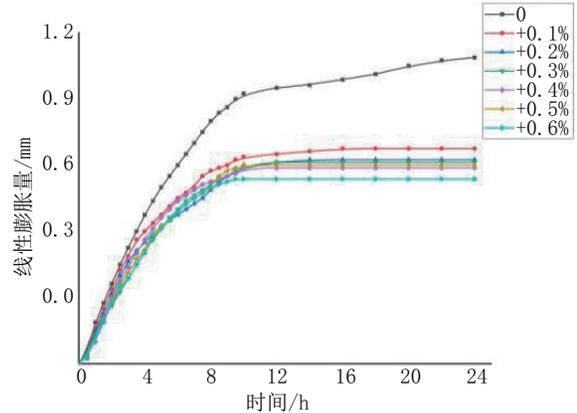


图3 固化剂复配后岩心线性膨胀量

虑到无固相冲洗液需要具有良好的流变性能,故需要针对其护壁防塌性和流变性进行综合考量,确定固化剂的加量。

### 2.4 冲洗液流变性试验

为了进一步了解固化剂的添加对冲洗液流变性能的影响,从而确定固化剂的具体加量,针对不同添加量的无固相冲洗液,进行了流变性能测试,结果见表3。

表3 添加固化剂后无固相冲洗液流变性能

固化剂加量/%	无固相冲洗液流变性能		
	表观粘度/(mPa·s)	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa
0	16	8	7.7
0.1	18.5	10.5	7.7
0.2	20	10.5	9.1
0.3	21.5	13	8.1
0.4	24	14	9.6
0.5	26.5	15.5	10.5
0.6	28	15.5	11.9

根据表3可见,当固化剂复配后加入无固相冲洗液中,对冲洗液的流变性能影响较大,尤其是表观粘度,随着加量的增大,当加量达到0.6%时,表观粘度增加了12 mPa·s,塑性粘度也增加了7.5 mPa·s,鉴于目前地质钻探施工采用绳索取心钻进工艺,环状间隙较小,不适宜使用过大粘度的冲洗液,故固化剂的添加需控制加量。当加量为0.2%时,表观粘度增加4 mPa·s,塑性粘度增加2.5 mPa·s,动切力提升了1.4 Pa,对无固相冲洗液的流变性能影响较小,能满足地质岩心钻探施工要求。同时

根据2.3中结论,当加量为0.2%时,岩心线性膨胀量为0.74 mm,也很好提高了无固相冲洗液的护壁防塌能力,故选择0.2%为最优加量。

### 3 结论

(1)通过岩心浸泡试验,确定了固化剂是可以添加至无固相冲洗液中,并对无固相冲洗液的护壁防塌性能有积极改善作用。

(2)根据线性膨胀量试验结果,确定了固化剂EPR和PU对无固相冲洗液的护壁防塌性能具有较好的改善作用。根据复配试验结果,确定最佳配比为EPR:PU=1:4。

(3)根据进一步的线性膨胀量试验和流变性试验,确定了最终无固相冲洗液配方为清水+0.5%聚丙烯酰胺+0.04% EPR+0.16% PU,该配方在对冲洗液流变性能影响较小的前提下,改善了冲洗液的护壁防塌性能。

### 参考文献:

- [1] 徐明磊,佟乐,杨双春,等.环保型耐高温无固相钻井液体系研究进展[J].应用化工,2020,49(8):2063-2067.
- [2] 谢彬强,邱正松,郑力会.水基钻井液用抗高温聚合物增黏剂的研制及作用机理[J].西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(1):96-102.
- [3] 张红伟.耐温耐盐系钻井液降滤失剂和抑制剂的研制与应用[D].石家庄:河北科技大学,2018.
- [4] 苗锦翔.氯化钙加重压裂液室内实验和性能研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [5] 胡俊凯,何鑫.植物胶冲洗液在岩溶区复杂地层钻探中的应用[J].建材与装饰,2018(40):220-221.
- [6] 薛洪刚,汤勇,郭慧玲,等.致密砂岩储层不同渗流机理对水平井产能的影响[J].中国科技论文,2017,12(3):263-268.
- [7] 冯明友,张帆,李跃纲,等.川西地区中二叠统栖霞组优质白云岩储层特性及形成机理[J].中国科技论文,2015,10(3):280-286.
- [8] 杨科,罗龙,曹灶开,等.阳山矿区严重漏失垮塌地层钻进工艺及工程实践[J].钻探工程,2024,51(2):119-126.
- [9] 丁宁宁,马天捧,姚雷,等.粉煤地层绳索取心钻进孔壁坍塌分析及处理[J].钻探工程,2024,51(2):127-132.
- [10] 王向阳.无固相KCL聚合物钻井液体系在伊拉克鲁迈拉油田的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(9):46-48.
- [11] 蒋官橙,张峰,吴江,等.低密度无固相海水钻井液在南海西部D气田的应用[J].钻井液与完井液,2018,35(5):61-66.
- [12] 张统得,蒋炳,樊腊生,等.探采结合水井无固相环保冲洗液的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):1-7.
- [13] 苏力才,蒙学礼,李永卫,等.PVA1788成膜体系无固相冲洗液在桂柳地1井的应用[J].钻探工程,2022,49(5):57-63.
- [14] 向浩天,李之军,邱豪,等.无固相冲洗液的防塌性能及其强化实验[J].中国科技论文,2021,16(12):1366-1371.
- [15] 李之军,朱茂,智晶子,等.微生物无固相钻井液体系构建及其固壁作用机理研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(4):187-194.

(编辑 王文)