

# 钻井液用智能型堵漏剂研究进展

况梅, 余志洋, 吴渝娟, 谢莹娜, 陈力, 鲁佳伟

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年5月10日; 发布日期: 2026年5月22日

## 摘要

在油气勘探开发向深井、高温高压及复杂地层不断推进的背景下, 井漏事故频发且治理难度大幅提升, 传统堵漏材料难以适配高温、高盐、多尺度漏失通道的自适应封堵需求。智能型堵漏剂凭借环境响应、靶向封堵与长效承压等突出优势, 已成为钻井防漏堵漏领域的研究热点与重要发展方向。本文依据材料组成、响应机制与封堵行为, 将智能堵漏剂划分为智能凝胶类、形状记忆类、微纳米智能类及复合型四大体系, 系统阐述各类材料的封堵机理、性能特征与研究现状, 对比分析典型体系在封堵效率、耐高温性及适用漏层等方面的差异; 指出当前智能堵漏剂在高温高盐稳定性、地层环境适配性、钻井液体系配伍性、响应精准度及工程化应用等方面存在的技术瓶颈; 展望耐高温分子设计、绿色可降解、多场耦合响应、多功能一体化及现场应用验证等未来发展趋势。研究旨在为高性能智能堵漏剂的结构设计、研发创新与工程应用提供系统理论参考与技术思路。

## 关键词

钻井液, 智能堵漏剂, 智能凝胶, 形状记忆材料, 自适应封堵

# Research Progress on Intelligent Lost Circulation Materials for Drilling Fluids

Mei Kuang, Zhiyang Yu, Yujuan Wu, Yingna Xie, Li Chen, Jiawei Lu

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: April 7, 2026; accepted: May 10, 2026; published: May 22, 2026

## Abstract

With the continuous advancement of oil and gas exploration and development into deep wells, high-temperature high-pressure and complex formations, lost circulation accidents occur frequently and become increasingly difficult to control. Traditional lost circulation materials can hardly meet the adaptive plugging requirements of high-temperature, high-salt and multi-scale leakage channels.

文章引用: 况梅, 余志洋, 吴渝娟, 谢莹娜, 陈力, 鲁佳伟. 钻井液用智能型堵漏剂研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 631-636. DOI: 10.12677/me.2026.143064

Intelligent lost circulation materials have become a research hotspot and important development direction in the field of drilling loss prevention and control due to their outstanding advantages such as environmental response, targeted plugging and long-term pressure bearing. According to material composition, response mechanism and plugging behavior, this paper classifies intelligent lost circulation materials into four categories: intelligent gel, shape memory, micro-nano intelligent and composite materials. The plugging mechanism, performance characteristics and research progress of various materials are systematically summarized, and the differences of typical systems in plugging efficiency, temperature resistance and applicable leakage zones are compared and analyzed. The technical bottlenecks of current intelligent lost circulation materials in high-temperature high-salt stability, formation environmental compatibility, drilling fluid compatibility, response accuracy and engineering application are pointed out. The future development trends such as high-temperature molecular design, green degradability, multi-field coupling response, multi-functional integration and field application verification are prospected. This review aims to provide systematic theoretical reference and technical ideas for the structural design, research and innovation and engineering application of high-performance intelligent lost circulation materials.

## Keywords

Drilling Fluids, Intelligent Lost Circulation Materials, Intelligent Gel, Shape Memory Materials, Adaptive Plugging

Copyright © 2026 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

随着油气勘探开发不断向深层、超深层、高温高压及破碎性地层延伸, 钻井过程中井漏、井壁失稳等井下复杂问题日益突出。井漏作为钻井现场最常见的复杂事故之一, 发生率占钻井总复杂事故的 60% 以上, 裂缝性、孔隙性、溶洞性及多类型耦合漏失并存, 不仅造成钻井液大量损耗、延误施工周期, 还可能引发卡钻、井壁坍塌等一系列连锁风险, 严重威胁钻井安全与作业时效[1]-[3]。传统堵漏材料以刚性颗粒、纤维、普通凝胶及化学固结剂为主, 主要依靠物理架桥、填充实现封堵, 存在与漏失通道匹配性差、高温易失效、承压能力不足、反应过程不可控、重复漏失率高等突出缺陷, 在深井、复杂地层中适用性大幅下降, 难以满足安全高效钻井需求[2] [4]。

为突破传统堵漏材料的技术局限, 具备环境感知、结构相变与自适应调控能力的智能响应材料被逐步引入钻井液堵漏领域为解决传统堵漏材料的局限性, 具有环境感知与自适应调控能力的智能响应材料被逐步引入钻井液堵漏领域。与常规堵漏材料不同, 钻井液用智能堵漏剂能够感知温度、pH、剪切力及地层流体离子等地层环境信号, 并通过自身结构与性能的可控变化实现按需溶胀、原位成胶、靶向封堵与自修复承压, 有效突破了传统材料被动封堵的技术局限, 为复杂地层井漏治理提供了新的技术途径。与常规堵漏材料不同, 智能型堵漏剂能够精准感知温度、pH、剪切力、离子强度及地层压力等井下环境信号, 并通过自身溶胀、相变、成胶、形变或固化等行为实现按需封堵、原位成胶、靶向填充与自修复承压, 有效提升封堵成功率与长效稳定性, 为复杂地层井漏治理提供了全新技术路径[5] [6]。

近年来, 国内外围绕智能堵漏剂开展了大量机理研究、材料开发与性能评价工作, 逐步形成多类型、多机制、多场景的技术体系。本文按照材料组成、响应模式与封堵机理, 将智能型堵漏剂分为智能凝胶类、形状记忆类、微纳米智能类及复合型四大体系, 系统梳理各类材料的作用机制、研究进展、性能优

劣与应用现状，分析当前面临的关键技术瓶颈，并展望未来发展趋势，以期为智能堵漏材料的优化创新与工程化应用提供理论支撑与研究思路[7]。

## 2. 智能型堵漏剂的分类、封堵机理与研究进展

智能型堵漏剂是一类可响应井下环境信号并实现结构与性能自适应调控的功能材料，相较于传统堵漏材料，具备触发可控、封堵精准、承压能力强、适配性高等优势。按照材料组成、响应机制与封堵行为特征，可将其分为智能凝胶类堵漏剂、形状记忆类堵漏剂、微纳米智能堵漏剂、复合型智能堵漏剂四大体系，各类材料封堵机理清晰、性能特点差异显著，已形成较为完善的研究与应用基础[5]。

### 2.1. 智能凝胶类堵漏剂

智能凝胶类堵漏剂由三维交联高分子网络构成，分子链中含有温敏、pH 敏、剪切敏等功能性基团，可在外界环境刺激下发生溶胶-凝胶转变、体积溶胀、黏度突变或结构自修复，从而在漏失通道内形成高弹、致密、稳定的凝胶封堵体，是目前研究最深入、应用最广泛的智能堵漏体系[5]-[7]。

该类材料的核心封堵机理可概括为：在地面或井筒高剪切条件下，高分子链亲水舒展，以低黏度流体状态稳定分散于钻井液中，具备良好的泵送与携带性能；进入漏层后，受温度升高、pH 变化、剪切减弱或地层离子作用，高分子链快速发生疏水聚集、离子交联、链段缠结或动态键重构，形成高强度三维凝胶网络，依靠体积膨胀挤压裂缝壁面，并与岩石表面形成吸附、嵌锁与黏结作用，实现漏失通道封堵与承压。同时，凝胶的弹性结构可缓冲压力波动，提升封堵层抗冲蚀能力与长效稳定性。

温敏凝胶以聚 N-异丙基丙烯酰胺、改性聚醚为基材，依靠最低临界溶解温度(LCST)实现亲水-疏水转变，在 80℃~120℃可快速成胶，封堵率大于 90% [6]；pH 响应凝胶通过羧基、氨基等离子化基团的质子化/去质子化调控溶胀行为，在 pH=5~9 区间内稳定性好，对碳酸盐岩地层适应性强[4] [6]；剪切响应凝胶遵循“高剪切低黏、静止高弹”规律，高剪切下黏度低于 30 mPa·s，静止 3 min 强度可达 5000 Pa 以上，适用于随钻堵漏与水平井微裂缝封堵[4]；自愈凝胶依靠氢键、动态共价键、金属配位键等可逆作用，实现“破损-自修复-再承压”循环，封堵稳定性提升 60%以上，是恶性重复漏失地层的理想材料。

智能凝胶类堵漏剂响应灵敏、原位成胶、自适应能力强，但仍存在明显不足：在 180℃以上高温、高盐及高密度钻井液中易出现链段降解、溶胀失控、相分离与强度衰减[8] [9]；与油基钻井液配伍性较差[10] [11]；单一响应模式易受井下复杂环境干扰，触发精准度有待提升，如表 1。

Table 1. Performance comparison of typical smart gel lost circulation materials

表 1. 典型智能凝胶堵漏剂性能对比

凝胶类型	响应机制	关键封堵机理	耐温性	封堵效果	适用漏层
温敏凝胶	温度 LCST 相变	疏水聚集→原位成胶	≤180℃	封堵率 > 90%， 承压 ≥ 7 MPa	高温裂缝地层
pH 响应凝胶	质子化/去质子化	链舒展/卷曲→溶胀调控	≤150℃	承压稳定， 封堵均匀	碳酸盐岩、 酸性地层
剪切响应凝胶	剪切变稀-静止增稠	缠结态转变→溶胶-凝胶可逆	≤160℃	强度 > 5000 Pa， 速凝	水平井、微裂缝、 随钻堵漏
自愈凝胶	动态键可逆作用	破损重构→循环承压	≤170℃	修复后承压 保留 > 80%	恶性漏失、 重复漏失地层

### 2.2. 形状记忆类堵漏剂

形状记忆类堵漏剂是一类具有“固定相-可逆相”双组分结构的智能聚合物材料，可在特定外界刺

激下实现压缩形态与预设形态的可控转变,以“压缩入井、膨胀架桥、自锁承压”模式完成大尺度漏失通道高效封堵,有效解决传统材料难以封堵大裂缝、溶洞的行业难题[12]。

其封堵机理为:材料在地面经预压、拉伸等工艺定型为压缩状态,便于井筒泵送与钻井液携带;进入漏层后,在温度、pH、离子或地层流体作用下,可逆相结构发生软化、松弛或相转变,固定相维持整体骨架,材料快速膨胀、伸展、弯曲并相互嵌锁,在漏失通道内形成三维稳定架桥结构,依靠机械自锁、界面摩擦与结构支撑实现高强度封堵。与刚性颗粒、纤维不同,形状记忆材料可自适应匹配漏失通道尺寸,避免颗粒过小被冲失、过大无法入井等问题,封堵成功率与稳定性显著提升[12][13]。

按照触发方式,形状记忆堵漏剂主要分为热触发型与化学/离子触发型两类。热触发型材料在低温下保持压缩形态,达到转变温度后快速膨胀,工艺简单、承压能力强,适用于高温地层大裂缝与溶洞封堵,但受井下温度场限制明显[12];化学/离子触发型依靠地层 pH、离子浓度变化驱动形状恢复,不受温度条件约束,触发精准度高,适用于低温地层、水平井、长水平段及低渗微裂缝漏失治理[1]。

形状记忆类堵漏剂在大尺度漏失封堵中优势突出,但仍存在触发条件单一、形状恢复速率难以精准调控、高温下结构稳定性不足、制备成本偏高等问题,在超深井、极端复杂地层的应用仍需进一步优化[13]。

### 2.3. 微纳米智能堵漏剂

微纳米智能堵漏剂以微胶囊包覆材料、纳米复合凝胶、智能固结体系为核心,通过微纳尺度结构设计实现靶向触发、多尺度填充、延迟固化与高强度封堵,可有效解决深部隐蔽裂缝、微纳米孔隙、高压渗漏地层等传统材料难以进入的漏失难题,推动智能堵漏向高精度、高致密、长效化方向发展[14][15]。

微胶囊包覆型堵漏剂以高分子为壳层,内部包覆固化剂、凝胶单体、膨胀剂等活性组分,在未达到触发条件时保持稳定,避免地面提前反应失效;进入地层后,在温度、剪切、压力或 pH 刺激下,壳层破裂、溶胀或降解,快速释放活性物质并原位固化成胶,实现深部漏层精准封堵,有效提升材料利用率与封堵效果[14]。

纳米智能复合堵漏剂利用纳米凝胶、纳米纤维、无机纳米颗粒等高比表面、高分散特性,可进入亚微米至微米级微细裂缝,与凝胶、颗粒等协同构建“架桥-填充-嵌锁”多级致密封堵结构,显著提升高温稳定性、承压强度与封堵致密性。部分纳米材料具备酸溶、可降解特性,可实现封堵与储层解堵一体化,有利于后期开发生产。

智能固结型堵漏剂以改性热固性树脂、响应型固化体系为主要成分,在外界刺激下缓慢交联固化,形成高强度、高稳定性固结体,承压高、抗冲刷、长效性好,适用于恶性漏失、破碎地层、高渗漏通道等复杂场景[15]。但该类材料固化速率调控难度较大,过早固化易导致泵注困难,过慢则易被地层流体冲失,如表 2。

**Table 2.** Typical performance comparison of micro-nano smart lost circulation materials

**表 2.** 微纳米智能堵漏剂典型性能对比

材料类型	触发方式	核心优势	耐温性	适用漏失类型
微胶囊型	温/剪/pH	延迟固化、深部靶向	≤200℃	隐蔽微裂缝、深部漏层
纳米复合	压力/温度	多尺度致密填充、高强	≤220℃	微细裂缝、低渗漏地层
智能固结	温度/化学	高承压、长效稳定、抗冲蚀	≤200℃	恶性漏失、破碎地层

### 2.4. 复合型智能堵漏剂

复合型智能堵漏剂通过将智能凝胶、形状记忆材料、微纳米颗粒、纤维、刚性粒子等两种及以上组

分进行合理复配,利用多材料、多机制协同作用,实现“架桥稳定、填充密实、弹性承压、自修复长效”一体化封堵,可显著提升材料在高温、高盐、高剪切、多尺度漏失并存的复杂工况下的综合适应性。

其协同封堵机理体现在:形状记忆材料或刚性纤维构成主架桥骨架,承担主要载荷,防止封堵体失稳;智能凝胶在架桥结构间隙原位溶胀成胶,填充空隙并增强界面黏结强度;纳米颗粒或微胶囊进一步填充微裂缝与孔隙,提升封堵体致密性与高温稳定性;自愈合组分则在封堵层受冲蚀破损后自动修复结构与承压能力,延长有效封堵时间。多组分协同可有效弥补单一材料短板,实现封堵效率、承压能力与环境适应性的同步提升[16]。

复合型智能堵漏剂是当前智能堵漏领域的主流发展方向,已在水基、油基、高密度钻井液体系中实现初步应用。但该类体系仍存在明显技术难点:组分种类多、配方复杂,组分间配伍性与体系稳定性控制难度大;高温、高盐条件下易出现相分离、响应不同步、界面脱黏等问题;材料成本较高,现场施工工艺与效果评价体系仍不完善[16]。未来需重点简化配方体系、强化界面相容性、实现多信号协同响应,推动复合型智能堵漏剂规模化工程应用。

### 3. 智能堵漏剂面临的挑战与发展趋势

随着钻井工程向深井、超深井及极端复杂地层发展,井下温度、压力、地层流体性质等工况条件愈加苛刻,智能堵漏剂在实际应用中面临多重技术挑战,未来将朝着高性能、绿色化、精准化、多功能化与工程化方向持续发展[17]。

#### 3.1. 面临的技术挑战

环境友好性有待提升。部分合成高分子材料生物降解性差,在地层中长期滞留存在污染风险,与绿色安全、低碳环保钻井发展要求存在差距。

工程化应用进程缓慢。微胶囊、纳米材料、形状记忆材料等制备成本偏高,实验室性能优异,但现场应用案例、施工工艺配套及效果验证不足,工业化转化受限。

#### 3.2. 未来发展趋势

绿色可降解智能体系开发。以天然高分子、生物基原料为基材,开发可降解、低污染智能堵漏剂,提升环境友好性,契合绿色钻井发展方向。

多功能一体化与工程化应用。开发集堵漏、防塌、润滑、抗盐、保护储层等功能于一体的多功能智能材料,建立漏层识别-材料选型-施工工艺-效果评价一体化技术,推动智能堵漏技术工业化落地与现场规模化应用。

## 4. 结论

智能型堵漏剂已形成智能凝胶类、形状记忆类、微纳米智能类、复合型四大技术体系,在环境响应、靶向封堵、长效承压与自适应匹配等方面显著优于传统堵漏材料,可满足深井、复杂地层多样化漏失治理需求。

智能凝胶依靠刺激响应相变与原位成胶实现多类型裂缝封堵;形状记忆材料以可控形变适配大裂缝与溶洞漏失;微纳米智能材料实现深部、微细裂缝高精度靶向封堵;复合型材料通过多机制协同提升复杂工况适应性。

当前智能堵漏剂仍面临高温高盐稳定性不足、环境适配性有限、钻井液配伍性差、响应精准度不高、工程化应用滞后等技术瓶颈,未来需聚焦分子结构优化、绿色可降解、多场耦合响应、油基专用体系及多功能一体化开展研究。

随着深井、超深井钻井技术不断发展,智能型堵漏剂将朝着耐高温高盐、绿色环保、精准响应、多功能集成与工程化落地方向快速发展,为复杂地层安全高效钻井提供关键技术支撑。

## 基金项目

重庆科技大学大学生科技创新训练计划项目(编号:2025008)。

## 参考文献

- [1] 潘一,徐明磊,郭奇,等. 钻井液智能堵漏材料研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9223-9230.
- [2] 张希文,李爽,张洁,等. 钻井液堵漏材料及防漏堵漏技术研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(6): 74-76, 79.
- [3] 孙金声,朱跃成,白英睿,等. 改性热固性树脂研究进展及其在钻井液领域应用前景[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 60-75.
- [4] 王晨焯. 剪切响应型凝胶体系及裂缝堵漏机理研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- [5] 孙金声,赵震,白英睿,等. 智能自愈合凝胶研究进展及在钻井液领域的应用前景[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1706-1718.
- [6] 孙金声,赵震,白英睿,吕开河,王金堂,王韧,王晨焯,戴立瑶. 智能自愈合凝胶研究进展及在钻井液领域的应用前景[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1706-1718.
- [7] 冯起,王磊,王康,等. 钻井液用智能响应型凝胶堵漏剂研究进展[J]. 油田化学, 2023, 40(2): 365-372.
- [8] 贾永红,周双君,段利波,等. 抗 180℃水基钻井液随钻堵漏剂的研制及性能评价[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(1): 16-19.
- [9] 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]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 568-577.
- [10] 刘昱彤,樊朋飞,姜雪清,等. 油基钻井液用抗高温可酸溶高滤失堵漏剂的研制及应用[J]. 钻井液与完井液, 2026, 43(1): 51-56.
- [11] 贾永红,周双君,曹青天,等. 油基钻井液高滤失复合堵漏剂的研制及性能评价[J]. 石油化工应用, 2024, 43(8): 92-96.
- [12] 于雷,李公让,王宝田,等. 一种新型亲油纤维堵漏剂的研发[J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 112-118.
- [13] Feng, Y. and Gray, K.E. (2017) Review of Fundamental Studies on Lost Circulation and Wellbore Strengthening. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **152**, 511-522. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.052>
- [14] 罗平亚,贺佳宁,段永强,等. 一种面向深部复杂地层的纳米凝胶增黏堵漏剂性能评价[J]. 新疆石油天然气, 2026, 22(1): 1-8.
- [15] 樊靖,汪伟,陈建国,等. 国内外固结堵漏剂研究进展及展望[J]. 西部资源, 2025(4): 72-77, 116.
- [16] 白英睿,张启涛,孙金声,等. 杂化交联复合凝胶堵漏剂的制备及其性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 176-184.
- [17] 杜旭东,张慧. 智能水基钻井液发展现状及前景展望[J]. 化学工程师, 2023, 37(7): 79-83.