

文章编号:1000-4092(2021)04-740-07

裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展*

赵洪波^{1,2,3}, 单文军^{2,3}, 朱迪斯^{2,3}, 岳伟民^{2,3}, 何远信^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 3. 中国地质调查局非常规油气工程技术中心, 北京 100083)

摘要:重点从裂缝性地层漏失机理, 堵漏剂种类、配方、工艺等方面综述了近三年的最新研究成果。此外, 还介绍了井眼强化等井漏预防工程技术方法、漏层确定方法的优缺点等。最后给出了一些建议, 为以后油气钻井堵漏作业提供借鉴。表2参65

关键词:油气井; 裂缝性地层; 井漏; 漏失机理; 堵漏材料; 新进展; 综述

中图分类号: TE358 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.04.028

0 前言

井漏是任何不受控制的钻井液、水泥浆或其他工作液在钻井、固井、完井等阶段进入地层的一种常见井下复杂情况, 会导致井眼失稳和压差卡钻, 并对周边环境造成污染, 在油气井勘探中对储层造成严重伤害。处理井漏在增加时间成本的基础上还会使钻井成本每米增加230~328美元^[1]。在漏速可接受的情况下, 一般采取继续钻进并加入随钻堵漏剂; 但当漏速不可接受时, 则需要专门堵漏。井漏及其造成的失返卡钻、溢流、井壁垮塌以及落鱼故障, 将会给继续钻进及后续固井带来极大的挑战。目前, 大、中型裂缝及溶洞的堵漏成功率还很低, 主要表现在: 一是, 对井下漏失情况不明, 不清楚井下裂缝的宽度, 不能优选出与地层中裂缝相配伍的堵漏材料; 二是, 不能确定合理漏失压力及漏层位置; 三是常规桥接堵漏材料无法在漏失通道中堆积、架桥形成有效封堵。随着油气勘探开发

转向深部地层, 发生漏失更加频繁与复杂。为了进一步提高钻井效率与钻井安全, 钻井液漏失成因探索及针对不同工况下堵漏材料和堵漏工艺方面的研究从未停止, 近年来, 有了新的发展和进步。

1 漏失机理研究进展

漏失发生需要3个必要条件: 正压差、漏失通道及较大漏失空间。漏失通道开口尺寸大于外来工作液固相粒径, 因此漏失与钻井液密度、钻井液固相粒径、地层压力、地层孔、缝、洞发育情况等密切相关。由于对漏失机理认识不清, 导致实际作业堵漏次数较多, 小漏变成大漏, 提高承压能力效果不理想。漏失程度较低(漏速 $<15 \text{ m}^3/\text{h}$)的堵漏成功率较高, 部分漏失与全部漏失堵漏成功率较低。裂缝发育有利于致密油气藏的有效开发, 但同时也是造成井漏的最常见因素。裂缝性漏失是最为普遍、复杂且难以解决的。根据裂缝性漏失发生的原因, 可将其分为小型裂缝性漏失、扩展性漏失及诱

* 收稿日期:2020-09-25; 修回日期:2020-09-25。

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“合肥盆地及周缘油气资源战略调查”(项目编号DD20190725)和“重点参数井含油气参数测试”(项目编号DD20201172), 国家自然科学基金青年基金“高温钻井液多因素钻具腐蚀机理及评价方法研究”(项目编号41802196)。

作者简介:赵洪波(1988—), 男, 高级工程师, 中国地质大学(北京)工程技术学院在读博士研究生(2017—), 从事科学钻探、地质钻探、石油钻井及工艺研究, E-mail: zhaohb@cugb.edu.cn。何远信(1964—), 男, 教授级高级工程师, 本文通讯联系人, 中国地质大学(北京)地质工程专业博士(2006), 从事地质钻探、石油钻井及相关工艺研究与管理, 通讯地址: 100083 北京市海淀区北四环中路267号奥运大厦, 电话: 010-83023143, E-mail: hyuanxin@mail.cgs.gov.cn。

导性漏失(压裂性漏失),在实际钻井过程中所遇到的裂缝性漏失一般为上述 3 种类型的相互组合。由于现场难以对漏失过程进行准确预测,导致目前扩展性漏失和诱导性漏失堵漏成功率较低^[2]。李大奇针对裂缝扩展性漏失,首次提出裂缝扩展性漏失压力,主要考虑了裂缝初始宽度、裂缝刚度及钻井液封堵性能的影响^[3]。韩耀图等分析裂缝性地层漏失机理的基础上,从统计学的角度出发,探索漏失压差与漏速分布规律,提出漏失压差与漏失速率的相关性关系,建立了微小-小裂缝性漏失地层漏失压力模型^[4]。赵洋等开展了 Griffiths 天然裂缝宽度预测模型研究与分析,基于非牛顿流体钻井液流变模型为宾汉流体的前提下,对 Griffiths 方法作了改进,可以更准确地估算井漏时的天然裂缝宽度,认为漏失时间、钻井液黏度和井内压差等因素都会对裂缝宽度产生影响^[5]。何新星等认为裂缝变形会对封堵层产生破坏,裂缝变形程度越大对封堵层的破坏越强,弹性堵漏剂能够更好地适应裂缝变形,通过降低井筒压力波动减小裂缝动态变形带来的不利影响^[6]。孙炜等开展了以叠前地震数据为基础,基于方位各向异性技术预测高角度缝的分布特征,设计井身轨迹避免井漏或针对性的开展堵漏^[7]。陈晓华等针对裂缝性漏失提出了基于损伤力学原理,利用 ABAQUS 软件中模拟漏失过程中裂缝的起裂和扩展,建立了三维地层裂缝性动态漏失模型,并探讨了裂缝形态、井周应力及地层孔隙压力等因素在漏失过程中的变化规律,为裂缝性漏失的堵漏施工提供技术指导^[8]。邱正松等基于裂缝封堵层微观结构受力分析,探讨了 5 种裂缝封堵层失稳破坏形式及微观机理,提出了评价封堵层失稳形式的特征参数,给出了裂缝致密承压封堵物理模型,采用合理的堵漏材料类型和粒度级配优化控制,可在裂缝入口端附近形成致密承压封堵层,提高裂缝封堵承压能力,减少封堵漏失量^[9]。

2 井漏预防与预测

井眼加固、随钻套管和控压钻进在一定程度上都可以预防漏失,岩石渗透性、孔隙率和裂缝宽度是决定桥接和井眼加固材料类型和浓度的关键^[10]。采用蒙特卡洛模拟法基于钻井液密度井漏风险的概率计算公式更有利于对井漏风险的评估^[11]。通

过分析应力状态,孔隙压力和储层力学性质,建立准确的地质力学模型,基于精细的岩相、地震相与裂缝预测的研究可以准确预测漏失位置,通过避免人工压裂或控制钻井液密度,为优选井身结构及钻井液优化提供了技术支持,从而减少堵漏的发生^[12]。采用电法勘探监测地下暗河、溶洞,在钻井工程设计时可以尽量避开易漏失的高风险区域,从源头上减少上部井段井漏及可能造成的环保影响^[13]。采用潜孔锤钻进和表层套管暂封溶洞可有效解决和规避表层漏失问题^[14]。针对超高压盐层钻进,提出结合井下情况合理降低密度的控压钻进方法来防止井漏,避免超高密度堵漏的技术难题^[15]。

3 漏层确定

准确定位漏失深度、评价漏失率至关重要,也是高效开展防漏堵漏作业的重要前提。对疑似漏层的早期发现可以大大提高预防和堵漏成功的几率,表 1 给出了几种常见的确定漏层方法的优缺点。

表 1 几种确定漏层方法及其优缺点

方法	优点	缺点
基于机器学习的地震解释方法 ^[16]	地质风险与地震资料的良好相关性;预测井漏风险的实证研究	对钻井事件缺乏足够的细节;测井资料难以与地震勘探相匹配
基于机器学习的操作变量和地质参数分析方法 ^[17]	准确度在 90% 以上	预测精度取决于模型训练过程中使用的数据集范围
包含瞬态压力-温度耦合模型的诊断方法 ^[18]	发现和识别漏失事件、漏失深度和漏失率;平均误差小于 1%;能够检测漏失相关参数的微小变化	受井眼膨胀、地层流体井涌影响
基于漏失速率和漏失层位影响的井筒温度场模型 ^[19]	可以准确预测裸眼段漏失循环条件下的井筒温度分布;根据环空流体温度梯度分布曲线的拐点判断漏层位置	模型只针对单一漏失速率;只适用于直井
微芯片井下测量系统 ^[20]	节省成本和时间;测量精度高,温度误差为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力为 $\pm 0.05\%$ 。	高温条件下系统电池性能差
井眼成像和高分辨率核磁共振测井仪 ^[21-22]	增强了测井数据的有效性;可以直接检测和识别漏失区域	电阻率井眼成像需要高导电钻井液

4 堵漏材料与堵漏技术

国内外对堵漏材料与堵漏技术的研究主要集中在纤维材料、新型纳米材料、超分子材料等。通过综合分析工程、地质、测井、岩屑等资料,明确了漏层深度、裂缝宽度等漏失层关键特性,采用随钻桥堵、水泥堵漏、桥接堵漏、化学固结、凝胶堵漏、高失水堵漏等堵漏工艺以及针对性研究能显著提高地层承压能力的致密承压堵漏材料。常规堵漏技术在一定程度上取得了较好的应用,但面对复杂地层还存在一些问题,缺乏专用高效的堵漏材料,处理严重漏失时,一次堵漏的成功率不高,且易发生重复性漏失^[23]。

4.1 堵漏材料

常规堵漏材料主要以刚性颗粒、弹性颗粒和纤维为主,在协同封堵过程中,刚性颗粒在裂缝较窄处形成具有较高承压能力的骨架,弹性颗粒在裂缝较窄处形成弹性力通过弹性变形来增加裂缝与堵塞区之间的摩擦力,使封堵层更加稳定;纤维填充在颗粒之间的孔隙空间,增加了封堵层的紧密性和完整性。

4.1.1 纤维类堵漏材料

形成高质量封堵层是深层裂缝性储集层漏失控制的关键,而强化封堵层结构稳定性的关键在于堵漏材料的选择。纤维是桥接堵漏法采用材料的重要组成部分,常规纤维类堵漏材料因酸溶性能较差,往往不能满足裂缝性储层酸化解堵的技术需要。许成元等认为粒度分布、纤维长径比、摩擦系数、抗压能力、抗高温能力、可溶蚀能力为深层裂缝性储集层堵漏材料的关键性能参数^[24]。杨振杰等以废弃的禽类羽毛为原料研制出了天然羽毛堵漏纤维 TRX-JM,在多种模拟漏失层中均具有较好的堵漏效果^[25]。王敏生等基于 1.2% 形状记忆聚合物与 1.2% 纤维组成的复合堵漏剂,具有良好的配伍性,可有效封堵地层裂缝^[26]。陈家旭针对常用纤维堵漏材料无法满足深层高温(>200 °C)防漏堵漏技术的要求,研制了一种新型抗高温堵漏纤维 SDHTF^[27]。

4.1.2 凝胶类堵漏材料

常规抗高温高盐凝胶堵漏材料与技术在国内外有广泛的应用。凝胶类堵漏材料尤其是交联聚

合物凝胶,可不受漏失通道的限制,在漏层中滞留形成具有三维网络结构的黏弹体,能够提高天然裂缝或碳酸盐岩溶洞地层近井地带的强度,在解决恶性漏失及含地下水的漏层方面具有广阔的应用前景^[28]。胶凝时间和胶凝强度是影响凝胶封堵效果的关键因素^[29]。Li 等认为根据油气井漏失情况通过改变膨润土、氧化钙、氧化镁等组分物质的比例能够调节新型可固化凝胶堵漏液体系的沉降稳定性和剪切稀化性,并提高抗压强度^[30]。王勇等根据超分子化学理论研发了一种超分子堵漏新材料,可以分散到水中溶胀成各种粒径大小不一的凝胶颗粒,凝胶颗粒有弹性、易变形,可以进入地层孔隙或裂缝,配合常规架桥颗粒对发生漏失层位进行复合封堵,能够适应不同深度、不同温度的地层,起到良好的堵漏效果,承压最高能够达到 7.0 MPa^[31]。苏俊霖等开发了适合表层漏失的“特种凝胶 ZND+凝胶强度调节剂 TD-1+常规随钻桥堵材料”凝胶随钻堵漏技术和“ZND 调剖堵漏剂+耐腐蚀超细水泥浆”调剖封堵剂体系,对开度 4.0 mm × 3.5 mm 裂缝封堵的承压能力最小为 3.6 MPa,漏失量小,且封堵在裂缝腰部,适合非均质恶性漏失并可实现随钻堵漏^[32-33]。郭新健等提出将有机凝胶与无机凝胶复合形成的抗高温化学凝胶用以解决深层高温地层的渗透性、裂缝性漏失,提高地层承压能力的堵漏施工方案^[34]。李辉等研制了可实现自破胶返排的抗高温堵漏凝胶,起到了环保安全的效果^[35]。颜帮川等研制了基于自由基聚合的以丙烯酰胺、*N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺为单体合成的具有高温延迟成胶时间(1~4 h)可调的交联聚丙烯酰胺凝胶堵漏剂来封堵裂缝型恶性漏失^[36]。Jiang 等采用树脂封装的方法由丙烯酰胺单体、交联剂和引发剂经自由基聚合制备了一种凝胶时间可调、凝胶强度高的交联聚合物凝胶 HTCMG,在 150 °C 下的承载力峰值可达 9.8 MPa,能有效地封堵 5 mm 宽的缝隙。HTCMG 具有封堵时间短、封堵成功率高、经济成本低等特点,对解决高温情况下漏失具有重要意义^[37]。但由于对于聚合物凝胶体系的封堵机理尚不明确,聚合物凝胶体系与其他堵漏材料的相容性也不清楚。交联聚合物随钻堵漏方面也有待进一步研究。

4.1.3 纳米堵漏材料

纳米堵漏材料的研究一直受到国内外的关注。Huang 等认为核壳结构的纳米丙烯酸树脂/纳米 SiO₂ 复合材料 (AR/SiO₂) 水基钻井液因与页岩基质的良好结合, 在页岩气钻井过程中可提高页岩孔隙的封堵效率, 减少流体侵入, 增强井眼稳定性^[38]。Ghanbari 等采用孔隙压力传递技术 (PPT) 研究纳米二氧化硅颗粒在水基钻井液中的封堵行为, 认为纳米二氧化硅颗粒能有效地堵塞孔隙喉道, 降低钻井液渗透到岩石的孔隙压力^[39]。

4.1.4 高温堵漏材料

在深井、超深井的钻井过程中, 井漏处理是深部钻井面临的一项重大难题, 堵漏材料的高温老化失效造成裂缝封堵层结构破坏并在储层段易发生重复性漏失^[40]。深井高温地层堵漏技术对堵漏材料的抗/耐高温能力、抗压强度和沉降稳定性等提出了更高要求^[41]。田军等针对常规堵漏材料高温不稳定易降解造成封堵层失效重复漏失的问题, 研制了在漏层压差下快速滤失后能富集成网、胶凝固化的快速滤失固结堵漏材料 ZYSD^[42]。陈家旭等研制了一种抗高温型高酸溶纤维堵漏剂 SDSF, 协同高酸溶颗粒状桥接堵漏材料组成的可适应不同开度楔形裂缝的高酸溶纤维堵漏工作液, 在水基钻井液中的分散性良好, 耐碱性能优良^[43]。韩成等通过优选抗高温堵漏材料, 针对诱导性裂缝将抗高温刚性堵漏材料 DXD 与弹性堵漏材料 TXD 复配, 形成了一套适用于高温高压井诱导裂缝堵漏的钻井液体系^[44]。苏晓明等针对塔中区块异常高温高压裂缝性溶洞漏失问题, 选用了耐高温、高刚度 (>8 MPa)、低磨损的刚性颗粒材料 GZD, 形成的耐高温、高强度的新型复合堵漏材料 SXM-I 表现出较好的高温高压封堵性能^[45]。Ettehadi 等在研究裂缝宽度与堵漏机理、堵漏效果关系时, 认为钻井液作为堵漏材料的载体, 在屈服点、凝胶强度和触变性等流变特性方面具有重要意义。海泡石水基钻井液体系在高温高压条件下具有良好的流变性、高固体悬浮性能以及合适的屈服点和凝胶强度值, 含碳酸钙海泡石钻井液在 193 °C 也能迅速堵塞裂缝^[46-47]。

以上几种抗高温堵漏材料的封堵性能总结于表 2。

表 2 几种抗高温堵漏材料的封堵性能

封堵材料	最大承压能力/MPa	适应缝宽/mm	抗高温能力/°C
ZYSD	18.5	5.0~10.0	150
SDSF	10	3.0~12.0	150
5% DXD+3% TXD	18	0.12~0.2	200
SXM-1	9	2	180
海泡石黏土水基钻井液	9	2~5	193

4.1.5 油基钻井液堵漏材料

油基钻井液相比水基钻井液在水平井等应用中具有良好的效果, 油基钻井液具有良好的润滑性, 更容易进入岩石弱面产生水力学劈裂, 井壁的亲油通道表面流动阻力小, 易漏失且堵漏难度更大。应用油基钻井液时堵漏成功的关键在于研发出适用于油基钻井液的堵漏剂。近年来针对油基钻井液的堵漏材料研究也得到了进一步的发展。许明标等研发了一种油基桥架堵漏剂 Dual GUARD, 通过颗粒逐级架桥、纤维成网、逐级填充, 在漏失压差下形成韧性封堵层, 成功解决了漏速小于 30 m³/h 的井漏问题, 为解决涪陵页岩气田的油基钻井液漏失问题提供了技术支撑^[48]。钱志伟等以刚性单体 (苯乙烯)、柔性单体 丙烯酸酯类、丙烯酸、丁二烯和丙烯腈) 为主单体, 以改性石英粉为凝结核, 在引发剂过硫酸钾-亚硫酸氢钠和偶氮二异丁腈盐酸盐作用下, 通过乳液聚合研制的具有弹性的油基钻井液用纳米封堵剂, 粒度级配 (60~500 μm) 合理, 与油基钻井液有良好配伍性, 突破压力达 10 MPa 以上^[49]。梁文利研制的一种具有自我调整的“进留颗粒粒径”能力的 T150 系列堵漏剂, 与油基钻井液具有良好的配伍性, 配合国外油基堵漏剂联合堵漏, 承压能力可从 1.75 g/cm³ 提高至 1.85 g/cm³^[50]。路宗羽等在油基钻井液中加入复合封堵剂 (1% 封堵剂 FD-L+1% 碳酸钙 (600 目)+0.5% 石墨粉) 和 3% 油性膨胀堵漏剂形成的高密度防漏型油基钻井液具有良好的封堵性能和防漏性能^[51]。

此外, 通过模拟地层温度、压力和井筒环空流动状态, 能够准确评价堵漏材料的适用性和封堵效果^[52]。暴丹等利用“热-机械变形”基本原理, 研制了不同粒径的热致形状记忆智能型堵漏剂。受温度

影响,其结构可从片状膨胀成立方体的三维结构,在一定范围内可自适应匹配裂缝宽度在3~5 mm漏层,实现自适应架桥封堵^[53]。马川针对裂缝性漏失常规桥塞堵漏材料与漏层裂缝开口匹配难以达到良好的堵漏效果,通过将类弹性颗粒堵漏材料的网状泡沫材料变形挤入裂缝与方解石颗粒等刚性颗粒材料以及随钻封堵材料SDQ-98配合使用,使得漏失通道变窄,可促进封堵层形成,达到良好的堵漏效果^[54]。

4.2 堵漏技术

桥接堵漏法是处理裂缝性储层钻井完井液漏失较常用的方法。王在明等针对常规复合堵漏材料之间无胶结、易被钻井液冲刷、使用油井水泥堵漏会造成新井眼的问题,研究开发了井壁强化与堵漏双作用的可钻水泥,将超细碳酸钙粉体加入胶凝材料硫铝酸盐水泥中,调节胶凝材料的可钻性,所形成的堵漏泥浆体系可明显增强体系的堵漏性能^[55]。侯士立等提出了高滤失承压堵漏技术,以清水配制的高滤失堵漏剂FPA为堵漏浆,在压差作用下堵漏浆在近井壁端迅速滤失形成滤饼,钻井液在滤饼的塞面上形成致密的泥饼,阻止钻井液进一步漏失,井壁得到强化,承压能力达到7 MPa,堵漏一次成功率高达71%^[56]。杨虎提出充氮气欠平衡钻井技术正成为防止裂缝性储层井漏、提高机械钻速的重要手段。根据裂缝性储层漏失压力和坍塌压力,确定钻井流体安全密度窗口,设计氮气注入参数和欠平衡专用设备需求量^[57]。邓柯等提出将常规充氮气钻井与连续循环钻井技术相结合,实现了充气流体介质的连续循环,在BY1井深部地层(3740~3846 m)减少漏失的同时钻速提高了1.6倍^[58]。梁文利认为将瞬间堵漏剂+水泥球+稻草节堵漏方法应用于地热水资源勘查具有良好的堵漏效果^[59]。朱金智等针对长裸眼井段存在多套砂泥岩互层及复杂压力系统,形成了雷特随钻承压堵漏工艺技术^[60]。中国石化华东石油工程公司提出了一种井下爆炸堵漏技术。该技术通过井下爆炸的方式挤压地层裂缝,减小裂缝宽度,使堵漏材料“进得去、停得住”,在苏北46口井裂缝性漏失中得到了有效应用^[61]。黎凌等针对长宁喀斯特地貌页岩气钻井失返性漏失采用“膨胀+交联+充填”堵漏工艺形成遇水快速膨胀胶凝堵漏浆,解决表层出水漏失

难题^[62]。王军等采用“刚性粒子+高失水材料”复合桥接堵漏技术,通过多种材料相互协同增效实现封堵结合配套井控技术,解决钻遇深部海相裂缝性地层喷漏共存处理难度和井控风险极大的问题^[63]。陈军等根据提高承压能力封堵理论,针对楔形效应,建立了井周应力-温度方程,通过降低钻井液或滤液的冷却作用,形成不渗透封堵层,可以提高堵漏成功率^[64]。基于尖点突变理论,建立了影响封堵层稳定性(地层参数、裂缝面接触参数和封堵层参数)的可用于预测井漏的最大承压压力模型。对于天然裂缝,在堵漏材料中掺入纤维或采用低摩擦系数的刚性颗粒有利于提高封堵层的最大承压压力。但对于诱导性裂缝,应采用高摩阻、高强度的堵漏材料来提高堵漏层的最大承压压力,以达到控制漏失的目的^[65]。

5 结论与展望

随着对油气能源需求的不断增加及可开采油气的不断减少,油气资源从常规油气转向非常规油气,常规储层转向碳酸盐岩、砂岩储层为代表的特殊储层,新区新层系非常规油气勘探将成为今后油气资源勘探开发的主要战场。碳酸盐岩储层往往存有天然裂缝,砂岩和碳酸盐岩在钻井作业中都可能产生诱导裂缝,极易发生漏失,使得堵漏材料及工艺的研究趋向于复杂。裂缝性地层漏失方面还存在许多挑战,钻井液漏失理论研究比较薄弱,远未达到模型化、定量化和科学化的程度。钻井技术的最新进展将重点放在高温高压砂岩和碳酸盐岩地层中的非常规深层裂缝性储层,这些苛刻的条件限制了传统堵漏材料对自然裂缝和诱导裂缝的封堵。此外,堵漏的概念将从局部封堵提升到井眼强化。

参考文献:

- [1] MAGZOUB M I, SALEHI S, HUSSEIN I A, et al. Loss circulation in drilling and well construction: The significance of applications of crosslinked polymers in wellbore strengthening: A review[J]. J Petrol Sci Eng, 2020, 185: 1-13.
- [2] 尹达, 刘锋报, 康毅力, 等. 库车山前盐膏层钻井液漏失成因类型判定[J]. 钻采工艺, 2019, 42(5): 121-123.
- [3] 李大奇, 康毅力, 刘修善. 基于漏失机理的碳酸盐岩地层漏失压力模型[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 900-904.
- [4] 韩耀图, 马英文, 谢涛, 等. 渤中19-6构造潜山花岗岩片麻岩地层漏失压力分析[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(s1): 136-138.

- [5] 赵洋, 邓明毅, 曾文强, 等. Griffiths天然裂缝宽度预测模型研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(5): 102-105.
- [6] 何新星, 李皋, 段慕白, 等. 地层裂缝动态变形对堵漏效果的影响研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 65-70.
- [7] 孙炜, 李玉凤, 陈霞, 等. 方位各向异性裂缝预测在泥页岩钻井漏失中的应用[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 53-59.
- [8] 陈晓华, 邱正松, 杨鹏, 等. 基于ABAQUS的裂缝性漏失过程动态模拟研究[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(1): 15-19.
- [9] 邱正松, 暴丹, 刘均一, 等. 裂缝封堵失稳微观机理及致密承压封堵实验[J]. 石油学报, 2018, 39(5): 587-596.
- [10] EZEAKACHA C P, SALEHI S, KIRAN R. Lost circulation and filter cake evolution: Impact of dynamic wellbore conditions and wellbore strengthening implications[J]. J Petrol Sci Eng, 2018, 171:1326-1337.
- [11] 胜亚楠, 管志川, 许玉强, 等. 井壁稳定问题的不确定性分析方法探讨[J]. 断块油气田, 2017, 24(6):847-850.
- [12] ZHENG Majia, TANG Hongming, LI Hu, et al. Geomechanical Analysis for Deep Shale Gas Exploration Wells in the NDNR Blocks, Sichuan Basin, Southwest China[J]. Energies, 2020, 13(5):1117-1140.
- [13] 王新新, 朱永峰, 杨鹏飞, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘油田A-B区块二叠系火成岩漏失原因与应对措施[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 130-136.
- [14] 万夫磊. 长宁页岩气表层防漏治漏技术研究[J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 28-31.
- [15] 赵永哲, 徐堪社, 杨哲, 等. 贵州煤层气井中上部地层钻井防漏堵漏技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1):113-116.
- [16] 卢俊安, 王春生, 冯少波, 等. 超高压盐水溢流处置技术[J]. 钻采工艺, 2017, 40(5):5-7.
- [17] GENG Zhi, WANG Hanqing, FAN Meng, et al. Predicting seismic-based risk of lost circulation using machine learning[J]. J Petrol Sci Eng, 2019, 176: 679-688.
- [18] ABBAS A K, AL-HAIDERI N A, BASHIKH A A. Implementing artificial neural networks and support vector machines to predict lost circulation[J]. Egypt J Petrol, 2019, 28(4):339-347.
- [19] JIANG Hailong, LIU Gonghui, LI Jun, et al. An innovative diagnosis method for lost circulation with unscented Kalman filter[J]. J Petrol Sci Eng, 2018, 166: 731-738.
- [20] 吴雪婷, 邹韵, 陆彦颖, 等. 漏失循环条件下井筒温度预测与漏层位置判别[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6):54-59.
- [21] LI Bodong, GOONERATNE C P, BADRAN M S, et al. Implementation of a drilling microchip for downhole data acquisition[C]//SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Jakarta, Indonesia, 2017-10-17.
- [22] CHEMALI R E, DIRKSEN R. Downhole optical imaging tools and methods: US 9 765 609[P]. 2017.
- [23] 温峥, 杨双春, 潘一, 等. 堵漏技术的研究进展[J]. 油田化学, 2016, 33(1): 186-190.
- [24] 许成元, 闫霄鹏, 康毅力, 等. 深层裂缝性储集层封堵层结构失稳机理与强化方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 399-408.
- [25] 杨振杰, 冯永超, 张金乐, 等. TRX-JM天然羽毛堵漏纤维的研究[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(4):20-22.
- [26] 王敏生, 光新军, 孔令军. 形状记忆聚合物在石油工程中的应用前景[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(5):14-20.
- [27] 陈家旭. 高效纤维防漏堵漏技术实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [28] 熊正强, 陶士先, 付帆. 堵漏用交联型聚合物凝胶研究进展[C]//第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 2019:253-258.
- [29] HAMZA A, SHAMLOOH M, HUSSEIN I A, et al. Polymeric formulations used for loss circulation materials and wellbore strengthening applications in oil and gas wells: A review[J]. J Petrol Sci Eng, 2019, 180:197-214.
- [30] LI Zaoyuan, DENG Zhizhong, GUO Xiaoyang, et al. Study of the impact of solidifier inorganic components on the performance of a solidifiable gel plugging fluid[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2015, 23: 450-457.
- [31] 王勇, 蒋官澄, 杜庆福, 等. 超分子化学堵漏技术研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(3): 48-53.
- [32] 苏俊霖, 王雷雯, 刘禧元, 等. 表层裂缝漏失凝胶随钻堵漏技术及应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(2):23-25.
- [33] 宋胜利. 非均质恶性漏失气藏调剖封堵剂体系的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 99-101.
- [34] 郭新健, 于培志. 抗高温化学凝胶堵漏技术在顺北52X井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(2): 189-193.
- [35] 李辉, 刘华康, 何仲, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层恶性漏失空间堵漏凝胶技术[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(1): 25-28.
- [36] 颜帮川, 蒋官澄, 胡文军, 等. 高温延迟交联聚丙烯酰胺凝胶堵漏剂的研究[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(6): 679-682.
- [37] JIANG Guancheng, DENG Zhengqiang, HE Yinbo, et al. Cross-linked polyacrylamide gel as loss circulation materials for combating lost circulation in high temperature well drilling operation[J]. J Petrol Sci Eng, 2019, 181:106250.
- [38] HUANG Xianbin, SUN Jinsheng, LYU Kaihe, et al. Application of core-shell structural acrylic resin/nano-SiO₂ composite in water based drilling fluid to plug shale pores[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2018, 55:418-425.
- [39] GHANBARI S, NADERIFAR A. Enhancing the physical plugging behavior of colloidal silica nanoparticles using binomial size distribution[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2016, 30:213-220.
- [40] 康毅力, 王凯成, 许成元, 等. 深井超深井钻井堵漏材料高温老化性能评价[J]. 石油学报, 2019, 40(2):215-223.
- [41] 暴丹, 邱正松, 邱维清, 等. 高温地层钻井堵漏材料特性实验[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 846-857.

- [42] 田军, 刘文堂, 李旭东, 等. 快速滤失固结堵漏材料ZYSD的研制及应用[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1):49-54.
- [43] 陈家旭, 李兆丰, 邱正松, 等. 高酸溶纤维堵漏剂的实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(5): 41-45.
- [44] 韩成, 黄凯文, 罗鸣, 等. 南海莺琼盆地高温高压井堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 47(6):15-20.
- [45] 苏晓明, 练章华, 方俊伟, 等. 适用于塔中区块碳酸盐岩缝洞型异常高温高压储集层的钻井液承压堵漏材料[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 165-172.
- [46] ETTEHADI A, ALTUN G. Extending thermal stability of calcium carbonate pills using sepiolite drilling fluid [J]. Petrol Explor Develop, 2017, 44(3): 477-486.
- [47] ETTEHADI A, TEZCAN M, ALTUN G. A comparative study on essential parameters to minimize sealing time in wide fractures [J]. J Petrol Sci Eng, 2019, 183:1-14.
- [48] 许明标, 赵明琨, 侯珊珊, 等. 油基桥架堵漏剂的研究与应用[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 799-802.
- [49] 钱志伟, 鲁政权, 白洪胜, 等. 油基钻井液防漏堵漏技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(6): 101-104.
- [50] 梁文利. 深层页岩气油基钻井液承压堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(3): 37-41.
- [51] 路宗羽, 徐生江, 叶成, 等. 准噶尔南缘膏泥岩地层高密度防漏型油基钻井液研究[J]. 油田化学, 2018, 35(1):1-7.
- [52] 蒋振新, 孟胡, 熊超, 等. 模拟环空流动状态的堵漏试验装置设计[J]. 石油机械, 2019, 47(9): 44-49.
- [53] 暴丹, 邱正松, 叶链, 等. 热致形状记忆“智能”型堵漏剂的制备与特性实验[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 106-115.
- [54] 马川. 裂缝漏层堵漏钻井液研究[D]. 成都:西南石油大学, 2018.
- [55] 王在明, 吴艳, 朱宽亮, 等. 井壁强化与堵漏双作用可钻水泥实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(6): 52-55.
- [56] 侯士立, 刘光艳, 黄达全, 等. 高滤失承压堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(1): 53-56.
- [57] 杨虎. 裂缝性储层充氮气欠平衡钻井流体参数设计图版与实例[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 118-124.
- [58] 邓柯, 邓虎, 李刚. 充气连续循环钻井技术在深部易漏地层中的应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(2): 108-109.
- [59] 梁文利. 干热岩钻井液技术新进展[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(4): 7-13.
- [60] 朱金智, 黄国良, 张震, 等. 雷特随钻承压堵漏技术及应用[J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 120-121.
- [61] 王委, 刘亚, 许春田, 等. 钻井井下爆炸堵漏技术[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1):63-67.
- [62] 黎凌, 李巍, 欧阳伟. 遇水快速膨胀胶凝堵漏技术在长宁页岩气区块的应用[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(2): 181-188.
- [63] 王军, 范翔宇. 四川盆地九龙山地区超深井优快钻井配套技术[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(1):28-35.
- [64] 陈军, 李巍, 范万升, 等. 钻井液冷却对裂缝楔形封堵效应的影响研究[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 22-24.
- [65] SHE Jiping, ZHANG Hao, KANG, Yili, et al. Cusp catastrophe model for plugging pressure prediction of lost circulation control in fractured reservoirs[J]. J Petrol Sci Eng, 2020, 186:106705.

Advance of Fractured Formation Lost Circulation Mechanism and Lost Circulation Materials in Oil and Gas wells

ZHAO Hongbo^{1,2,3}, SHAN Wenjun^{2,3}, ZHU Disi^{2,3}, YUE Weimin^{2,3}, HE Yuanxin^{1,2,3}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, P R of China; 2. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, P R of China; 3. Unconventional Oil & Gas Engineering Technology Center, China Geological Survey, Beijing 100083, P R of China)

Abstract: The latest achievements in the aspects of lost circulation mechanism, types of lost circulation materials, drilling fluid formulation and technology was reviewed. In addition, the engineering methods of well prevention, such as well strengthening, and the advantages and disadvantages of the methods for determining the leakage layer was also introduced. Finally, some suggestions was given, which can be used for reference in the future.

Keywords: oil and gas wells; fractured formation; loss circulation; lost circulation mechanism; lost circulation materials (LCMs); new development; review