

文章编号: 1000-0747(2021)03-0630-09 DOI: 10.11698/PED.2021.03.18

裂缝性恶性井漏地层堵漏技术研究进展与展望

孙金声^{1,2}, 白英睿¹, 程荣超², 吕开河¹, 刘凡², 冯杰²,
雷少飞¹, 张洁², 郝惠军²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油集团工程研究院有限公司, 北京 102206)

基金项目: 国家自然科学基金重大项目课题“井筒工作液与天然气水合物储层作用机理和调控方法”(51991361); 国家自然科学基金面上项目“深层裂缝性地层剪切响应型凝胶体系构筑与空间自适应堵漏机理”(52074327); 国家自然科学基金-石油化工联合基金(A类)重点基金项目“超深井安全高效井筒工作液构建及调控方法基础研究”(U1762212); 中国石油天然气集团有限公司重大工程技术现场试验项目“恶性井漏防治技术与高性能水基钻井液现场试验”(2020F-45)

摘要: 通过系统论述裂缝性地层钻井液漏失和堵漏机理, 对不同类型堵漏材料及其在裂缝性恶性漏失地层中的适用性及作用机理进行了分类归纳, 同时基于所用堵漏材料分析了不同类型堵漏工艺的优缺点及应用效果, 明确了目前国内外恶性漏失地层堵漏技术存在的关键问题, 进而提出未来恶性井漏堵漏技术发展方向。未来应综合地质、工程、材料等学科, 实现恶性井漏堵漏技术的一体化、智能化与系统化, 重点应开展5个方面的研究: ①注重钻井液漏失和堵漏机理研究, 为科学选择堵漏材料及配方、堵漏方法和工艺提供依据; ②注重自适应堵漏材料研发, 提高堵漏材料与裂缝漏失通道级配关系; ③注重三维裂缝空间强驻留强充填堵漏材料研发, 增强堵漏材料在漏失通道中的驻留和充填程度, 改善封堵效果; ④注重抗高温堵漏材料研发, 保证深层高温漏失地层的长期封堵效果; ⑤注重发展数据化和智能化堵漏技术, 促进堵漏技术向数据化和智能化方向发展。表1 参40

关键词: 恶性井漏; 堵漏机理; 堵漏材料; 堵漏工艺; 钻井液漏失; 堵漏技术进展

中图分类号: TE28 文献标识码: A

Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation

SUN Jinsheng^{1,2}, BAI Yingrui¹, CHENG Rongchao², LYU Kaihe¹, LIU Fan², FENG Jie²,
LEI Shaoifei¹, ZHANG Jie², HAO Huijun²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China)

Abstract: By reviewing the mechanisms of drilling fluid lost circulation and its control in fractured formations, the applicability and working mechanisms of different kinds of lost circulation materials in plugging fractured formations have been summarized. Meanwhile, based on the types of lost circulation materials, the advantages, disadvantages, and application effects of corresponding plugging technologies have been analyzed to sort out the key problems existing in the current lost circulation control technologies. On this basis, the development direction of plugging technology for severe loss have been pointed out. It is suggested that the lost circulation control technology should combine different disciplines such as geology, engineering and materials to realize integration, intelligence and systematization in the future. Five research aspects should be focused on: (1) the study on mechanisms of drilling fluid lost circulation and its control to provide basis for scientific selection of lost circulation material formulas, control methods and processes; (2) the research and development of self-adaptive lost circulation materials to improve the matching relationship between lost control materials and fracture scales; (3) the research and development of lost circulation materials with strong retention and strong filling in three-dimensional fracture space, to enhance the retention and filling capacities of materials in fractures and improve the lost circulation control effect; (4) the research and development of lost circulation materials with high temperature tolerance, to ensure the long-term plugging effect of deep high-temperature formations; (5) the study on digital and intelligent lost circulation control technology, to promote the development of lost circulation control technology to digital and intelligent direction.

Key words: severe lost circulation; lost circulation control mechanism; lost circulation materials; lost circulation control technology; drilling fluid lost circulation; plugging technologies progress

引用: 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.

SUN Jinsheng, BAI Yingrui, CHENG Rongchao, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 630-638.

0 引言

井漏是钻井过程中钻井液大量漏入地层的现象, 不仅消耗大量钻井液, 延长钻井周期, 处理不当还可能引发井塌、井喷、卡钻等复杂情况, 甚至导致井眼报废, 造成重大工程事故^[1]。钻井液漏失速率(Q_{DL})是最直观、最易测的反映钻井液漏失程度的重要参数, 根据漏速不同, 钻井液漏失类型可大致分为少量漏失($Q_{DFL} \leq 5 \text{ m}^3/\text{h}$)、中等漏失($5 < Q_{DFL} \leq 15 \text{ m}^3/\text{h}$)、严重漏失($15 < Q_{DFL} < 30 \text{ m}^3/\text{h}$)和失返性漏失($Q_{DFL} \geq 30 \text{ m}^3/\text{h}$)。失返性漏失属于恶性漏失, 同时裂缝(缝洞)发育地层发生的严重漏失, 由于堵漏难度较大, 亦可归为恶性井漏范畴。随着油气勘探开发向深层—超深层、非常规、低品位等油气资源领域拓展, 钻井工程面临更加苛刻的地质条件和诸多技术瓶颈, 裂缝(缝洞)性地层恶性井漏是最常见且最难以治理的钻井工程复杂事故之一, 已成为制约钻井工程中“卡脖子”的关键难题之一^[2-3]。

据统计, 全世界井漏发生率约占钻井总数的20%~25%, 每年用于堵漏的费用高达 40×10^8 美元^[4]; 北美地区(美国、加拿大)碳酸盐岩油气藏、页岩油气等钻井过程中发生恶性井漏的井数约占钻井总数的40%^[5]; 中东地区碳酸盐岩裂缝性油藏钻井过程中发生恶性井漏的井数占比超过30%, 井漏损失时间占比超过50%^[6]。中国油气钻井工程同样面临井漏难题, 据中国石油集团油田技术服务有限公司统计, 2017—2018年中国石油天然气股份有限公司(简称“中国石油”)国内和海外区块钻井复杂事故总损失时间中, 井漏导致的损失占比均超过70%, 年均经济损失超过 40×10^8 元人民币; 塔里木库车山前深层2017—2019年共完钻井76口, 发生井漏354井次, 其中恶性井漏占比65%。

目前国内外裂缝性恶性漏失地层的一次堵漏成功率较低。据统计, 中国石油川渝地区二开断层漏失段一次堵漏成功率低于10%, 三开裂缝漏失段一次堵漏成功率低于30%; 塔里木库车山前地区巨厚盐层漏失段一次堵漏成功率低于40%; 沙特阿拉伯 Ghawar 油田二叠系 Khuff 组裂缝性地层的一次堵漏成功率低于20%^[6]。因此, 裂缝性地层恶性井漏已成为制约油气勘探开发进度的世界性难题, 提高恶性井漏一次堵漏成功率是世界各油田保障“安全、高效、经济”钻井的迫切需求。

通过科研攻关, 目前国内外开发出了以桥接、高失水、可固化等为代表的堵漏材料, 形成了系列钻井液承压堵漏技术, 较好解决了渗透性和小微裂缝性井漏难题^[7-8]。但是, 针对大裂缝/缝洞性恶性漏失地层目前尚无有效预防和快速治理方法, 一次堵漏成功率低, 堵漏周期长, 现场施工经验性强, 成功堵漏方法难以复制。针对上述难题, 本文系统论述了钻井液漏失机理、堵漏机理、堵漏材料、堵漏工艺的国内外研究现状, 分析目前恶性漏失地层堵漏技术存在的问题, 并指出堵漏技术的未来发展方向。

1 钻井液漏失机理研究进展

钻井液的漏失机理主要研究钻井液漏失量与压力、时间、裂缝特性、钻井液流变性等参数之间的关系。在钻井工程现场, 实时监测钻井液流量是检测钻井液漏失、分析漏失规律的常见做法。目前国内外学者主要通过建立裂缝性地层钻井液漏失的数学模型和统计学模型, 实现地下裂缝分布及尺度的反演, 进而研究钻井液漏失机理。

1.1 钻井液漏失数学模型

钻井液漏失数学模型主要包括一维线性模型、二维平面模型和一维径向流模型。一维线性模型假设地层中仅有一条裂缝, 钻井液沿着裂缝延伸方向进行一维层流流动^[9-10]。一维线性模型的研究经历了从假设钻井液为牛顿流体到宾汉流体和幂律流体的发展过程, 裂缝模型由简单的不考虑裂缝性质发展到考虑裂缝变形、壁面滤失和粗糙度等。二维平面模型假设地层中存在一条任意倾角矩形裂缝, 钻井液在矩形裂缝中沿裂缝走向和裂缝延伸方向进行二维层流流动^[11-12]。二维平面模型主要研究钻井液沿裂缝平面进行二维流动, 比一维线性模型更加复杂且更接近于真实地层。一维径向模型假设地层中有一条无限长径向裂缝与井眼相交, 钻井液沿着裂缝延伸方向进行径向层流流动^[13]。

由于一维线性模型假设条件过于简单, 相比而言, 一维径向模型和二维平面模型更符合钻井液在单条裂缝中的流动特征, 从一定程度上更能客观反映钻井液在裂缝中的漏失规律; 相比二维平面模型, 一维径向模型计算过程更简单, 因此一维径向模型是研究裂缝性地层漏失问题最常用的数学模型。

研究人员应用上述数学模型可分析钻井液流变性、裂缝粗糙度、裂缝壁面滤失、裂缝宽度等因素对

钻井液漏失规律的影响,计算漏失压力、裂缝宽度等参数,为钻井液堵漏技术提供理论基础。但由于3种模型主要以单裂缝中的漏失研究为基础,与漏层实际情况相差较大,复杂裂缝地层的漏失压力和裂缝参数的预测精确度较低。

1.2 钻井液统计学漏失模型

钻井液统计学漏失模型主要包括基于机器学习的漏失模型和基于数据统计的漏失模型。①基于机器学习的漏失模型。主要根据给定的漏失参数(如地层岩性物性、漏失速率、流变参数等)训练样本,求取输入和输出之间的依赖关系的估计,使它能够对漏失措施做出尽可能准确的预测。钻井液漏失中的复杂非线性关系很难用数理方法描述,故机器学习模型多采用非线性函数通用数学模型对钻井液漏失类型、漏失速率和防漏、堵漏对策等参数进行预测。Sabah等^[14]基于ANN(人工神经网络)、SVM(支持向量机)和决策树等算法,将机器学习应用于钻井液漏失诊断领域,证明了机器学习漏失模型可以利用钻井大数据优选防漏和堵漏作业措施。②基于数据统计的漏失模型。主要以大量现场钻井井漏资料为基础,统计分析钻井液漏失速率与钻井液密度、黏度以及地层漏失通道等参数之间的关系,建立基于统计学原理的钻井液漏失压力计算模型。基于数据统计的漏失模型仅以部分生产地区的漏失资料为基础数据,通过统计分析和数据拟合,形成区域性较强的钻井液漏失模型,因而不具有普遍适用性。

综上,在钻井液漏失机理研究方面,建立精确可靠的钻井液漏失模型是关键。现有钻井液漏失数学模型主要以单裂缝漏失预测为基础,与漏层实际情况相差较大,三维复杂裂缝条件下漏失压力和裂缝宽度计算模型研究尚属空白;现有统计学模型以邻井的钻井资料和防漏堵漏数据为基础,属于经验型预测模型。两种模型的地层漏失压力和裂缝尺度预测精度不高,计算结果对现场指导性不强,难以推广应用^[15]。

2 钻井液堵漏机理研究进展

钻井液堵漏机理研究分为基于岩石力学假设建立的理论堵漏机理与基于实验的物理模拟堵漏机理,主要包括应力笼理论、裂缝封堵机理与隔断封堵机理等。

2.1 应力笼理论

Aston等^[16]提出的应力笼理论认为,可以通过调控井周切向应力场和裂缝尖端应力场,建立井筒液柱压力与地应力场的平衡来控制钻井液漏失。堵漏材料进

入裂缝后,在裂缝入口附近形成堵塞隔层,阻挡钻井液压力和流体介质的传递,增加环向应力,形成应力笼,进而提高地层的承压能力。井筒压力增加时,增加的环向应力可以阻止裂缝开启或产生新的诱导裂缝。强化应力笼的关键在于短时间内要在裂缝中形成渗透性极低的致密封堵层^[17]。

2.2 裂缝封堵机理

①提高裂缝闭合应力封堵机理:认为堵漏材料必须在裂缝内部沉积,同时隔离裂缝尖端,提高裂缝闭合应力,进而提高地层承压能力。堵漏材料进入裂缝后快速堆积形成封堵层,提高裂缝闭合应力,同时隔断裂缝尖端与入口,封堵层后的流体滤失至周围岩石的孔隙中,显著降低裂缝尖端的压力^[18]。

②控制裂缝尖端延伸封堵机理:是指使用堵漏材料隔离裂缝尖端,阻止钻井液向裂缝尖端传递压力,提高裂缝破裂压力,阻止裂缝延伸^[19]。当钻井液在地层漏失时,堵漏材料在裂缝尖端附近形成致密封隔层,阻止压力波传播,防止裂缝产生诱导裂缝。在高渗透地层裂缝尖端封堵容易形成,在低渗透地层裂缝尖端封堵不易形成。控制裂缝尖端延伸所选用的堵漏材料粒径需有较宽的分布范围。

2.3 隔断封堵机理

隔断封堵机理是指在地层温度、压力、流体等环境诱发下,堵漏材料发生物理化学反应,在裂缝中形成高强度结构体,隔断井筒和地层两个压力系统,提高地层承压能力^[20]。采用隔断封堵机理提高地层承压能力的效果取决于材料在环境中的自适应能力及结构体强度、反应时间和稳定性等,材料主要为聚合物凝胶类、可固化类等,适用于渗透性—裂缝性漏失地层。

虽然国内外在堵漏机理研究方面取得了一定进展,同时开展了现场试验并取得了一定效果。但裂缝性地层堵漏机理总体上仍不完善:①大多数理论只是定性认识而不是定量计算;②基于岩石力学的应力笼理论、裂缝封堵机理以及基于实验的隔断封堵机理适用于高渗透性以及中小裂缝发育的漏失地层,但在大裂缝发育的恶性漏失地层适用性较差;③主要针对刚性颗粒材料的堵漏机理进行研究,对于柔性材料堵漏机理研究较少,尤其是三维裂缝防漏堵漏材料的运移、充填、堵塞等机理研究有待深入,关于柔性或复合型材料在三维裂缝内的堵漏机理目前国内外均尚未开展深入研究。因此,目前堵漏机理在指导承压堵漏技术研发及现场施工时存在较大限制,恶性井漏现场施工盲目性大,堵漏效果不理想。

3 堵漏材料及作用机理研究进展

堵漏材料是堵漏技术的基础和关键,国内外学者相继研发了桥接类、高失水类、吸液(水、油)膨胀类、柔性凝胶类、可固化类等多种类型堵漏材料,并探究了不同类型堵漏材料对裂缝的堵漏机理。近年来,智能材料受到了国内外学者的日益关注,开展了智能堵漏材料的基础研究工作。

3.1 桥接类堵漏材料及作用机理

桥接类堵漏材料是由颗粒状、纤维状、片状等惰性材料按照一定的质量比和粒度级配形成的复合堵漏材料。常用的桥接材料有核桃壳、碳酸钙、纤维、云母片等。桥接堵漏材料主要通过漏失通道内架桥、拉筋、堆积、填充等作用,形成致密的封堵层,具有对钻井液流变性影响小、成本低廉、操作简单等优势,现场应用广泛,适用于渗透性或漏失不严重的地层,在钻井液堵漏中具有十分重要的地位。Amanullah^[21]采用椰枣核研发了系列桥接颗粒状堵漏材料 ARC,对缝宽 2 mm 裂缝的封堵承压能力达 8 MPa 以上;康毅力等^[22]评估了包括刚性颗粒、弹性颗粒和纤维在内的不同类型桥接材料单独及协同使用时对毫米级裂缝的堵漏效果,实验结果表明“刚性+弹性+纤维”复合桥接材料对于毫米级裂缝具有最佳堵塞效果,对缝宽 2 mm 裂缝最高承压封堵能力达到 13 MPa。

但是常用桥接堵漏材料存在以下不足:①桥接材料粒径与地层漏失通道尺寸的匹配性差;②桥接材料在漏失通道内架桥堆积,在压差作用下形成压实堆积体,其堆积强度在中小尺度漏失通道中容易形成,但是由于重力沉降、缝内冲刷等因素的影响,在裂缝宽度较大、纵向延伸较高的大裂缝,尤其是溶洞中不易驻留,导致封堵层承压能力低,易重复漏失。

3.2 高失水类堵漏材料及作用机理

高失水类堵漏材料是由硅藻土、渗滤性材料、惰性材料等按一定比例配成的堵漏材料。该类堵漏材料进入地层裂缝后,在地层压力与钻井液液柱压力的压差作用下迅速失水,固相组分聚集变稠迅速形成薄膜或滤饼,封堵裂缝漏失通道。雪佛龙菲利普斯公司研发的 DiascalM 堵漏材料、狄赛尔(DSL)堵漏剂等都是典型的高失水堵漏材料。侯士立等^[23]以不同粒级的多微孔、针状天然矿粉作为主体材料,以无机纤维作为悬浮材料,以方解石颗粒作为架桥材料,以束状单丝合成纤维和立体网状合成纤维作为纤维材料,复配组成了一种高失水、高承压、高酸溶的堵漏材料 FPA,

单独使用时对缝宽 1.0 mm 裂缝的最高承压封堵能力达 7 MPa。高失水类堵漏材料使用方便、见效快、成功率高,适用于漏速不大的渗透性与微小裂缝性漏失地层堵漏,但是对恶性漏失的堵漏效果有待进一步提高。

3.3 吸液膨胀类堵漏材料及作用机理

吸液膨胀类堵漏材料是由具有吸水、吸油性质的材料单独使用或与其他堵漏材料复配形成的堵漏材料,如亲油树脂颗粒、预交联凝胶颗粒等。吸液性堵漏材料在井筒与地层压差作用下挤入裂缝后吸水(油),利用分子间范德华力(或氢键)、三维网络结构内外侧渗透压将水或油分子吸入网络结构而引起体积膨胀,形成具有良好弹性的充填层。

王平全等^[24]研发了一种成本低、强度高、吸水倍率高的高吸水性凝胶颗粒,室温下的吸水倍率达到 137 g/g,高渗透砂床堵漏承压能力可达 3.0 MPa 以上;刘文堂等^[25]研发了一种与油基钻井液配伍性良好的纳微米级可变形球状吸油凝胶,可随钻封堵微孔和微裂缝,防止或减少油基钻井液漏失;Hashmat 等^[26]研究发现,与单独使用体膨型凝胶颗粒相比,将体膨型凝胶颗粒与刚性颗粒、纤维、黏土复配使用,可明显改善裂缝的承压堵漏效果。

吸液膨胀类堵漏材料具有膨胀堵塞和良好的变形性等优点,不受漏失通道形状和尺寸的影响,解决了传统桥接堵漏材料、高失水堵漏材料无法解决的自适应堵漏问题,适用于孔隙性、裂缝性漏失地层,但是其吸液延时效果和抗温性能较差,对大裂缝或溶蚀性恶性漏失地层的堵漏适用性较差。

3.4 柔性凝胶类堵漏材料及作用机理

与其他类型堵漏材料相比,柔性聚合物凝胶堵漏材料由于具有良好的受压可变形性,可自适应进入不同尺度漏失通道而不受其形态限制,容易在漏失通道内形成高强度封堵,是一种适用于不同尺度漏失通道的堵漏材料^[6],主要分为交联成胶型凝胶和非交联型凝胶两种。

交联成胶型凝胶是指将聚合物(或单体)、交联剂、引发剂等以水溶液形式注入到井下漏失通道中,在地层环境下发生交联反应生成黏弹性凝胶体,进而封堵漏失通道。交联成胶型凝胶主要使用未水解或部分水解聚丙烯酰胺与有机铬、酚醛树脂等交联剂反应,制备成胶时间和成胶强度可调的聚合物凝胶体系,可用于不同类型地层堵漏。非交联型凝胶主要是通过带有特殊官能基团的高分子链间的相互缠绕或缔合作用形成凝胶结构。聂勋勇等^[27]研发的 ZND 型特种凝胶是最

具代表性的非交联型凝胶堵漏材料,在水溶液中聚合物大分子链通过分子间疏水缔合作用自发聚集,形成可逆的动态物理交联网络结构,可以充满漏失裂缝,形成能隔断地层内部流体与井筒流体的“凝胶段塞”,从而达到堵漏的目的。

与聚合物凝胶堵漏材料研发同步,国内外学者开展了聚合物凝胶裂缝堵漏机理研究工作,提出了针对裂缝性恶性漏失的“隔断式凝胶段塞堵漏机理”,其核心是裂缝中凝胶应当“流得进、冲不稀、停得住、排得开、填得满、隔得断、抗得住”。Ivan等^[28]认为交联聚合物凝胶可在裂缝内形成具有足够强度的承压封堵层,防止裂缝的压力传播和诱导扩展,进而分隔开高压井筒和低压地层。Sweatman等^[29]研究表明,凝胶段塞中存在的从井筒至地层的压降,使得作用在裂缝尖端的压力降低,可防止裂缝扩张。因此,强化凝胶自身以及与裂缝壁面之间的胶结强度,可达到降低缝尖端压力,预防裂缝扩张的目的。

聚合物凝胶堵漏材料目前主要存在两个问题:①抗高温性能普遍较差,高温条件下长期稳定性差,导致裂缝封堵无效或堵后复漏风险高;②常用聚合物凝胶的缝内排液和驻留性能不佳,三维裂缝中凝胶的动态运移、展布充填规律不清,凝胶运移/充填与堵漏效果之间的关系不明确,堵漏机理尚不完善。

3.5 可固化类堵漏材料及作用机理

常用可固化材料是指由水泥、矿渣、石膏、石灰、硅酸盐类等的混合物与激活剂等添加剂组成的堵漏材料。水泥是典型的可固化材料,可通过添加各种水泥浆外加剂和改善挤注工艺来提高水泥封堵效果,具有承压能力强,处理严重漏失地层效果显著等特点,主要堵漏原理为:将水泥浆泵送至井下漏层中一定时间后稠化凝固,形成具有高强度的固状体,并与地层胶结为一体,从而达到封堵漏层的目的。

近年来中国学者研发了多种新式水泥,如快干水泥、膨胀水泥等,搭配高效的水泥速凝剂、缓凝剂,提高了水泥的使用范围与作用效果,同时也提高了水泥堵漏的成功率。赵后阳^[30]结合桥浆堵漏和水泥浆堵漏方法的优点,研制出一种新型触变性可固化堵漏材料,主要堵漏原理为:强触变性堵漏浆进入裂缝后流动阻力增大,漏失速率降低,惰性堵漏材料在缝口架桥堆积对裂缝进行暂堵,阻止了堵漏浆向漏层进一步流失,而后使进入裂缝的堵漏液在一定时间内固化,将地层胶结在一起,提高地层承压能力。

除水泥材料之外,贝克休斯公司研发了一种

MAGNE-SET型可固化堵漏材料,主要原理是通过镁、钙氧化物的混合物与水发生反应后生成高强度固结体,进而堵塞漏失通道。与其他堵漏材料相比,可固化堵漏材料具有较高的承压封堵能力,固化时间易控制,价格低廉,配制和操作简单,适用于恶性漏失地层。但该材料容易被地层水稀释,稀释后固化强度低,固化时间和速率不易控制,施工安全风险高。

3.6 智能堵漏材料及作用机理

智能材料是一种能感知外部刺激,能够判断并且自我执行的功能材料。该类材料可自主适应各种复杂地层,力学性能优异,可显著提高堵漏效率,在钻井液堵漏领域具有广阔的应用前景。近年来国内外学者陆续研发了智能形状记忆聚合物、智能凝胶、智能分子膜、智能仿生等堵漏材料。智能形状记忆堵漏材料具有承压能力强、自适应架桥封堵、激活温度可调等优点,可适用于裂缝性漏失地层;智能凝胶堵漏材料具有自适应能力强、配伍性好、耐冲刷能力强和良好的可降解性等优点,可适用于封堵裂缝性和溶洞性漏失地层;智能分子膜与智能仿生堵漏材料对大孔道和微裂缝具有良好的封堵性能,且由于其独特的生物可降解性,储集层损害程度低,适用于高渗透性和微裂缝性漏失储集层的随钻堵漏^[31]。

目前钻井液堵漏领域大多数智能材料仍处于基础研究阶段,在恶性漏失地层尚未开展现场试验。在未来研究过程中,重点攻关:①通过固化技术提高智能形状记忆材料的承压强度;②提高自愈合、自胶结型智能凝胶材料在苛刻条件(如高温等)下的适应能力;③实现智能分子膜堵漏材料成膜厚度和成膜强度的双提升,增强智能分子膜对漏失通道的适用能力;④架桥封堵、自适应封堵和智能仿生封堵相结合,协同强化堵漏。

综上,目前国内外研发的堵漏材料种类繁多,典型的堵漏材料及其主要作用机理如表1所示,在一定程度上,不同类型堵漏材料均取得了较好的应用效果,但仍存在不足之处:①桥接堵漏材料配方复杂,形成的封堵层与裂缝壁面胶结强度弱,易受压力波动等因素影响导致返吐;②高失水堵漏材料配方复杂,失水速率难以控制,解堵困难,水敏地层适用性差;③吸液膨胀类堵漏材料的吸液速率难以控制,吸液后材料强度不足,抗温性能普遍较差;④常规聚合物凝胶类堵漏材料的抗温、抗盐能力普遍较低,长期封堵稳定性差;⑤水泥类固化材料抗钻井液和地层水稀释能力差,固化时间难以控制,施工安全风险高;⑥智能堵漏材料目前尚处于基础研究阶段,其作用机理仍需进

表 1 典型堵漏材料及其主要作用机理

堵漏材料类型	典型堵漏材料		主要作用机理
桥接类	颗粒状	核桃壳、橡胶、沥青、硅藻土、贝壳等	架桥堆积卡堵裂缝通道
	片状	云母片、蛭石、稻壳、树脂片等	填塞堆积颗粒间的空隙
	纤维状	锯末、棉纤维、亚麻纤维、碳纤维等	拉筋成网，强化堆积体结构
高失水类	黏土、粉煤灰、石棉纤维、碳酸钙等		在裂缝内快速失水形成封堵层
吸液膨胀类	亲水/亲油树脂、预交联凝胶颗粒等		吸液膨胀填塞裂缝空间
柔性凝胶类	聚丙烯酰胺凝胶、聚丙烯腈凝胶、聚乙烯醇凝胶、生物凝胶等		裂缝内反应生成凝胶体，隔断井筒和地层
可固化类	触变水泥、矿渣、聚氨酯、酚醛树脂等		井下反应生成高强度固结体
智能材料类	形状记忆聚合物、形状记忆金属、温敏凝胶、自愈合凝胶等		受环境刺激自行发生物理化学反应，封堵裂缝

一步完善，材料的适用性尤其是在深层高温复杂地层的适用性尚需进一步提高。

目前采用水泥、凝胶或复合堵漏材料可在一定程度上解决裂缝性地层的井漏难题，但是上述材料处理恶性井漏的一次堵漏成功率普遍较低，缺乏高效堵漏材料。目前油基钻井液常用的堵漏材料多亲水，专用堵漏材料种类少，针对油基钻井液恶性井漏的高承压堵漏材料稀缺。

随着材料学科理论与技术的发展，智能材料在多个行业，尤其是在医药学、生物学等领域得到越来越多的研究和应用，将会对钻井液智能化堵漏理论与技术的发展产生革命性的推动作用。

4 堵漏工艺及应用研究进展

针对裂缝性地层恶性井漏难题，目前已形成多种类型堵漏工艺。根据所使用堵漏材料的类型，主要分为桥接堵漏、凝胶堵漏、水泥堵漏、复合材料堵漏和机械堵漏等工艺。

4.1 桥接堵漏工艺及应用

桥接堵漏是目前使用最广泛的堵漏工艺之一，其材料来源广泛、价格低廉，现场配制和施工难度低，但对材料粒径和裂缝尺度的匹配性要求高，施工时易发生“缝口封门”或“封内流失”现象，后续钻进时易发生返吐、复漏。

新疆油田中拐—玛南地区通过对桥接材料粒子形状、尺寸、强度的合理优选匹配，研制了裂缝性地层承压堵漏钻井液体系，对宽度 1~3 mm 裂缝的承压封堵能力达 7 MPa 以上^[32]。针对桥接颗粒粒径与裂缝尺度不易匹配的难题，张沛元^[33]提出了桥接材料的粒径由细到粗、浓度由低到高的边配边注“渐进法”桥接堵漏工艺，有利于堵漏材料进入裂缝形成桥塞，避免“封门”现象发生，提高了堵漏成功率，现场施工 6 口井、7 井次，堵漏成功率 100%。

4.2 凝胶堵漏工艺及应用

对于大裂缝、溶洞性漏失地层，桥接、高失水等

堵漏材料在其中很难滞留形成封堵层，聚合物凝胶具有强变形和滞留特征，可以克服颗粒类材料的缺陷，达到理想堵漏效果。

基于隔断式凝胶段塞堵漏机理，在长庆油田和川东北地区 30 余口井采用 ZND 型特种凝胶段塞配合水泥浆封口袋塞进行现场堵漏试验，效果良好；具有喷漏同层地质条件的双庙 1 井和罗家 2 井也取得了巨大成功，采用凝胶段塞堵漏技术处理恶性井漏取得了重要突破^[34]。Lecolier 等^[35]基于研发的交联聚合物堵漏剂（CACP），结合纤维、刚性颗粒等形成了固相颗粒强化凝胶段塞堵漏技术，在路易斯安那、伊朗北部的恶性漏失井取得了良好的现场应用效果。贝克休斯公司研发了一种氧化镁基触变性无机凝胶堵漏材料 MAX-LOCK，并基于地层漏速、漏层温度、漏失通尺寸等因素优化了 MAX-LOCK 凝胶的凝结时间，形成了专门用于处理碳酸盐岩井漏地层的 MAX-LOCK 凝胶堵漏技术，在中东碳酸盐岩恶性漏失井的堵漏效果良好，并获得 2019 年度世界石油技术大奖最佳油田流体与化学品奖，同时获得 2019 年 MEA 最佳钻井液/增产技术奖。

4.3 水泥堵漏工艺及应用

水泥堵漏工艺是指将配制好的水泥浆泵入井筒，在压差作用下水泥浆进入漏失通道，在地温作用下水泥浆固化形成封堵体，形成对裂缝的高强度封堵。水泥浆固化封堵体的承压能力高，与地层胶结强度大，目前在恶性井漏现场使用较多。

哈里伯顿公司研发了“一袋式”堵漏技术，即使用携带液将装有可膨胀水泥的不同尺度堵漏袋定点放入井下溶洞或大裂缝内，水泥膨胀并胀开堵漏袋后发生固化反应生成水泥固结体，封堵漏失通道，控制恶性井漏。该技术的承压封堵能力高达 20 MPa，可封堵裂缝宽度 3~25 mm，并且具备良好的抗温性能与稳定性。南海西部莺歌海盆地 X 构造天然裂缝普遍发育，地层温度最高 204 ℃，地层压力系数最高达到 2.19，地层承压能力低，安全密度窗口窄，钻井过程中极易发生恶性井漏等复杂情况，采用“试挤清洗液+注挤水

泥浆”间歇式挤水泥工艺进行高承压堵漏 10 余井次,堵漏成功率达到 100%,有效提高了莺歌海盆地 X 构造超高温、高压井段地层的安全顺利钻进^[36]。

4.4 复合材料堵漏工艺及应用

复合材料堵漏工艺是指将多种堵漏材料进行复配或分成前后段塞使用,尤其是使用高密度钻井液体系钻进高压且窄密度窗口地层时,地层极易产生诱导裂缝导致钻井液漏失,复合材料堵漏可充分发挥不同类型堵漏材料的优势,达到良好的堵漏效果。目前使用的主要复合段塞方式有桥塞+可固化、桥塞+高失水、凝胶+水泥等。

普光气田明 1 井钻至灰岩地层时发生恶性漏失,地层承压能力有限,首先使用高强度、耐浸泡的桥塞材料与交联固结剂混配成交联成膜堵漏浆,而后使用采用纳微米级颗粒且带正电荷的可固化材料配制化学固结堵漏浆,最后采用注入交联成膜堵漏浆与化学固结堵漏浆段塞的承压复合堵漏工艺提高地层的承压能力,后续钻井过程中承压堵漏井段未再发生复漏^[37]。针对莺琼盆地高温、高压、窄安全密度窗口(小于 0.10 g/cm^3)地层,韩成等^[38]研发了密度为 2.30 g/cm^3 的高密度“桥塞+高失水”复合堵漏技术,将地层安全密度窗口提高至 0.16 g/cm^3 ,钻井效率大幅提高。

4.5 机械堵漏工艺及应用

根据使用的堵漏工具不同,常用的机械堵漏工艺主要有膨胀波纹管 and 旁通阀堵漏等。

膨胀波纹管是对圆形管材进行冷压处理,使圆管径向发生塑性变形、截面形状呈波纹状,波纹管在液压作用下具有扩张恢复成圆管的特性。波纹管堵漏工艺利用这一特性,将波纹管下入预定井段,在井下通过液压或机械的方法胀管,使其截面形状变为直径较大的圆管紧贴在井壁上,达到封堵地层裂缝的目的。吐哈油田 L7-71 井钻井过程中先后漏失钻井液超过 $1\,000 \text{ m}^3$,进行 6 次堵漏,历时近 20 h 未能见效,采用长 62.5 m 膨胀波纹管在 2 451.0~2 513.5 m 地层段实施封堵成功^[39]。

为了解决在深井和超深井发生井漏时频繁提钻更换堵漏钻具、延长非生产作业时间、严重影响钻井时效问题,国外 DSI (Drilling Systems International)、贝克休斯、XDT (X Drilling Tools)、国民油井华高等公司研发了多种“井口投球式”和多次激活式堵漏旁通阀工具,通过投入特种材料的开孔球堵塞工具内孔,依靠憋压推动内部滑套完成开孔动作,再投入关孔球关闭工具侧面的旁通孔,实现不起钻堵漏作业,降低井控风险并

缩短钻井周期。但存在单次入井开关次数有限、开关对堵漏作业时的排量和泵压等参数精度要求高等问题^[40]。

综上,国内外恶性漏失地层堵漏工艺研究在许多方面有了突破性进展,同时现场实践结果表明,水泥、凝胶以及复合堵漏工艺处理裂缝性漏失井况的成功率较高,多次重复堵漏成功率也较高,但是存在堵漏周期长,一次堵漏成功率低,成功堵漏方法难以复制的难题。

5 恶性井漏堵漏技术发展展望

井漏(尤其是裂缝性地层恶性井漏)具有突发性和复杂性特征,揭示钻井液漏失机理,研发专用堵漏材料,建立强适用性堵漏工艺,形成高效堵漏技术,提高裂缝性地层一次堵漏成功率,是钻井工程领域研究和实践的重点之一。国内外在钻井堵漏研究和实践上积累了大量经验:在堵漏材料和方法上经历了由单一向多元化方向发展;在堵漏材料配方设计及施工工艺上经历了由最初的盲目性到经验性、再到初具科学性方向发展;在漏点检测、机械堵漏工具研发上也进行了有利探索。目前裂缝性地层堵漏效果进步显著,基本满足少量和中等漏失地层的安全、高效、经济钻井的需求。

尽管近年来堵漏技术的进步促进了堵漏成功率的进一步提高,但恶性漏失地层的堵漏效果仍不理想,尤其是大尺度裂缝和溶洞发育地层,在钻井液漏失和堵漏机理、堵漏材料自适应滞留和充填性能、堵漏材料高温稳定性能、堵漏材料和工艺的信息化和智能化等方面仍需开展深入研究。

总而言之,未来裂缝性恶性漏失地层堵漏技术的主要研究方向包括 5 个方面。①注重钻井液漏失和堵漏机理研究:不同地层的钻井液漏失及堵漏机理不明确,堵漏技术的科学指导性不强,未来应重点研究钻井液漏失和堵漏机理。由于地质条件不同,主要漏失通道存在很大差异,进行堵漏作业时需要根据漏失通道以及储集层物理化学性质的不同优选堵漏材料。钻井液漏失和堵漏机理的研究是堵漏技术的基础,未来应加强机理研究,明确不同地层、不同尺度漏失通道中钻井液的漏失规律,从力学平衡、漏失通道、封堵方式等方面揭示漏失通道的堵漏机理和原则,为科学选择堵漏材料及配方、堵漏方法和工艺提供依据。②注重自适应堵漏材料研发:常规堵漏材料形态与复杂尺度裂缝的自适应配伍性能差,在天然(诱导)裂缝发育的地层,裂缝尺度复杂且诱导敏感性强,常规桥接堵漏材料的粒径、水泥及凝胶堵漏材料的固化时间难以与裂缝(尤其是动态诱导裂缝)尺度相匹配,易

在漏失层井壁或在裂缝入口处形成“封门”现象，后续钻井时易返吐，复漏风险高。未来应根据漏失和堵漏机理，确定堵漏材料与裂缝漏失通道的级配关系，研发具有裂缝空间形态自适应特性的堵漏材料。③注重三维裂缝空间强驻留、强充填堵漏材料的研发：三维裂缝中堵漏材料驻留能力弱，充填堵塞程度低，大裂缝、溶洞等漏失通道纵向尺度大，在重力、密度等因素影响下，常规堵漏材料在纵向漏失空间中驻留能力弱，难以实现对漏失空间的有效全充填，堵漏效果不佳。未来应基于漏失通道参数和堵漏材料物理化学特征，研发具备裂缝空间强驻留强充填特征的高效堵漏材料，明确其自适应展布充填规律，增强其在漏失通道中的驻留和充填程度，改善漏失通道封堵效果，提高堵漏施工成功率。④注重抗高温堵漏材料研发：堵漏材料的抗高温能力不足，长期封堵稳定性差，在深层、高温井的使用中受限。深层油气是未来中国油气资源勘探开发的重点对象之一，与中浅层相比，深层钻井过程中普遍面临着高温环境，要求堵漏材料具有良好的抗温性能。常用堵漏材料的抗温低于140℃，高温长期稳定性较差，对深层裂缝漏失空间“堵不牢”，后期易发生复漏。加强材料的抗高温机理研究，研发抗温性能良好的堵漏材料，才能保证深层高温漏失地层的长期封堵效果。⑤注重发展大数据、智能化堵漏技术：目前恶性井漏堵漏技术经验性强，缺乏堵漏分析和评价专家系统，智能化程度不高。国内恶性漏失地层堵漏技术主要是依赖相似井况或邻近漏失井的堵漏处理经验，缺乏堵漏技术的科学优选和评价专家系统，无统一的堵漏工艺规范。开展一体化、智能化堵漏技术研究，首先建立重点区块堵漏数据库，形成具有广泛适用性的堵漏分析和评价专家系统；其次强化智能化堵漏材料和方法的基础研究，促进堵漏技术向数据化和智能化方向发展。2020年中国石油天然气集团有限公司正式设立重大工程技术现场试验项目“恶性井漏防治技术与高性能水基钻井液现场试验”，将研发智能化堵漏材料及工具、建立井漏综合大数据库、构建防漏堵漏远程判断及辅助决策专家系统等关键技术列为研究重点，并设立了现场应用目标。未来在国家油气重大专项、国家重点研发计划以及大型石油公司等层面的支持下，智能化堵漏技术及装备将取得长足发展，实现恶性井漏的高效综合治理。

6 结语

随着油气勘探开发向深层—超深层、非常规、低品位等油气资源领域拓展，裂缝（缝洞）性地层恶性

井漏是钻井过程中最常见且最难以治理的井下复杂事故之一，目前国内外在钻井液漏失机理、堵漏机理、堵漏材料、堵漏工艺研究等方面均取得了一定进展，但现有技术均尚未有效解决裂缝性地层恶性井漏难题。未来，恶性漏失地层承压堵漏技术应综合地质、工程、材料等学科开展一体化研究与实践，深入完善漏失和堵漏机理研究，强化堵漏材料与堵漏工艺对漏失地层的适应性；注重智能堵漏材料和专家数据库的研究与开发，构建智能化堵漏系统，进而提高恶性井漏堵漏技术水平，实现裂缝性恶性漏失地层“高效、安全、经济”钻井，加快油气勘探开发进程。

参考文献：

- [1] 王中华. 复杂漏失地层堵漏技术现状及发展方向[J]. 中外能源, 2014, 19(1): 39-48.
WANG Zhonghua. The status and development direction of plugging technology for complex formation lost circulation[J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(1): 39-48.
- [2] 孙金声, 张希文. 钻井液技术的现状、挑战、需求与发展趋势[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(6): 67-76.
SUN Jinsheng, ZHANG Xiwen. Situations, challenges, demands and trends of drilling fluid technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(6): 67-76.
- [3] 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.
XU Chengyuan, YAN Xiaopeng, KANG Yili, et al. Structural failure mechanism and strengthening method of plugging zone in deep naturally fractured reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 399-408.
- [4] FENG Y, GRAY K E. Lost circulation and wellbore strengthening[M]. Switzerland: Springer, 2018.
- [5] FIDAN E, BABADAGLI T, KURU E. Use of cement as lost circulation material-field case studies[R]. SPE 88005-MS, 2004.
- [6] LAVROV A. Lost circulation: Mechanisms and solutions[M]. London: Gulf Professional Publishing, 2016.
- [7] 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.
XU Mingbiao, ZHAO Mingkun, HOU Shanshan, et al. Research and application of oil-based bridge plugging agent[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(6): 799-802.
- [8] 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.
SU Xiaoming, LIAN Zhanghua, FANG Junwei, et al. Lost circulation material for abnormally high temperature and pressure fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tazhong block, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 165-172.
- [9] ZHAI X, CHEN H, LOU Y, et al. Prediction and control model of shale induced fracture leakage pressure[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 198: 108186.
- [10] 李大奇, 刘四海, 康毅力, 等. 天然裂缝性地层钻井液漏失规律研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 101-106.
LI Daqi, LIU Sihai, KANG Yili, et al. Dynamic behavior of drilling fluid leakage in naturally fractured formations[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2016, 38(3): 101-106.
- [11] WANG M, GUO Y, CHEN W. Effect of solid particles on the lost circulation of drilling fluid: A numerical simulation[J]. Powder Technology, 2020, 363: 408-418.
- [12] 贾利春, 陈勉, 侯冰, 等. 裂缝性地层钻井液漏失模型及漏失规

- 律[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 95-101.
- JIA Lichun, CHEN Mian, HOU Bing, et al. Drilling fluid loss model and loss dynamic behavior in fractured formations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 95-101.
- [13] RAZAVI O, LEE H P, OLSON J E, et al. Drilling mud loss in naturally fractured reservoirs: Theoretical modelling and field data analysis[R]. SPE 187265, 2017.
- [14] SABAH M, TALEBKEIKHAH M, AGIN F, et al. Application of decision tree, artificial neural networks, and adaptive neuro-fuzzy inference system on predicting lost circulation: A case study from Marun oil field[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 177: 236-249.
- [15] FENG Y, GRAY K E. Modeling lost circulation through drilling-induced fractures[J]. SPE Journal, 2018, 23(1): 205-223.
- [16] ASTON M S, ALBERTY M W, MCLEAN M R, et al. Drilling fluids for wellbore strengthening[R]. SPE 87130, 2004.
- [17] MEHRABIAN A, JAMISON D E, TEODORESCU S G. Geomechanics of lost-circulation events and wellbore-strengthening operations[R]. SPE 174088, 2015.
- [18] VAN O E, RAZAVI O S. Wellbore strengthening and casing smear: the common underlying mechanism[R]. SPE 168041-MS, 2014.
- [19] LOLOI M, ZAKI K S, ZHAI Z, et al. Borehole strengthening and injector plugging-the common geomechanics thread[R]. SPE 128589-MS, 2010.
- [20] 康毅力, 许成元, 唐龙, 等. 构筑井周坚韧屏障: 井漏控制理论与方法[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 473-479.
- KANG Yili, XU Chengyuan, TANG Long, et al. Constructing a tough shield around the wellbore: Theory and method for lost-circulation control[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 473-479.
- [21] AMANULLAH M. Characteristics, behavior and performance of arc plug: A date seed-based sized particulate LCM[R]. SPE 182840-MS 2016.
- [22] 康毅力, 余海峰, 许成元, 等. 毫米级宽度裂缝封堵层优化设计[J]. 天然气工业, 2014, 34(11): 88-94.
- KANG Yili, YU Haifeng, XU Chengyuan, et al. An optimal design for millimeter-wide fracture-plugged zones[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(11): 88-94.
- [23] 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.
- HOU Shili, LIU Guangyan, HUANG Daquan, et al. Lost circulation control with high filtration lost circulation materials[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(1): 53-56.
- [24] 王平全, 白杨, 苗娟, 等. 钻井过程中吸水树脂型堵漏剂的研制与性能评价[J]. 钻采工艺, 2013, 36(1): 76-80.
- WANG Pingquan, BAI Yang, MIAO Juan, et al. Preparation and evaluation of absorbent resin sealing agent PQ[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(1): 76-80.
- [25] 刘文堂, 郭建华, 李午辰, 等. 球状凝胶复合封堵剂的研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 34-39.
- LIU Wentang, GUO Jianhua, LI Wuchen, et al. The development and application of a microsphere gel composite plugging agents[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 34-39.
- [26] HASHMAT M D, SULTAN A S, RAHMAN S, et al. Flowing gels for lost circulation prevention[R]. SPE 188103-MS, 2017.
- [27] 聂勋勇, 王平全, 罗平亚. 用于钻井堵漏的特种凝胶屈服应力研究[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 80-82.
- NIE Xun Yong, WANG Pingquan, LUO Pingya. A study of the yield stress of a viscoelastic gel applied in severe lost circulation control[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 80-82.
- [28] IVAN C D, BRUTON J R, MARC T, et al. Making a case for rethinking lost circulation treatments in induced fractures[R]. SPE 77353-MS, 2002.
- [29] SWEATMAN R, WANG H, XENAKIS H. Wellbore stabilization increases fracture gradients and controls losses/flows during drilling[R]. SPE 88701-MS, 2004.
- [30] 赵启阳. 一种可固化堵漏工作液体系的研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- ZHAO Qiyang. Study on a curable plugging working fluid system[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [31] 孙金声, 雷少飞, 白英睿, 等. 智能材料在钻井液堵漏领域研究进展和应用展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 100-110.
- SUN Jinsheng, LEI Shaofei, BAI Yingrui, et al. Research progress and application prospects of smart materials in lost circulation control of drilling fluids[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2020, 44(4): 100-110.
- [32] 宋波凯, 谢建安, 阮彪, 等. 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, 2019, 48(1): 135-140.
- SONG Bokai, XIE Jian'an, RUAN Biao, et al. Research on optimization of drilling fluid system and loss prevention and control technology in Zhongguai-Manan region[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(1): 135-140.
- [33] 张沛元. “逐级渐进法”桥接堵漏工艺[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(2): 67-69.
- ZHANG Peiyuan. Progressive bridge plugging technology for lost circulation[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2010, 27(2): 67-69.
- [34] 王平全, 李再钧, 聂勋勇, 等. 用于钻井堵漏和封堵的特种凝胶抗冲稀性能[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 697-701.
- WANG Pingquan, LI Zaijun, NIE Xun Yong, et al. Anti-dilution properties of a special gel applied to loss circulation control in drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 697-701.
- [35] LECOLIER E, HERZHAFT B, ROUSSEAU L, et al. Development of a nanocomposite gel for lost circulation treatment[R]. SPE 94686-MS, 2005.
- [36] 杨仲涵, 罗鸣, 陈江华, 等. 莺歌海盆地超高温高压井挤水泥承压堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 47-51.
- YANG Zhonghan, LUO Ming, CHEN Jianghua, et al. Cement squeezing for pressure-bearing plugging in ultra-high temperature and high pressure wells in the Yinggehai Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 47-51.
- [37] 刘金华, 刘四海, 龙大清, 等. 明1井交联成膜与化学固结承压堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 54-60.
- LIU Jinhua, LIU Sihai, LONG Daqing, et al. Strengthening plugging operations by combining cross-linked film and chemical consolidation in well Ming-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 54-60.
- [38] 韩成, 罗鸣, 杨玉豪, 等. 莺琼盆地高温高压窄安全密度窗口钻井关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(5): 568-572.
- HAN Cheng, LUO Ming, YANG Yuhao, et al. Key drilling technologies for HTHP wells with narrow safety density window in the Yingqiong Basin[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2019, 41(5): 568-572.
- [39] 刘鹏. 膨胀波纹管封隔定向井段应用技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- LIU Peng. Research and application of solid expandable profile liner in directional well section[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [40] 池胜高, 代琼曦, 张策, 等. 国外多次激活旁通阀技术现状[J]. 石油机械, 2015, 43(10): 30-33, 41.
- CHI Shenggao, DAI Qiongxi, ZHANG Ce, et al. Current technical status of foreign multiple activation bypass valve[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(10): 30-33, 41.
- 第一作者简介: 孙金声(1965-), 男, 江西于都人, 博士, 中国工程院院士, 主要从事钻井液、储集层保护、天然气水合物钻采理论与技术等方面的研究工作。地址: 北京市昌平区黄河街5号院1号楼, 邮政编码: 102206。E-mail: sunjinsheng@petrochina.com.cn
- 联系作者简介: 白英睿(1989-), 男, 河北邯郸人, 博士, 中国石油大学(华东)副教授, 主要从事防漏堵漏、储集层保护等方面的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 中国石油大学(华东)石油工程学院, 邮政编码: 266580。E-mail: smart-byron@163.com
- 收稿日期: 2020-07-27 修回日期: 2021-03-28

(编辑 唐俊伟)