硬脆性破碎地层低固相成膜冲洗液研究与应用

韦祥龙[1,2]，蒙发强[1,2*]，陆 何[1]，胡 巍[1,2]，苏福长[1,2]，尹 欣[1,2]
（1.广西第一地质工程有限公司，广西 南宁 530031；2.广西矿产资源深部勘查钻探技术人才小高地，广西 南宁 530031）

摘要：针对南丹县某矿区多钻孔钻遇破碎地层时频繁出现的坍塌掉块与阻卡等技术难题，本文在系统分析矿区地质特征的基础上，提出了孔壁稳定冲洗液技术对策，并开展了现场应用。受丹池断裂带影响，硅质泥岩岩体节理裂隙极为发育，表现为硬脆性破碎特征，在机械扰动作用下，层间结构极易发生失稳破坏，形成角砾状、碎块状剥落物，进而引发大规模掉块及坍塌卡钻等复杂情况。为此，本文研究探索了低固相植物胶体系冲洗液、低黏土相硅酸盐防塌冲洗液、低固相成膜冲洗液体系等多种冲洗液配方，最终研发出适用于该矿区破碎地层的低固相成膜PAC-LV+PVA1788冲洗液体系。该体系可发挥低固相体系中黏土颗粒的骨架作用，在GSP分散活化下，利用PAC-LV的颗粒桥接与PVA1788的疏水锚定协同成膜，于硅质泥岩孔壁快速生成致密韧性内外泥饼，兼具物理封堵与化学固壁双重功能，解决了硬脆性破碎地层微裂隙长时效封堵的工程难题。现场应用效果良好，为广西“锡、锑、铟”等关键金属找矿突破行动提供了有力支撑。

关键词：硅质泥岩；硬脆性破碎地层；低固相成膜冲洗液；PAC-LV+PVA1788协同封堵；双重固壁
中图分类号：P634.6 **文献标识码**：B **文章编号**：2096-9686(2026)S1-0311-07

Research and application of low-solid film-forming flushing fluid for hard-brittle fractured formations

WEI Xianglong[1,2], MENG Faqiang[1,2*], LU He[1], HU Wei[1,2], SU Fuchang[1,2], YIN Xin[1,2]
(1. *Guangxi No.*1 *Geological Engineering Co., Ltd., Nanning Guangxi* 530031, *China*; 2. *Guangxi Mineral Resources Deep Exploration Drilling Technology Talent Small Highland, Nanning Guangxi* 530031, *China*)

Abstract: To address the frequent technical challenges of borehole collapse, block falling, and pipe sticking encountered in multiple drill holes penetrating fractured formations in a mining area of Nandan County, based on a systematic analysis of the geological characteristics of the mining area, this study proposes technical countermeasures to wellbore stabilization using flushing fluid, and field application was carried out. Influenced by the Danchi fault zone, the siliceous mudstone rock mass exhibits extremely developed joints and fissures, displaying hard-brittle fractured characteristics. Under mechanical disturbance, the interlayer structure is highly susceptible to instability failure, forming brecciated and fragmented spalled materials which further trigger large-scale block falling and collapse-induced pipe sticking. Therefore, multiple flushing fluid formulations were explored, including low-solid plant gum systems, low-clay-phase silicate anti-collapse systems, and low-solid film-forming systems. Ultimately, a low-solid film-forming PAC-LV+PVA1788 flushing fluid system suitable for the fractured formations in this mining area was developed. The system utilizes the skeleton role of clay particles within the low-solid-phase system. Under the GSP dispersion and activation, PAC-LV particle bridging and PVA1788 hydrophobic anchoring synergistically form a film, rapidly generating a dense and tough internal/external mud cake on the siliceous mudstone borehole wall. This system combines the dual functions of physical plugging and chemical consolidation, effectively solving the engineering challenge of long-term micro-fracture plugging in hard-brittle fractured formations. Field application has yielded

收稿日期：2026-05-20；**修回日期**：2026-06-28 **DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.S1.040

第一作者：韦祥龙，男，壮族，1988年生，工程师，勘查技术与工程专业，主要从事地质钻探工程技术研究和岩土工程等工作，广西南宁市江南区五一西路20号，409455010@qq.com。

通信作者：蒙发强，男，汉族，1988年生，高级工程师，地质工程专业，主要从事地质资源与地质工程相关技术研究工作，广西南宁市江南区五一西路20号，531281846@qq.com。

引用格式：韦祥龙，蒙发强，陆何，等.硬脆性破碎地层低固相成膜冲洗液研究与应用[J].钻探工程，2026，53(S1)：311-317.
WEI Xianglong, MENG Faqiang, LU He, et al. Research and application of low-solid film-forming flushing fluid for hard-brittle fractured formations[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 311-317.

favorable results, providing strong technical support for the prospecting breakthrough of critical metals such as tin, antimony, and indium in Guangxi.

Key words: siliceous mudstone; hard-brittle fractured formation; low-solid film-forming flushing fluid; PAC-LV+PVA1788 synergistic plugging; dual consolidation

0 引言

破碎地层通常具有裂缝发育、结构松散、水敏性强等特点,容易引发孔壁坍塌、漏失等问题,严重制约钻探效率。冲洗液作为钻探工程的“血液”,在稳定孔壁方面发挥着至关重要的作用。冲洗液要起到防塌作用,需要具有较强的抑制能力和形成优质滤饼的能力。当前冲洗液的防塌性能主要通过以下机制实现:(1)抑制水化:通过抑制剂抑制泥页岩水化膨胀;(2)封堵裂缝:通过封堵剂封堵地层裂缝,防止冲洗液漏失;(3)强化孔壁:通过成膜剂在孔壁形成致密薄膜,提高孔壁强度。

其中,提高冲洗液的成膜封堵性是一种重要的技术手段[1]。水基冲洗液中通过加入成膜剂改变其物理化学性质,能够在孔壁表面形成一层致密的半透膜,阻止冲洗液中自由水进入地层,防止发生孔壁坍塌等事故[2]。例如,孙凯等[1]在原有抗温防塌冲洗液体系配方优化的基础上,引入成膜剂,研发了具有良好流变性、抗高温稳定性及较强抗污染能力的冲洗液体系,该冲洗液在提高裂缝封堵能力方面展现出了优良性能。常见的成膜剂主要有聚合物成膜剂、钾盐硅酸盐抑制类成膜剂和封堵材料类成膜剂[2]。石油勘探领域多使用聚合物成膜剂和封堵材料类成膜剂[3-4]。聚合物类成膜剂制备工艺较复杂[5],纳米封堵材料又不够成熟[6],且适配的地层多为灰岩、白云岩、泥岩和泥页岩等[7],而适配于硅质岩和硅质泥岩等硬脆性地层的成膜封堵技术仍有待研究。此外,地质矿产勘探通常采用的是小口径绳索取心钻进,要求冲洗液具有较好的流变性和较低的黏度[8-9]。

南丹县某矿区位于广西壮族自治区河池市,是国内重要的多金属矿产资源基地之一。自广西新一轮找矿突破战略行动实施以来,矿区内勘探开发进程显著加快,拟部署的钻探总工作量已超过10万m。然而,勘探区内多个钻孔在钻遇破碎地层时,出现严重的孔壁坍塌掉块与频繁阻卡,导致多孔报废、钻探周期延长,造成了较大的经济损失。同时,受勘探市场行情影响,钻探施工单价偏低,而套管护壁工艺成本较高,水泥固结护壁效果亦不理想,矿区原采用的“水+膨润土+成膜剂A+成膜剂B+GSP”冲洗液体系,应用效果同样不佳。为解决该矿区钻孔孔壁失稳难题,本文系统分析了硅质岩、硅质泥岩等破碎地层的构造特征及孔壁失稳机理,研制出适配于该类硬脆性破碎地层的低固相成膜冲洗液体系——PAC-LV+PVA1788[10]。该体系已在多个钻孔中成功应用,为该区域地质勘探工作奠定了坚实基础,并有力推动了广西关键金属找矿战略突破行动。

1 破碎地层地质研究

1.1 地层概况

该矿区是大厂式复合型锡铅锌多金属矿区的五大典型矿床之一,矿床的赋矿地层为泥盆系,五指山组扁豆状、条带状灰岩;榴江组硅质岩;罗富组泥灰岩、页岩;塘丁组泥灰岩、页岩夹砂岩;主要成矿时代为燕山晚期,矿床位于黑云母花岗岩体上方。主要控矿构造为北西向丹池大断裂、北东向断裂组、南北向断裂组和丹池背斜及其次级褶皱、小褶曲。其必要的成矿要素有:丹池坳陷带的构造背景、燕山晚期酸性岩浆侵入、特殊的赋矿地层、岩性组合、断裂控矿构造;重要要素有:侵入岩特征、矿体地质特征、岩石化学特征、蚀变。

区域地质资料及邻孔实钻资料显示,该矿区的地层由新至老简述如下:(1)第四系残坡积层,主要由黏土、亚黏土夹硅质泥岩及砂岩角砾组成,结构松散,可钻性1~2级;(2)石炭系深灰至灰黑色中厚层状灰岩、生物碎屑灰岩夹燧石结核及条带,局部岩溶裂隙发育,可钻性5~6级;(3)上泥盆统五指山组灰黑色薄至中层状泥灰岩、条带状灰岩夹钙质页岩,可钻性4~5级;(4)中泥盆统榴江组以灰黑色薄~中厚层状硅质岩为主,垂直节理发育、脆性较强,可钻性6~7级;(5)中泥盆统罗富组为主要赋矿层位,岩性以深灰至灰黑色硅质泥岩为主,受热液蚀变及构造作用影响,硅化程度较高,节理裂隙极为发育,表现为硬脆性破碎特征,可钻性7~8级,是钻进坍塌掉块的核心层段;(6)下泥盆统塘丁组主要

岩性为灰绿、暗紫色石英砂岩、粉砂岩夹页岩,整体较完整,可钻性5～6级,为矿区基底地层。

1.2　区域地质构造分析和孔壁失稳机理分析

受丹池北西向主控矿断裂与北东向断裂组的双重制约,临近矿体的硅质泥岩岩体多呈坚硬且脆性显著的特征,构造裂隙及石英、方解石脉发育,孔壁易发生脆性崩落与块体坍塌。该类硅质泥岩的岩石骨架由高硬度石英等硅质矿物与片状黏土矿物混杂胶结而成,整体结构致密,孔隙度低,刚性极强。岩体内部广泛发育成岩微裂隙,构成潜在破坏面。

钻进过程中,钻头破开孔壁后,地应力发生瞬时释放并在孔周重新集中,作用于岩石先存的微裂隙,促使其张开并进一步扩展,为后续侵入提供通道。同时,岩石中所含黏土矿物(如伊利石)遇水后虽未出现如蒙脱石般的剧烈膨胀,但其水化膨胀压力极为显著,足以撑开岩体内部的裂缝,最终导致宏观破碎垮塌,引发孔壁失稳。同时,受丹池断裂带影响,该组地层硅化程度较高,节理裂隙极发育,呈硬脆性破碎的特征,受机械扰动后层间结构易失稳破坏而形成角砾状、碎块状,进而诱发大规模掉块和坍塌等。

2　地层适配性冲洗液体系室内优选

2.1　冲洗液对策

针对硅质岩与硅质泥岩破碎地层的特点,冲洗液对孔壁的稳定作用可通过以下途径实现:采用合理密度提供液柱支撑,平衡地层应力以抑制围岩变形;通过高效降失水与微裂隙封堵阻断滤液侵入,降低裂隙水压力,避免软弱结构面遇水弱化;同时,利用致密韧性泥饼缓冲压力激动、均匀支撑孔壁,减轻脆性破坏;并辅以聚合物类处理剂对裂隙的胶结加固作用,提升碎裂岩体的整体强度,最终实现孔壁长期稳定。

鉴于植物胶体系在湖北汉江大跨越勘察项目[11]、成膜体系在甘肃曹家口金矿勘探项目[12],以及GSP与PVA1788在广西桂柳地1井[10]均取得了成功应用,本文从小口径地质钻探的实际特点出发,对多种冲洗液体系开展了室内对比试验。以表观黏度、API滤失量和动切力为主要评价指标,最终优选出满足低滤失量、低黏度及中等动切力等性能要求的低固相成膜PAC-LV+PVA1788冲洗液体系。

2.2　低固相植物胶冲洗液体系

低固相植物胶冲洗液配方分成两大组进行,其中一组以水+0.5% 植物胶+0.5% KCl为基浆1,依次加入0.5% GSP和0.3% Na-CMC,另一组以水+0.5% 植物胶+1.0% 膨润土为基浆2,依次加入1.0% GSP和0.3% PAC-LV,室内试验结果见表1。

分析表1,基浆1滤失量较大,且无动切力。加入膨润土后,能够在仅小幅提高黏度的前提下有效降低滤失量。GSP利用其两性离子基团与植物胶之间的氢键和静电作用,构筑了更强的物理交联网络,从而进一步降低滤失量,但体系的流变性能仍显不足。Na-CMC与PAC-LV的引入均可进一步降低滤失量,并形成较强的交联结构以提升动切力。二者均为聚阴离子纤维素,其取代基均为$-CH_2COO^-Na^+$,但Na-CMC的取代度为0.6～0.9,而PAC-LV的取代度≥1.0,在性能上表现为前者显著增黏,后者则在优化降黏的同时提高了动切力,因此PAC-LV的综合性能优于Na-CMC。

2.3　低黏土相硅酸盐防塌冲洗液

鉴于植物胶体系API滤失量偏大、动切力偏低,考虑去除植物胶组分,以“水+0.8% 膨润土+0.8% GSP”为基浆,复配0.5% PAC-LV与0.3% 磺化沥青,构建了低黏土相硅酸盐防塌冲洗液体系,其性能测试结果详见表2。

表1　无固相植物胶冲洗液体系室内试验结果

序号	冲洗液配方	漏斗黏度/s	API滤失量/mL	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa
1	基浆1	17.84	32.0	5.0	4.0	0
2	基浆1+0.5% GSP	21.41	24.0	6.0	6.0	0
3	基浆1+0.5% GSP+0.3% Na-CMC	28.23	23.0	13.0	11.0	1.02
4	基浆2	18.81	23.0	5.5	5.0	0.51
5	基浆2+1.0% GSP	23.14	16.0	8.5	8.0	0.51
6	基浆2+1.0% GSP+0.3% PAC-LV	24.46	13.0	6.0	5.0	2.04

表2 低黏土相硅酸盐防塌冲洗液体系室内试验结果

序号	冲洗液配方	漏斗黏度/s	API滤失量/mL	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa
1	水+0.8%膨润土+0.8%GSP	17.56	24.0	9.0	8.0	1.02
2	水+0.8%膨润土+0.8%GSP+0.5%PAC-LV	28.45	16.0	12.5	10.0	2.56
3	水+0.8%膨润土+0.8%GSP+0.3%磺化沥青	32.59	15.0	16.0	11.0	5.11

由表2可见,配方1的API滤失量极大,动切力较低。配方2引入PAC-LV后,API滤失量显著降低,动切力亦明显提高;配方3加入磺化沥青后,滤失量及动切力均较基浆大幅改善,但漏斗黏度与表观黏度增幅过大。对其作用机理的深入分析如下:

膨润土构成了泥饼的基本骨架,而GSP分子链较短,在溶液中呈完全溶解的单分子状态,自身封堵能力有限,导致基浆API滤失量极大。PAC-LV通过其分子链上羧甲基的静电引力和羟基的氢键作用,同时吸附于多个膨润土颗粒表面,形成桥接与包被效应,从而将疏松的泥饼改造为致密的复合滤膜。磺化沥青中的稠环芳烃组分在溶液中不完全溶解,能够形成微米级的、带负电的胶体颗粒或胶束。这些可变形的颗粒在压差下进入泥饼的粗大孔道,通过充填和封堵构筑起一道物理隔离屏障,并在孔道表面覆盖一层疏水薄膜,进一步增强了降失水效果。

李浩等[8]认为小口径绳索取心工艺的基本要求是冲洗液具有较好的流变性和较低的黏度。而室内试验表明配方3虽防塌性能优异,携渣能力较强,但漏斗黏度、表观黏度及塑性黏度均偏高,难以完全适配小口径地质勘探。在实际的应用中,应考虑减少磺化沥青的加量,再复配适量的PAC-LV,以实现1+1远大于2的降失水和孔壁稳定效果。

2.4 低固相成膜冲洗液体系

2.4.1 试验方法及数据

矿区原用冲洗液配方为“水+0.8%膨润土+0.3%成膜剂A+0.3%成膜剂B+0.8% GSP”,但该配方未能有效解决硅质泥岩破碎地层的阻卡问题。针对这一技术难题,开展了室内优选试验。试验共分为三大组,其中,基浆1配方为水+0.8%膨润土+0.3%成膜剂A+0.3%成膜剂B+0.8%GSP,基浆2配方为水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP;基浆3配方为水+0.8%膨润土+0.8%成膜剂A+0.8%成膜剂B。在各组基浆中分别加入不同浓度的PAC-LV、GSP及磺化沥青,对不同配方的流变性能进行评价,试验结果见表3。

表3 低固相成膜冲洗液体系室内试验结果

序号	冲洗液配方	漏斗黏度/s	API滤失量/mL	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa
1	基浆1	17.47	18.0	3.5	3.0	0.51
2	基浆1+0.2%PAC-LV	18.72	15.0	10.0	8.0	2.04
3	基浆2	17.94	17.0	3.5	3.0	0.51
4	基浆2+0.3%PAC-LV	22.84	14.0	11.0	9.0	2.04
5	基浆2+0.3%PAC-LV+0.2%磺化沥青	23.28	15.0	11.0	9.0	2.04
6	基浆2+0.3% PAC-LV+0.2%磺化沥青+0.2% GSP	24.13	16.0	11.5	9.0	2.26
7	基浆3	15.27	30.0	3.5	3.0	0.51
8	基浆3+0.3%PAC-LV	20.53	18.0	8.5	8.0	2.56
9	基浆3+0.3%PAC-LV+0.5%GSP	21.87	16.0	10.5	9.0	1.53
10	基浆3+0.5%PAC-LV+0.5%GSP	25.91	13.0	13.0	10.0	3.07

2.4.2 评价结果

由表3可知,原用冲洗液配方API滤失量大,流变性能偏低;加入GSP后滤失量有所降低,但流变性能改善有限。与2.2节植物胶体系中的基浆1和基浆2相比,该体系流变性能已有较大程度提升。PAC-LV的引入显著优化了冲洗液体系的流变性能;而磺

化沥青中的惰性颗粒可对微小孔喉实施物理封堵,在保持良好流变性能的同时不引起大幅增黏。

成膜剂A与成膜剂B的最佳加量均为0.6%;在功能性处理剂中,PAC-LV能够在有效控制滤失量的同时避免大幅增黏,其最优添加量为0.3%;适量增加GSP有助于提高冲洗液的动切力,其最佳加量为0.8%~1.0%;磺化沥青可封堵微裂隙且无明显增黏效应,可依据实际需求酌情添加。

2.5　低固相成膜冲洗液体系的优化设计

2.5.1　降失水剂的选择

经系列试验探索,初步确定采用低固相成膜体系作为该矿区破碎地层的冲洗液方案,并需进一步开展降失水剂的室内优选工作。小口径地质勘探行业常用的降失水剂主要包括PAC-LV、Na-CMC及英格尔E4381,其中英格尔E4381兼具一定的防塌功能。四组不同冲洗液配方见表4。

表4　低固相成膜冲洗液体系降失水剂优选试验

序号	冲洗液配方	漏斗黏度/s	API滤失量/mL	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa
1	水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP	17.54	17.0	3.5	3.0	0.51
2	水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP+0.3%PAC-LV	19.53	12.0	8.0	8.0	1.02
3	水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP+0.3%Na-CMC	24.29	13.0	8.5	8.0	0.51
4	水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP+0.3% E4381	25.21	14.0	9.0	8.0	1.02

试验结果表明,与Na-CMC和E4381相比,PAC-LV综合性能最优,能够在实现低滤失量、低塑性黏度的同时,提供适中的动切力,并可增强泥饼的致密性,满足优化设计指标。据此,选择PAC-LV作为该体系的核心降失水剂。

由图1可见,冲洗液泥饼在室温条件下放置2~4 h风干后,完整性良好,形成的泥饼可长时间稳定存在。折叠试验[13]表明,配方2~4的泥饼折叠后泥饼未破裂,且未见折痕。泥饼厚度测量结果显示:配方1未添加降失水剂,已见开裂现象,泥饼质量及韧性均较差,实测厚度为0.05 mm;添加降失水剂后,配方2~4的泥饼厚度均降至0.03 mm,韧性亦均优于配方1。

综上,冲洗液配方2~4具备良好的降失水性能,并能在孔壁形成可长期稳定存在的高质量泥饼保护膜。

2.5.2　PVA1788复配不同降失水剂性能对比

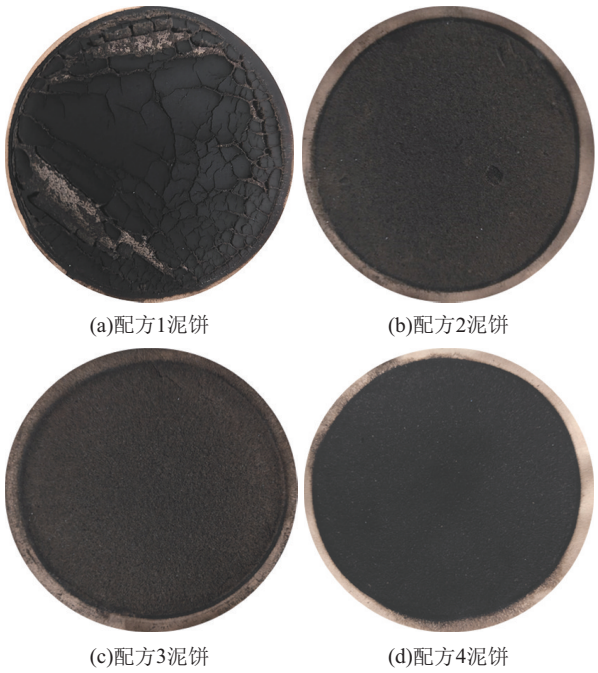
基于PVA1788优异的包裹吸附特性与成膜抑制性能,以及其在桂柳地1井的成功应用经验,团队决定在低固相成膜冲洗液体系的基础上,开展室内小样配伍试验,系统考察PAC-LV、Na-CMC及E4381三种降失水剂与PVA1788之间的协同增效作用。试验结果表明:加入0.3% PVA1788后,PAC-LV体系的塑性黏度与表观黏度均有所下降,API滤失量进一步降低;Na-CMC体系黏度指标明显升高,滤失量变化不显著;E4381体系黏度小幅下降,滤失量同步降低,动切力略有提升,具体数据见表5。

2.5.3　冲洗液处理剂作用机理分析

基于室内试验结果,确定以低固相成膜体系为基

表5　低固相成膜冲洗液体系PVA1788与不同降失水剂结合的对比试验

序号	冲洗液配方	漏斗黏度/s	API滤失量/mL	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa
1	水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP+0.3% PAC-LV+0.3%PVA1788	17.28	9.0	7.5	6.0	0.51
2	水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP+0.3% Na-CMC+0.3%PVA1788	32.85	12.0	20.0	14.0	1.53
3	水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8%GSP+0.3%E4381+0.3%PVA1788	22.42	12.0	8.5	8.0	0.51



(a)配方1泥饼 (b)配方2泥饼

(c)配方3泥饼 (d)配方4泥饼

图1 各配方泥饼风干后折叠形状

础，复配PAC-LV与PVA1788，作为该矿区勘探作业的冲洗液体系。该体系各组分的作用机理如下：

膨润土：作为基础造浆材料，提供悬浮能力和初始滤饼骨架。

GSP：分子主链上密布着磺酸基（$-SO_3^-$）或羧基（$-COO^-$），与膨润土端面上的Al^{3+}形成了带有高密度负电荷和厚水化鞘的强阴离子双电层，建立基础分子结构。

PAC-LV（低黏聚阴离子纤维素）：是纤维素结构进行羟基取代作用和分子链降解作用而形成的[14]。经水解可形成大量的羧甲基（$-CH_2COO^-Na^+$）和羟基（-OH），其中羧甲基（$-CH_2COO^-Na^+$）通过多点协同吸附在两个不同的黏土颗粒上，形成“黏土颗粒A-PAC-LV链-黏土颗粒B”的桥接结构；链上的羟基（-OH）与PVA1788链上的羟基，以及黏土表面的氧原子和羟基，形成一张连续、密集的分子间和分子内氢键网络；分子链上的糖环C-H面是其疏水微区，能通过疏水相互作用，“识别”并吸附在已被GSP稳定分散的成膜剂A/B混合胶束表面，整合成功能性成膜单元。

PVA1788：是部分醇解型聚乙烯醇，其核心官能团为高密度羟基（-OH）和少量疏水基团乙酰基（$-OCOCH_3$）。乙酰基作为疏水探针，与成膜剂发生特异性强锚定，并通过长亲水链段回连主网；高密度羟基（-OH）可通过氢键作用，连接在PAC-LV的骨架上，形成二级柔性补强和桥接。

该体系构建了一套强抑制、低失水、高携屑的成膜封堵冲洗液体系。通过PAC-LV与PVA1788协同增黏提切，形成强韧的聚合物空间网架结构，确保优异的悬浮携屑能力。在GSP对成膜剂进行分散活化后，体系在压差下可快速形成致密、韧性的内外泥饼，实现对破碎地层的屏蔽暂堵与化学固壁，有效防止孔壁失稳。

3 冲洗液体系的现场应用

3.1 冲洗液配方及性能维护要求

冲洗液配方：1 m^3水＋8 kg膨润土＋6 kg成膜剂A＋6 kg成膜剂B＋8 kg GSP＋3 kg PAC-LV＋3 kg PVA1788＋1 kg纯碱。

性能要求：密度1.02～1.05 kg/L，塑性黏度5～10 mPa·s，API滤失量5～15 mL，pH值8～11。

现场冲洗液配制及性能调节维护：

（1）现场采用英格尔EP1500G型钻机，标配两个搅拌池，规格分别为0.4、0.6 m^3。配制新浆时，基本按冲洗液配方的比例加入处理剂，冲洗液配方：400 L清水＋3.2 kg膨润土＋2.4 kg成膜剂A＋2.4 kg成膜剂B＋3.2 kg GSP防塌剂＋1.2 kg PAC-LV＋1.2 kg PVA1788＋0.4 kg纯碱。

（2）地层相对完整时，置换冲洗液，每桶冲洗液加量：400 L清水＋3.0 kg膨润土＋2.0 kg成膜剂A＋2.0 kg成膜剂B＋3.0 kg GSP＋1.0 kg PAC-LV＋ 1.0 kg PVA1788。

（3）现场冲洗液配制加料顺序：在清水中加入膨润土，充分水化搅拌20～30 min，必要时应水化8 h，建立基础胶体结构；缓慢少量加入PAC-LV，低速分散搅拌，直至完全溶解；加入成膜剂A，充分搅拌10 min，再加入成膜剂B，充分搅拌；加入GSP护壁剂，搅拌10～20 min，最后缓慢加入PVA1788，充分搅拌20 min以上。全部组分加完后，应整体循环搅拌30 min以上，性能均匀后方可使用。

（4）钻遇强风化带漏失地层时，酌情加入磺化沥青或其他随钻堵漏剂。

3.2 钻进参数

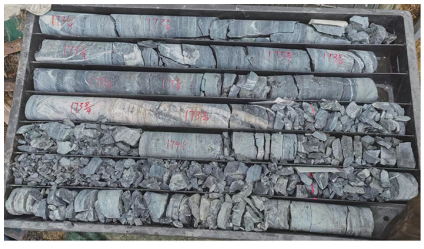
鉴于现场均采用正循环绳索取心钻进工艺，针对受外力扰动敏感的硬脆性地层，钻进过程中应控制转速，避免过高转速加剧钻具对孔壁的敲击扰

动[15]。钻遇破碎地层时,转速控制在200～400 r/min,泵量控制在50～100 L/min,采用不加压钻进,必要时可减压钻进。泥浆泵正常工况压力维持2～5 MPa。

3.3　应用效果分析

该冲洗液体系已成功应用。其中,ZK120-34-15孔在340～346 m孔段钻遇破碎层,孔内坍塌掉块严重,钻机扭矩急剧升高,无法正常钻进,破碎层取心率为0。采用该冲洗液体系后,成功解卡并顺利钻至设计孔深,且破碎层平均取心率为96.67%(图2a)。ZK0048孔于408.2 m处钻遇破碎层发生卡钻,取心率为0,采用该冲洗液体系并配合3.2节所述钻进参数后,顺利穿越破碎带,钻至较完整基岩,且破碎层平均取心率为98.70%(图2b)。实测穿越破碎带回次为第164～165回次及第173～177回次,对应破碎带长度分别为2.40和10.30 m,该钻孔目前已顺利穿过破碎带,钻至设计孔深950 m。现场孔口循环冲洗液性能指标为:密度1.03 kg/L,漏斗黏度18.56 s,塑性黏度7 mPa·s,API滤失量10 mL。

(a) ZK120-34-15孔破碎带岩心



(b)ZK0048孔破碎带岩心

图2　破碎带岩心

4　结论及建议

(1)南丹县某矿区地处丹池断裂带附近,破碎带母岩为硅质泥岩,构造裂隙与节理极为发育,钻孔易发生掉块、坍塌等孔壁失稳现象。经对各配方冲洗液体系的积极探索,矿区原采用的“水+膨润土+成膜剂A+成膜剂B+GSP”冲洗液体系API滤失量大,动切力低,难以满足该矿区钻探作业要求。

(2)以膨润土、GSP防塌剂、成膜剂A及成膜剂B为基础构建的低固相成膜体系,复配PVA1788与PAC-LV等核心处理剂,形成的低固相成膜PAC-LV+PVA1788冲洗液体系,具备三级协同封固机制,可有效解决该区域破碎地层钻进难题。硬脆性破碎地层的最优冲洗液配方为1 m^3水+0.8%膨润土+0.6%成膜剂A+0.6%成膜剂B+0.8% GSP+0.3% PAC-LV+ 0.3% PVA1788+0.1%纯碱。

(3)该体系对极破碎地层的适应性有待进一步研究,后续需着力探索技术可行性与经济合理性兼备的实用冲洗液方案。

参考文献:

[1] 孙凯,冉茂林,李鑫.成膜防塌钻井液技术研究与应用[J].钻采工艺,2021,44(4):104-109.

[2] 孙俊,艾加伟,舒义勇,等.FDM-1成膜封堵剂的实验评价及应用[J].钻井液与完井液,2020,37(1):54-58.

[3] 胡继良,陶士先,纪卫军.破碎地层孔壁稳定技术的探讨与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(9):30-32.

[4] 胡友林,岳前升,刘书杰,等.成膜剂HN-1研制及其在钻井液中的应用[J].海洋石油,2013,33(1):85,96-99.

[5] 王方博.川西海相破碎地层防塌钻井液技术研究及应用[J].钻探工程,2021,48(9):55-64.

[6] 吕文军,童俊涛,曾令,等.X-A成膜钻井液体系在滇东北地区页岩气调查井中的应用[J].钻探工程,2023,50(S1):223-226.

[7] 吴若宁,熊汉桥,苏晓明,等.成膜封堵技术室内实验研究[J].油气藏评价与开发,2018,8(6):51-61,69.

[8] 李浩,陈礼仪,陈尔志,等.新型水基钻井液成膜处理剂的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(4):20-22,26.

[9] 吴金生,房勇,石绍云,等.浅层气区地质岩心钻探技术综合研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):23-27.

[10] 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.

[11] 黄河,张安平.松散破碎地层钻探泥浆研究与应用[J].山西建筑,2021,47(20):106-107.

[12] 王发民,刘清山,郭合伟,等.甘肃曹家口金矿松散破碎地层液动潜孔锤钻进冲洗液选型及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):29-32.

[13] 张雨晨,郝树青,杜新齐.高原冻土区低固相成膜剂钻井液配方优选[J].应用化工,2023,52(7):1950-1953.

[14] 黄汉仁.油基钻井流体工艺原理[M].北京:石油工业出版社,2016.

[15] 汪鸿,杨灿,周雪菡,等.风险探井花深1x井深部破碎带地层钻井液技术[J].钻井液与完井液,2019,36(2):208-213.

(编辑　王文)