

# 抗高温堵漏材料研究进展与展望

苏政琦, 刘磊, 董娜, 邵佩先, 杨增辉

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年2月19日; 录用日期: 2025年3月19日; 发布日期: 2025年5月7日

## 摘要

钻井过程中遇到井漏问题是常见但棘手的挑战, 井漏会导致资源浪费、增加作业成本, 甚至可能引发井喷等安全隐患。井漏问题影响钻井效率与安全, 尤其在高温深层地层中, 井漏处理更为困难。文章主要讨论了抗高温堵漏材料的发展现状, 聚焦于纤维型、环氧树脂型、可酸溶型、凝胶型、复合型和智能型材料。这些材料在耐高温、耐压、封堵效果和化学稳定性等方面有所突破。各类材料通过提升成分、工艺及配比, 有效应对复杂地层的井漏问题, 如纤维材料强化了裂缝桥接, 环氧树脂材料具有优异的渗透性和强度, 而智能材料则能感知环境变化自动适应。文章最后提出了进一步优化材料配方、建立评价体系及快速响应堵漏材料的建议, 以提升井漏处理效果, 促进高温地层钻井作业的安全与效率。

## 关键词

钻井安全, 井漏机理, 抗高温堵漏材料, 高温地层

# Research Progress and Prospects of High-Temperature Resistant Plugging Materials

Zhengqi Su, Lei Liu, Na Dong, Peixian Shao, Zenghui Yang

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

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2025; published: May 7<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Lost circulation in drilling is a common yet challenging issue, often leading to resource wastage, increased operational costs, and potential blowout hazards. Lost circulation impacts drilling efficiency and safety, especially in high-temperature deep formations, where control becomes more difficult. This paper discusses recent advancements in high-temperature resistant plugging materials, focusing on fiber-based, epoxy resin-based, acid-soluble, gel-based, composite, and intelligent

materials. These materials have made significant progress in temperature resistance, pressure resistance, sealing efficiency, and chemical stability. By improving composition, processing, and formulations, these materials effectively address lost circulation issues in complex formations. For example, fiber materials enhance fracture bridging, epoxy resin materials exhibit excellent permeability and strength, while intelligent materials can adapt automatically to environmental changes. The paper concludes by recommending further optimization of material formulations, the establishment of evaluation systems, and the rapid selection of suitable plugging materials to improve the efficacy of lost circulation control, ensuring safety and efficiency in high-temperature drilling operations.

## Keywords

Drilling Safety, Lost Circulation Mechanisms, High-Temperature Resistant Plugging Materials, High-Temperature Formations

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

井漏问题在钻井作业中十分常见,其发生会导致大量时间、劳动力及资源的消耗,井漏现象不仅可能导致井涌、井喷及井壁失稳等复杂工况[1],严重时更将对钻井作业人员生命安全造成威胁。作为全球油气钻探领域长期存在的技術瓶颈,该问题至今尚未获得根本性解决方案。统计数据显示,井漏事故发生率约为钻井总数的20%~25%,年度直接损失的经济约达40亿美元量级[2]。钻井液漏失作为该现象的直接表征,根据漏失的速率差异可划分为五个等级:漏速低于 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 的为微漏, $10\sim 20\text{ m}^3/\text{h}$ 为小漏, $20\sim 50\text{ m}^3/\text{h}$ 为中漏,超过 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 为大漏,而严重漏失去表现为完全失反。

深层油气是中国未来油气开发的重要目标,对比中浅层,深层钻井普遍存在高温环境,这对堵漏材料的耐高温性提出了更高的要求。常用堵漏材料的耐温性能通常在 $140^\circ\text{C}$ 以下,高温下的稳定性不佳,难以牢固堵塞深层裂缝,容易出现复漏现象。通常当地层温度超过 $150^\circ\text{C}$ 时,定义为高温地层,但有些地层温度甚至高于 $200^\circ\text{C}$  [3]。

近年来,随着钻井技术的不断发展,钻井深度也随之不断的增加,因此,对于复杂的地层条件,堵漏材料的要求也在不断提高。经过持续努力,国内外已研发出多种适用于高温条件下的堵漏材料,包括纤维类、环氧树脂类、可酸溶类、凝胶类及新型材料,为解决深层高温井漏问题提供了宝贵的参考。本文系统综述了井漏机理和抗高温堵漏材料的国内外研究进展,分析了当前抗高温堵漏材料存在的问题,并对未来的发展方向进行了展望。

## 2. 井漏机理研究

钻井液漏失量、地层压力、裂缝特性及地层结构等因素都是井漏机理研究的主要方向。对于漏失机理的分类体系,主要是取决于漏失通道及漏失程度。从本质成因角度分析,井漏通常分为压差性井漏、裂缝扩展性井漏及压裂性井漏三类:

(1) 压差性井漏:当井周的储层存在宏观裂缝或者溶洞时,孔隙压力与液柱压力形成压差,致使发生井漏。

(2) 裂缝扩展性井漏:当井筒周围已经存在打开的通道,在压差的作用下封堵颗粒难以进入漏层。液

柱压力作用在裂缝面上,受正压差、温度和渗透影响,使裂缝逐渐扩大,导致钻井液漏失。此类型多由对压力敏感的微裂缝导致,封堵难度较大。

(3) 压裂性井漏:在井壁不存在裂缝的情况下,液柱压力过大使井壁开裂,钻井液与新的漏失通道漏失。一般只有钻井液密度过高才会引发此类现象。

此外,国外一些学者为了更加清晰地了解地下裂缝分布及尺度,建立了许多钻井液漏失数学模型及统计学模型对其进行反演,其中包括一维线性模型、二维平面模型、一维径向流模型及基于机器学习的漏失模型和数据统计模型[4]。

高温环境对堵漏材料性能具有显著影响:泥浆体系可能出现增稠、稀化或固化等相态转变,粘土矿物则经历分散、聚合及钝化过程。以锯末、核桃壳为代表的有机材料在高温环境中易发生快速老化现象;方解石类刚性颗粒在高应力条件下存在碎裂风险,导致封堵失效。

### 3. 抗高温堵漏材料研究进展

近年来,各种抗高温堵漏材料被应用于高温地层的井漏处理,在应对高温地层井漏问题中发挥了重要作用。这些材料主要包括纤维型、环氧树脂型、可酸溶型、凝胶型、复合型及智能型等抗高温堵漏材料。

#### 3.1. 纤维型抗高温堵漏材料

在堵漏工艺中,纤维材料是关键组成部分,分为天然纤维和人造纤维,主要原料包括棉籽壳、木质纤维、锯末、聚丙烯纤维、聚酯纤维和聚酰胺纤维等。这些纤维在桥接堵漏体系中具有良好的协同效果,能有效应对复杂地层的井漏问题。因此,系统研究新型高效的堵漏纤维具有重要的实际意义。传统纤维堵漏材料由于酸溶性差和抗温性不足,难以适应高温地层,故而研究抗高温纤维类材料为高温地层井漏处理提供了更多选择。

董洪栋[5]在松科2井中筛选出6种抗高温堵漏材料,实验研究证实,石棉纤维与玻璃纤维在200℃极端条件下对钻井液流变性及滤失性影响微弱,且具备3.5 MPa的承压能力。陈家旭[6]研制出新型耐高温堵漏纤维材料SDHTF,经热稳定性、耐温性及分散性等系列检测,验证该材料在220℃条件下仍保持优异性能,其在水基钻井液中的分散性与耐碱性突出,且在土酸溶液中呈现近完全溶解的特性。暴丹[7]开发的耐高温高强纤维堵漏材料在220℃热老化后断裂强度保持率超过92%,显著提升密封结构整体强度。不同纤维材料的桥接效能与其形态参数密切相关:聚丙烯纤维(长径比>100)通过三维缠绕形成空间网络结构,适用于宽裂缝;玻璃纤维(弹性模量70 GPa)依靠高刚性实现应力支撑;玄武岩纤维(耐温800℃)通过熔融相变在高温下形成自愈合层。实验表明,当纤维长度达到裂缝宽度的3倍时,桥接效率提升42% [8]。具体材料、配比以及性能比较见表1。

**Table 1.** Formulation and temperature/pressure resistance of condensed fiber-type high-temperature resistant plugging materials

**表 1.** 凝纤维型抗高温堵漏材料的配比及耐温压性

材料	配比	耐温时长	耐温强度	抗压强度
石棉纤维和玻璃纤维	基浆 + 2%玻璃纤维或基浆 + 1%石棉纤维	16 h	200℃	3.5 MPa
SDHTF	2%石灰石颗粒(150~250目) + 2%弹性石墨颗粒(150~250目) + 1%SDHTF-0	48 h	220℃	10 MPa
抗高温高强度纤维	玄武岩、绿泥石等天然岩料粉碎成微细颗粒(40~80目)经合金拉丝漏板高速拉制	48 h	220℃	10 MPa

### 3.2. 环氧树脂型抗高温堵漏材料

环氧树脂是一种广泛应用的热固性树脂，具有优异的机械性能、强度、模量、附着力、耐高温性和化学稳定性。其高温下粘度逐渐下降，便于渗透至裂缝中实现深层封堵，是一种很有潜力的堵漏材料[9]。

杜江波课题组[10]采用环氧树脂基体制备的可固化堵漏剂，经抗压强度和耐高温性测试，显示其抗压强度突破 20 MPa，耐高温性能高于 150℃，展现出卓越的高温高压耐受性。沉降稳定性与化学稳定性评估结果表明，该材料的流动性类似于标准的水泥浆，有较好的沉降稳定性，化学稳定性同样优异。郭锦棠[11]等人以环氧树脂 E-51 为主要堵漏材料，在促进剂 SH-A100 和热固剂 Q-500 条件下，以聚乙二醇 200 为溶剂，并添加重晶石作为加重剂，通过调节环氧树脂密度，使得堵漏材料密度可达最高 2.0 kg/m<sup>3</sup>。性能测试表明，该材料在 10% 的盐酸、氢氧化钠和氯化钠水溶液中经过 24 小时后几乎没有质量损失，稳定性良好。且通过热失重分析发现，该材料在 230℃ 以下不会分解，具备良好的耐高温性及抗压强度。以上试验证实了环氧树脂封堵材料的高强度和抗高温性能，适用于高温、高压地层的堵漏需求。双酚 A 型环氧树脂的耐高温性源于其交联密度，DSC 测试显示其玻璃化转变温度(T<sub>g</sub>)与固化剂类型直接相关：采用酚醛胺固化时 T<sub>g</sub> 达 180℃，而酸酐固化体系可提升至 210℃ [12]。但过度交联会导致脆性增加(冲击强度下降 35%)，需通过纳米二氧化硅(添加量 8wt%)进行增韧改性。上述环氧树脂型抗高温堵漏材料的配比及耐高温耐压特性总结见表 2。

**Table 2.** Composition and thermal/pressure endurance of epoxy resin-based high-temperature resistant plugging materials  
**表 2.** 环氧树脂型抗高温堵漏材料的配比及耐高温压性

材料	配比	耐高温时长	耐高温强度	抗压强度
可固化环氧树脂类堵漏剂	环氧树脂 + 30% 的聚乙二醇 200 + 5% 的固化剂 + 0.7% 的促进剂 + 2.6% 的稳定剂 + 108% 的重晶石	3 h	150℃	20 MPa
环氧树脂基	双酚 A 型环氧树脂 + 固化剂 Q-500 双氰胺(粒径为(5 ± 0.2) μm) + 超细活性促进剂 SH-A100 (粒径为(3 ± 0.2) μm) + 聚乙二醇 200 (PEG200, M <sub>n</sub> = 200 g/mol) + 重晶石(ρ = 4.2g/cm <sup>3</sup> ) + 沉降稳定剂	24 h	230℃	30 MPa

### 3.3. 可酸溶型抗高温堵漏材料

当前国际钻井液堵漏技术主要适用于井温 ≤170℃ 的作业环境，但在井底温度超过 200℃ 的深层油气藏中，井漏事故处理面临重大技术挑战[13]。针对恶性漏失或漏失失返，常规硅酸盐水泥封堵方案存在水化产物酸溶率低、溶蚀效率差等缺陷。

钟小军[14]通过优化新型抗高温、可酸溶堵漏材料，并在优化后的基础上将配方进行改良，成功开发出可封堵 1~5 mm 裂缝/溶洞的随钻堵漏体系，耐高温性在改良后能超过 210℃，酸溶率从 72% 增加至 75%，且承压能力也提升到了 10 MPa。陈彬[15]开发了一种抗高温暂堵剂 FRACSEAL，可适用于不同的裂缝宽度。其采用抗高温刚性颗粒、高强度片状材料及可酸溶纤维，抗温能力能超过 210℃，能够封堵裂缝开度 10 mm 的裂缝，承压能力达 20 MPa，酸溶率超过 94%，适合于温度较高的储层裂缝封堵。聂育志[16]针对顺托井区压差性和裂缝扩展性漏失，开发了高酸溶性堵漏剂和堵漏配方。研制出的耐高温 200℃ 屏蔽暂堵剂 SMHP-1，可用于封堵小规模漏失，酸溶率达 80.1%，几乎不会对钻井液流变性产生影响。同时，他开发的抗高温高酸溶桥接堵漏配方适用于封堵大漏失场景，在 200℃ 条件下酸溶率达 76.5%。方俊伟[17]等人为解决顺北油气田一区超深裂缝性碳酸盐岩储层的漏失及其引起的储层损害问题，创新性提出“钻井液性能控制 + 可酸溶暂堵体系”的方案，成功构建以可酸溶纤维、弹性石墨及填充材料为核心组分的

耐高温可酸溶暂堵体系。该体系在 180℃条件下酸溶率大于 85%，储层渗透率的恢复率超过 87%，可用于缝宽不大于 1.0 mm 的裂缝性储层。上述几种可酸溶型抗高温堵漏材料的配比及酸溶率总结见表 3。

**Table 3.** Formulation and acid solubility of acid-soluble high-temperature resistant plugging materials

**表 3.** 可酸溶型抗高温堵漏材料的配比及酸溶率

材料	配比	酸溶率	耐高温强度	抗压强度
耐高温酸溶材料	ZF-1 作为分散剂、ZJ-5 作为降失水剂、ZH-8 作为超高温缓凝剂	95.99%	210℃	10 MPa
FRACSEAL	实验浆 + 5% 堵漏材料(片状:纤维 = 1:1)	94.37%	210℃	20 MPa
高酸溶桥接堵漏配方	2% + 1% SMPFL + 4% SMP + 3% SML-4 + 3% SMNA-1 + 5% SMC + 0.5% SMS-19 + 1% JA-1 + 1% SMJH-1 + 0.1% SP-80 + 0.2% NaOH + 重晶石	76.5%	200℃	10 MPa
可酸溶暂堵剂	酸溶纤维:刚性填充暂堵剂:可变形弹性石墨 = 4:5:1	85.0%	180℃	7.0 MPa

### 3.4. 凝胶型抗高温堵漏材料

对于大裂缝恶性漏失地层，封堵材料比较匮乏，且封堵成功率也很低。传统的封堵材料容易被地层水冲稀，不能滞留在漏失通道，堵漏效果较差。同时，在高温条件下，凝胶吸水性增加、强度下降，影响堵漏效果[18]。

**Table 4.** Composition and temperature/pressure resistance of gel-based high-temperature resistant plugging materials

**表 4.** 凝胶型抗高温堵漏材料的配比及耐高温压性

材料	配比	耐高温时长	耐高温强度	抗压强度
GN-1	淡水 + 1.5% GN-1 + 0.15% 地面交联剂 + 1% 井下交联剂 + 0.2% 抗氧化剂	24 h	180℃	-
复合凝胶	耐热高分子(NW-1) + 加强剂 + 架桥纤维 + 有机交联剂 CL-1	192 h	150℃	20 MPa
抗高温可控凝胶	(0.8~2.0%)自制聚合物 + (0.8~2.0%) HPAM 比例为 1:2-2:1	16 h	120℃	7 MPa
抗高温可延迟交联型聚合物凝胶	6% 聚合物 HDZ-A + 1% 交联剂 L-B + 8% 缓凝剂 HDZ-C	168 h	150℃	10 MPa

胡子乔[19]等人通过合成抗高温凝胶剂 GN-1 并采用二次交联技术，开发出新型抗高温凝胶堵漏材料。经热滚老化实验与高温流变测试验证，该凝胶在 180℃老化 24 小时后，剪切速率为 7.34 s<sup>-1</sup> 时的剪切粘度仍超过 10,000 mPa·s，展现出较好的热稳定性与粘弹性。材料卓越的携载能力及其与聚磺钻井液体系的良好匹配性，使其适用于高温地层堵漏作业。同时，作者进一步探究了不同温度与 pH 值下的成胶性能，为工程应用奠定理论基础。杨超[20]研发的复合凝胶堵漏材料通过多组分协同作用形成高强度网络结构，具备可控成胶时间、优良高温成胶性及高温持久性，为高温条件下的堵漏材料研究提供了依据。罗明望[21]自制了一种抗高温缔合聚合物主剂，然后使其与水解聚丙烯酰胺复配，构建双重凝胶交联体系，成功制备抗高温可控凝胶堵漏剂，且该堵漏剂能够对凝胶时间进行精确控制。高温老化实验显示，该凝胶在 120℃条件下可耐温 16 小时。章江[22]以丙烯酰胺(AM)、丙烯酰胺(ACMO)与 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)为原料，合成出抗高温耐盐聚合物 HDZ-A，并在其中添加交联剂和缓凝剂，开发出一种耐

高温、延迟交联的聚合物凝胶堵漏剂。通过筛选交联剂 L-B，并对聚合物、交联剂和缓凝剂浓度进行优化，确定了最优配方。性能测试显示，交联后的凝胶呈三维网状结构，流变性稳定，耐温性能达 150℃，在该温度下通过调节缓凝剂浓度可延长成胶时间至 4.5 小时。上述几种凝胶型抗高温堵漏材料的配比及耐温压性总结见表 4。

### 3.5. 复合型抗高温堵漏材料

目前，国内外的抗高温堵漏材料主要以云母、蛭石、石棉和贝壳等为基础，随着复合型抗高温堵漏材料的引入，使得堵漏方案更加多样化，抗高温堵漏体系逐步完善，尤其在应对高温缝洞型双漏失地层方面效果显著[23]。

程鹏至[24]等人采用创新制备技术成功研制 LCC 系列堵漏材料，包含有机高分子刚性颗粒 LCC100、合金纤维 LCC200 及柔性碎片 LCC300。LCC100 在 API 堵漏仪钢珠床中的封堵层承压能力达 7 MPa，在 25 MPa 承压下破碎率低于 10%，且在 150℃热滚 48 小时后强度稳定，展现出优异的耐压与耐温特性。苏晓明[25]通过静态承压封堵实验优化 GZD 与木质素纤维、弹性材料 SQD-98 及碳酸钙四者之间的复配比例，开发出一种新型耐高温、高承压复合堵漏材料 SXM-I。该材料能够兼具缝洞封堵的功能，且适配钻井液体系，承压能力超过 9 MPa，而且漏失量降至 13.4 mL，展现优异的高温高压封堵性能，抗温能力超过 180℃，密度超过 1.80 g/cm<sup>3</sup>。王建华[26]等人以苯乙烯磺酸钠、丙烯酰胺等单体为原料，成功合成了新型抗高温防漏堵漏剂，其更适用于油基钻井液。实验结果显示，该堵漏剂的热稳定性良好，分解初温达 360℃，体积膨胀 3~4 倍；在 180℃条件下，可对宽裂缝漏失通道进行封堵，其承压极限达 6 MPa，满足高温高压漏失地层的堵漏需求。蒋炳[27]等人基于颗粒状、纤维状和片状材料的耐高温筛选，研制出 HTD-3 型高温堵漏材料，并通过 DL-3A 型高温堵漏评价仪对其耐高温、承压及封堵性能进行了测试。测试结果表明，HTD-3 型材料具备优良的抗温和承压性能，并表现出良好的封堵效果，成为未来深海钻探堵漏作业的潜在选择。表 5 汇总了上述几种复合型抗高温堵漏材料的配比及耐温、承压性能。

**Table 5.** Formulation and thermal/pressure endurance of composite high-temperature resistant plugging materials  
**表 5.** 复合型抗高温堵漏材料的配比及耐温压性

材料	配比	耐温时长	耐温强度	抗压强度
LCC100	酰基、氨基、醛基等有机单体和氟化物	48 h	150℃	7 MPa
SXM-I	(8%~10%) GZD (A:B:X = 2:1:1) + (0.5%~1%)木质素纤维 + (6%~8%) SQD-98 (中:粗 = 1:1) + (1%~2%)碳酸钙(0.0190 mm:0.0021 mm (1200 目:800 目) = 1:1)	-	180℃	9 MPa
新型材料	树脂颗粒(粒径 10~100 μm) + 对苯乙烯磺酸钠 99% + 丙烯酸丁酯 99% + 丙烯酸十八酯 98% + 丙烯酰胺 99% + 二甲基二烯丙基氯化铵 99.0% + 乳化剂 40% + 亚甲基双丙烯酰胺 99% + 过硫酸钾 99%	16 h	180℃	6 MPa
HTD-3	47%的颗粒状材料 + 11.5%的纤维状材料 + 8%的片状材料 + 悬浮材料和填充材料	1.3 h	260℃	10 MPa

### 3.6. 智能型抗高温堵漏材料

近年来，在钻井液堵漏领域中，智能材料的应用与研究取得了显著的成效。作为一种功能性材料，智能堵漏材料能够在感知外界刺激后自我适应复杂的地层条件，其力学性能优越，相较于传统堵漏材料，在提高堵漏效果的同时，减少对地层的破坏。近年来开发的智能堵漏材料，如智能形状记忆聚合物和智

能凝胶，凭借其环境适应性和针对性，已成为石油开采领域的研究热点[28]。

庞雨微[29]等人使用石棉纤维、刚性颗粒、六次甲基四胺和聚丙烯酰胺等原料，开发了一种智能凝胶堵漏剂。该堵漏剂能够在不同深度的漏失层中及时的形成凝胶，以达到预期的封堵效果。在 150℃ 高温下，堵漏剂的承压能力达 7 MPa，满足高温高压条件下长时间封堵的需求。暴丹[30]等人基于热变形原理，研究了一种温敏形状记忆智能堵漏剂，其可根据漏失层温度进行调控玻璃化转变的温度。该材料在 120℃、20 MPa 条件下颗粒 D90 增长率超过 40%，一经激活便可形成自适应高强度架桥封堵结构。在未激活时，该堵漏剂呈片状的结构，能够更加方便的进入裂缝中，一旦达到临界温度，可以根据裂缝宽度膨胀成立方体，实现自适应封堵。王照辉[31]等人以热固性形状记忆环氧树脂为基体，通过引入空心玻璃微珠提升材料压缩性能，成功开发温敏膨胀型智能堵漏剂 SMP-LCM。该堵漏剂具有不同的响应温度和膨胀倍数，能够有效适应复杂的漏失环境，实现自动膨胀封堵。表 6 对以上几种智能型抗高温堵漏材料的配方和耐高温承压性能进行了总结。

**Table 6.** Composition and temperature/pressure tolerance of intelligent high-temperature resistant plugging materials  
**表 6.** 智能型抗高温堵漏材料的配比及耐高温性

材料	配比	耐温强度	抗压强度
多元化智能凝胶堵漏剂	-	150℃	7 MPa
热致形状记忆智能型堵漏剂	4% 膨润土浆 + 0.4% CMC-HV。加入 PJ50 体系制备的不同目数复配的形状记忆堵漏剂(SD-SLCM): 4% SD-SLCM (10~20 目) + 4% SD-SLCM (20~40 目) + 3% SD-SLCM (40~80 目)	120℃	20 MPa
SMP-LCM	4% 基浆 + 2% 复合堵漏剂 + 2% SMP-LCM (20~30 目) 堵漏体系封堵 60~80 目	95℃	6.21 MPa

### 3.7. 各类堵漏材料性能对比

**Table 7.** Performance comparison of various plugging materials  
**表 7.** 各类堵漏材料性能对比

类型	适用温度(℃)	抗压强度(MPa)	响应时间(min)	酸溶率(%)	成本指数
纤维型	200~220	3.5~10	-	≤30	1.2
环氧树脂	150~230	20~30	60~180	0	3.5
可酸溶型	180~210	7~20	-	75~95	2.8
智能材料	120~150	6~20	5~30	-	4.0

如表 7 所示，各类抗高温堵漏材料在关键性能指标上呈现显著差异：

(1) 纤维型材料(适用温度 200~220℃)凭借低成本(成本指数 1.2)和快速桥接能力，在微裂缝封堵中具有经济性优势，但其酸溶率低(≤30%)限制了储层保护能力。实验表明，当裂缝开度超过 3 mm 时，纤维材料的抗压强度衰减率达 40%，需与刚性颗粒复配使用。

(2) 环氧树脂型材料表现出最高的抗压强度(20~30 MPa)，得益于其三维交联网络结构，但固化时间较长(60~180 min)且不可酸溶，适用于非产层的永久性封堵。需注意其高温下的脆化现象——当温度超过 T<sub>g</sub> (玻璃化转变温度)时，弹性模量下降 52%，可能引发二次漏失。

(3) 可酸溶型材料在酸溶率(75~95%)与耐温性(180~210℃)间取得平衡，尤其适用于碳酸盐岩储层的暂堵作业。但现场数据显示，当裂缝开度 > 5 mm 时，其承压能力下降至 7 MPa 以下，需配合弹性石墨

等变形材料使用。

(4) 智能材料虽具备快速响应特性(5~30 min 激活),但其适用温度窗口较窄(120~150℃)。形状记忆聚合物的热膨胀系数可达传统材料的6倍,但成本指数高达4.0,现阶段仅适用于恶性漏失的紧急处置。

上述对比揭示,现阶段尚无单一材料能满足高温(>200℃)、宽缝(>5 mm)、可解堵(酸溶率 > 90%)等多重需求。未来需通过分子设计(如环氧树脂-形状记忆聚合物杂化体系)或智能调控(温度/pH 双响应凝胶)实现性能突破。

## 4. 结论与展望

### 4.1. 结论

随着常规石油资源的减少,开采已逐渐转向非常规地层。然而,高温地层的井漏问题依旧是钻井作业中的重大挑战,井漏一旦发生,不仅难以修复,还会对钻井工程产生显著影响。因此,研发有效的抗高温堵漏材料已成为钻井工程领域的重要研究方向。通过下面这些措施,有望进一步推动抗高温堵漏材料的研究与应用,提升其在高温复杂地层条件下的有效性和可靠性。这将有助于提高井漏处理的成功率,促进钻井工程的整体效率和安全性。

(1) 加强承压强度与抗高温时长的研究:深入探讨材料的承压能力和抗高温性能,寻找适合高温环境的材料配方和改性方法。

(2) 建立完善的性能评价体系:开发更全面的评价方法,针对不同类型的抗高温堵漏材料在不同温度下的表现,形成系统的评估标准。

(3) 快速响应的堵漏材料选择机制:由于井漏的发生具有时效性和复杂性,快速精准选择适合特定井漏特征的堵漏材料至关重要,因此应建立井漏特征与堵漏材料之间的匹配关系。

### 4.2. 研究展望

(1) 多尺度协同封堵理论:需建立裂缝孔径分布与材料粒径级配的数学模型,开发基于分形理论的堵漏剂设计方法。

(2) 智能材料响应阈值精确控制:研发具有温度-压力双重响应的形状记忆聚合物,通过调节甲基丙烯酸甲酯含量(15 mol%~25 mol%),使激活温度误差控制在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 范围。

(3) 数字孪生堵漏系统:构建包含地层压力场、温度场、应力场的三维数字模型,集成机器学习算法(如XGBoost模型),实现堵漏方案成功率预测准确率 > 85%。

## 参考文献

- [1] 徐楷, 苏堪华, 李猛, 等. 机器学习在油气钻井工程中的应用[J]. 非常规油气, 2023, 10(5): 8-17.
- [2] 孙金声, 王韧, 龙一夫. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. 钻井液与完井液, 2024, 41(1): 1-30.
- [3] 洪纯阳. 液氮循环压裂干热岩裂缝起裂与扩展机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2023.
- [4] 谢平, 蒋丽雯, 赵尧, 等. 基于神经网络的井涌井漏实时预测方法研究[J]. 现代计算机(专业版), 2018(11): 23-28.
- [5] 董洪栋. 松科2井抗高温随钻堵漏材料优选及封堵效果评价[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [6] 陈家旭. 高效纤维防漏堵漏技术实验研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学, 2019.
- [7] 暴丹. 裂缝地层致密承压封堵机理与钻井液堵漏技术研究[D]: [博士学位论文]. 东营: 中国石油大学, 2020.
- [8] Elhadary, M., Hamdy, A. and Shaker, W. (2022) Effect of Fiber Bridging in Composites Healing. *Alexandria Engineering Journal*, 61, 2769-2774. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.002>
- [9] Dioguardi, M., Alovisi, M., Sovereto, D., Troiano, G., Malagnino, G., Di Cosola, M., et al. (2021) Sealing Ability and Microbial Leakage of Root-End Filling Materials: MTA versus Epoxy Resin: A Systematic Review and Meta-Analysis.

*Heliyon*, 7, e07494. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07494>

- [10] 杜江波. 高温条件下可固化钻井堵漏材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2020.
- [11] 郭锦棠, 杜江波, 冯杰, 等. 高温高压钻井用堵漏材料的制备及性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(6): 593-598.
- [12] Cheng, J., Li, J. and Zhang, J.Y. (2009) Curing Behavior and Thermal Properties of Trifunctional Epoxy Resin Cured by 4, 4'-Diaminodiphenyl Sulfone. *Express Polymer Letters*, 3, 501-509. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.62>
- [13] Gao, C.H. (2019) Drilling Fluids for High Temperature Wells. *Petroleum & Coal*, 61.
- [14] 钟小军. 冀中坳陷深潜山抗高温可酸溶堵漏体系研究与优化[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学, 2020.
- [15] 陈彬, 金勇, 张伟, 等. 一种抗高温暂堵剂的研制[J]. 当代化工, 2022, 51(3): 505-508+512.
- [16] 聂育志. 顺托区块钻井液堵漏技术研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学, 2019.
- [17] 方俊伟, 贾晓斌, 游利军, 等. 深层断溶体油气藏钻完井储层保护技术挑战与对策[J]. 断块油气田, 2024, 31(1): 160-167.
- [18] Li, C., Yang, S., Wen, Z., Pan, Y., Zeng, F., Zhao, C., et al. (2020) The Research of New Type Gel Plugging Agent for Deep Well. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46, 7485-7499. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1756538>
- [19] 胡子乔, 刘四海, 张金成, 等. 新型抗高温二次交联凝胶堵漏材料的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(7): 103-106.
- [20] 杨超, 吴爽, 平善海, 等. 抗高温承压复合堵漏凝胶室内研制及评价[J]. 辽宁化工, 2021, 50(12): 1785-1788+1792.
- [21] 罗明望. 抗高温可控凝胶堵漏技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2021.
- [22] 章江. 抗高温延迟交联型聚合物凝胶堵漏剂研制及应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [23] Huang, X., Meng, X., Lv, K., Zhang, Z., Cao, L., Wang, R., et al. (2022) Development of a High Temperature Resistant Nano-Plugging Agent and the Plugging Performance of Multi-Scale Micropores. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 639, Article 128275. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128275>
- [24] 程鹏至, 易德文, 梅林德, 等. 新型堵漏材料的研制及性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(3): 51-55.
- [25] 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.
- [26] 王建华, 王玺, 柳丙善, 等. 油基钻井液用改性树脂类抗高温防漏堵漏剂研究[J]. 当代化工研究, 2021(3): 150-152.
- [27] 蒋炳, 严君凤, 张统得. HTD-3 型高温堵漏材料研制及性能评价[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 57-63.
- [28] Li, Z., Zhou, Y., Qu, L. and Zhang, X. (2023) Smart Plugging and Low-Damage Foam Drilling Fluid Technology for CBM Drilling. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 32, 103-125. <https://doi.org/10.1504/ijogct.2023.128050>
- [29] 庞雨微, 袁俊秀, 朱魁, 等. 一种速溶型阳离子聚丙烯酰胺类包被剂及其制备方法[P]. 中国专利, 106609132A, 2017-01-04.
- [30] 暴丹, 邱正松, 赵欣, 等. 基于温敏形状记忆特性的智能化堵漏材料研究展望[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(3): 265-272.
- [31] 王照辉, 崔凯潇, 蒋官澄, 等. 基于形状记忆环氧树脂聚合物的温敏可膨胀型堵漏剂研制及性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(4): 412-420.