

钻井堵漏技术研究现状与展望

汪春林^{1*}, 廖忠辉², 朱佳宝², 刘生滔¹, 杨 健¹, 都伟超², 陈 刚²

¹陕西合信油服科技股份有限公司榆林市地层物理封堵工程技术研究中心, 陕西 榆林

²西安石油大学油气田化学陕西省高校工程研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2025年10月10日; 录用日期: 2025年11月18日; 发布日期: 2025年11月25日

摘 要

井漏是制约石油天然气钻井工程安全、高效、经济运行的全球性技术瓶颈。随着勘探开发向深层、复杂地层拓展, 井漏问题日益突出, 对高效堵漏技术提出了更高要求。快速失水堵漏技术以其响应迅速、封堵强度高、成功率高等优势, 成为应对中-严重漏失的关键手段。本文系统梳理了国内外快速失水堵漏材料的研究进展, 详细评述了暂堵型、膨胀类、无机凝胶、桥接堵漏、化学堵漏及高失水堵漏等六类主要材料的堵漏机理、性能特点、代表性研究成果及现场应用案例。在此基础上, 深入分析了当前堵漏技术面临的关键挑战, 并从材料创新、机理研究、智能决策等方面展望了未来发展趋势, 以期为我国钻井堵漏技术的研发与优化提供系统性参考。

关键词

井漏, 堵漏材料, 架桥封堵, 机理, 研究进展

Current Status and Prospects of Drilling and Plugging Technology Research

Chunlin Wang^{1*}, Zhonghui Liao², Jiabao Zhu², Shengtao Liu¹, Jian Yang¹, Weichao Du², Gang Chen²

¹Yulin Engineering & Technology Research Center for Formation Physical Plugging, Shaanxi Hexin Oilfield Services Technology Co., Ltd., Yulin Shaanxi

²Engineering Research Center of Oil and Gas Field Chemistry, Universities of Shaanxi Province, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

Received: October 10, 2025; accepted: November 18, 2025; published: November 25, 2025

Abstract

Lost circulation poses a global technical challenge that constrains the safety, efficiency, and

*通讯作者。

文章引用: 汪春林, 廖忠辉, 朱佳宝, 刘生滔, 杨健, 都伟超, 陈刚. 钻井堵漏技术研究现状与展望[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1486-1495. DOI: 10.12677/me.2025.136164

economic viability of oil and gas drilling operations. As exploration and development extend into deeper and more complex formations, the issue of lost circulation becomes increasingly prominent, demanding higher performance from effective control technologies. Rapid fluid loss control technology has emerged as a key solution for addressing moderate to severe lost circulation, owing to its advantages of rapid response, high sealing strength, and high success rate. This paper systematically reviews the research progress on rapid fluid loss control materials both domestically and internationally. It provides a detailed critique of the plugging mechanisms, performance characteristics, representative research findings, and field application cases of six main categories of materials: temporary plugging agents, swelling materials, inorganic gels, bridging agents, chemical grouting materials, and high fluid loss control materials. Furthermore, the paper delves into the key challenges currently faced by lost circulation control technologies. Future development trends are prospected from perspectives such as material innovation, mechanism research, and intelligent decision-making systems, aiming to provide a systematic reference for the research, development, and optimization of drilling lost circulation control technologies in China.

Keywords

Lost Circulation, Lost Circulation Materials (LCMs), Bridging and Sealing, Mechanism, Research Progress

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钻井是油气勘探开发的核心环节,而井漏则是该过程中最常见、最复杂且代价高昂的井下故障之一。据统计,全球范围内,每年因井漏导致的直接经济损失(包括钻井液损失、非生产时间、特殊材料消耗及事故处理费用)高达近 30 亿美元,在某些漏失高发区域,处理井漏的时间可占总钻井时间的 15%~20% [1] [2]。井漏的本质是钻井液在压差作用下非预期地流入地层,不仅造成资源浪费和进度延误,更会破坏井筒压力平衡,诱发井壁坍塌、卡钻、甚至井控失控等灾难性后果,严重威胁人员安全和生态环境[3] [4]。井漏发生的根本条件在于地层中存在可供流体流动的通道(如孔隙、裂缝、溶洞),且井筒内钻井液柱压力大于地层压力。漏失通道的规模从微米级的孔隙到厘米级甚至米级的裂缝、溶洞不等,其几何形态、分布规律及地层压力背景千差万别,这决定了堵漏技术的复杂性和多样性[5]。传统的堵漏方法,如单纯的桥接堵漏或水泥堵漏,在处理复杂地层,尤其是深层裂缝性、破碎带或压力敏感地层时,常显露出局限性:桥接堵漏材料的架桥稳定性受材料形状、尺寸分布与裂缝匹配度影响大,封堵强度有限,易发生重复漏失;水泥浆堵漏则存在凝固时间控制难、易污染产层、施工周期长、脆性水泥石在后续作业中易被破坏等问题[6] [7]。为克服传统技术的不足,国内外科研与工程界持续致力于发展快速失水堵漏技术。该技术体系的核心在于利用特制堵漏浆在漏失通道内快速失水,使其中的固相组分(刚性颗粒、纤维、片状材料等)和化学组分(胶凝材料、聚合物等)能够迅速聚集、架桥、成网、胶结,在漏点处形成一个致密、坚韧且承压能力高的封堵隔墙[8] [9]。理想的快速失水堵漏体系应具备以下特征:(1) 快速响应能力,能短时间内形成有效封堵;(2) 高封堵强度,能承受后续钻井作业中的循环压耗和激动压力;(3) 良好的配伍性,与钻井液体系相容且不影响其性能;(4) 优异的抗温抗盐性能,适应深井高温高压环境;(5) 环境友好性,尤其对于产层,应具备可降解或可破胶特性以保护储层[10]。鉴于快速失水堵漏技术的重要性与复杂性,本文旨在对国内外该领域的研究现状进行一次全面、系统的梳理与评述。文章将聚焦于不同类型

堵漏材料的机理、性能与最新进展,分析其适用条件与局限性,并展望未来技术发展方向,以期为相关科研人员与现场工程师提供有益借鉴。

2. 主要堵漏材料类型与研究进展

快速失水堵漏材料的分类方式多样,根据其作用机理和主要成分,可大致分为以下六类。

2.1. 暂堵型堵漏材料

暂堵型堵漏剂的核心设计理念是实现“可控封堵”,即在钻井和完井过程中有效封堵漏层,而在作业结束后能够通过物理或化学手段解除封堵,恢复地层原始渗透率,最大限度地保护油气产能。其作用机理通常是在工作液(如钻井液、完井液)中加入特定尺寸的固相颗粒(如碳酸钙、盐粒)与纤维状结网剂,通过泵送至漏失层段。在正压差作用下,这些材料在漏道狭窄处(“喉道”)发生架桥,随后纤维材料相互交织牵拉,形成具有一定强度和韧性的三维网络结构,最终构建一个低渗透率、高承压能力的暂堵层[11][12]。

国外研究方面,暂堵技术起步较早且不断创新。McCabe 等人[13]开发了一种由烷基磷酸盐酸酯和有机胺组成的液态碳氢化合物暂堵剂。该剂在泵入地层后能发生快速凝结反应,形成坚实的暂堵屏障,且其破胶条件温和,易于解除。美国能源部(DOE)资助的研究项目成功研制出基于纳米纤维素的智能响应型暂堵剂[14]。该材料以纳米纤维素为基体,通过化学修饰引入酶响应基团。在 85℃ 的模拟储层条件下,其形成的暂堵层封堵强度可达 8~12 MPa,能将漏失速率从 30 bbl/h 显著降低至 0.5 bbl/h。更为突出的是,该材料可通过注入低浓度(如 0.1%)的纤维素酶溶液在 4 小时内实现快速解堵,地层渗透率恢复率超过 98%。相较于传统的酸溶性暂堵材料,其原料来源可再生,成本估计可降低 20%,展现了良好的应用前景。

国内研究同样取得了显著成果。孟瑄等人[15]针对裂缝性储层开发了一种新型裂缝暂堵剂体系,其优化配方为:清水 + 7.5%主剂 CFTD-1-1-A + 0.3%辅助剂 CFTD-1-1-B + 1.0%固化剂。该体系通过主剂中的刚性颗粒在裂缝喉部架桥,辅助剂中的纤维形成三维网络,固化剂则增强整体结构强度,实现“架桥-成网-固化”三级封堵机制。实验表明,该体系在 140℃ 高温、5 MPa 压差条件下,对宽度为 1 mm 和 2 mm 的人工裂缝表现出卓越的封堵性能,3600 秒内的总滤失量分别控制在 8 mL 和 30 mL 以内。该技术在大庆油田某井进行现场试验,该井为裂缝性碳酸盐岩储层,漏失类型为中等裂缝性漏失(裂缝宽度 1~3 mm)。施工中采用堵漏浆密度 1.25 g/cm³,泵速 1.5 m³/min,注入后静置候凝 4 h。后续测试显示,井筒承压能力从 1.20 g/cm³ 提升至 1.65 g/cm³,产能恢复率 100%,验证了其优异的暂堵和保护储层能力。张庆华等人[16]研制的 SJ-2 暂堵剂,在水基环境中堵塞效率超过 90%,且具有较高的突破压力,特别适用于负压井的洗井替油作业,有效避免了作业过程中的地层伤害。此外,诸如 PCC(可酸溶)暂堵剂、DF-1 等新型暂堵材料也成为近年来的研究热点,不断推动着暂堵技术的进步[17]。

2.2. 膨胀类堵漏材料

膨胀类堵漏剂是一类能够吸收钻井液中的水分而发生显著体积膨胀的高分子材料。其堵漏机理在于:吸水膨胀后的材料颗粒体积增大数十至数百倍,在漏失通道中通过架桥、填充和挤压作用,形成一种具有弹性和韧性的密封体,有效阻断流体流动[18]。这类材料对不规则裂缝和孔洞具有良好的适应能力。

具有代表性的产品如 Nguyen 等人[19]报道的 Poly Block,它由特定颗粒状材料和结晶状聚合物混合而成,专门设计用于处理漏失严重的井况,在埃及尼罗河三角洲地区的现场应用中取得了显著效果。Davidson 等人[20]介绍了一种交联聚合物堵漏体系,该体系包含纤维材料和水溶性交联聚合物。纤维材料吸水膨胀后,在堵漏浆中相互交错形成“拉筋”结构,增强了整体网络的机械强度;而吸水膨胀的凝胶则填充孔隙,共同在漏失通道内形成高强度的封堵层。该材料对地层伤害小且可生物降解,在 Giove-2 井的成功应用,有效治理了令人头疼的失返性漏失。Heying [21]则关注于膨胀速率的控制,其报道的方法选

用遇水膨胀速率较慢的高分子聚合物, 确保材料在充分膨胀前能够输送到目标漏层深处, 避免过早膨胀影响泵送或在井筒浅部形成无效封堵。

国内研究人员在膨胀聚合物的合成、改性及应用方面开展了大量工作。夏海英等人[8]以丙烯酸(AA)和丙烯酰胺(AM)为主要单体, 采用水溶液聚合法, 加入适量交联剂, 制备了一种凝胶状聚合物堵漏剂 GCY-X。将其在 105℃ 下烘干、粉碎后得到最终产品。性能测试表明, GCY-X 在室温下吸蒸馏水倍数高达 303 倍, 在钻井液中的吸水倍数也达到 20 倍, 抗温能力为 100℃。该剂与常用钻井液配伍性好, 对宽度为 1.2~2.5 mm 的岩心裂缝封堵率可达 100%, 承压能力为 6 MPa。彭芸欣等人[9]通过系统实验, 优化了合成工艺参数: 交联剂 0.06%、引发剂 0.35%、膨润土 15%、PH 值 7.0、单体总加量 30%、单体配比 $m(\text{AA}):m(\text{AM}) = 3:1$ 、反应温度 50℃, 制备出的堵漏剂综合性能优良。为了满足更深部钻井的需求, 张歧安等人[10]以丙烯酰胺为基础, 采用具有疏水性的有机化合物作交联剂, 通过双交联法制备了互穿网络聚合物(IPN)型吸水树脂, 并进一步对其表面进行疏水改性, 成功延迟了膨胀起始时间, 使其能更深入地进入地层后才开始显著膨胀, 提高了封堵的精准性。针对高矿化度地层, 廖列文等人[11]选用 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)和丙烯酸(AA)共聚, 制备了 AA-AMPS 高吸水性树脂。当 AMPS 与 AA 摩尔比为 15:85, 交联剂和引发剂用量分别为单体的 0.025% 和 0.05%, 中和度 90%, 单体质量分数 35%, 反应温度 60℃ 时, 所得树脂耐盐性突出, 在 0.9% 和 1.8% 盐水中的吸液能力分别达到 125 g/g 和 100 g/g 以上, 适用于矿化度较高的中浅井堵漏。刘永兵等人[22]则探索了丙烯酸、丙烯腈和丙烯酰胺的三元共聚体系, 以期获得更佳的性能。

2.3. 无机凝胶堵漏材料

无机胶凝堵漏剂, 主要以水泥为基础, 辅以石灰、石膏等材料, 是钻井工程中历史最悠久、应用最广泛的堵漏材料之一。其最大优势在于原料易得、成本低廉, 且固化后形成的水泥石具有极高的承压强度, 非常适合用于封堵大型裂缝(开度 0.8~3 cm)、破碎带和砾石层等严重漏失工况[23]。堵漏水泥的成功应用关键在于对水泥浆性能(如流动性、凝固时间、早期强度)的精确控制以及对灌注工艺的优化。近年来, 国内外在新型堵漏水泥研发、外加剂技术和施工工艺方面取得了长足进步。Tongwa 等人[24]创新性地将聚合物网络嵌入到黏土结构中, 利用黏土氧原子与聚合物酰胺侧链氢原子间的氢键、以及黏土表面金属离子与聚合物羧基氧原子的配位作用, 构建了一种有机-无机杂化三维网络水凝胶。该材料热稳定温度高达 168℃, 并表现出优异的力学性能, 为开发高性能堵漏水泥提供了新思路。各种功能性水泥和外加剂的涌现极大地丰富了堵漏手段: 触变性水泥可在静止状态下快速形成凝胶结构, 有效防止浆液进入地层后继续向深处流失; 膨胀水泥在凝固过程中产生微膨胀, 能更好地与井壁和裂缝面结合, 提高封堵层的密封性; 快干水泥可显著缩短候凝时间, 提高作业效率; 高效缓凝剂和速凝剂则使得施工人员能够根据地层温度和作业需求灵活调节水泥浆的泵送和安全操作时间[25][26]。这些技术进步共同提升了水泥堵漏的成功率和安全性。

2.4. 桥接堵漏材料

桥接堵漏是目前全球范围内应用最为普及的堵漏技术, 尤其在处理裂缝性地层漏失时, 其应用比例在美国高达 90%, 全球范围内超过 65% [27][28]。该技术的理论基础是“架桥理论”, 即通过将不同形状、尺寸的惰性固体材料按一定级配与钻井液混合形成堵漏浆。根据材料形状, 桥接堵漏材料通常分为三类:

(1) **颗粒状材料**(如核桃壳、坚果壳、碳酸钙、陶瓷球等): 其作用是在流经漏失通道的狭窄部位时被卡住, 形成“桥墩”, 为后续封堵提供支撑点。

(2) **纤维状材料**(如木纤维、矿棉、雷特纤维、聚合物纤维等): 它们在堵漏浆中纵横交错, 相互拉扯, 形成“拉筋”网络, 起到悬浮、增强和填充作用, 使封堵层更具韧性。

(3) **片状材料**(如云母片、赛璐珞片等): 主要起填充和密封作用, 覆盖在已架桥的骨架上, 降低封堵层的渗透率。

这三类材料复配使用, 在裂缝中经历架桥、堆积、充填过程, 最终形成一个致密、高承压的裂缝封堵层[29]。

机理研究方面, 许成元等人[30]通过实验模拟, 将桥接封堵层的形成过程清晰地划分为“滞留阶段”和“封堵阶段”。滞留阶段是封堵成败的关键, 堵漏材料在裂缝中经历复杂的运移、沉积、架桥、结构破坏与重构, 最终形成一个稳定的初始桥接框架。封堵阶段则是在此框架基础上, 后续材料持续堆积、压实, 形成承压能力更强的致密封堵带。这一研究深化了对动态封堵过程的认识。进一步地, 该团队提出了“PPSD (Particle Packing and Structural Design)优化技术”, 通过调整颗粒尺寸分布(如 $D_{50} = 100\ \mu\text{m}$, $D_{90} = 300\ \mu\text{m}$)与纤维长度(3~6 mm)的匹配关系, 显著提升了桥接效率, 在模拟实验中封堵强度提高约30%。材料开发上, Amanullah 等人[31]利用椰枣核这一天然资源, 开发了系列环保型桥接颗粒材料, 实验证明其对 2 mm 宽裂缝的承压封堵能力可达 10 MPa 以上, 为低成本绿色堵漏提供了选项。面对深井超深井的苛刻条件, 康毅力等人[21]系统研究了核桃壳、碳酸钙等常用桥接材料在高温下的老化行为, 建立了相应的性能评价方法和指标体系, 指出材料高温老化导致的性能劣化是深部地层堵漏后发生重复性漏失的一个重要原因, 为深井堵漏材料的选择提供了重要依据。

2.5. 化学堵漏材料

化学堵漏材料是指通过化学反应在漏失通道内实现封堵的一类制剂, 主要包括树脂、凝胶和膨胀聚合物等。其共性优势在于: 凝固时间可在一定范围内精确调控; 配制的堵漏浆密度较低, 利于泵送; 能深入封堵微细孔隙; 形成的封堵体连续性好、强度高; 且钻屑对其性能干扰较小[32]。这类材料特别适用于常规桥接材料难以奏效的渗透性砂岩漏层、微裂缝漏层以及部分失返性漏失。树脂类堵漏剂: 如脲醛树脂、酚醛树脂、环氧树脂等。其单体或预聚物被泵送至漏层后, 在地层温度或固化剂作用下发生聚合交联反应, 由液态转变为固态。反应程度超过凝胶点后, 体系粘度急剧上升, 进入成型阶段, 最终形成三维网络结构的坚硬固体, 牢固地胶结在漏失通道中[33]。凝胶类堵漏剂: 种类繁多, 包括合成胶乳堵剂、聚合物胶囊增稠堵剂、水解聚丙烯腈堵剂、PMN-化学凝胶堵剂、液体硅酸钠(水玻璃)堵剂等。其中, PMN 化学凝胶是一种时间可控的凝胶体系, 其成胶时间可通过调节催化剂浓度(通常为 0.1%~0.5%)精确控制, 成胶时间范围从 30 min 至 4 h 可调。该体系通过自由基聚合与交联反应形成三维网络结构, 凝胶强度可达 10~15 MPa, 适用于深井高温环境($\leq 150^\circ\text{C}$)。例如, 在大庆油田某井的现场应用中, 该井为微裂缝性漏失(裂缝宽度 0.5~1 mm), 采用 PMN 凝胶体系, 催化剂浓度 0.3%, 成胶时间 2 h, 注入后井漏完全停止, 后续钻探无重复漏失, 产层渗透率恢复率达 92%。它们通常通过交联反应、PH 值变化、离子作用或温度触发等方式形成具有粘弹性的凝胶体, 通过粘滞阻力和物理堵塞作用封堵漏道[34]。例如, PMN 凝胶是一种时间可控的凝胶体系, 其成胶时间可通过调节催化剂浓度来控制, 适用于需要一定作业时间的深井堵漏。膨胀聚合物类堵漏剂: 如前文 1.2 节所述, 这类材料也常被归为化学堵漏范畴。它不依赖于与地层物质的化学反应, 而是利用其本身超强的吸水膨胀特性来封堵漏道。其优点在于对漏道尺寸的精确匹配性要求较低, 只要材料能进入漏道, 即可通过膨胀填充空间。在现场应用中, SYZ 膨胀材料、烃聚合物堵漏剂、乳液型堵剂、不饱和聚酯树脂、脲醛树脂、PMN 化学凝胶等化学堵漏材料在许多复杂井漏处理中取得了良好效果[35]。

2.6. 高失水堵漏材料

高失水堵漏材料是快速失水堵漏技术的典型代表, 其配方通常由滤失控制材料(如纤维、硅藻土)、胶

凝材料(如快凝水泥、胶质水泥)和增强材料(如刚性颗粒)等复配而成。其堵漏机理是:当堵漏浆被泵入漏失层段时,在压差作用下浆液中的水分迅速滤失进入地层,导致浆液中的固相组分浓度急剧升高,迅速变稠、聚集,在漏口附近形成一个致密、低渗透的滤饼。这个滤饼在地层压力的进一步作用下被压实,牢固地填充在漏失通道的入口或内部,从而实现快速封堵[36]。该技术以其卓越的驻留能力、极快的封堵速度和降低重复漏失的概率而备受现场青睐。国内研究与应用十分活跃。早期使用清水与 HHH 高失水堵漏剂复配,发现该体系虽失水速度快,但悬浮稳定性较差。通过向体系中添加羧甲基纤维素(CMC),有效改善了堵漏浆的悬浮性能,延缓了失水时间,使其更可控,从而提高了堵漏作业的成功率。针对宽度小于 3 mm 的裂缝漏失,研发了 ZYSD 高失水固结堵漏技术。室内评价和现场应用表明,该技术不仅封堵速度快,而且形成的封堵带强度高,承压能力强,能有效避免重复漏失。现场实践中,川庆钻探工程公司的“何劲堵漏工作室”对高失水堵漏技术进行了深入的配方优化和工艺改进。在双鱼 001-H2 井的作业中[37],他们采用“高失水堵漏剂 + 刚性粒子(如碳酸钙) + 雷特纤维”的综合堵漏方案,一次性成功封堵漏层,使全井筒承压能力提升至等效密度 1.95 g/cm^3 以上,满足了安全钻井的要求。此项集成技术在包括平探 1 井、塔探 1 井、磨溪 023-H1 井在内的 40 余口高风险探井和生产井中广泛应用,一次堵漏成功率得到显著提升。与传统桥塞堵漏相比,该技术形成的封堵塞强度更高,堵漏浆密度易于调节,施工周期更短,安全性更好,特别适用于存在含水层或需要重点保护的产层段堵漏,据报道一次成功率可提高 40% 以上。王曦等人[27]则系统研究了不同堵漏剂单独使用及复配使用的效果。研究发现,对于 3 mm 裂缝,单独使用 2% 浓度的锯末可承受 3 MPa 压力;但对大于 3 mm 的裂缝,锯末效果下降。核桃壳对 3 mm 裂缝在 4 MPa 下封堵效果良好,但对更宽裂缝需与其他材料复配。FZS 新型堵漏剂对 4~5 mm 裂缝封堵效果优异,承压达 5 MPa。最终通过复配实验确定最优配方为:基浆 + 1.5% FZS + 2.5% 核桃壳 + 1.0% CMC,该复配体系承压能力超过 5 MPa,且滤失量最小,展现了协同增效作用。

2.7. 各类堵漏材料对比分析

为系统对比六类主要堵漏材料的性能特点,本文从适用漏失尺寸、封堵强度、成本、环保性、对储层伤害等维度进行横向分析(见表 1)。总体而言,各类材料各有优劣:桥接堵漏成本低、应用广,但匹配性要求高;化学堵漏强度高、可控性好,但成本较高且环保性存疑;高失水堵漏响应快、成功率高,但配方复杂、抗温性有限。在实际应用中,需根据地层特征、漏失类型及作业要求综合选材,必要时采用复配技术以发挥协同效应。

3. 存在的问题与解决方案

当前,油气勘探开发持续向深层、超深层、非常规资源领域拓展,钻井环境日趋复杂。深层地层往往经历多期构造运动,裂缝、溶洞发育,且地应力状态复杂,压力系统多变,极易诱发严重井漏。同时,水平井、大位移井等先进钻井技术的广泛应用,使得长裸眼段、大井斜角井眼钻遇不同压力体系漏失层的风险大增,对堵漏技术的时效性、可靠性和长效性提出了近乎苛刻的要求。传统堵漏技术在上述挑战面前常力不从心。桥接堵漏效果严重依赖于堵漏材料颗粒分布与裂缝尺寸的匹配度(“架桥法则”),在实际地层中,裂缝形态不规则且尺寸多变,难以实现完美匹配,导致架桥不稳定,封堵强度低,易发生重复漏失。水泥浆堵漏虽承压高,但存在泵送风险(如过早凝固)、污染产层、施工周期长、脆性水泥石易被后续钻具破坏等问题。聚合物凝胶堵漏,特别是早期以聚丙烯酰胺为主的体系,普遍存在耐温抗盐性能不足(尤其在 $>120^\circ\text{C}$ 、高钙镁离子环境下易脱水缩聚)、在动态流体冲刷下驻留能力弱、形成的凝胶强度有限等缺陷,制约了其在深部复杂地层的应用效果。因此,研发能够适应恶劣工况、智能响应、高效封堵且环境友好的新型快速失水堵漏材料与技术体系,已成为保障钻井作业安全、降本增效、推动油气工业可持续发展的重大战略需求。

Table 1. Comparison of primary leak-stopping materials
表 1. 主要堵漏材料性能对比

材料类型	适用漏失尺寸	封堵强度	成本	环保性	对储层伤害	主要优缺点
暂堵型	微裂缝 - 中裂缝 (0.1~2 mm)	中高	中	良好	低(可解堵)	优点: 可解堵、保护产层; 缺点: 抗温性有限, 适用条件较窄
膨胀类	中裂缝 (1~5 mm)	中	中低	较好	中	优点: 适应不规则裂缝; 缺点: 膨胀速率难控, 抗盐性差
无机凝胶	大裂缝 - 溶洞 (>5 mm)	高	低	中	高	优点: 强度高、成本低; 缺点: 凝固时间难控, 易污染产层
桥接堵漏	中 - 大裂缝 (1~10 mm)	中高	低	较好	中	优点: 应用成熟、成本低; 缺点: 匹配性要求高, 重复漏失风险大
化学堵漏	微裂缝 - 中裂缝 (0.1~5 mm)	高	高	较差	中高	优点: 强度高、可控性好; 缺点: 成本高, 环保性差, 抗温抗盐性有限
高失水堵漏	中裂缝 (1~5 mm)	高	中高	中	中	优点: 响应快、成功率高; 缺点: 配方复杂, 抗温性有限, 悬浮稳定性难控

针对性材料筛选与复配：基于对漏失地层特征的深刻理解(如裂缝性、孔隙性、溶洞型)，有针对性地筛选和复配堵漏材料。对于裂缝性地层，重点优选片状、纤维状材料以快速构建高强度骨架；对于孔隙性漏失，则侧重于超细刚性颗粒(如超细碳酸钙、超细单封)与柔性材料(如纯石绒棉)的级配优化，实现高效填充。

性能优化与可控性提升：致力于提升堵漏体系的“快速响应”能力。通过引入水泥等胶凝材料，实现接触地层流体后的快速固化，形成高强度封堵层。同时，必须全面优化堵漏浆的悬浮稳定性、流变性(粘度、切力)、抗温性、抗污染性及滤失可控性，确保其在复杂井下环境中性能稳定，施工安全可靠。

机理深化与模型构建：深入探究堵漏材料在多孔介质和裂缝中的运移、滞留、架桥、成塞微观机理，建立更精确的封堵层形成动力学模型和强度预测模型，为材料的理性设计和施工参数的优化提供理论指导。

保障钻井安全的核心屏障：快速有效的堵漏是维持井筒压力平衡、防止井壁坍塌、避免卡钻和井喷等恶性事故的第一道防线。例如，某海上钻井平台因未能及时有效封堵裂缝性漏失，导致井筒压力失衡引发井壁坍塌，直接经济损失超过 5000 万元人民币。高效的堵漏技术能迅速恢复压力控制，极大提升作业安全性。提升钻井效率的关键举措：井漏处理占用的非生产时间(NPT)极其可观。一次严重的井漏事件可能导致钻机停待数天甚至数周。快速失水堵漏技术能显著缩短处理时间，减少钻井液漏失量，保障钻井周期，对于降低作业成本、加速油气田投产具有直接的经济价值。

降低综合成本的有效途径：通过提高一次堵漏成功率，减少材料浪费和重复作业；通过使用部分低成本天然材料或工业副产物，降低材料成本；通过缩短工期，节约设备租赁和人力成本。研究表明，应用先进堵漏技术可使钻井综合成本降低 15%~20%。

推动相关学科与技术发展的交叉动力：堵漏材料的研究涉及高分子化学、材料科学、胶体与界面化学、流体力学、岩石力学等多个学科。新材料的开发推动了高性能聚合物、智能凝胶、纳米复合材料等领域的进步；对封堵机理的深入研究丰富了对多相流在复杂通道中运移规律的认识；数字化、智能化技术的引入促进了钻井决策系统的升级。

4. 挑战与未来展望

尽管取得了显著进展,快速失水堵漏技术仍面临一系列严峻挑战。材料性能极限:现有材料的抗高温($>200^{\circ}\text{C}$)、抗高压($>100\text{ MPa}$)性能仍有待突破,特别是在超高矿化度地层水环境下的长期化学稳定性不足,导致深部地层重复漏失。智能响应与可控性:多数材料仍处于“被动”封堵状态,缺乏根据井下环境(如温度、pH、剪切力)变化而“主动”调节其封堵行为(如膨胀速率、胶凝时间、强度发展)的智能响应能力。环保与储层保护:传统堵漏材料,尤其是某些化学剂和纳米材料,其生物降解性和环境毒性备受关注。对于产层,如何在高效封堵的同时实现彻底、低伤害的解堵,仍是技术难点。模拟与预测精度:现有的数值模型对堵漏材料在真实复杂裂缝网络中的运移、堆积过程模拟仍不够精确,难以完全指导现场的个性化设计。

未来发展趋势将聚焦于以下几个方面。

新材料创新:开发温度/pH/酶响应型聚合物凝胶、形状记忆聚合物等,实现按需封堵和可控解堵。利用纳米粒子(如纳米二氧化硅、纤维素纳米晶)增强传统堵漏剂的强度、稳定性和封堵效率;设计有机-无机杂化复合材料,兼具柔韧性和高承压能力。大力开发基于生物质(如淀粉、木质素、壳聚糖)的可降解堵漏剂,以及利用工业废料(如粉煤灰、矿渣)的环保型配方。

机理研究与数字化:结合CT扫描、微流控芯片等先进实验手段与CFD-DEM(计算流体动力学-离散元法)耦合数值模拟,从孔隙尺度到宏观尺度揭示封堵机理。构建井眼-地层系统的数字孪生体,集成实时井下数据(如随钻测压、成像),利用人工智能和机器学习算法优化堵漏方案,实现精准、高效的智能堵漏作业。发展“随钻堵漏”、“预防性堵漏”技术,将堵漏功能集成到钻井液体系中,实现漏失的早期干预和预防。形成从漏失诊断、材料优选、方案设计到效果评价的完整技术链条。

绿色技术开发:大力开发基于淀粉、木质素、壳聚糖等生物质的可降解堵漏剂,其原料可再生、毒性低且可在特定条件下(如酶作用)高效降解。同时,积极推进粉煤灰、矿渣等工业固废的资源化利用,研发环保型堵漏配方。这不仅降低了材料成本与环境足迹,更显著减少了对产层的潜在伤害,是实现钻井作业可持续发展的重要途径。

5. 结语

快速失水堵漏技术是应对钻井过程中井漏挑战的关键利器。国内外研究者通过持续的材料创新、机理探索和工程实践,已发展出暂堵型、膨胀类、无机凝胶、桥接、化学和高失水等多种技术路径,并在现场应用中取得了显著成效。然而,面对日益复杂的钻井地质条件,现有技术仍在适应性、智能性和环保性方面存在提升空间。未来,通过跨学科的协同创新,融合新材料科学、信息技术和人工智能等先进成果,有望推动快速失水堵漏技术向高性能化、绿色化、智能化方向迈进,最终形成更加安全、高效、经济的井漏防控技术体系,为全球油气资源的可持续勘探开发提供坚实保障。

致 谢

陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-305)、西安市科技局项目(24GXFW0074)、陕西省教育厅技术服务地方专项(24JC077)和榆林市秦创原重点科研项目“粉煤灰资源化利用于油气钻井堵漏技术研究”。

参考文献

- [1] 魏强强, 刘海榕, 王博. 石油钻井工程中防漏堵漏技术探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(3): 168-170.
- [2] Smith, T. (2022) Enzyme-Degradable Nanocellulose Materials or Temporary Wellbore Sealing. *Petroleum Technology*, 74, 56-63.

- [3] 李岩阁, 侯薇, 邹双, 等. 钻井工程防漏堵漏材料研究进展[J]. 油田化学, 2025, 42(3): 537-544.
- [4] 李威明, 侍德益, 王浩, 等. 钻井过程中井漏预警方法研究[J]. 石化技术, 2025, 32(10): 228-230.
- [5] 潘一, 李长平, 张立明, 等. 耐温承压堵漏剂的研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(2): 476-482.
- [6] 计磊. 抗高温凝胶堵漏剂的制备与评价实验研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2022.
- [7] Sun, J., Ai, Y., Tang, K. and Zhang, Z. (2025) Machine Learning-Based Monitoring of Chemical Contamination from Drilling Leaks. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, **61**, 793-800. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01922-y>
- [8] 夏海英, 周沙, 兰林, 等. GCY-X 体膨型堵漏剂的研制与性能评价新方法[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(6): 11-13.
- [9] 彭芸欣, 罗跃, 陈利平, 等. 吸水膨胀型聚合物堵漏剂的合成与评价[J]. 当代化工, 2009, 38(6): 563-565.
- [10] 宋冰倩. 缝洞型漏失井段固结型堵漏技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- [11] 刘淑琼, 王珍珍, 高晨. 抗菌型四元共聚吸水性树脂的制备与性能[J]. 现代塑料加工应用, 2017, 29(5): 16-19.
- [12] 黄晓辉. 暂堵型聚合物凝胶修井液的研究与应用[J]. 化工管理, 2014(21): 165.
- [13] 郭国浩. 具有温敏固化功能的复合水泥堵漏剂研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [14] Guo, H., Voncken, J., Opstal, T., Dams, R. and Zitha, P.L. (2012). Investigation of the Mitigation of Lost Circulation in Oil-Based Drilling Fluids Using Additives. <https://doi.org/10.2118/151751-ms>
- [15] 欧翔, 谭凯, 周楚翔. 深层钻井堵漏材料的研究现状与发展思考[J]. 材料导报, 2024, 38(S2): 615-620.
- [16] Lai, X.L., Wang, Z.H., Deng, H.J., et al. (2011) Development of a Dual Texture Resin Sealing Agent for Plugging Lost Circulation. *Petroleum Drilling Techniques*, **39**, 29-33.
- [17] Vickers, S. (2006) Compactness in Locales and in Formal Topology. *Annals of Pure and Applied Logic*, **137**, 413-438. <https://doi.org/10.1016/j.apal.2005.05.028>
- [18] Whitfill, D. (2008) Lost Circulation Material Selection, Particle Size Distribution and Fracture Modeling with Fracture Simulation Software. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, Jakarta, 25-27 August 2008, SPE-115039-MS. <https://doi.org/10.2118/115039-ms>
- [19] Lee, J.L. and Lim, E.W.C. (2017) Comparisons of Eulerian-Eulerian and CFD-DEM Simulations of Mixing Behaviors in Bubbling Fluidized Beds. *Powder Technology*, **318**, 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.05.050>
- [20] Mehrabian, A., Pérez, A.D. and Santana, C. (2018) Wellbore-Stability Analysis Considering the Weak Bedding Planes Effect: A Case Study. *SPE Drilling & Completion*, **33**, 377-384. <https://doi.org/10.2118/189593-pa>
- [21] 朱金智, 任玲玲, 陆海英, 等. 桥接堵漏材料及其配方粒度分布预测新方法[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(4): 474-478.
- [22] Razavi, O., Vajargah, A.K., van Oort, E., Aldin, M. and Govindarajan, S. (2016) Optimization of Wellbore Strengthening Treatment in Permeable Formations. *SPE Western Regional Meeting*, Anchorage, 23-26 May 2016, SPE-180467-MS. <https://doi.org/10.2118/180467-ms>
- [23] Al-Sabagh, A.M., El-Awamri, A.A., Abdou, M.I., Hussien, H.A., Abd El Fatah, H.M. and Rasmy, W.E. (2016) Egyptian Diatomite as High Fluid Loss Squeeze Slurry in Sealing Fractures and High Permeable Formation. *Egyptian Journal of Petroleum*, **25**, 409-421. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.09.005>
- [24] 黄贤杰, 董耘. 高效失水堵漏剂在塔河油田二叠系的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008(4): 159-162.
- [25] 方俊伟, 贾晓斌, 刘文堂, 等. ZYSD 高失水固结堵漏技术在顺北 5-9 井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(1): 74-78.
- [26] 陈忠玖. 川庆钻井新型堵漏技术堵住效益黑洞[J]. 石油知识, 2020(3): 19.
- [27] 王曦, 杨斌, 陈辛未, 等. FZS 高失水堵漏剂性能评价[J]. 广州化工, 2013, 41(12): 107-108.
- [28] 刘静, 马诚, 杨超, 等. 井漏地层钻井液堵漏材料研究现状与展望[J]. 油田化学, 2023, 40(4): 729-735.
- [29] 乔木, 朱忠喜, 闫康凯. 钻井液堵漏材料研究及应用现状[J]. 新疆石油天然气, 2025, 21(1): 10-23.
- [30] 李军民, 韩强, 边世德, 等. 石油钻井工程中防漏堵漏工艺的应用[J]. 石化技术, 2025, 32(3): 150-152.
- [31] 王中华. 国内钻井液研究应用现状、存在问题与发展建议[J]. 钻井液与完井液, 2025, 27(5): 1-13.
- [32] 李强, 李志勇, 张浩东, 等. 响应面法优化纳米材料稳定的泡沫钻井液[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(1): 23-30.
- [33] Wang, W., Xu, X. and Lv, L. (2022) Design and Optimization of Negative Poisson Ratio Thin-Walled Tube Using Sensitivity-Based Response Surface Model Methodology. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **23**, Article 2350036. <https://doi.org/10.1142/s0219455423500360>
- [34] 张战. 钻井液用柔性颗粒封堵剂研制[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2018.

-
- [35] 周风山, 苏标瑾. 一种新型酸溶性高失水暂堵剂的研制与评价[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2020(5): 46-49.
- [36] 刘军, 张宏, 黄华, 等. 基于响应面模型的泥浆泵曲轴结构优化设计[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 879-885
- [37] 雷镇林, 刘伟, 范俊. KSD + 刚性粒子堵漏工艺在超深井堵漏中的应用——以 PP1 井为例[C]//中国石油学会天然气专业委员会. 第 33 届全国天然气学术年会(2023)论文集(04 钻采工程). 2023: 707-711.