

红星区块漏失机理分析及堵漏技术研究



林子旸*, 刘俊君, 汤雨朦

中国石化江汉石油工程公司, 湖北武汉 430000

摘要: 红星地区构造上处于川东高陡褶皱带石柱复向斜(齐岳山断层以西), 地理位置位于湖北省利川市、重庆市石柱县境内, 面积3000平方千米, 主体为山地地貌, 地面海拔600-1600米。通过总结完钻井井史资料, 区块内钻井施工中漏失普遍发生, 处理复杂所需时间占比过高, 严重影响钻井施工效率, 主要漏失层位为沙溪庙组、嘉陵江组、飞仙关组、长兴组、吴家坪组, 以诱导性裂缝漏失为主, 少量渗透性漏失。沙溪庙组漏失量最高, 达到17279.76方, 占比45.45%。吴家坪组发生井垮、井漏等复杂分别占比58.18%。针对红星地区井漏风险高、漏失量大、堵漏成功率低等难点, 分析研究红星地区漏失机理, 构建适用于红星区块裂缝型地层堵漏体系配方, 形成特色堵漏技术研究, 提高一次性堵漏成功率, 有效解决该区块漏失风险。

关键词: 井漏机理; 堵漏体系; 封堵性

DOI: [10.57237/j.jest.2023.05.002](https://doi.org/10.57237/j.jest.2023.05.002)

Analysis of Leakage Mechanism and Research on Sealing Technology in Hongxing Block

Lin Ziyang*, Liu Junjun, Tang Yumeng

Sinopec Jianghan Petroleum Engineering Company, Wuhan 430000, China

Abstract: The Hongxing area is structurally located in the Shizhu syncline (west of Qiyueshan fault) of the high and steep fold belt in eastern Sichuan. It is geographically located in Lichuan City, Hubei Province, and Shizhu County, Chongqing City, covering an area of 3000 Square kilometre. The main part of the area is mountainous terrain, with a ground elevation of 600-1600 meters. By summarizing the historical data of drilling wells, during drilling construction in the block, leakage generally occurs. The proportion of time required to handle complexity is too high, which seriously affects the efficiency of drilling construction. The main leakage layers are Shaximiao Formation, Jialing River Formation, Feixianguan Formation, Changxing Formation and Wujiaping Formation, which mainly induced crack leakage, with a small amount of permeability leakage. The leakage of Shaximiao Formation is the highest, reaching 17279.76 cubic meters, accounting for 45.45%. The complex occurrence of well collapse and leakage in the Wujiaping Formation accounts for 58.18%, respectively. In response to the high risk of well leakage, large amount of leakage, and low success rate of plugging in the Hongxing area, analysis and research are conducted on the leakage mechanism in the Hongxing area, constructing a formula for plugging fractured formations in the Hongxing block forming a unique plugging technology research, and effectively solving the leakage risk in this block.

Keywords: Well Leakage Mechanism; Sealing System; Sealing Characteristics

基金项目: 中国石化重大科技项目“红星二叠系页岩气有效开发关键研究”(P22507).

*通信作者: 林子旸, linzy9479@163.com

收稿日期: 2023-11-13; 接受日期: 2023-12-06; 在线出版日期: 2023-12-27

<http://www.energyscitech.org>

1 引言

红星地区主体位于石柱复向斜，被区域断裂齐岳山和方斗山所夹持，整体变形较弱，保存条件好；发育为三排雁列式构造，分别对应建南区块、三星区块和龙驹区块；整体形态为“两凹夹一隆”构造格局，主要钻井位于中央隆起带及南北延伸方向，区内主要发育太平镇、跨石庙断层。通过前期 8 口井钻探结果分析，红星地区地层稳定性较差，嘉陵江组、飞仙关组、吴家坪组、长兴组多层位断裂带，裂缝、微裂缝发育明显，漏、垮风险比例较高。井漏复杂概率>81.5%，漏失钻井液超 2 万余方，严重影响钻井施工及后续页岩气开采[1, 2]，针对以上问题，分析研究红星地区漏失机理，形成针对性防漏堵漏工艺技术，有效解决红星地区漏失复杂。

2 红星区块故障复杂分析

2.1 井漏井垮复杂统计

统计红星区块已钻井漏失、垮塌、卡钻、断钻具等复杂情况表明，沙溪庙组、凉高山组存在漏失，嘉陵江组嘉一段、飞仙关组、水平段吴二段等层位存在垮塌、漏失，吴家坪组页岩页理发育，脆性矿物含量高、主应力差异较大，密度窗口小，易引起井壁垮塌[3]。

导眼段二叠系以上地层漏失井占比达到了 88.9%。主要漏失层位侏罗系、嘉陵江组，飞仙关组，漏失普遍，漏失量大；次要漏失层位长兴组；均以裂缝性漏失为主，少量渗透性漏失。

水平井二叠系以上地层漏失井占比达到了 83.3%。主要漏失层位飞仙关组、长兴组与吴家坪组，漏失普遍；次要漏失层位侏罗系、嘉陵江组；以裂缝性漏失为主，少量渗透性漏失。飞仙关组、水平段吴二段等层位存在垮塌、漏失。其中统计的 8 口井中沙溪庙组发生漏失的占比高达 50%。

2.2 复杂原因分析

红星区块构造沉积演化复杂，三维区断裂主要以 4-5 级断裂为主，条数 121 条，断距离普遍小于 50m，整体呈现中部及北部欠发育，南部发育的特征，2 级断裂及 3 断裂发育 6 条，主要位于红星地区东西两侧边界及东南一带。其中太平镇断层断穿至侏罗系地层，最大延伸长度超 50km。

页岩碳酸盐岩矿物含量高，隔夹层多，裂缝及地应力分布复杂，可压性描述难度大，页岩非均质性强，品质特征及纵横向变化规律不清长兴组和吴家坪组都含有硅质，最高含量达 20%，地层研磨性强，可钻性差，自侏罗系-上三叠徐家河为陆相地层，以砂泥岩、泥质砂岩互层为主，以下海相沉积，自上而下发育大套泥质灰岩，灰色灰岩，灰黑色页岩等，目的层吴家坪组页岩页理发育，脆性矿物含量高、主应力差异较大导致井壁易失稳，导致漏失、垮塌等复杂频发，现用钻井液体系难以形成有效的抑制，严重影响页岩气后续有效开采。

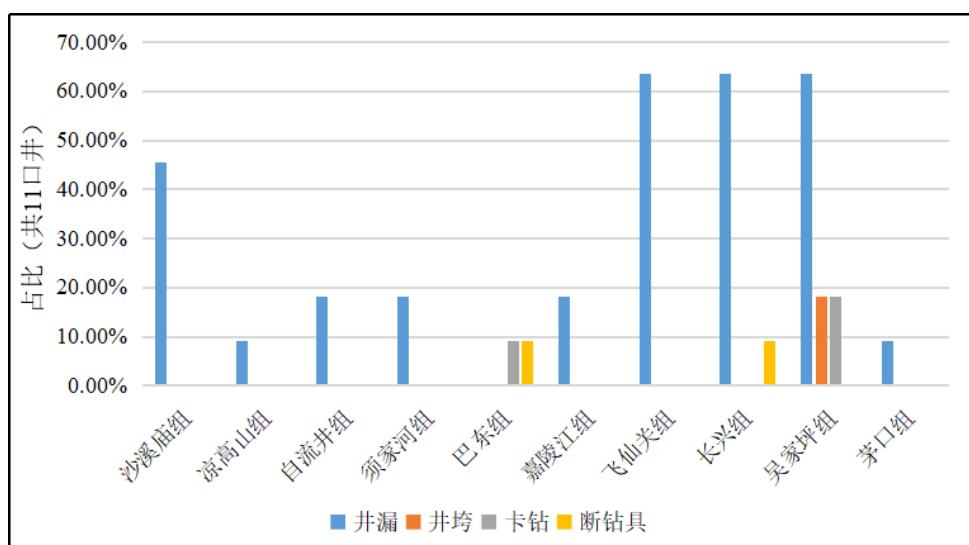


图 1 已钻井分层段故障复杂统计

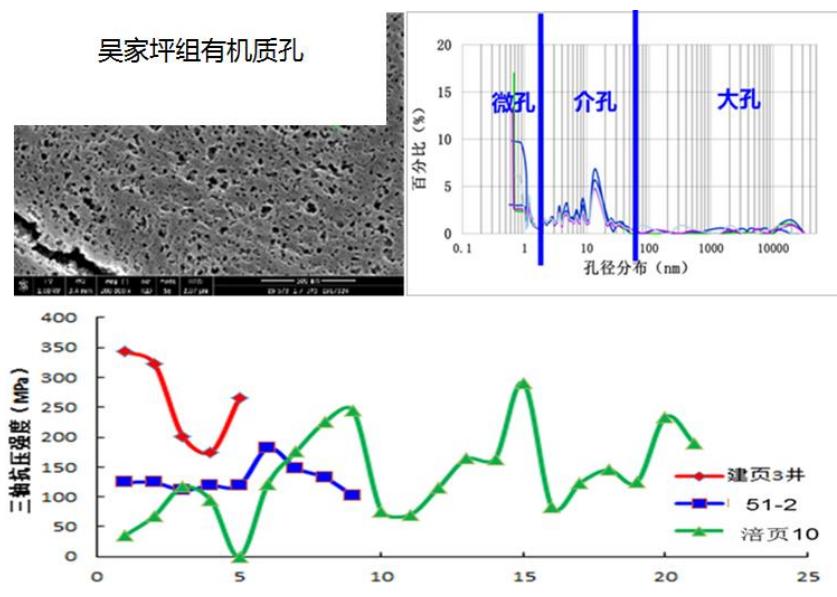


图 2 已钻井分层段故障复杂统计

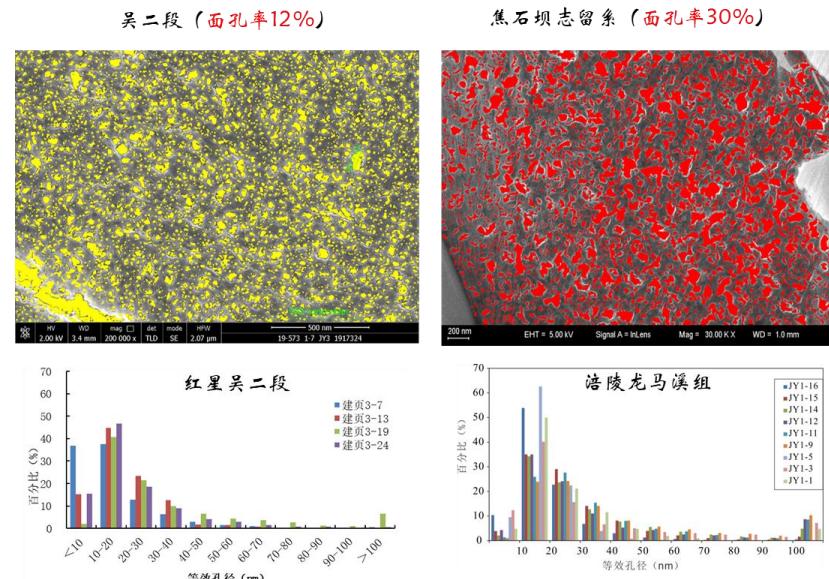


图 3 红星、焦石目的层段孔隙分布对照图

3 漏失机理分析

3.1 页岩水理话性能影响

页岩井漏、井壁稳定性与水理性密切相关，主要表现为以下几方面：

- (1) 吸水性---比表面积较小、孔径很小，亲水强，页岩的吸水率一般为 0.5-3.2%；
- (2) 软化性---抗张强度较低、抗压强度中等、抗剪强度低；浸水饱和后抗压强度降低的性质，页岩的软化系数为 0.24~0.74，亲水性和可溶性矿

物、大开空隙越多，软化性较强，软化系数较小，工程地质性质较差；

- (3) 膨胀性---阳离子交换量和亚甲基蓝容量均较低线性膨胀率较小、回收率中等偏低、岩石吸水后体积增大引起岩、石结构破坏的性能；
- (4) 崩解性----被水浸泡，内部结构遭到完全破坏呈碎块状崩开散落的性能，页岩具有强烈崩解性，短时间内即发生崩解。

实验结果表明，随着时间延长，裂缝持续扩展，到了 2h 试样整体已经破坏

底部为扩展趋于结束区，中部为快速扩展区，上

部为发展区, 含水饱和度变化越剧烈的位置, 整体裂缝的宽度变化速度越大, 裂缝逐步向四周延伸, 钻井

液内固相材料在压力作用下仍无法对裂缝形成有效支撑, 进一步增大井漏、井垮等复杂概率。

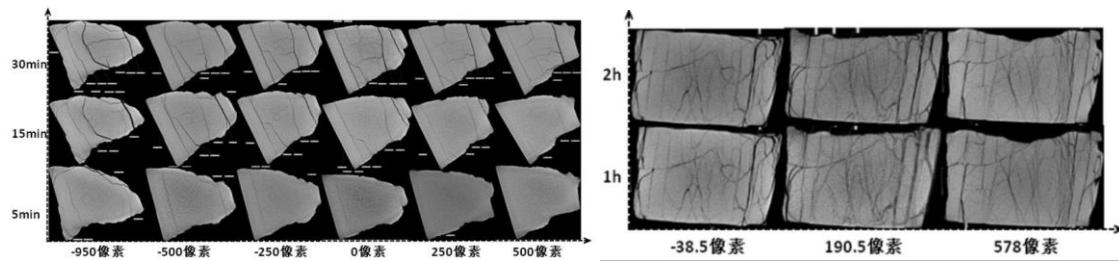


图4 岩页自吸水化裂缝演化过程 (5min-2h)

结合实验数据结果, 建立拟合方程, 模拟页岩裂缝变化规律, 对页岩裂缝宽度变化数值化模拟。

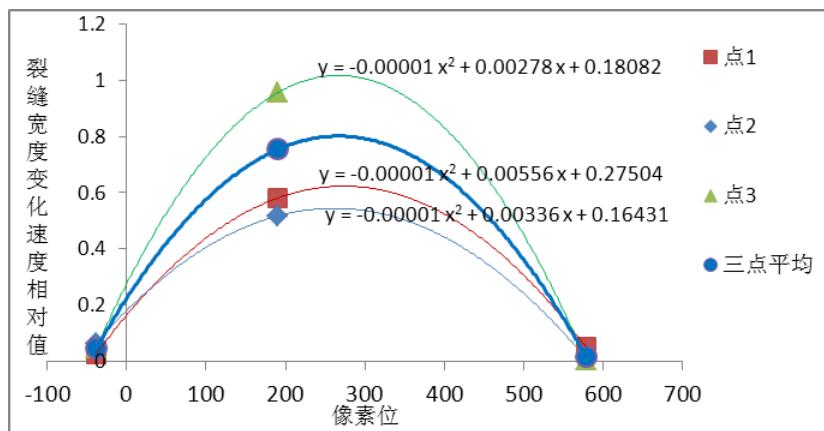


图5 岩页裂缝宽度变化速率曲线

3.2 地质层位构造影响

结合实钻漏失量及漏速结合地层岩性综合分析, 区块南部地层沙溪庙组底部存在裂缝型破碎带导致钻井液漏失。结合目的层构造图分析, 沙溪庙-凉高山组漏失与东侧 III 级大断裂 (垮石庙断层) 存在一定关系, 延伸长度超 30km, 断裂两侧发育一些列次级断裂带。受断层或变形影响, 接触面附近存在局部裂缝及溶蚀作用影响形成较大的漏失层。

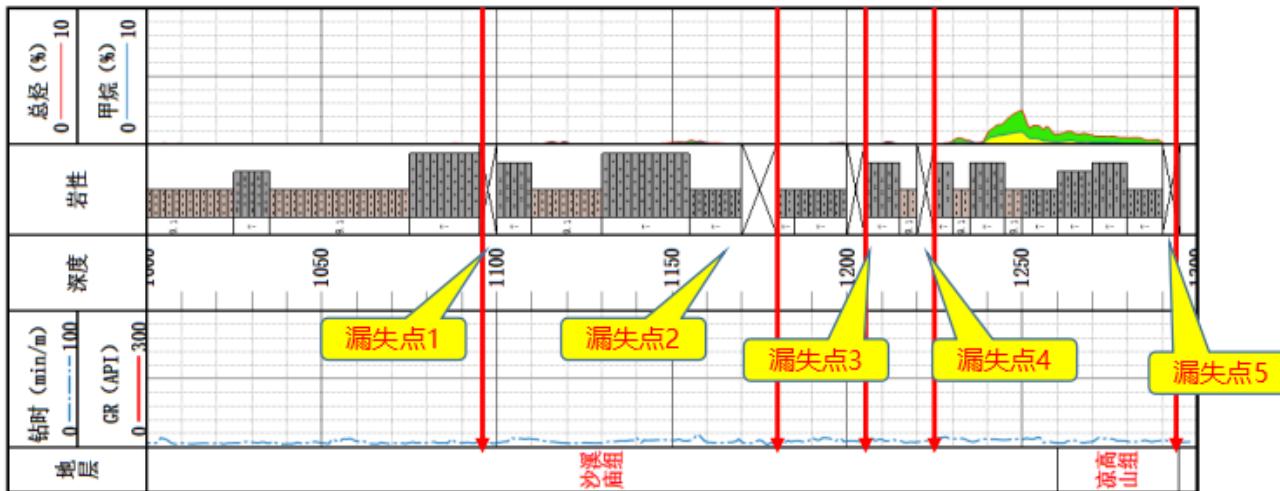


图6 红页 XX 井综合录井图

目的层段吴家坪-茅口组水平段钻进过程中,由于钻井液密度偏低而导致的井垮较为突出,整体水平缝较为发育,以层理缝为主,水沿层理易快速渗透易造成井壁垮塌,电测情况表明,测量井段内嘉一段-吴二段、茅四段下部-茅三段井眼均无明显扩径明显,吴-段-茅四段中上部井眼扩径最明显,井眼扩大率9.72%。

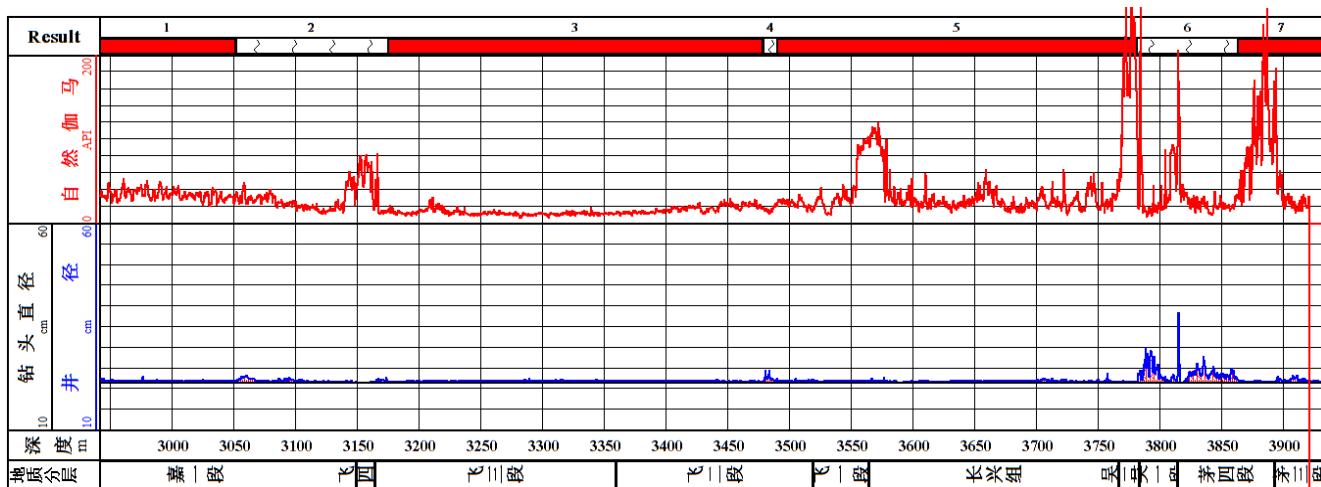


图 7 电测扫描图

3.3 钻井液体系性能影响

通过调研红星区块现用水基、油基钻井液体系结构,分析可以看出,红星区块地质差异性较大,密度窗口较窄,目的层地层压力系数差异大(吴家坪组地层压力系数:1.10-1.35,吴二段最大、最小主应力差大:为11.04MPa,差异系数0.17,对合适的钻井液密度提出更高要求。如钻井液密度过小,则出现剪切裂缝,钻井液密度过大,出现张性裂缝,裂缝产生加剧井壁失稳[4-6]。

结合实钻钻井液井史,已完钻井开钻密度范围区

间为 $1.36\text{-}1.38\text{g/cm}^3$,进入水平段密度 $1.40\text{-}1.42\text{g/cm}^3$,完钻密度 $1.45\text{-}1.55\text{g/cm}^3$ 。对钻井液整体配方分析可知,现用钻井液体系内封堵材料仍以细目钙、随钻封堵剂等常规材料为主,其粒径分布差异较大,无法对地层裂缝形成有效填充,随着钻进深度增加,钻井液终切增长速率过大(20-35Pa),钻井液流型变化幅度大,流态缺乏稳定性,进而导致钻井液携岩携砂不畅,造成环空憋压、压漏地层等井下复杂。

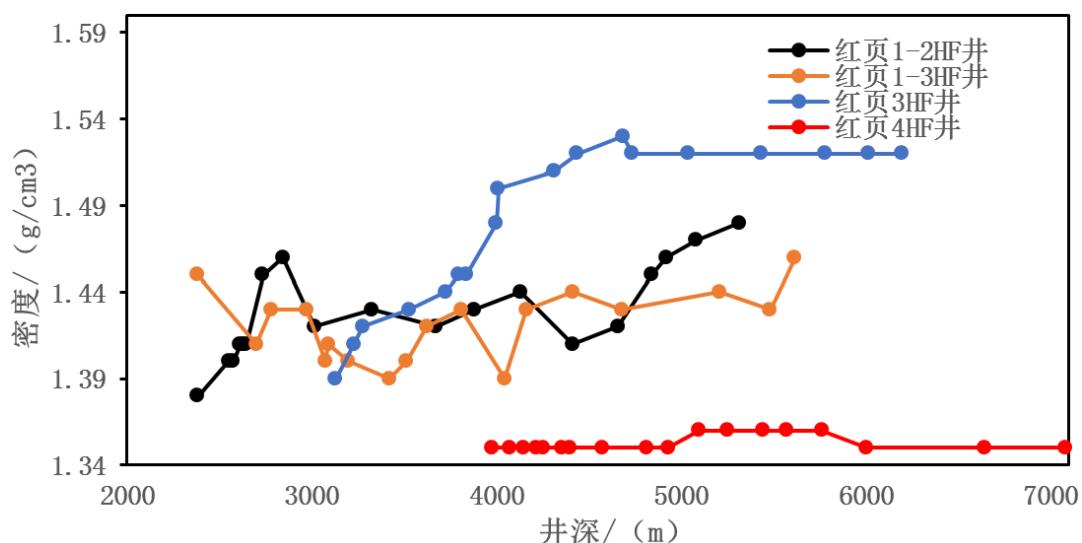


图 8 红星区块部分井密度变化曲线

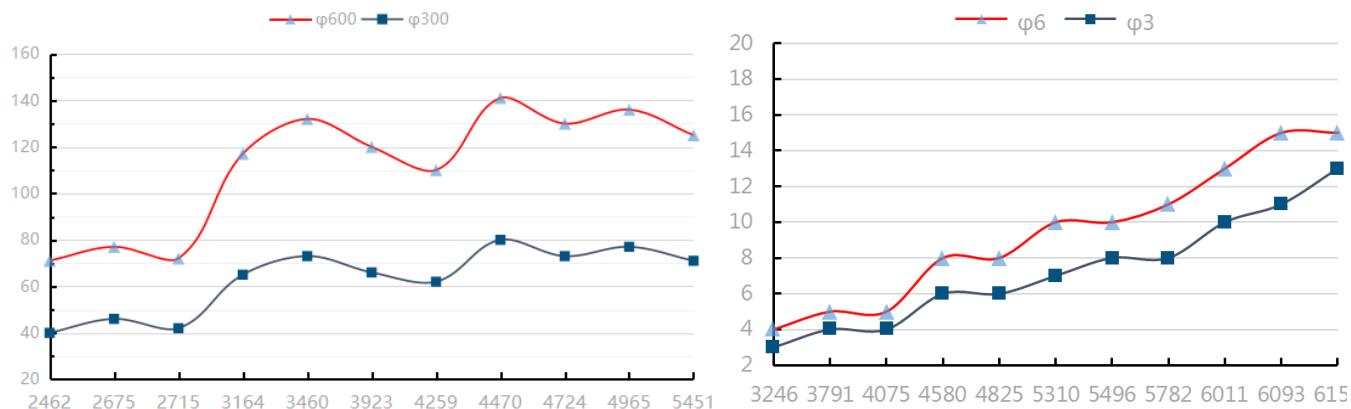


图 9 红页 XX 井流变性能变化曲线

如下表所示, 在处理井漏复杂过程中, 常规堵漏材料中的核桃壳、超细碳酸钙、随钻植物纤维粉等材料对钻井液整体性产生较大影响, 因此, 在后续研发过程中应逐步开展相关材料研发及体系优化, 保持钻井液性能稳定。

表 1 封堵材料对钻井液性能影响

配方	$\varphi 600$ /φ300	$\varphi 200$ /φ100	$\varphi 6$ /φ3	初切/终 切 Pa/Pa	AVmPa.s	PVmPa.s	YPPa	FLml	ES (V)	24h 静态沉降稳定性	
										上下密度差	析出清液
基浆	70/42	30/20	5/4	2.5/4.5	35	28	7	2.1	678/690	0.018	4.0ml
+15%核桃壳	颗粒粗, 无法测试							5.4	309/303	--	12.0ml
+15%细目钙	74/45	34/22	7/5	4/7	37	29	8	4.2	653/734	0.034	11.5ml
+15%随钻	>300/200	158/108	30/25	10/12	--	--	--	6.0	20/14	0.032	16.0ml

4 钻井液封堵性能优化

4.1 水基钻井液体系配方优化

依据“井眼强化理论、1/3~2/3 架桥规则、2/5~1/20 充填、双峰/多峰理论”等[7], 对架桥粒子、填充粒子、可变性粒子、封端口粒子、尖端粒子等材料进行优选级配, 并对封堵性能进行评价。

优化前水基钻井液配方: 4%-5% 土粉+0.25-0.3% 烧碱

+0.05% 纯碱+1.5% PAC-LV+0.5% FA367+2% SMP-1+1% 超细 800 目+1% 超细 1200 目+1% 液体润滑剂+3% 抗高温改性沥青+2% 随钻竹纤维+重晶石 (密度 1.25-1.28g/cm³)

优化后配方: 原配方+2% 封端口材料 (2% 10-20 目果壳颗粒)+6% 架桥材料 (4% 20-40 目果壳颗粒+2% 40-60 目果壳颗粒)+6% 填充材料 (2% 20-80 目云母片+2% 20-200 目弹性橡胶+2% 80-200 目单封纤维)+2% 尖端材料 (1% 超细 2000 目+1% 超细 3000 目)。

表 2 粒子粒径及加量优选

裂缝, mm	架桥粒子 (加量≥6%)		充填粒子 (加量≥4%)	
	1/3~1/2 架桥粒子	2/3~3/4 架桥粒子	1/4~1/6 充填粒子	1/10~1/20 充填粒子
开口缝宽: 1.00	0.33~0.50mm	0.67~0.75mm	0.16~0.25mm	0.05~0.10mm
中值缝宽: 0.75	0.25~0.38mm	0.50~0.56mm	0.125~0.18mm	0.0038~0.075mm
出口缝宽: 0.5	0.16~0.25mm	0.33~0.38mm	0.08~0.125mm	0.025~0.05mm
封端颗粒: 1.00-1.50	--	0.83~1.00mm	--	--
尖端颗粒: (参考重晶石≥325 目)	>900 目 0.015mm	>500 目 0.03mm		

优化后的水基钻井液体系配方能够对 0.28-0.92mm 微裂缝实现有效封堵, 承压可达到 18MPa。

表 3 动态裂缝封堵实验评价

温度 ℃	缝宽 mm	压力 MPa	时间 min	漏失量
120	0.28	0.34	5	0
120	0.28	0.74	5	0
120	0.33	3.5	5	0
120	0.33	5.16	5	0
120	0.49	7.11	5	0
120	0.70	10.15	5	0
120	0.83	12.06	5	0
120	0.83	15.04	5	6.01
120	0.92	18.56	5	40.58

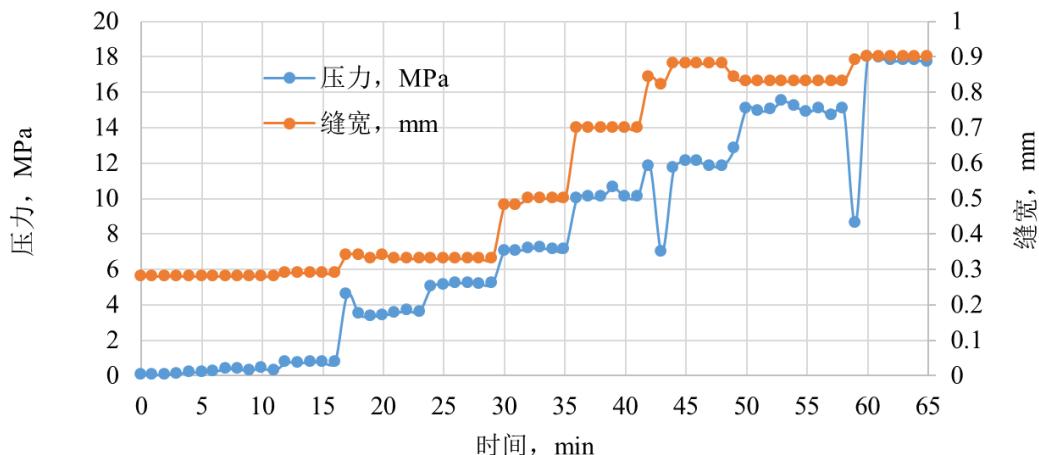


图 10 动态裂缝封堵实验曲线图

4.2 油基钻井液体系配方优化

石墨烯是一种将石墨高温处理后形成的微小碳粒，具有很高的纯度和晶态结构，其具有良好的弹性和可压缩性，抗温>425℃同时具有一定的承压强度，且不含烃类、重金属及硫质成分，无味、无毒，不与钻井液中的任何添加剂发生反应，作为油基钻井液封堵材料具有明显的优势[8]。

通过不同目数粗颗粒改性石墨级配架桥，配合3%石墨烯（尖端粒子）、3%沥青树脂（可变型粒子），能封堵住1.0-3.0mm微裂缝，承压达7MPa.

表 4 石墨烯在油基钻井液封堵性评价

钻井液体系	裂缝宽度, mm	漏失量, mL	承压强度, MPa	堵漏情况
油基钻井液（基浆）	0.5	全部漏完	0	不能堵住
基浆+3%改性石墨（TXT-850, 20-40 目）+3%TXT-500（40-80 目）+3%TXT-100（80-150 目）+3%石墨烯+3%沥青树脂（可变型）	1.0	45	7	能够堵住
基浆+3%改性石墨（TXT-850, 20-40 目）+3%TXT-500（40-80 目）+3%TXT-100（80-150 目）+3%石墨烯+3%沥青树脂（可变型）	3.0	74	7	能够堵住

5 结论

- (1) 红星区块地质构造复杂，断裂带发育明显是造成井漏频发的主要影响因素之一。
- (2) 页岩水化膨胀造成的井壁失稳进一步导致裂缝发育，增大井漏风险。

- (3) 钻井液体系结构及堵漏浆适配性造成环空压力增大，增大井漏风险。
- (4) 优选架桥、尖端粒子可有效的对0.28mm-0.92mm微裂缝形成有效封堵。
- (5) 石墨烯材料与油基钻井液具有良好的配伍性，可对1-3mm裂缝形成有效封堵。

参考文献

- [1] 车阳. 裂缝内支撑剂破碎特征实验研究 [D]. 中国石油大学 (北京), 2020. DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2020.001592.
- [2] 李文哲, 于兴川, 赖燕等. 深层脆性页岩井钻井液漏失机理及主控因素 [J]. 特种油气藏, 2022, 29(03): 162-169.
- [3] 舒逸. 沉积-成岩-构造联合控制下的涪陵页岩气富集机理研究 [D]. 中国地质大学, 2021. DOI: 10.27492/d.cnki.gzdzu.2021.000100.
- [4] 张薇. 破碎带地层钻探施工用化学堵漏剂的合成与应用 [D]. 中国地质大学 (北京), 2021. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000398.
- [5] 陈修平, 李双贵, 于洋等. 顺北油气田碳酸盐岩破碎性地层防塌钻井液技术 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(02): 12-16.
- [6] 万夫磊, 王培钢, 范生林. 川南页岩气钻井漏特征及堵漏技术研究与应用 [J]. 石油科技论坛, 2022, 41(02): 85-91.
- [7] 李伟, 白英睿, 李雨桐等. 钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 4733-4743.
- [8] 王晓军, 白冬青, 孙云超等. 页岩气井强化封堵全油基钻井液体系——以长宁—威远国家级页岩气示范区威远区块为例 [J]. 天然气工业, 2020, 40(06): 107-114.