

川渝裂缝性漏失多级复合堵漏技术研究与应用

高峰 兰晓云 余婷 何雷 刘志华
(西部钻探工程有限公司钻井液分公司)

摘要: 提高地层承压能力的钻井液技术是扩展窄安全密度窗口钻井液技术的重要内容。通过分析国内外封堵机理及油基钻井液防漏堵漏技术与应用现状。多级复合堵漏封堵机理主要划分为刚性封堵理论、柔性封堵理论及提高地层承压能力理论; 堵漏技术主要包括随钻防漏堵漏技术、承压堵漏技术, 通过人为蹙挤钻井液多级复合材料进入地层裂缝, 从而提高地层的承压能力, 来达到防漏堵漏技术手段, 提高钻井液密度的安全使用上限, 保证在窄(或负)安全密度窗口条件下的安全钻进, 是油气勘探开发钻井的重要需求。

关键词: 油基钻井液; 防漏堵漏; 作用机理

井漏是钻井工程中最常见的技术难题之一, 目前在深层超深层、深水、非常规油气勘探中仍存在严重的漏失问题。井漏严重制约了钻井速度, 造成巨大的经济损失, 甚至对储层产生不可估量的损害。由于地层薄弱易破或本身就已经破裂, 钻井过程中经常发生低承压或者不承压性井漏。由井漏引起的井下复杂情况和由它诱发的其它各种井下恶性事故, 对钻井工程危害极大, 一直是石油工程界十分关注的问题, 该问题与窄安全密度窗口下的安全钻井紧密相关, 因其原因复杂、影响制约因素多, 使之成为国内外钻井工程至今仍未完全解决的重大技术瓶颈, 为了解决由于安全密度窗口过窄而产生的井漏问题, 亟需深入研究提高地层承压能力的钻井液理论与技术。

四川盆地及周缘是目前中国页岩气最丰富的地区, 但川渝页岩气区块地层断层发育、地层破碎严重, 在四开钻井作业中, 同裸眼存在多压力层系, 低易出、高易漏, 密度窗口窄等影响钻井提速复杂难题; 2023年在川南页岩气区块四开钻井作业中, 同裸眼存在多压力层系, 韩家店-石牛栏-龙马溪组地层压力高易出、裂缝发育易漏、密度窗口窄, 漏失主要表现为裂缝性漏失和诱导性漏失。目前针对川渝微裂缝的封堵材料的形状较单一, 无法对复杂的微裂缝进行封堵, 主要矛盾点是常规惰性堵漏材料在页岩裂缝中的自适应性差, 吸水膨胀类堵漏材料在油基钻井液中配伍性较差, 造成页岩地层油基钻井液堵漏效果也较差, 无法满足现场要求。

油基钻井液几乎不与水敏性地层矿物发生反应, 具有抑制性强、润滑性好、热稳定性好等优点, 有利于保持井壁稳定, 但成本和环境保护问题突出。近年来, 国内外研究人员在防漏堵漏理论与技术发展方面取得了一定成效, 在逐渐完善防漏堵漏封堵理论基础上, 充分利用堵漏材料与漏失地层之间的匹配关系, 对钻井液防漏堵漏具有十分重要的推动作用。

1. 国内外防漏与堵漏理论研究现状:

1.1 刚性堵漏理论。

刚性封堵理论是指固定形状和粒径的刚性堵漏材料, 在钻井液

柱压力作用下, 对漏失进行架桥, 充填堆积, 有效封堵漏失通道, 减少钻井液漏失。在封堵早期阶段, Csrl Gatlin 等研究人员提出了封堵层最大密度理论。通过室内试验, 分析不同粒径充填粒子的比例关系和最大惰性粒子的在漏失通道中的作用。A.Abrams 等研究人员提出“1/3架桥理论”, 堵漏材料最小架桥粒径应大于漏失通道中 1/3, 且架桥颗粒在钻井液中浓度不小于 5%, 才能有效架桥封堵漏失通道。“1/3架桥理论”仅验证架桥粒子最低临界条件, 并未对浓度、粒径进行优选。

罗平亚等在 A.Abrams “1/3架桥理论”基础之上进一步, 康毅力从数学角度分维数来优选堵漏剂尺寸, 利用堵漏材料的分维值表明粒径分布情况, 选择堵漏材料与漏失孔径分维值相同或相近, 达到最优匹配效果。李中等提出利用颗粒粒径体积分数和粒径平方根曲线图, 来优选不同粒径暂堵剂的粒径组合。

刚性封堵理论核心为架桥和充填封堵。充填封堵理论最初由河床密度与渗透率之间关系引入。架桥理论体系主要围绕架一级刚性桥堵材料尺寸与孔吼之间比例关系展开, 从“1/3架桥理论”的提出, 随后延伸出“2/3理论”围绕一级架桥颗粒选择范围和二级填充材料浓度与粒径选择范围, 堵漏材料与漏失通道匹配关系研究逐渐加深, 降低渗透率, 提高封堵强度。

1.2 柔性封堵理论。柔性封堵理论是指非固定形状和粒径的柔性封堵材料, 混入钻井液中, 在地层温度、压力和矿化度等联合作用下, 封堵材料自身形态发生变化, 如物理、化学变化, 在漏失通道中发生联结、溶胀等, 形成具有一定强度的承压封堵层, 降低钻井液漏失。吕开河等针对刚性堵漏颗粒与漏失裂缝匹配不佳等问题, 提出自适应堵漏剂来封堵孔隙和裂缝, 来克服桥接堵剂对漏失地层尺寸的依赖, 提高防漏堵漏成功率。刘伟等研制出一种与油基钻井液中配伍性良好的膨胀型防堵堵漏剂, 经适度交联形成三维网状结构, 具有一定的抗压和成膜能力, 封堵效果良好。

柔性封堵理论以架桥和充填封堵理论为基础, 利用封堵材料在漏

失通道中溶胀、联结等性能,在压差作用下可发生形变,在孔隙大小不同的地层有效驻留,充分考虑漏失地层的非均质性,作为刚性封堵的补充,进一步丰富了堵漏理论体系。

1.3 提高地层承压能力理论。提高地层承压能力理论是利用封堵材料加固井壁或形成封堵带,提高地层井壁的周向应力和井壁裂缝重启压力,本质上是调整地层岩石抵抗张行破坏的能力,来控制钻井液漏失。地层承压能力主要受地质因素和工程因素两方面影响。地质因素主要受地层孔隙压力、地层温度、岩石特性和裂缝类型等有关,提高地层承压能力理论中主要由“封尾”、“应力笼”和“裂缝闭合压力”组成。

相比之下,刚性堵漏理论是建立在刚性材料能否进入地层漏失通道基础之上的,没有考虑刚性材料的尺寸与地层漏失孔隙、裂缝尺寸之间的匹配关系,造成堵漏成功率较低;柔性封堵理论是建立在材料柔性形变后封堵漏失通道及出生,但柔性材料承压能力较低、材料耐温使用范围。提高地层承压能力理论是综合刚性堵漏理论和柔性封堵理论的优点,同时使用刚性材料和柔性材料封堵地层漏失通道,因此具有更广的应用范围和更佳的应用效果。

通过分析国内外各种类型的封堵理论与油基钻井液防漏堵漏技术实际应用效果,可以认识到:刚性封堵理论核心为架桥和充填封堵,提高材料与漏失通道的匹配关系;柔性封堵理论核心为通过物理、化学变化,在漏失通道中发生联结、溶胀等,形成具有一定强度的承压封堵层,降低钻井液漏失;提高地层承压能力理论核心是调整地层岩石抵抗张行破坏的能力,来控制钻井液漏失。封堵理论发展也是一个由浅及深的过程,从不同粒径充填粒子与漏失通道匹配关系开始,到利用数学角度优选堵漏剂的尺寸,并在发展过程中不断融合其他理论,更有效的封堵漏失地层。从“见漏就堵”逐渐演变为“以防为主、防堵结合”对影响漏失问题的认识逐渐加深,更有效封堵油基钻井液漏失问题。

2.主要研究内容

提高地层的承压能力钻井液技术是利用钻井液手段提高地层的破裂压力或是漏失压力,属于提高安全密度窗口上限,是在钻井过程中,优选处理剂以及随钻防漏颗粒在近井壁形成填塞层,通过人工方法添加一层隔离膜,阻止非致漏裂隙扩大漏失;是在停钻堵漏过程或是固井前提高承压能力堵漏过程中,通过添加堵漏颗粒,配置堵漏浆,通过挤注的方式给地层薄弱面或是致漏裂缝添加一层隔离层,提高地层漏失压力或是破裂压力。

2.1 压堵漏缝内压力分布研究

建立了承压堵漏封堵诱导裂缝方法评价,研究了裂缝中堵漏颗粒的作用和堵漏阻止裂缝扩延机理和提高承压能力机理,通过线弹性岩石力学及岩石断裂力学的理论与方法,建立了地层承压能力高低的实验评价方法。

2.1.1 先期承压堵漏阻止裂缝延伸技术的实质是在裂缝内建立起阻挡流体压力传递和流体介质通过的堵塞隔离层。堵漏材料在缝内某位置开始封堵,裂缝将被分为“缝尖端”和“隔墙段”两部由于封堵隔离带对流体压力具有阻挡作用,缝尖端内流体压力应低于井内钻井液的压力,而高于地层孔隙压力,即满足: $P_p < P_t < P_w$

人工隔墙在裂缝中的形成过程是流体占据的部分裂缝空间逐渐转变成由堵漏材料占据、由液压支撑裂缝壁面转变成堵漏材料支撑裂缝壁面的过程。人工隔墙与液压应当对裂缝壁面发挥着同样的支撑作用,其区别在于人工隔墙在支撑缝面的同时能更加有效地阻挡流体压力的传递。

对裂缝地层,封堵后承压能力的提高,主要取决于裂缝中形成的填塞层的强度和渗透性,它们取决于两个方面的因素:①与裂缝相匹配的架桥粒子的形状、尺寸、强度和浓度以及各级填塞粒子的合理级配和浓度。②各级桥塞粒子能顺利进入裂缝,不受严重干扰。只要粒径与裂缝尺寸相匹配,就能在某个位置卡住,起到架桥作用,小直径的颗粒填充裂缝,并最终堵死裂缝,就能形成牢固的堵塞层,提高地层承压能力。

堵漏成功的关键,很大程度上取决于对漏失通道的认识程度,包括漏层位置、漏失通道大小、漏层温度等因素。其中,漏失类型判断和漏失通道大小的识别尤为重要。

$$V(t) = wh\lambda = 2\sqrt{2}\sqrt{D_E t}wh = 2\sqrt{2}\sqrt{K_{\omega}\frac{k_f(p_w - p_f)}{\mu}}wh\sqrt{t}$$

式中, w 为漏层宽度; h 为漏层高度; K_f 为微裂缝等效渗透率; λ 为漏失深度;

D_E 为分子扩散系数; K_{ω} 为单相流体粘度扩散系数;取 $1w$ 为井底压力; P_f 为漏层压力; μ 为钻井液粘度

桥塞堵漏材料封堵隔墙形成过程中,设某一时刻隔墙有效渗透率为 $k(t)$,钻井液入口端面的有效空隙度为 $\Phi(t)$,封堵隔离墙的长度为 $L(t)$,钻井液液相在封堵隔离带的流动满足达西流动规律,且钻井液在隔离墙中的流量为 $Q(t)$,缝内流体压力为 $p_{frac}(t)$ 。根据渗流力学基本理论,可以得到任意时刻钻井液液相漏失速度:

$$Q(t) = w_f H_f \Phi(t) \frac{k(t)(p_w - p_{frac}(t))}{\mu L(t)} \quad (2-1)$$

随着桥塞材料的不断进入裂缝,并在裂缝内架桥和堆积,缝堵隔离墙的长度 $L(t)$ 将不断增大,若在桥接材料中加入变形材料和填充材料,钻井液入口端面有效渗透率 $\Phi(t)$ 将随着变形材料和填充材料的填充作用而减小,封堵隔离墙的有效渗透率 $k(t)$ 也将随着 $\Phi(t)$ 的降低而减小。由上式可以清楚地看出,钻井液在封堵隔离墙的漏失速度也将显著降低,若堵漏材料的级配合理,就能满足 $\Phi(t) = 0$ 和 $k(t) = 0$,即钻井液的漏失停止,此时缝内流体压力 $p_{frac}(t)$ 也降低为地层流体压力 P_p 。

设桥塞段钻井液入口端面的有效空隙度为 Φ_0 ，出口端面的有效空隙度为 Φ_1 ，根据力学平衡原理，桥塞两端面的作用力的差值应该由桥塞与裂缝之间的摩擦力 F_f 来平衡，即：

$$p_w w_f H_f (1 - \Phi_0) = p_{frac} w_f H_f (1 - \Phi_1) + F_f \quad (2-2)$$

$$F_f = p_w w_f H_f (1 - \Phi_0) - p_{frac} w_f H_f (1 - \Phi_1) \quad (2-3)$$

当 $\Phi_0 = 0$ 时，桥塞和裂缝面的摩擦力达到最大值，即：

$$F_{f\max} = w_f H_f (p_w - p_p (1 - \Phi_1)) \quad (2-4)$$

因此，桥塞堵漏了增大桥塞与裂缝面之间的最大静摩擦力，从而平衡了桥塞两端面的作用力之差。由封堵材料形成的堵塞层隔断了泥浆漏失，也隔断了裂缝扩张压力的传递。

2.2 承压堵漏裂缝的止裂条件研究

根据裂缝地层漏失机理，如果通过堵漏技术在裂缝缝内建立封堵裂缝的封堵隔离带，即可以增大流体在缝内的流动压降，也阻止了裂缝的延伸和扩展，同时提高了井壁岩石抵抗产生新裂缝的能力，这样就减少了漏失，提高了承压能力。

2.2.1 钻井液先期堵漏技术是扩展安全密度窗口的重要技术手段。揭示了给出了承压堵漏阻止诱导裂缝延伸的必要条件。堵漏材料在裂缝入口后一定距离封堵为封堵诱导裂缝的最佳位置形式；裂缝尖端部分流体压力必须低于最小水平主应力，且越低越有利于裂缝的阻裂。

2.2.2，诱导需要维持一定大小的周向诱导应力，这也是保证承压堵漏可以提高裂缝重启压力的一个重要实质。这个时候采用具有一定机械强度的堵漏材料可以更好的对诱导裂缝起到支撑作用，可以保证周向诱导应力不会随着裂缝内部的压力变化而发生巨大的改变。换句话说，裂缝的重启压力的大小就会等于裂缝的入口处的闭合应力的大小。由此可见，在提高地层承压能力的钻井液堵漏作用机理中，采取措施使得周向的诱导应力保持在一定的大小范围内，是这一机理的实质内容。这样，周向的诱导应力就能够保持在一定的大小范围上了，从而很好地保证裂缝的重启压力。

2.3 实验材料优选和配方研究

为了堵住漏层，必须利用各种堵漏物质，在距井筒很近范围的漏失通道建立一道堵塞隔墙，用以隔断漏液的流道。在提高地层承压能力堵漏实验中主要是利用桥塞堵漏的原理，对现有的堵漏颗粒堵漏机理进行研究，对现有的堵漏材料进行分析，优选出能在裂缝中形成高强度堵塞层的堵漏剂组合，设计评价实验判断该堵漏剂组合的封堵裂缝承压能力，并分析该堵漏剂组合是裂缝堵塞层强度提高机理，得出相应的现场使用工艺。常用的堵漏材料主要有纤维类堵漏剂、刚性颗粒类堵漏剂、可变形颗粒类堵漏剂、复合堵漏剂以及可凝固类堵漏剂。

实验室研究是在材料优选、建立的实验方基础之上进行配方研究，评价各种颗粒组合对裂缝封堵后堵塞层的承压能力。常规堵漏

材料有桥接堵漏材料、高失水堵漏材料、暂堵材料、化学堵漏材料、无机凝胶堵漏材料及软硬塞堵漏材料等。由于各种堵漏材料的性能有差异，这就使各种堵漏材料的堵漏机理也有所区别。堵漏材料进入到漏失通道以后，在油井内部压力、温度或化学反应作用下，以机械堆积或化学生成物堆积的方法，形成具有一定机械强度的封堵层，从而起到一定的堵塞作用。当桥接堵漏材料、暂堵材料、化学堵漏材料进入到漏失通道后，其中的纤维等材料起到“架桥”、“拉筋”作用，而其它的材料则填充到所形成的孔隙中，将大孔洞变成小孔洞，从而提高堵漏能力；高失水堵漏材料进入到漏失通道后，在钻井液压力和地层压力差的作用下，迅速失水形成滤饼。所形成的滤饼能够透气透水，但是钻井液不能通过，从而起到压实密封漏失通道的作用。这些材料在挤入地层后继续吸水膨胀，进一步提高地层裂缝封堵强度，而不容易再次发生漏失。

针对油基钻井液应用中井漏时有发生，堵漏效果欠佳的情况，从机理上探索油基钻井液堵漏与水基钻井液的不同，研究开发新型防漏堵漏材料，分别对于纳微米级孔隙和裂缝型地质特征引发的漏失，形成高效的封堵方案，提高地层承压能力，形成综合配套技术，以满足技术需求和提高经济效益。

3. 油基钻井液防漏堵漏材料研究

常规堵漏材料在油基钻井液体系堵漏成功率较低，其原因为堵漏材料表面多是亲水型，在油相中分散性欠佳，形成的封堵层较为松散，难于形成致密封堵。油基钻井液防漏堵漏材料的研究采用亲油型材料，从研制核心吸油膨胀性微孔树脂出发，合成出一种能在油相中吸油膨胀 21.6% 的树脂类材料，分布通过研制形成一种纳微米级防漏材料 XZ-DL8 和一种裂缝性堵漏材料 XZ-DL11。对不同类型的井漏均具有良好的堵漏效果。

XZ-DL8 针对渗漏性地层，采用微细颗粒进行复配，根据 1/3 架桥原理进行粒度优选，形成了较好的渗漏地层封堵配方：40% 刚性颗粒、30% 微孔树脂、20% 植物纤维、10% 硅酸铝矿物纤维。其颗粒直径主要分布在 10-100 μm 之间，与漏失地层具有较好的匹配性。

XZ-DL11 针对裂缝性地层，对于不同宽度裂缝首先采用核桃壳进行架桥，其细规格的核桃壳填充其中，由于细规格核桃壳的缝隙尺寸具有较好的一致性，形成一种用于填充的堵漏材料，其配方为：40% 刚性颗粒、20% 微孔树脂、10% 海泡石纤维、25% 锯木粉、5% 分散剂。对于不同宽度的缝板有灵活的堵漏配方，承压能力高。

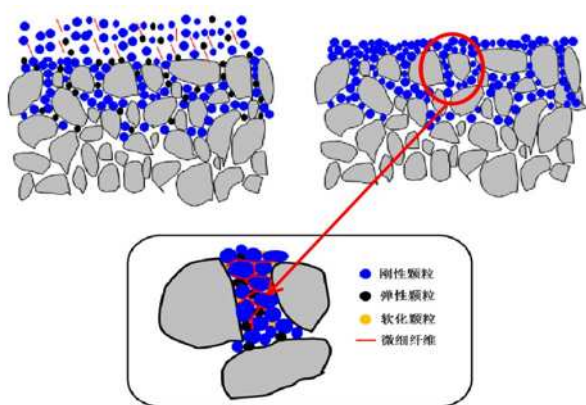
3. 油基钻井液堵漏承压工艺研究

3.1 封堵作用机理

油基钻井液强化致密承压封堵配方是按照一定的粒度级配复配软化颗粒、刚性架桥颗粒、可膨胀颗粒、高摩阻颗粒以及微细纤维材料和弹性填充颗粒组成的。不同种类的钻井液防漏堵漏材料之间具有协同作用，颗粒之间通过互相挤压变性而紧密结合，在孔隙或

微裂缝中形成性能稳定的“强力链网络”的承压封堵层，提高封堵层的承压能力。

刚性封堵材料可以在孔喉或裂缝开度狭窄处形成稳定架桥，构成承压封堵层的基础骨架；然后通过弹性颗粒和刚性颗粒以及微细纤维材料共同作用形成致密的网络结构，强化提升致密承压封堵层结构的整体性和稳定性；而后弹性填充颗粒以及膨胀型颗粒在压力作用下发生弹性形变进入地层，填充在刚性架桥颗粒之间的孔隙处，孔隙空间处的可膨胀颗粒随着时间增加，吸油膨胀体积逐渐增加，将剩余孔隙完全填充与封固，逐渐形成承压能力高的封堵层，钻井液由漏失逐步转变为滤失，提高地层承压能力。



图一 承压封堵层

3.2 承压工艺

堵漏钻具下至漏层以上 30m，同时观察记录井筒中钻井液返出量，钻具进入裸眼段后要间断活动。按照配制量、堵漏剂加入的增量倒入钻井液基液至专用配置罐，调整基液密度与井浆一致，同时应保证堵漏剂不漂浮。按照计算的堵漏剂加量，在专用配置罐连续搅拌条件下，经加重漏斗均匀加入堵漏材料。倒好上水管线闸门，并记录好配置的堵漏浆量，记录地面各循环灌的钻井液量。缓慢活动钻具，按照正常钻进排量的三分之一到二分之一注入堵漏浆，同时记录时间、泵压、注入排量、液面、返出排量、返出量等数据，堵漏浆注入完毕后，继续注入顶替钻井液，并记录时间、液面及其它参数情况。注入和顶替完堵漏浆后，起钻至安全位置。根据出口返出情况确定下步措施，若出口见返，则关井挤注，小排量、低压力缓慢整压，控制好井口压力；若憋不起压力，应根据具体情况采取下述措施，初次整压，控制较低的压力和挤入量，第二次、第三次整压采取间隔一段时间（0.5-1 小时）进行，如果承压能力上升速度慢则延长间隔时间；若出现堵漏浆挤不进漏层的现象，则增大挤注量、提高整压压力。

4. 现场应用

4.1 随钻防漏

泸 208H4-S 井构造位置位于川南低褶带阳高寺构造群，地理位置位于重庆市荣昌区广顺街道天常村 11 组。设计井深 5642m，井别：开发井，井型：水平井，层位：龙马溪组，完钻层位：龙马溪组。实际完钻井深 5710m。

泸 208H4-S 井自韩家店组四开，采用 $\Phi 215.9\text{mm}$ 钻头，油基钻井液，龙马溪段渗透性漏失，在井浆中加入不同粒径防漏堵漏浆，泵入井内薄弱井段，在压差作用下挤入地层裂缝，并控制钻井液流变性以减小 ECD，防止井壁失稳和井漏。

现场结果表明：泸 208H4-S 井龙马溪组从最大漏速 $12 (\text{m}^3/\text{h})$ 加入提高承压能力材料后稳定在 $3.5 (\text{m}^3/\text{h})$ ，最大漏速显著降低，防漏、堵漏效果显著。

4.2 裂缝性漏失

泸 208H4-X 井构造位置位于川南低褶带阳高寺构造群，地理位置位于重庆市荣昌区广顺街道天常村 11 组。设计井深 6082m，井别：开发井，井型：水平井，层位：龙马溪组，完钻层位：龙马溪组。泸 208H4-X 井实际完钻井深 6160m。

泸 208H4-X 井四开采用 $\Phi 215.9\text{mm}$ 钻头，密度 $1.89\text{g}/\text{cm}^3$ 粘度 88s 的油基钻井液，钻进至 3600m 发生井漏，漏速 $44.5\text{m}^3/\text{h}$ ，地层：韩家店组，岩性：灰色砂砾岩。井漏原因：地层裂缝发育。提钻至 2650m，配堵漏浆 30m^3 ，下钻打入堵漏浆，替浆 40m^3 ，提钻到 2650m 做承压堵漏。采用少量多次的方式，以 5L/s 排量进行憋压，第一次泵入 9m^3 泥浆，套压 3.2MPa，稳压 60min，压降 0.3 MPa。第二次泵入 2.5m^3 泥浆，套压 3.6MPa，稳压 60min，压降 0.2MPa。承压堵漏成功后下钻循环验漏，液面稳定，复杂解除。

结语：

综上所述，随着石油钻探的不断发展，有很多的新型钻井液堵漏材料得到了广泛运用，主要代表有聚合物凝胶、柔弹性、高滤失、水泥浆堵漏材料等，不同的材料其性能优势不同，相关防漏堵漏技术的优化改进，解决了不少井漏问题。随着现代化技术的发展和石油的深度开发，要不断加强对钻井液堵漏材料的复合研究，尽量将不同的材料融合在一起，使堵漏材料具有更加广泛的适用性，让它们在高温高压地层或者含盐膏层都能发挥出良好的堵漏效果，提高其经济适用性，加强其针对性，使钻井液堵漏材料与防漏堵漏技术更加贴合石油钻井的发展需求。

参考文献：

- [1]王雪.玉刘正, 廖静茹.中拐 - 玛南地区钻井液体系优化与防漏堵漏技术研究[J]. 当代化工, 2018 (35): 94~102
- [2]彭浩.裂缝性地层井漏分析与堵漏决策优化研究[D].成都: 西南石油大学, 2016.
- [3]李伟.裂缝性地层堵漏技术研究[D].成都: 西南石油大学, 2013.