

交联凝胶+水泥浆复合堵漏技术 在深部盐矿井的应用

邹志飞^{1,2,3}, 孙海洋⁴, 熊正强^{1,2}, 李艳宁^{1,2}, 彭博一^{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; 4. 中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司, 陕西 神木 719315)

摘要: 深部盐矿资源勘探与开发过程中频发的钻井液漏失技术难题, 其形成机理复杂且堵漏难度较大。在构造应力、地下水溶蚀及工程扰动等多因素作用下, 储层及近井地带易发育不同尺度的裂缝网络甚至溶蚀腔体, 形成多重渗流通道体系。以河北采卤工程A井为例, 在井深2594 m出现渗漏, 继续钻进4 m后演变为涌漏同层的失返性漏失, 严重影响钻探工程时效。针对A井漏失问题, 本文采用交联凝胶-水泥浆复合堵漏技术, 利用交联凝胶隔水性好、交联时间可控等特点, 形成网状分割层, 为后续水泥浆固结提供有效支撑。两次堵漏作业完成后, A井返浆量达到了正常循环量的80%左右。该复合堵漏技术有效解决了传统单一堵漏材料适应性不足的问题, 为深部含水层恶性漏失问题治理提供了新的解决方案。

关键词: 盐矿钻探; 失返性漏失; 涌漏同层; 交联凝胶; 复合堵漏

中图分类号: P634.8; TD871^{+.1} **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0315-04

Application of crosslinked gel and cement slurry composite leak-sealing technology in deep salt mines

ZOU Zhifei^{1,2,3}, SUN Haiyang⁴, XIONG Zhengqiang^{1,2}, LI Yanning^{1,2}, PENG Boyi^{1,2}

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, CGS, Beijing 100083, China; 2. Innovation Center for Green Drilling Technology, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Shenhua Energy Company Limited Shendong Coal Branch, Shenmu Shaanxi 719315, China)

Abstract: During the exploration and development of deep salt mineral resources, the frequent technical challenge of drilling fluid loss is characterized by complex formation mechanisms and significant sealing difficulties. Under the combined effects of tectonic stress, groundwater dissolution, and engineering disturbances, reservoirs and near-wellbore zones are prone to developing multi-scale fracture networks and even dissolution cavities, forming a multi-channel seepage system. A case in point is Well A from a brine extraction project in Hebei Province: leakage occurred at a depth of 2594m, which evolved into a total loss scenario with simultaneous influx and leakage in the same stratum at 2598m, severely impacting drilling efficiency. To address this leakage issue, this study employs crosslinked gel and cement slurry composite sealing technology. Leveraging the excellent water plugging capabilities and controllable crosslinking time of the gel, a network-like separation layer was formed to provide effective support for subsequent cement slurry consolidation. After two sealing operations, the drilling fluid return reached approximately 80% of the normal flow rate. This composite technology effectively overcomes the adaptability limitations of traditional single sealing materials and offers a novel solution for managing severe leakage in deep drilling engineering.

Key words: salt mine drilling; lost circulation; influx and leakage in the same stratum; crosslinked gel; composite leak-sealing

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2025-06-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.050

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD 2021722); 自然资源部青年科技人才部门预算项目

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, 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, zzf1125@126.com。

引用格式: 邹志飞, 孙海洋, 熊正强, 等. 交联凝胶+水泥浆复合堵漏技术在深部盐矿井的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 315-318.

ZOU Zhifei, SUN Haiyang, XIONG Zhengqiang, et al. Application of crosslinked gel and cement slurry composite leak-sealing technology in deep salt mines[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 315-318.

0 引言

地层漏失是深部固体矿产资源勘探开发面临的主要工程难题之一,不仅造成钻井液大量损失,增加钻探成本,还会带来一系列复杂井内安全事故^[1-3]。例如,在老挝施工的可溶性钾镁盐矿勘探工程,约600个钻孔,钻孔漏失率达60%,部分钻孔因漏失而引发卡钻、塌孔等孔内事故^[4]。湘南3000 m科学深钻ZK16508孔,开钻后因全孔漏失、缩径坍塌,导致卡埋钻事故频发,严重影响钻探施工效率,历时2年多才最终完孔,终孔孔深为3008.93 m^[5]。发生恶性漏失时,常规堵漏技术如桥接堵漏、水泥堵漏和高失水堵漏等,因材料功能单一或适应性不足等原因,难以取得理想的效果,堵漏成功率不高^[6-8]。新型堵漏材料如纳米复合材料、超分子材料、形状记忆聚合物等,目前多聚焦于深部油气资源勘探开发,在地质勘探工程中应用案例较少^[9-10]。

A井是河北中部地区典型深部盐矿采卤井,其目标储层及近储层地带发育裂隙、溶腔等复杂地质体,导致钻探过程中出现失返性漏失^[11]。现场先后采用桥塞堵漏(增黏剂+惰性材料+大颗粒材料配制稠浆)和水泥堵漏,但是井口均未能返浆。针对该技术难题,采用“交联凝胶+水泥浆”复合堵漏技术进行堵漏作业,取得了良好的应用效果。

1 工程基本概况

河北深部盐矿钻探工程A井是一个井组改造项目,在原A井井深2483 m处开窗侧钻,造斜半径190 m,定向钻进至2882.2 m精准中靶,如图1所示。工程要求下入 $\varnothing 139.7$ mm无接箍套管,下深2782.35 m。A井当前井深2603 m,井径为152.4 mm,井底温度80~90℃。井深2438~2623 m地层主要岩性为砂岩、页岩,井深2624~2882.2 m为目的层盐矿层。

施工钻机型号为ZJ40,泥浆泵型号为F-1300,正常循环时泥浆泵排量为13~14 L/s。现场钻井液为低固相钻井液体系,钻井液苏氏漏斗黏度为29~30 s,API滤失量4~6 mL,密度1.02~1.05 g/cm³。

2 漏失问题

A井钻进至2594 m时出现渗漏,钻至2598 m时出现失返性漏失,漏失层垂直高度约1 m,主要漏失特征为开泵时钻井液失返,停泵之后井口涌出高

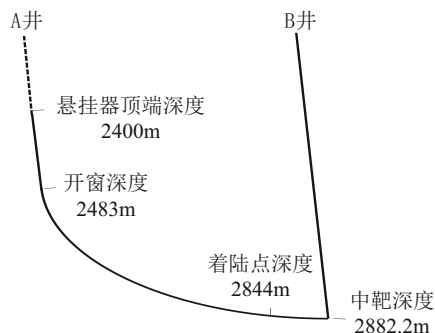


图1 井组改造工程示意

压卤水,为典型的“涌漏同层”。钻井液密度提升至1.14 g/cm³可平衡地层压力,涌水停止。漏失地层主要为砂岩,砂岩地层孔隙度一般较大,容易出现井漏现象。且该漏失地层周边区域曾实施过压裂作业,可能形成裂隙通道,甚至裂隙通道会与盐层溶腔连通,从而导致深部地层卤水涌出。桥塞堵漏浆无法有效封堵是因为漏失通道尺寸较大,导致包含大颗粒材料的桥塞堵漏剂难以在裂缝通道填充、堆积,无法形成致密封堵层^[12-13]。现场采用水泥浆堵漏,注入水泥浆体积约30 m³,候凝72 h后探塞,但仅在漏层上部有少量水泥塞,这是因为前期注入的水泥在进入漏层后被地层高压卤水快速稀释。

因为地层特性,A井钻井液恶性漏失对于堵漏技术具有很大的挑战,其主要难点:

(1)涌漏同层,钻井液密度窗口窄,仅为1.10~1.14 g/cm³。当钻井液密度低于1.10 g/cm³,井内涌水,而高于1.14 g/cm³时,井内失返性漏失。

(2)漏失位置非常接近盐层,主要是高压卤水,含盐量高。因此,堵漏材料需要有良好的抗盐性能。

(3)漏失位置较深,对于现场人员配合、设备协调和堵漏操作要求高。要求现场施工人员准确把握设备情况、钻具参数并制定详细堵漏方案,避免堵漏材料泵送不到位。

3 交联凝胶配方及特点

针对失返性漏失和含水层漏失问题,研制了一种绿色可控交联凝胶堵漏材料,该材料主要组分及其作用见表1。交联凝胶在应用时不受漏失通道限制,可根据漏层深度和现场泵送设备参数调整凝胶交联时间,确保凝胶浆液在泵送时具有良好的流动性,而在进入漏层时形成具有一定结构强度的黏弹性堵漏材料^[14-15]。交联凝胶具有良好的隔水特性,

交联时间可控,可满足不同漏失地层的泵送和堵漏要求,其配方及其交联时间见表 2。

表 1 交联凝胶组分及其作用		
序号	组分名称	作用
1	成胶剂	通过其生物聚合物材料特性形成凝胶结构
2	交联剂	与成胶剂交联,形成具有三维网络结构的凝胶材料
3	交联控制剂	控制交联凝胶的交联时间

表 2 不同交联凝胶配方及其交联时间		
序号	配 方	交联反应开始时间/min
1	4% 成胶剂 GEL+0.6% 交联剂 GCK	6
2	4% 成胶剂 GEL+0.5% 交联控制剂 GDL+0.6% 交联剂 GCK	15
3	4% 成胶剂 GEL+2% 交联控制剂 GDL+0.6% 交联剂 GCK	23
4	4% 成胶剂 GEL+3% 交联控制剂 GDL+0.6% 交联剂 GCK	35
5	4% 成胶剂 GEL+4% 交联控制剂 GDL+0.6% 交联剂 GCK	45
6	4% 成胶剂 GEL+4% 交联控制剂 GDL+0.5% 交联剂 GCK	49

4 交联凝胶+水泥浆复合堵漏技术现场应用

4.1 堵漏前理论分析

根据 A 井漏失问题和地层特点,可以初步判断地层漏失通道大,地层含水量多。单独采用水泥浆或交联凝胶堵漏技术都存在明显缺点。若单独采用水泥浆堵漏,其与高压卤水接触之后,水泥浆马上会被地层涌水携带冲散,无法有效凝结。而单纯采用交联凝胶堵漏,一方面交联凝胶用量非常大,增加堵漏成本,另一方面因为其环保特性,在井底 80~90 ℃ 环境下一定时间后便会出现自降解,导致承压能力下降,无法满足长期钻探作业需求。综上所述,为了提高堵漏成功率,采用“交联凝胶+水泥浆”复合堵漏技术,其中所用水泥为早强型硅酸盐水泥,抗压强度为 32.5 MPa,水泥浆密度 1.8 g/cm³。

根据漏层位置以及泥浆泵排量计算(0.78 m³/min),预计交联凝胶浆液在钻杆内下行时间为 15 min 左右。为避免凝胶浆液在钻杆内出现交联固化,其交联反应开始时间要大于其在钻杆内下行时

间。由表 2,交联凝胶配方 3 的交联反应开始时间为 23 min,适用于 A 井堵漏作业。

4.2 关键参数计算

(1)交联凝胶材料用量计算。漏失井段 2594~2599 m,裸眼容积为 0.09 m³,考虑 A 井漏失通道较大,交联凝胶材料用量为裸眼容积的 10~20 倍。

(2)泵送时间计算。现场应用时需根据井深、井径、钻杆尺寸、漏失段长度和泥浆泵排量等参数计算泵送时间,钻具参数见表 3。

表 3 钻具参数			
序号	钻杆直径/mm	钻杆内径/mm	钻杆线容积/(L·m ⁻¹)
1	102	84	5.54
2	89	70	3.85

例如,光钻杆下钻至 2588 m,井内 Ø102 mm 钻具总长 835.48 m,Ø89 mm 钻杆长 1759.6 m,则钻杆内部容积总计 11.4 m³,地面管线内容积按 0.4 m³ 计算,则总容积为 11.8 m³。根据泵排量和总容积计算,交联凝胶浆液在钻具内下行时间约为 15.1 min。

4.3 灌注实施

4.3.1 第一次堵漏

2023 年 8 月 29 日,在制定完成堵漏方案之后,开始第一次堵漏作业。

按照配方“4% 成胶剂 GEL+2% 交联控制剂 GDL+0.6% 交联剂 GCK”配制交联凝胶浆液。配制步骤:将成胶剂加入搅拌罐,并水化搅拌 30 min,使其充分溶解分散,再加入交联控制剂,继续搅拌 20 min,最后加入交联剂,搅拌时观察交联凝胶浆液黏度变化,并准备泵送作业。

确保开始堵漏作业前,所有设备和材料都已准备妥当,便于及时跟进泵送,减少停泵时间。具体堵漏操作:(1)下入光钻杆至 2588 m,按照泥浆配方 1 m³水+50 kg 钠基膨润土+5 kg HV-CMC 配制稠浆,泵入稠浆 1 m³作为前置液;(2)按照配方配制交联凝胶浆液,自加入交联剂后开始计时,在搅拌约 8 min 后泵入 1 m³浆液,泵送交联凝胶浆液时,观察泵压变化及井口返浆情况;(3)泵入 0.5 m³隔离稠浆和 1 m³水泥浆,最后顶替泥浆 11.5 m³,堵漏作业完成。

堵漏作业开始 20 min 后,泥浆泵泵压升至约 2 MPa。堵漏作业完成 24 h 后,下钻未探到水泥塞,但井口返浆量提升至正常返浆量的 50% 左右,表明

此次堵漏作业具有一定封堵效果。再次制定堵漏方案,进行第二次堵漏作业。

4.3.2 第二次堵漏

2023年8月31日,进行了第二次堵漏作业。根据第一次堵漏作业经验,第二次堵漏作业对堵漏工艺进行了优化调整,主要包括:

(1)交联凝胶浆液增加至 2 m^3 ,水泥浆增加至 3 m^3 。分析认为第一次堵漏作业完成后交联凝胶浆液已进入漏失地层裂缝中,但由于量少而未能起到明显的封堵效果。故第二次堵漏增加堵漏材料用量(井场单次可配制最大交联凝胶浆液为 2 m^3)。

(2)第二次堵漏作业将钻杆下钻至井底。第一次堵漏作业钻杆下至漏失地层顶部,堵漏材料可能优先封堵了上部漏失地层。因此,第二次堵漏作业改为将钻杆下入井底,由底部开始封堵。

(3)在交联凝胶浆液中加入交联剂之后,搅拌10 min再开始泵送。交联凝胶强度在堵漏作业中具有重要影响。在A井堵漏作业中,交联凝胶主要作用是进入地层裂缝之后隔水并且承托水泥浆,降低地下水对水泥浆的稀释作用,使水泥浆拥有足够的凝结时间和空间。交联凝胶强度会随着时间增长逐渐提高,因而当加入交联剂之后,交联凝胶浆液在地面停留时间越长,其泵送至地层时强度便会更高,具有更好的隔水和承压能力。

其余操作与第一次堵漏作业相同。堵漏作业开始28 min后,泥浆泵泵压上升明显,从2 MPa升至4 MPa,表明交联凝胶浆液已进入裂缝地层。候凝24 h后,下钻探水泥塞,塞面2588 m,候凝48 h后开始扫塞,水泥塞长度约12 m,但是在2598~2599 m处约有0.5 m放空段。扫塞至井底后持续循环钻井液,返浆量达到正常返浆量80%左右。相比于第一次堵漏作业,本次堵漏作业封堵效果更加明显。

4.4 结果分析

第一次堵漏作业,临近结束时泵压上涨至2 MPa,表明交联凝胶已具有一定强度且进入漏层。本次堵漏作业未形成水泥塞,可能是因为主力漏层的漏失通道太大,交联凝胶体积过少,难以有效承托水泥浆。但是开泵循环后,返浆量提升至正常水平的50%,说明交联凝胶对于地层中部分裂缝具有良好的封堵作用。

第二次堵漏作业,形成了12 m水泥塞,表明交联凝胶在井底约90℃环境下具有较高的凝胶强度,

能承托住水泥浆,阻止其向漏层深部流动。

5 总结

针对深部盐矿钻探工程A井“涌漏同层”失返性漏失问题,选用交联时间23 min的交联凝胶配方“4%成胶剂GEL+2%交联控制剂GDL+0.6%交联剂GCK”,采用“交联凝胶+水泥浆”复合堵漏技术实施了2次堵漏作业,堵漏效果显著。应用结果表明,交联凝胶具有抗水稀释性好和交联时间可控等特点,结合水泥浆复合堵漏,解决了单一堵剂在恶性漏失地层的应用局限性。该复合堵漏技术的应用是深部固体矿产资源勘探与开发工程处理恶性漏失问题的一次重要实践,为类似钻探工程提供了借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 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(3):630-638.
- [2] 罗龙,曹灶开,杨科,等.全面钻进工艺在甘肃阳山矿区失返性漏失地层中的应用[J].西部探矿工程,2021,(8):50-54.
- [3] 孙欢,朱明明,邹双,等.鄂尔多斯盆地天环坳陷走滑断裂带深表层堵漏技术[J].钻井液与完井液,2024,41(4):467-472.
- [4] 白宝山,许青海,吴礼林,等.老挝可溶性钾镁盐矿钻探冲洗液漏失的预防与处理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):14-16.
- [5] 翟育峰,赵辉,王鲁朝,等.湘南3000m科学深钻孔内事故处理及对策[J].钻探工程,2023,50(4):32-40.
- [6] 王志祥,许非,陈冲,等.地质钻探完全漏失地层处理方式探讨[J].钻探工程,2023,50(S1):218-222.
- [7] 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.
- [8] 隗德祥,高金华,刘维平,等.岩心钻探漏失地层水泥堵漏技术的实例分析与研究[J].钻探工程,2024,51(S1):327-331.
- [9] 海波,林星杰,钟诚,等.高强度等四面体树脂固结堵漏剂的研制及应用[J].钻井液与完井液,2024,41(4):481-488.
- [10] 熊正强,李晓东,彭博一.地热井堵漏材料研究进展[J].地质与勘探,2024,60(5):1030-1039.
- [11] 李志强,郝志宣,牛耀辉,等.宁晋-辛集石盐矿体的成矿地质特征及其构造演化背景[J].盐科学与化工,2024,53(9):27-31.
- [12] 赵洪波,单文军,朱迪斯,等.裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J].油田化学,2021,38(4):740-745.
- [13] 孙金声,杨景斌,白英睿,等.裂缝性地层桥接堵漏技术发展综述与展望[J].石油科学通报,2023,8(4):415-431.
- [14] 李文博,李公让.可控化聚合物凝胶堵漏材料的研究进展[J].钻井液与完井液,2021,38(2):133-141.
- [15] 熊正强,陶士先,周凤山,等.聚合物交联凝胶堵漏性能评价方法研究进展[J].西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(1):85-94,126.

(编辑 王跃伟)