

基于数字孪生系统的可视化缝隙评价仪及堵漏工作液研究

朱明明, 刘朝峰, 张延兵, 孙 欢, 骆胜伟,
孙 艳, 骆迪琳, 张红新, 荆朝旗, 白秀丽
(中国石油川庆钻探长庆钻井总公司, 陕西 西安 710016)

摘要:针对现有堵漏评价仪器存在人工操作繁琐、数据稳定性差、安全性不足及现场堵漏成功率低等问题,研制了一套基于数字孪生系统的可视化缝隙评价仪,并开发了宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液。该评价仪融合三维可视化控制界面、物理感知跟踪体系及实验管理平台,数据采集精度达 $\pm 0.5\%$ FS,传输速率1~5 Mbps,系统稳定性 $>99.5\%$,最高承压5 MPa,可模拟1~5 mm裂缝,实现远程操作与堵漏过程可视化观测,大幅提升实验安全性。依托该仪器研发了宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液,优化主剂与悬浮剂加量,形成适配不同裂缝宽度的堵漏配方。实验表明,工作液可有效封堵1~3 mm裂缝,固化强度 ≥ 8 MPa,可钻性级别2~3级。现场应用24口井,一次堵漏成功率87.5%,施工后循环恢复正常且无漏失现象。研究结果表明,该仪器与工作液显著提升了堵漏评价的安全性及效率,为裂缝性漏失的高效治理提供了智能化解决方案。

关键词:数字孪生;缝隙评价仪;堵漏工作液;复合结构塞体;滤失型;可视化;裂缝封堵;现场应用

中图分类号:TE28⁺3;P634.8 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0207-06

Research on visual fracture evaluation instrument based on digital twin system and plugging fluid

ZHU Mingming, LIU Chaofeng, ZHANG Yanbing, SUN Huan, LUO Shengwei,
SUN Yan, LUO Dilin, ZHANG Hongxin, JING Zhaoqi, BAI Xiuli

(CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Changqing Drilling Company, Xi'an Shaanxi 710016, China)

Abstract: To address the problems of existing plugging evaluation instruments, such as cumbersome manual operation, poor data stability, insufficient safety, and low field plugging success rate, a visualized fracture evaluation instrument based on a digital twin system was developed, along with a wide-temperature range filtration-type composite structure plugging fluid. The instrument integrates a 3D visualization control interface, a physical perception tracking system, and an experimental management platform. It achieves a data acquisition accuracy of $\pm 0.5\%$ FS, a transmission rate of 1~5 Mbps, a system stability of $>99.5\%$, and a maximum pressure capacity of 5 MPa. Capable of simulating 1~5 mm fractures, it enables remote operation and visual observation of the plugging process, thereby significantly improving experimental safety. Based on this instrument, the wide-temperature range filtration-type composite structure plugging fluid was developed; by optimizing the dosages of the main agent and suspending agent, plugging formulations adaptable to different fracture widths were formulated. Experimental results show that the plugging fluid can effectively seal 1~3 mm fractures, with a consolidated strength of ≥ 8 MPa and a drillability grade of 2~3. Field applications in 24 wells demonstrate a one-time plugging success rate of 87.5%, with normal circulation restored and no leakage after operations. The results indicate that the instrument and plugging fluid significantly

收稿日期:2025-09-16; 修回日期:2025-12-25 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.024

基金项目:川庆钻探长庆钻井总公司基金项目(编号:CQ2024B-11-27-3-Z)

第一作者:朱明明,男,汉族,1985年生,工程师,应用化学专业,从事钻井液及防漏堵漏工作液研究与开发工作,陕西省西安市未央路151号, sz10253519195@163.com。

引用格式:朱明明,刘朝峰,张延兵,等.基于数字孪生系统的可视化缝隙评价仪及堵漏工作液研究[J].钻探工程,2026,53(S1):207-212.

ZHU Mingming, LIU Chaofeng, ZHANG Yanbing, et al. Research on visual fracture evaluation instrument based on digital twin system and plugging fluid[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):207-212.

enhance the safety and efficiency of plugging evaluation, providing an intelligent solution for the effective treatment of fractured loss zones.

Key words: digital twin; fracture evaluation instrument; plugging fluid; composite structure plug; filtration type; visualization; fracture sealing; field application

0 引言

桥塞材料在堵漏领域应用占比60%以上,涵盖刚性粒子、纤维、架桥材料等多种类型^[1-4]。目前国内通用的API堵漏仪器仅有高温高压滤失仪(OFITE HTHP滤失仪)和API静态堵漏评价仪两种。近年来,国内院校虽研发了如DL-3A型高温高压堵漏评价仪、XAN-D型小型堵漏评价仪、JLX-2型动态堵漏试验仪、FA型无渗透滤失仪等多种堵漏评价仪器,但仍普遍存在需人工近距离操作、传感器连接繁琐、数据稳定性差、评价失真、处理效率低、安全性难以保障等不足^[5-8]。与此同时,数字孪生技术在工业监测与控制领域得到广泛应用,在钻井装备智能化、智能钻井系统构建等方面已取得初步进展,但其在堵漏评价仪器中的应用仍处于探索阶段。为解决上述技术难题,本研究通过构建三维可视化控制界面、开发物理感知跟踪体系及实验管理平台,研制了一套基于数字孪生系统的可视化缝隙评价仪,在保障高效精准堵漏评价实验的同时,大幅提升了实验安全性。依托该仪器,研发了一套宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液,实现了对不同漏失通道的高效封堵,一次堵漏成功率达87.5%,现场应用效果显著。

1 可视化缝隙评价仪

为最大限度满足堵漏实验中可视化观察堵漏材料进入漏层过程及封堵效果的需求,研制了一台可视化缝隙评价仪(图1)。同时,基于数字映射方法,对该仪器进行数字赋能,形成了一套基于数字孪生系统的可视化缝隙评价仪。该仪器具有以下功能。

(1)分区温控:上下分区独立温控,温度调节范围30~95℃,升温速率1~30℃/min可调,温控精度±1℃,可模拟堵漏材料在漏层温度条件下的封堵效果。

(2)仿岩壁特征:中心管内壁采用贴砂工艺,高度还原井壁和裂缝表面粗糙度,真实体现堵漏材料与岩石表面的黏合度。

(3)透明视窗观察:承压筒设有透明视窗,可目视观察堵漏材料反应变化及渗入模拟砂层状态。

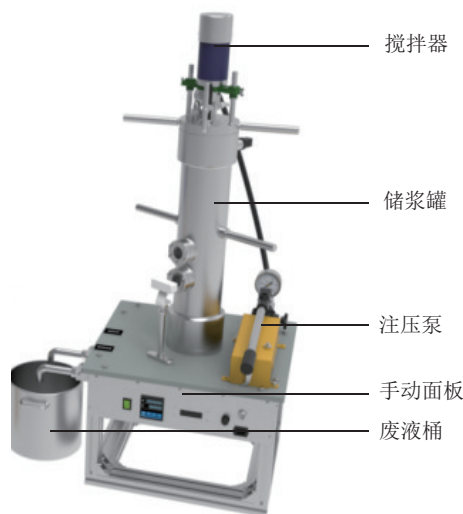


图1 可视化缝隙评价仪

(4)便捷更换结构设计:承压筒采用可更换设计,若材料固化无法清理,可便捷更换。

(5)高承压能力:最高承压能力达5 MPa,相较于老式FA型无渗透滤失仪(承压1 MPa),提升400%。

(6)仪器尺寸:主体尺寸为800 mm(长)×600 mm(宽)×1200 mm(高),便于实验室布局与操作。

(7)视窗清晰度提升优化:采用高透光耐磨钢化玻璃视窗,配合内置LED光源系统,即使在浑浊浆液中仍可通过图像增强算法实现堵漏材料运移过程的清晰观测。

2 可视化缝隙评价仪数字赋能

2.1 物理感知跟踪体系

2.1.1 可编程逻辑控制器优选

可编程逻辑控制器(PLC)作为工业自动化核心设备,其性能直接影响实验仪器的运行效率与准确性。通过对国内外6款常用PLC的性能、通信能力、扩展性等参数进行对比分析(表1),国产XL5E-32T在性能、通信能力、扩展性、易用性及性价比方面表现优异,满足实验仪器需求。

2.1.2 工业通信协议优选

工业通信协议是实现设备间数据交换的关键。

表 1 国内外常用 PLC 对比分析				
品牌型号	处理速度	程序存储容量	数据存储容量	扩展性
西门子 LOGO	0.008 ms/指令	30 KB	10 KB	有限(可添加扩展模块)
西门子 S7-300	0.1 μs/指令	64 KB~8 MB	256 KB~1 MB	最多 32 个模块
西门子 S7-400	0.03 μs/指令	1~20 MB	1~4 MB	最多 21 个扩展单元
三菱 FX1S/FX1N	0.065 μs/指令	8~16 KB	8 KB	可扩展模块(模拟量、通信)
三菱 FX3U/FX3G	0.065 μs/指令	64~128 KB	32~64 KB	支持多种特殊功能模块
信捷 XL5E-32T	0.7 μs/指令	32 KB	32 KB	最多扩展 16 模块+1ED 模块

通过对 7 种常用工业通信协议的通信速率、实时性、设备兼容性、部署成本、维护难度及应用场景进行分析(表 2),结合仪器技术需求,确定 Modbus 协议在实验仪器通信中具有显著优势(实现简单、兼容性强)。

表 2 常用的工业通信协议对比分析				
通信协议名称	特点	使用范围	优势	注意事项
PROFINET	基于以太网,高时效性	过程控制,工厂自动化	灵活性高,性能优异	实现较复杂,成本较高
PROFIBUS	基于 RS-485/光纤,技术成熟	工业自动化,过程自动化	可靠性高,设备支持广泛	布线要求高,速率受限
Modbus	串行/以太网,协议简单	工业自动化,楼宇管理	实现简单,兼容性强	数据速率低,功能有限
Ethernet/IP	基于以太网,高速传输	工业自动化,过程控制	与 IT 系统集成良好	网络负载高,实施复杂
CANopen	基于 CAN 总线,实时性强	工业自动化,汽车电子	高可靠性,实时性强	距离受限,速率较低
DeviceNet	基于 CAN 总线,灵活配置	工业自动化,设备控制	易于集成,广泛支持	网络复杂度高,调试困难
BACnet	楼宇自动化协议,灵活性高	楼宇自动化,能源管理	标准化高,适应广泛	实施复杂,成本较高

2.1.3 无线物联传输网络选择

无线物联网技术为实验数据实时传输、远程监控与分析提供了便利。通过对常用无线物联网技术参数对比(表 3),结合实验需求、覆盖范围、数据

传输速率等因素,定制了 900 MHz Wi-Fi 方案,数据传输速率 1~5 Mbps,具有数据传输速率高、安全稳定性强、信号覆盖广等优势。

表 3 无线物联网技术对比分析						
方案名称	覆盖范围/m	功耗(发射电流)/mA	数据传输速率/Mbps	成本	安全性稳定性	典型延迟/ms
定制版 900 MHz Wi-Fi	200~500	80~150	1~5	中	高	20~50
蓝牙(BLE)	10~100	10~30	1~2	低	中	3~10
ZigBee	10~100	15~35	0.02~0.25	低	中	15~30
Wi-Fi(2.4 GHz/5 GHz)	30~100	100~300	10~600	中—高	高	5~20
LoRaWAN	1000~10000	20~50	0.0003~0.05	中	高	100~1000

2.1.4 多参数数据采集及呈现

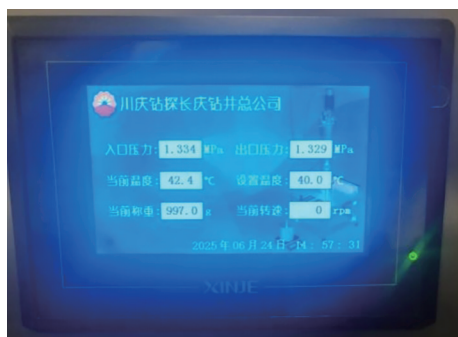
基于优选的信捷 XL5E-32T PLC,为获取实验所需的压力、转速、液面、温度等数据,选用信捷 XL-E4AD 模拟量扩展模块进行采集与传输。该模块可将 4 路模拟信号(电流/电压)转换为数字信号并传输至 PLC 主单元,采集精度达±0.5%FS(满量程),实现实时数据交互,同时选用信捷 TS5-700-E 高性能触摸屏,清晰展示压力、温度、转速等参数,便于操作人员快速掌握状态、分析趋势、诊断故障,

提升设备效率与安全性,如图 2 所示。

2.2 三维可视化控制界面

采用 3ds Max 软件进行零部件建模与装配。按设计要求装配螺栓等连接件、轴承等细节部件,明确各组件空间位置与相对运动关系,确保结构完整稳定。为各零部件赋予材料属性(金属、塑料等)并进行纹理处理,利用贴图技术模拟光照、阴影、反射效果,渲染呈现 3D 效果,提升模型真实感(图 3)。

实验数据通过 PLC、传感器采集,经无线通信



(a)数据展示界面



(b)实物展示

图2 多参数数据采集及呈现界面

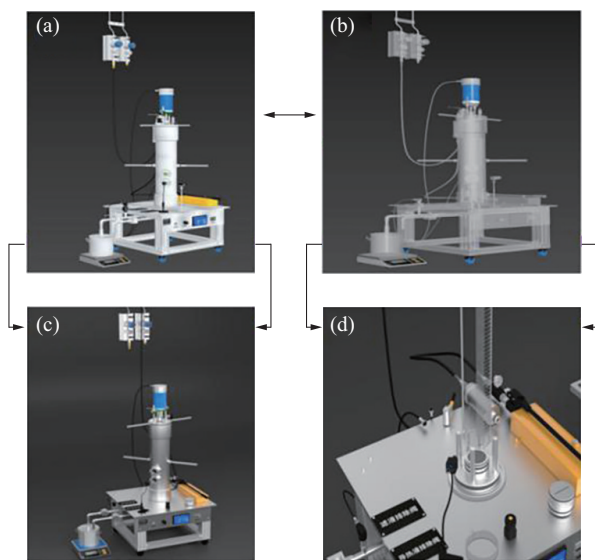


图3 可视化缝隙评价仪3D建模效果

模块(Wi-Fi)传输,电脑终端解码,与Unity(3D开发引擎)虚拟设备结合,通过编程语言和接口协议实现模型与实验数据的同步更新。

2.3 可视化缝隙评价仪实验管理平台

2.3.1 数据库管理系统

基于处理能力、框架支持、灵活性与可扩展性

等方面,优选Python高级编程语言;考虑数据存储、查询效率、事务处理及安全性需求,选用MySQL数据库。该系统满足数据存储、高效查询、事务处理需求,并具备良好的安全性与可扩展性。

2.3.2 可视化缝隙评价仪软件界面

仪器软件界面含物联传感实验系统(图4)、视频管理平台(图5)两个模块,具备实验管理、实验数据展示、实验报告编写导出等功能,实现了数据资源的最大化利用,提升实验管理效率。



图4 物联传感实验系统

2.4 数字孪生系统对工作液的适用性要求

本评价仪适用于黏度 $\leq 200 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、固相含量 $\leq 30\%$ 、温度 $30\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的堵漏工作液评价。系统通过高精度传感器(压力 $\pm 0.1 \text{ MPa}$ 、温度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)实时采集数据,结合三维可视化模型同步展示浆液在裂缝中的运移与封堵过程,适用于桥塞浆、水泥浆、复合结构浆等多种堵漏体系的可视化评价。

3 宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液

长庆区域漏失类型多样,现有堵漏材料多达十余种,常因裂缝尺寸与堵漏材料不匹配导致“封门”、“留不住”等问题,一次堵漏成功率低^[8-12];常规水泥浆虽适用性广,但固化后收缩易产生微裂缝,且扫塞易形成新井眼,存在二次漏失及井下复杂风险^[13-17]。为解决上述难题,依托数字孪生可视化缝隙评价仪,研发了宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液。该工作液适应性强、稳定性好,能有效封固 $1\sim 3 \text{ mm}$ 裂缝,固化后体膨胀 $\geq 5\%$,可钻性级别 $2\sim 3$ 级,在实现高效封堵的同时避免井下复杂。

3.1 滤失型复合结构塞体主剂

滤失型复合结构塞体主剂(GS-1)由硅藻土、渗

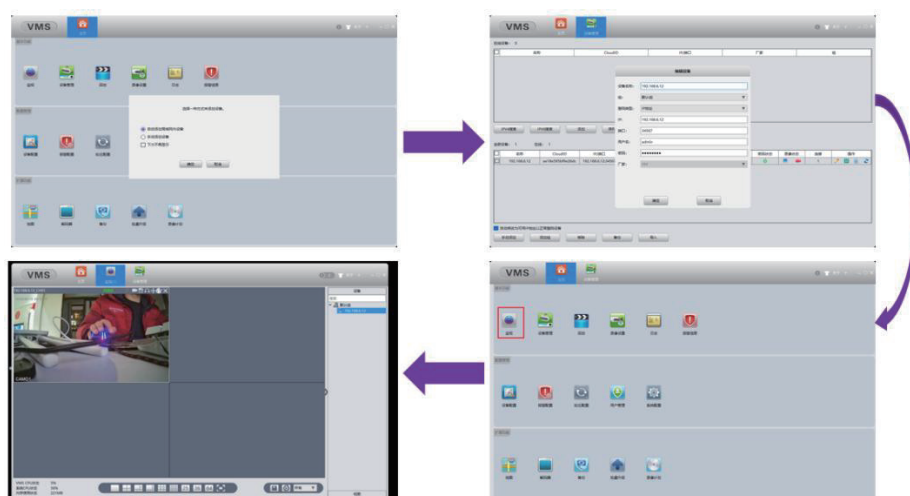


图5 视频管理平台

滤性材料、惰性材料等按一定比例复配而成,其粒度分布: $D_{10}=2.14\ \mu\text{m}$ 、 $D_{50}=20.47\ \mu\text{m}$ 、 $D_{90}=92.12\ \mu\text{m}$ (图6)。150℃条件下质量损失率9.9%,满足多种漏失类型堵漏需求。

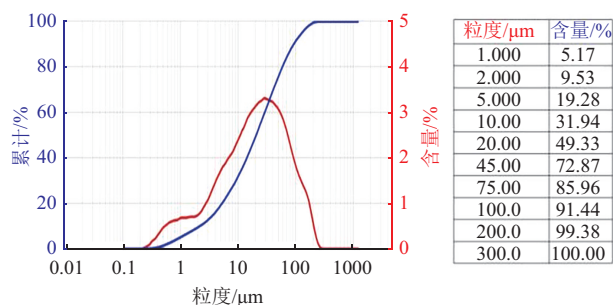


图6 滤失型复合结构塞体主剂粒度分布

3.2 滤失型复合结构塞体悬浮剂的加量

滤失型复合结构塞体悬浮剂粒径 $\leq 100\ \mu\text{m}$,清水虽基本满足悬浮性,但因现场施工等停时间难以保障,需确保浆体具有强悬浮稳定性,避免析水分层。优选水化白土(水化 $\geq 4\ \text{h}$)作为悬浮剂,采用静置沉降法评价其稳定性(表4)。

由表4可以看出,悬浮剂加量为1.0‰时,静置2 h后清水析出率仅为4%,满足现场施工要求。因此,确定悬浮剂的最佳加量为1.0‰。

3.3 数字孪生可视化缝隙评价仪缝隙评价实验

采用该评价仪进行缝板承压评价(1~3 mm长缝板)。实验步骤:(1)启动物理感知跟踪体系;(2)启动三维可视化控制界面;(3)启动实验管理平台;

表4 悬浮剂加量优选

清水/ mL	悬浮 剂/‰	主剂/%	静置时 间/h	上层清 水/mL	清水析 出率/%
500	0.2	20	2	70	14.00
500	0.4	20	2	60	12.00
500	0.6	20	2	55	11.00
500	0.8	20	2	38	7.60
500	1.0	20	2	20	4.00
500	1.2	20	2	19	3.80

(4)安装缝板;(5)加入500 mL堵漏浆;(6)电脑端设置参数;(7)进行实验;(8)生成数据报告。通过多组实验,针对不同裂缝宽度优选6种承压堵漏配方(表5)。

由表5可知,针对1 mm漏失通道优选配方2,针对2 mm漏失通道优选配方4,针对3 mm漏失通道,优选配方6。该配方通过主剂GS-1在压差作用下瞬间失水形成固结塞段,通过NTBASE架桥支撑,进一步提升抗压强度,固化后强度均 $\geq 8\ \text{MPa}$,满足现场堵漏需求。

4 宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液现场应用

4.1 现场应用统计

基于数字孪生系统的可视化缝隙评价仪优选的宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液现场应用24口井,其中21井次一次堵漏成功,一次堵漏成功率为87.5%。应用井裂缝宽度范围为1~5 mm,井温涵盖40~110℃,以当量密度计地层承压能力

表5 缝板承压能力评价

序号	配 方	缝板/mm	滤失量/mL	承压/MPa	固化强度/MPa
1	清水+1.0‰水化白土+15% GS-1	1	410	1.2	8.0
2	清水+1.0‰水化白土+20% GS-1	1	200	3.0	8.5
3	清水+1.0‰水化白土+20% GS-1+5% GT-MF	2	400	1.5	8.5
4	清水+1.0‰水化白土+20% GS-1+5% NTBASE	2	215	3.2	8.6
5	清水+1.0‰水化白土+20% GS-1+5% NTBASE	3	420	1.2	8.8
6	清水+1.0‰水化白土+20% GS-1+10% NTBASE	3	180	3.1	8.8

提升0.07 g/cm³。施工过程中扫塞钻压仅需10~20 kN,未出现井下复杂情况,实现了恶性井漏的高效治理。

4.2 典型案例现场应用

苏东35-X井为6½ in(Ø165.1 mm)小井眼定向井,钻进至2758 m(刘家沟组)发生失返性漏失。先后采用常规桥塞浆两次、注水泥堵漏两次均无效,后采用宽温带滤失复合结构塞体堵漏工作液进行高承压堵漏。

堵漏施工工艺:光钻杆下至井深2750 m,泵入配制的堵漏工作液15 m³,配方为清水+1.0‰水化白土+20%GS-1+5%NTBASE,起钻至井深2000 m关井挤封;第一次挤入堵漏工作液3 m³,最高套压1.5 MPa,第二次挤入堵漏工作液2 m³,最高套压2.5 MPa,第三次挤入堵漏工作液3 m³,最高套压3.5 MPa,稳压2.5 MPa(10 min),憋压6 h后开井循环,钻井液返出正常;下钻至井底循环无漏失,恢复钻进,一次堵漏成功。

5 结论

(1)研制的基于数字孪生系统的可视化缝隙评价仪,融合三维可视化控制界面、物理感知跟踪体系和实验管理平台,该仪器采集精度±0.5%FS、数据传输速率1~5 Mbps、系统连续运行稳定性>99.5%,可模拟1~5 mm裂缝宽度,高承压堵漏实验过程中实现远程操作,最大限度降低实验安全风险。

(2)依托该仪器研发的宽温带滤失型复合结构塞体堵漏工作液,可有效封堵1~3 mm裂缝,兼具桥塞浆与水泥浆双重优势,克服了“封门”、“留不住”及易形成“新井眼”等技术难题。该工作液形成的固化体强度≥8 MPa,可钻性级别2~3级。现场应用24口井,其中21井次一次堵漏成功,一次堵漏

成功率87.5%,大幅提升了裂缝性漏失井的堵漏时效。

参考文献:

[1] 孔二伟,王利锋,韩子辰,等.裂缝型漏失地层钻井液防漏堵漏数值模拟研究[J].钻探工程,2025,52(4):46-53.

[2] 李强,朱宣泽,赵雄虎,等.环境响应性智能材料在油田中的应用与研究进展[J].油田化学,2025,42(2):372-380.

[3] 赵少伟,杨进,杨奇奇,等.渤海油田深层钻探井漏综合治理技术[J].石油钻探技术,2025,53(3):84-89.

[4] 高伟,范胜,齐彪,等.碳酸盐岩储层高酸溶多级架桥暂堵型钻井完井液体系[J].钻井液与完井液,2024,41(5):589-602.

[5] 张睿辉,史俊,王立玮,等.复合胶结堵漏工作液的制备及性能研究[J].石油化工应用,2022,41(11):81-85,95.

[6] 严君凤,吴金生,蒋炳,等.高温高压堵漏评价仪器的研制[J].钻井液与完井液,2021,38(2):212-217.

[7] 段志伟,马春旭,马云朋,等.堵漏模拟评价装置研究进展[J].广州化工,2025,53(7):19-21,29.

[8] 肖剑,任胜利,王伟,等.数据科学在钻井工程防漏堵漏技术中的应用[J].化工管理,2020,(29):56-57.

[9] 朱明明,屈艳平,刘磊.纤维塑凝固化剂CQDL-1堵漏技术研发与应用[J].化学工程与装备,2017(1):68-70.

[10] 丰彩君.在施工过程中运用固体堵漏剂工艺提高注水泥塞一次成功率[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(15):36.

[11] 钱维丽.塔河油田托普区块二叠系堵漏技术的研究与应用[D].西安:西安石油大学,2011.

[12] 雷少飞,肖超,宋碧涛,等.热塑性温敏黏连树脂堵漏剂制备及其黏结作用机理[J].钻井液与完井液,2025,42(5):609-616.

[13] 朱明明,孙欢,屈艳平,等.鄂尔多斯盆地东部深层煤层气防漏堵漏技术[J].钻井液与完井液,2025,42(3):343-349.

[14] 王昭翔,肖志海,罗烈强,等.鄂尔多斯盆地东部煤岩气水平井护壁水泥浆研究[J].石化技术,2025,32(4):233-235.

[15] 张婧,衡德,徐兴海,等.页岩地层油基高滤失承压堵漏技术[J].特种油气藏,2025,32(4):143-148.

[16] 朱明明,孙欢,孙艳,等.陇东致密油区域恶性出水漏层堵漏技术[J].石油钻探技术,2023,51(6):50-56.

[17] 余运虎.多级承压堵漏技术研究与运用[J].石化技术,2024,31(7):140-142.

(编辑 王跃伟)