# 深层-超深层缝洞型漏失通道堵漏浆驻留机制与材料协同设计:CFD-DEM研究进展

孙寿骏[1],张 毅[1*],王倩男[1],袁文真[1],马成云[2],汪 伟[1]
(1.中国地质科学院,北京 100037;2.西安石油大学机械工程学院,陕西 西安 710399)

**摘要**:深层-超深层缝洞型漏失通道具有开度突变、粗糙壁面、局部扩容和远端强连通等特征,堵漏材料易发生入口封门、深部耗散或封堵层冲刷失稳。为阐明堵漏浆由输运向驻留转变的控制机制,重点评述近十年CFD-DEM及相关颗粒尺度模拟,比较计算域、网格尺度、时间步长、边界条件、接触模型、流体本构与验证方法,并将定量结果用于材料协同设计分析。结果表明:在特定粗糙裂缝模型中,当颗粒直径/裂缝宽度($d/W$)=0.4、壁面摩擦系数为0.5、入口速度为0.1 m/s时,颗粒体积分数8%,在3 s内未形成封堵,而10%和20%分别在2.6和2.2 s形成封堵;另一三维裂缝研究得到粒径0.50~0.67 $W$、浓度8%、载液黏度50 mPa·s及壁面摩擦系数0.7~0.9的较优组合。针对2~5 mm裂缝的形状记忆颗粒模拟中,裂缝由3 mm×2 mm增至5 mm×4 mm时,封堵时间由0.11 s增至0.25 s、漏失率由4.6%增至12.3%。绝对架桥加量与补差紧密堆积设计使3组对比体系的承压能力提高100%~229%,累计漏失量降低31%~38%,材料用量降低28%~76%。上述阈值均受通道几何、材料形状和边界条件约束,不能作为通用配方。基于此,提出以通道参数化、几何级配、载液流变、高温功能保持和多尺度验证为主线的协同设计流程,为堵漏材料由经验复配向可计算、可验证设计转变提供依据。

**关键词**:深层-超深层;缝洞型漏失;堵漏浆;颗粒驻留;CFD-DEM;高温流变;协同设计
**中图分类号**:P634.8;TE28 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-9686(2026)S1-0032-16

# Retention mechanisms and collaborative material design of lost-circulation-control slurry in deep and ultra-deep fractured-vuggy loss channels: A CFD-DEM review

SUN Shoujun[1], ZHANG Yi[1*], WANG Qiannan[1], YUAN Wenzhen[1], MA Chengyun[2], WANG Wei[1]
(1. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*; 2. *School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi* 710399, *China*)

**Abstract**: Deep and ultra-deep fractured-vuggy loss channels are characterized by abrupt aperture variation, rough walls, local expansion and strong distal connectivity, which may cause premature entrance sealing, deep material loss or erosion-induced failure of the plugging zone. To clarify the governing mechanism for the transition of lost-circulation-control slurry from transportation to retention, this review examines particle-scale CFD-DEM and related simulations published mainly during the past decade, with emphasis on computational domains, mesh size, time steps, boundary conditions, contact laws, fluid constitutive models and validation, and quantitative results are

**收稿日期**:2026-06-22;**修回日期**:2026-08-09 **DOI**:10.12143/j.ztgc.2026.S1.004
**基金项目**:中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助项目(编号:JKYDM2025112、JKY202637)
**第一作者**:孙寿骏,男,汉族,2002年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为深层-超深层缝洞型地层井漏机理与堵漏技术,北京市海淀区皇后店东路中国地质科学院(100094),414245337@qq.com。
**通信作者**:张毅,男,汉族,1986年生,高级工程师,硕士生导师,地质工程专业,博士,从事科学钻探技术与装备研究,北京市西城区百万庄大街26号,shidazhangyang@163.com。
**引用格式**:孙寿骏,张毅,王倩男,等.深层-超深层缝洞型漏失通道堵漏浆驻留机制与材料协同设计:CFD-DEM研究进展[J].钻探工程,2026,53(S1):32-47.
SUN Shoujun, ZHANG Yi, WANG Qiannan, et al. Retention mechanisms and collaborative material design of lost-circulation-control slurry in deep and ultra-deep fractured-vuggy loss channels: A CFD-DEM review[J]. Drilling Engineering, 2026,53(S1):32-47.

adopted for synergistic material design analysis. The results show that in a specific rough-fracture model with a ratio of particle diameter and fracture width ($d/W$)=0.4, a wall-friction coefficient of 0.5 and an inlet velocity of 0.1 m/s, an 8% particle volume fraction did not seal within 3 s, whereas 10% and 20% sealed at 2.6 and 2.2 s, respectively. A separate three-dimensional fracture study identified a model-specific favorable combination of particle size of 0.50～0.67 $W$, concentration of 8%, carrier-fluid viscosity of 50 mPa·s and wall-friction coefficient of 0.7～0.9. In a shape-memory-particle simulation for 2～5 mm fractures, increasing the inlet-outlet dimensions from 3 mm×2 mm to 5 mm×4 mm, increased sealing time from 0.11s to 0.25 s and loss ratio from 4.6% to 12.3%. A design combining absolute bridging dosage with gap-filling dense packing increased pressure-bearing capacity by 100%～229%, while reduced cumulative loss by 31%～38% and material consumption by 28%～76% in three comparative cases. These thresholds are conditional on channel geometry, particle shape and boundary settings and should not be treated as universal formulations. Based on this, a collaborative design workflow integrating channel parameterization, geometric gradation, carrier-fluid rheology, high-temperature functional retention and multiscale validation is therefore proposed, which provides support for the lost-circulation-control material transportation from empirical compounding toward computable and verifiable design.

**Key words**: deep and ultra-deep formations; fractured-vuggy lost circulation; lost-circulation-control slurry; particle retention; CFD-DEM; high-temperature rheology; collaborative design

## 0　引言

深层和超深层油气资源已成为我国油气增储上产的重要接替领域。随着井深增加,温度、压力和地应力升高,井筒安全密度窗口收窄;碳酸盐岩缝洞体、断控岩溶体及裂缝-孔洞复合网络具有尺度跨度大、开度突变和强连通等特征,钻遇后易形成持续性或恶性漏失,并诱发井壁失稳、卡钻和井控风险。现场实践表明,材料是否具备高承压强度并不能单独决定堵漏成功,堵漏浆能否进入目标通道并在高速漏失流场中减速、驻留和形成稳定封堵层更为关键[1-11]。

近年研究已从桥接材料筛选扩展至粒径分布优化、粗糙裂缝颗粒滞留、封堵层力链演化、非牛顿流体携带、高温材料退化和CFD-DEM细观模拟。规则裂缝试验建立了$D_{50}$、$D_{90}$与缝宽的匹配关系,粗糙裂缝和多粒级模拟揭示了摩擦、浓度、颗粒形状及局部收缩对架桥概率的影响,凝胶与固结材料则为大开度和扩容通道提供了不同于单纯颗粒桥接的驻留路径[12-29]。

现有成果仍存在两类关键断点。其一,地震、成像测井和钻井动态能够识别缝洞体,却尚未稳定转化为实验和模拟所需的开度分布、粗糙度、局部收缩比及连通性参数;多数粒径准则仍基于平直、单一开度裂缝,对厘米级裂缝和裂缝-孔洞复合通道的适用性有限[11,30-32]。其二,颗粒级配、流变触变和材料高温物性通常被分开评价,导致地面设计级配进入井下后可能因沉降、分选、热降解或触变恢复不足而失效。

在方法层面,CFD-DEM已能够输出颗粒速度、接触力、力链、局部固相浓度和压降演化,但近五年的堵漏模拟仍以等温条件、刚性球形颗粒和简化流变模型为主,对触变流体、柔性纤维、可变形或膨胀颗粒、凝胶固化以及真实缝洞拓扑的考虑不足[13,16,19,21-22,25-29,33]。因此,现有研究尚缺少由通道特征出发,将颗粒几何匹配、动态流变调控和高温稳定性统一起来的设计逻辑。

上述不足表明,综述不能停留在材料类别罗列或一般性进展汇总,而应回答三个可检验问题:不同通道几何如何改变颗粒捕获位置,计算模型在何种网格、时间步和边界条件下得到驻留阈值,模型输出如何转化为骨架、填充、增强相及载液流变的设计变量。只有同时报告模型条件和定量响应,才能避免将个别研究的“最优值”误作普适准则。

本文围绕深层-超深层缝洞型漏失通道堵漏浆驻留机制与材料协同设计展开综述。首先分析通道等效表征及颗粒输运、架桥和封堵层失稳;随后以CFD-DEM为重点,讨论控制方程、耦合尺度、计算设置、参数响应和验证边界;在此基础上归纳流变触变、高温材料功能保持及“骨架-填充-增强”设计逻辑,并提出可由实验和现场数据反馈修正的协同设计流程。

## 1　深层-超深层缝洞型漏失通道特征与等效表征

### 1.1　缝洞型漏失通道的地质基础

从堵漏工程角度,深层-超深层漏失通道可归

纳为天然或诱导裂缝型、岩溶孔洞型、断控缝洞型、裂缝-孔洞复合型和断裂破碎带型。天然或诱导裂缝型以开度、延伸长度和压力开启行为为主要参数，成像测井、漏失压力响应与平板或楔形模型较适用；岩溶孔洞型存在局部扩容和自由沉降空间，地震属性、放空漏失动态及裂缝-孔洞串联模型更能反映其特征；断控缝洞型和破碎带型则受分支连通与远端供泄能力控制，需要井震结合、声波远探测和网络模型共同约束[5-7,10-11,30-32]。

不同方法的有效尺度并不相同。地震雕刻适合识别区域缝洞体和断裂展布，但难以直接给出井壁附近毫米级开度；电成像可定量提取裂缝倾角、密度、表观开度及孔洞面积，却受井壁覆盖范围限制；声波远探测扩大了径向探测范围，但反演结果仍需与钻井漏失量、泵压突变和承压试验联合解释。因而，单一识别手段只能回答通道位置或局部几何问题，多源数据融合才能将地质模型转化为堵漏模型参数[30-32]。

面向材料设计的等效表征应保留对驻留最敏感的参数，而不必完整复制储层。规则裂缝便于确定粒径和浓度的单因素阈值；变开度和粗糙模型可识别捕获点、入口封门与深部桥接；三维打印或真实缝面重构适于验证壁面微凸体和迂曲通道对滞留概率的影响；裂缝-孔洞或多分支模型则用于评价扩容沉降和强连通条件下的材料耗散。不同模型的比较见表1。

**表1 缝洞型漏失通道等效物理模型对比**

| 模型类型 | 代表性研究 | 主要表征参数 | 优 势 | 局限与适用条件 |
|---|---|---|---|---|
| 平行平板/长槽 | 李洁等[13]、康毅力等[15]、张帅[18] | 单一开度、流速、浓度、粒径比 | 变量可控、重复性好，适合确定初始桥接阈值 | 忽略粗糙与开度突变；适用于规则裂缝和方法标定 |
| 楔形/变开度 | 张敬逸[17]、夏雪芹[27] | 入口开度、收缩率、桥接位置 | 可区分入口封门与深部桥接 | 几何仍较理想；适用于开度渐变裂缝 |
| 人工粗糙裂缝 | 冯永存等[16]、黄尹剑[19] | 粗糙度、摩擦系数、微凸体 | 能够研究碰撞、滞留和局部低速区 | 粗糙度表征方法不统一；适用于驻留概率研究 |
| 真实缝面/三维重构 | 张敬逸[17] | 三维形貌、迂曲度、局部收缩 | 几何真实性高，可验证颗粒形状效应 | 制样与重复实验成本高；适用于机制验证 |
| 裂缝-孔洞/网络 | 闫丰明等[10]、张帅[18]、孙金声等[11] | 扩容比、分支数、连通性、远端边界 | 可反映沉降、分流和材料深部耗散 | 参数难反演；适用于大开度和强连通通道 |

### 1.2 通道几何参数与拓扑特征

堵漏浆能否驻留，与通道几何特征密切相关。开度是最直接的控制参数。对于小尺度裂缝，颗粒粒径与裂缝开度之间的匹配关系往往决定初始架桥能否发生；对于毫米级和厘米级裂缝，单一颗粒通常难以跨越整个通道，需要依赖多颗粒协同、纤维缠结、弹性变形或固结材料形成复合封堵层；对于裂缝-孔洞复合通道，孔洞扩容会降低局部流速但增加材料沉降和分散风险，使颗粒可能在进入孔洞后失去有效堆积约束[15,34]。

粗糙度是影响颗粒驻留的另一关键因素。真实裂缝壁面通常具有起伏、台阶、尖灭、收缩和局部扩张等形态。粗糙壁面可增强颗粒碰撞和局部滞留概率，为初始架桥提供几何支点；但过强的粗糙非均质性也会造成流场局部加速或绕流，使颗粒堆积位置呈现不稳定性。相比平直裂缝，粗糙裂缝中颗粒运动轨迹更复杂，颗粒沉积、砂丘形成、局部堵塞和再冲刷过程更明显[16-17]。

连通性决定漏失通道是否持续吸收堵漏浆。若裂缝与大孔洞或远端断裂网络连通，堵漏浆可能在局部架桥前被迅速带走，导致材料消耗大但封堵效果差；若通道存在局部收缩、尖灭或分支汇合，则更容易形成桥接位置。对于断控缝洞型储层，断裂带的规模、方向、分支和与孔洞的组合关系决定了漏失路径。堵漏设计若只关注井筒附近单一开度，而忽略远端连通空间，可能难以解释现场中“材料打入量大但承压不明显”的现象[2,10]。

因此，面向堵漏的漏失通道表征应至少包括开度分布、壁面粗糙度、通道长度、局部收缩比、孔洞扩容比、分支连通性和流动边界条件等参数。这些参数不仅用于描述地层，也应成为实验模型和数值模型的输入。

### 1.3　通道识别与定量表征方法

缝洞型储层识别主要依赖地震、测井、录井、钻井动态和生产动态等多源信息。宏观尺度上,地震资料可通过串珠状反射、线性弱反射、杂乱强反射和多属性融合识别大尺度孔洞、断裂带和缝洞体。井震结合、分频分级、多属性融合和三维雕刻方法能够在一定程度上刻画缝洞体空间展布,为判断漏失通道类型和规模提供依据[5,30]。

井筒附近的微观和中观尺度表征则更多依赖常规测井、成像测井、电成像测井和声波远探测测井。电成像测井可以较直观地识别裂缝、溶蚀孔洞和高密度孔洞发育带,并提取裂缝开度、长度、密度、倾角、孔洞面积、周长和迂曲度等参数。声波远探测可在井外数十米范围内识别地质异常体,弥补常规测井径向探测深度不足的问题。对于深层缝洞型储层,地震资料具有区域覆盖优势,成像测井具有高分辨率优势,二者结合有助于建立“区域缝洞展布-井周通道形态-堵漏模型参数”的联系[31-32]。

钻井动态资料同样重要。钻遇放空、钻时突变、泵压下降、返出量减少、漏失量变化和承压试验响应等现象,可反映漏失通道规模和连通性。对于堵漏研究而言,将测井和地震识别结果与漏失动态、承压曲线和材料用量结合,是判断漏失通道等效模型的重要依据。

### 1.4　等效物理模型构建

由于真实缝洞型通道难以完整复制,实验和数值研究通常采用等效模型。常见模型包括平板裂缝、楔形裂缝、变开度裂缝、粗糙裂缝、长槽裂缝、裂缝-孔洞串联模型和裂缝网络模型。平板裂缝便于控制变量,适合研究粒径匹配、浓度和流变性对架桥的影响;楔形裂缝能够模拟裂缝逐渐收缩或扩张条件下的桥接位置;粗糙裂缝更接近天然裂缝壁面,可用于研究颗粒碰撞、滞留和局部堵塞;裂缝-孔洞复合模型可模拟大缝洞漏失中局部扩容和通道连通问题[13,18]。

需要指出的是,等效模型并非越复杂越好,而应服务于具体机制问题。若研究粒径匹配阈值,可采用规则裂缝以提高可重复性;若研究驻留位置和封堵层稳定性,则应引入粗糙度和变开度;若研究大缝洞漏失,则需要考虑孔洞扩容、流速衰减、颗粒沉降和远端连通。未来的关键不只是建立模型,而是将地质识别得到的通道参数转化为物理实验和数值模拟可使用的等效参数。

## 2　堵漏浆在漏失通道中的运移与驻留机制

### 2.1　堵漏浆运移阶段划分

堵漏浆进入漏失通道后,并非瞬间形成封堵,而是经历连续演化过程。第一阶段为流体携带与颗粒输运,堵漏材料在钻井液或专用堵漏浆中悬浮,在压差作用下进入漏失通道。此阶段颗粒运动主要受流体拖曳力、重力、浮力、颗粒间碰撞和壁面作用控制。第二阶段为颗粒分选与局部富集,由于颗粒粒径、密度、形状和受力不同,堵漏浆在通道内可能发生颗粒分级、沉降或局部浓度增加。第三阶段为初始架桥,颗粒在裂缝收缩处、粗糙凸起处、裂缝入口或孔喉部位形成临时支撑结构。第四阶段为堆积和填充。后续颗粒、细粉和纤维在初始桥接结构后方堆积,逐渐降低封堵层孔隙率和渗透率。第五阶段为承压稳定或失稳。当封堵层能够抵抗井筒与地层之间压差时,漏失得到控制;若封堵层受冲刷、压裂扩展、颗粒滑移或材料软化影响,则可能发生再漏失[17,19]。

驻留机理的核心在于颗粒从“随流体迁移”转变为“在通道内滞留并参与结构形成”。这一转变通常需要几何约束、颗粒间接触、壁面摩擦、流变支撑和局部压降共同作用。若缺少几何约束,颗粒容易被带入深部;若缺少细颗粒填充,初始桥接层渗透率过高,仍会发生大量滤失;若封堵层缺少韧性和黏附,压力波动下易失稳。

### 2.2　颗粒架桥机制与粒径匹配准则

颗粒桥接是裂缝性漏失堵漏的基础机制。早期研究提出了基于孔喉或裂缝宽度的粒径匹配经验准则,认为当一定比例颗粒粒径达到裂缝开度的某一比例时,更容易形成有效桥接。后续研究进一步强调$D_{50}$、$D_{90}$、$D_{10}$等粒径分布指标的作用,认为$D_{50}$和$D_{90}$控制架桥能力和封堵深度,$D_{10}$和细颗粒比例影响封堵层渗透率和总漏失量。粒径分布过窄时,颗粒可能形成骨架但孔隙较大;粒径分布过宽时,细颗粒虽有利于填充,但过多细颗粒也可能随流体流失或影响浆体流变[12,20]。

对于规则裂缝,粒径-缝宽比可以较好预测初始桥接条件。例如,部分研究提出$D_{50}$不小于裂缝宽度的0.3倍、$D_{90}$不小于裂缝宽度的1.2倍时,材料更可能形成有效封堵。也有研究以$W_f/D_{50}$作为临界参数,指出当裂缝宽度与中值粒径比值超过一定范围后,单纯依靠颗粒桥接的难度迅速增加。对于毫

米级裂缝，这类准则具有较强工程价值[12,15]。

但对于深层-超深层缝洞型漏失通道，粒径准则不能机械套用。首先，真实通道开度并非单一值，而是存在分布和突变。其次，大开度裂缝或孔洞中，单一颗粒很难直接架桥，需要多颗粒团聚、纤维辅助、弹性变形或固结材料参与。再次，颗粒过大可能导致井筒或裂缝入口处封门，堵漏浆难以进入目标位置。最后，高温和高剪切会改变材料尺寸、强度和表面性质，使地面筛分粒径与井下有效粒径不完全一致。因此，粒径匹配应作为几何设计的起点，而非完整设计方法。

### 2.3 粗糙裂缝和变开度对驻留的影响

粗糙裂缝内的颗粒运移与平直裂缝显著不同。粗糙壁面形成局部缩径、扩径和低速区，为颗粒滞留提供了可能。颗粒在流经粗糙凸起时可能发生碰撞、旋转、减速和局部堆积，进而形成初始桥接。数值模拟显示，粗糙度增加会改变颗粒沉积距离、沉积高度和压降变化规律。局部粗糙结构还可能诱导颗粒形成团簇或块状堆积，使封堵层位置前移[13,16]。

变开度裂缝更接近实际漏失通道。裂缝收缩段有利于形成桥接，扩张段则容易导致颗粒分散和沉降。在楔形裂缝中，颗粒通常在某一临界开度处开始架桥，后续颗粒在桥接结构后方堆积。若裂缝入口较窄而深部扩张，则可能出现入口封门；若入口较宽而深部收缩，则材料进入能力较好，但需保证颗粒在深部收缩处仍有足够浓度。对于裂缝-孔洞复合通道，孔洞相当于局部扩容区，流速下降可能促进沉降，但也可能使颗粒沉积在孔洞底部而不是形成跨通道封堵[17,21]。

因此，驻留机制不仅取决于材料粒径，还取决于通道几何中是否存在有效“捕获点”。未来实验应从单一平直裂缝转向粗糙、变开度和裂缝-孔洞复合模型，以更真实地评价堵漏浆驻留能力。

### 2.4 颗粒形状、浓度和纤维对封堵层形成的影响

颗粒形状影响流体阻力、壁面碰撞、堆积密度和颗粒间接触方式。球形颗粒流动性较好，但相互咬合作用较弱；片状、棱角状和不规则颗粒更容易产生机械嵌挤和摩擦滞留，可在一定条件下封堵大于其筛分粒径的裂缝。非球形颗粒还会改变沉降姿态和拖曳系数，影响其在非牛顿流体中的输运和沉降[34-35]。

颗粒浓度存在适宜范围。浓度过低时，颗粒间接触不足，难以形成连续桥接结构；浓度过高时，浆体黏度上升、泵送阻力增大，并可能在井筒或入口处提前堵塞。实验和模拟均表明，在一定级配条件下存在最优颗粒浓度，使颗粒既能有效进入裂缝，又能在目标位置形成桥接和堆积[19,21]。

纤维材料在堵漏中的作用不只是填充。纤维可通过缠结、搭接和柔性变形提高颗粒滞留概率，增强封堵层韧性，并降低封堵层被冲刷破坏的可能。片状纤维或柔性纤维可贴附裂缝壁面，形成辅助桥接结构，随后颗粒在其支撑下堆积。细颗粒和纤维进入桥接骨架孔隙后，可进一步降低封堵层渗透率，提高致密性和承压能力。因此，深层缝洞型堵漏材料设计应重视刚性颗粒、细颗粒、纤维和弹性材料的复合作用[34,36]。

### 2.5 CFD-DEM模型、计算设置与驻留机理证据

#### 2.5.1 耦合框架与模型选择

CFD-DEM将载液视为连续相、将堵漏颗粒视为离散相，通过孔隙率、相间作用力和颗粒速度进行双向交换。连续相求解质量与动量守恒方程，离散相求解颗粒平动和转动方程；颗粒-颗粒及颗粒-壁面接触通常采用软球模型，流体作用包括曳力、压力梯度力、浮力及在需要时引入的升力。由此可同时获得速度场、压降、颗粒轨迹、接触力、力链和局部固相体积分数，评价框架见图1。

模型选择取决于颗粒与网格的相对尺度。非解析式CFD-DEM以单元平均孔隙率和阻力关联式表征相间作用，适合多粒级、大颗粒数量的参数扫描；解析式CFD-DEM需用小于颗粒尺度的网格解析颗粒周围流场，能够更细致描述粗糙壁面附近的绕流和捕获，但计算成本显著增加。夏雪芹[27]采用非解析式耦合、Di Felice曳力模型及软球接触，张敬逸[26]采用单层颗粒通过的解析式方法研究粗糙缝面。两类方法并无绝对优劣，关键是模型分辨率与研究目标一致，并通过网格无关性和实验观测验证。

#### 2.5.2 计算域、网格、时间步与边界条件

夏雪芹[27]建立长度100 mm的三维裂缝，采用2 mm流体网格，网格尺度约为颗粒直径的3～5倍；入口采用0.5 m/s速度边界、出口采用压力边界。基准工况颗粒直径0.7 mm、密度2.71 g/cm$^3$，载液黏度30 mPa·s、密度1.3 g/cm$^3$，DEM与CFD时间步分别为$1\times10^{-6}$和$1\times10^{-3}$ s，单工况计算0.5 s。该研究完成90余组计算，在12核CPU上单工况耗时约1～2

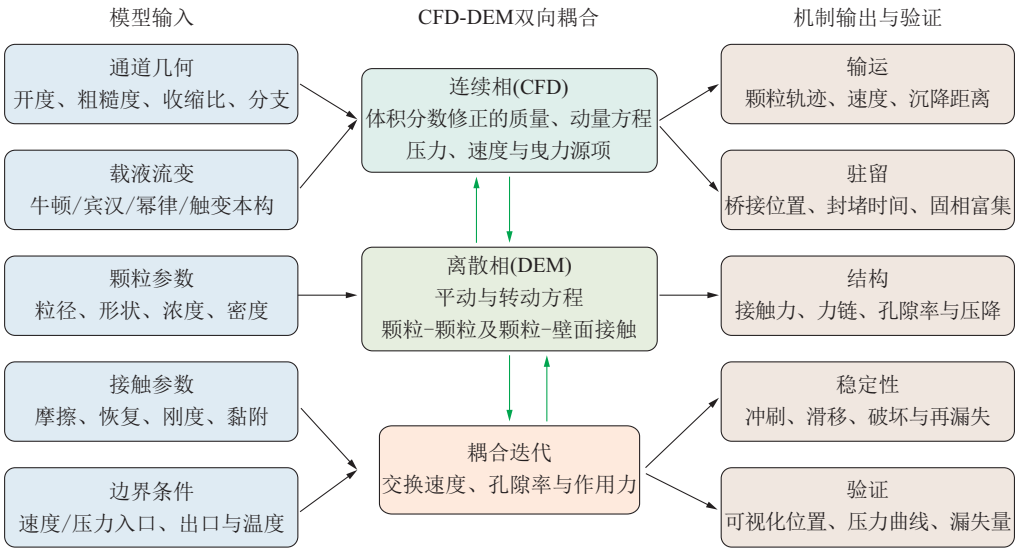



**图 1　CFD-DEM 双向耦合与堵漏颗粒驻留评价框架**

d,说明高维参数扫描必须在几何真实性、粒级数量与计算成本之间权衡。

张爱[28]采用长度 150 mm、高度 10 mm、入口与出口开度分别为 2 和 1 mm 的楔形裂缝,平均开度 1.5 mm,颗粒粒径 0.2～1.2 mm;DEM、CFD 时间步分别为 $1\times10^{-6}$ 和 $1\times10^{-4}$ s,总计算时间 1 s。该研究同时报告 0.5 m/s 入口速度及 50 kPa 入口压力,复现时需进一步核对速度与压力边界的施加阶段。两项研究表明,时间步至少相差 3 个数量级的多速率耦合较为常见,但应同时报告网格/颗粒尺度比、耦合交换频率、质量守恒误差和计算收敛性,否则不同阈值难以横向比较。

### 2.5.3　参数响应与由输运向驻留的转变

驻留不是单一粒径条件,而是几何捕获、颗粒接触、壁面摩擦、局部固相富集和压降反馈共同形成的动态结果(图 2)。张敬逸[26]在 $d/W=0.4$、壁面摩擦系数 0.5 和入口速度 0.1 m/s 条件下发现,8% 颗粒体积分数在 3 s 内未封堵,10% 与 20% 分别在 2.6 和 2.2 s 形成封堵;相同浓度和粒径比下,光滑裂缝即使提高至 $d/W=0.6$ 仍未形成稳定封堵。这一对比说明,粗糙微凸体和摩擦提供的捕获作用可改变浓度阈值,不能仅用 $d/W$ 解释驻留。

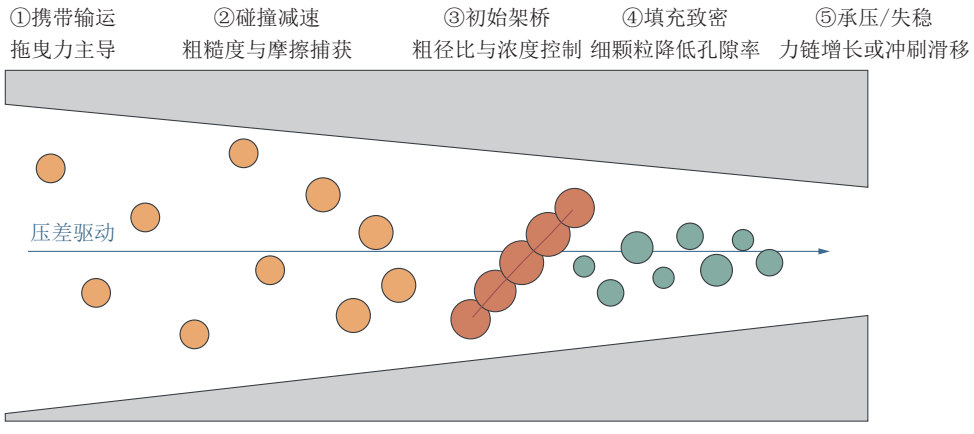
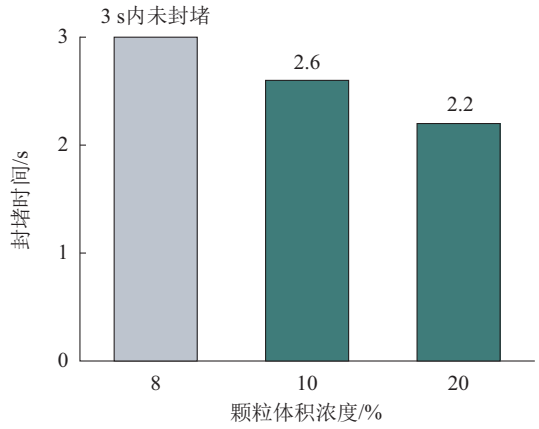



**图 2　漏失通道内堵漏颗粒由输运到驻留的机制链条**

参数扫描进一步揭示了阈值的模型依赖性。夏雪芹[27]在 0.5、0.7、0.9、1.1 和 1.34 mm 粒径,1%～11% 浓度,0.1～0.9 壁面摩擦系数及 0.25～20 GPa 剪切模量范围内比较后,得到粒径(0.50～0.67)$W$、浓度 8%、载液黏度 50 mPa·s、载液密度 1.4 g/cm$^3$ 和壁面摩擦系数 0.7～0.9 的较优组合。张爱[28]则在楔形

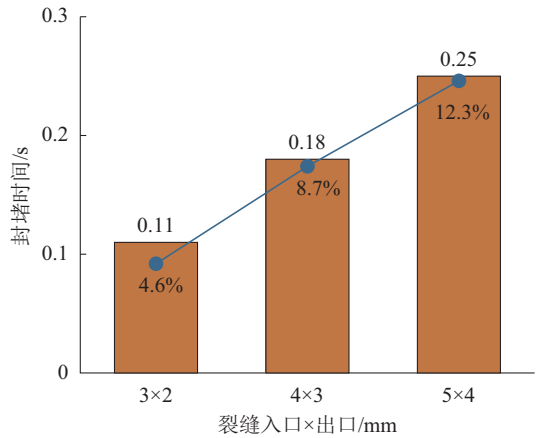
裂缝中得到单球架桥比$R$为0.2～0.4、浓度15%的较优结果，并观察到片状颗粒翻转搭接、条状颗粒交织增强、块状颗粒悬挂后滑移等不同失稳路径。差异表明，材料形状改变了受力和接触拓扑，“最优粒径比”必须与形状、浓度、流速及壁面条件共同给出。

对于可变形响应材料，解宏涛[29]在2～5 mm裂缝和幂律载液中，将6～10、10～16、16～30和30～50目四粒级按4:5:5:2复配，颗粒体积分数为16%、载液黏度为20～40 mPa·s。裂缝入口×出口由3 mm×2 mm增至4 mm×3 mm和5 mm×4 mm时，封堵时间由0.11 s增至0.18、0.25 s，漏失率由4.6%增至8.7%和12.3%（图3）。该结果反映通道尺度增大导致骨架形成推迟和无效流失增加，同时说明热触发膨胀只能补偿部分几何失配，仍需由多粒级初始桥接提供驻留基础。




注：$d/W$=0.4，摩擦系数0.5，入口速度0.1m/s。

(a)粗糙裂缝中的浓度阈值




注：幂律流体；4:5:5:2四粒级；体积分数16%；柱形为封堵时间，折线为漏失率。

(b)多尺度裂缝的封堵响应

**图3 粗糙裂缝浓度阈值与多尺度裂缝封堵响应[26,29]**

#### 2.5.4 模型验证与适用边界

模型验证应形成“流变参数—颗粒运动—桥接位置—压力/漏失曲线—封堵层结构”的递进证据链。夏雪芹[27]针对粒径、浓度、黏度、载液密度和摩擦系数5类因素将模拟与实验对比，变化趋势一致，模拟封堵效果整体略高于实验；这提示理想壁面、均一颗粒和未充分考虑材料磨损可能导致乐观偏差。许成元等[22]通过光弹试验观察力链，球形颗粒体系强力链占比11.64%、最大承压0.22 MPa，加入异形颗粒后强力链占比提高至16.20%～16.61%、最大承压提高至0.35～0.53 MPa，验证了接触网络而非单纯固相体积分数控制承压稳定。

因此，CFD-DEM适合识别因果机制、比较参数敏感性和缩小配方搜索区间，但不能替代高温动态封堵实验。对于真实缝洞通道，至少应验证三类量：几何层面的桥接位置和封堵体形态；过程层面的封堵时间、压降与漏失衰减；结构层面的接触力、孔隙率或破坏模式。若仅以最终承压值同时反演摩擦、恢复、黏附和曳力参数，会产生多解性。表2汇总的阈值仅在所列模型与工况内成立。

### 2.6 封堵层失稳与再漏失机制

堵漏成功并不等同于封堵层永久稳定。现场复漏现象表明，封堵层在形成后仍可能受到压差升高、循环冲刷、井底压力波动、裂缝继续扩展、颗粒破碎和材料高温软化等因素影响而失稳。封堵层失稳可分为结构滑移、局部冲蚀、颗粒重排、压裂贯通和材料退化等类型。结构滑移多发生于封堵层与裂缝壁面黏附不足或摩擦阻力不足时；局部冲蚀常出现在封堵层内部孔隙率较高、细颗粒填充不足或滤失通道尚未完全切断时；颗粒重排则与压力升高后颗粒接触力重新分布有关，可能造成原有力链断裂和孔隙通道重新贯通[4,22]。

对于大开度裂缝和裂缝-孔洞复合通道，封堵层失稳风险更高。大开度条件下，封堵层往往厚度较大且内部结构非均匀，若骨架颗粒比例不足，封堵层容易被压实变形；若细颗粒不足，则残余渗流会持续冲刷骨架孔隙；若纤维或凝胶增强不足，则封堵层在压力波动下缺乏整体性。裂缝与孔洞连通时，封堵层后方可能存在较大空腔，压差作用下封堵体易发生整体推移或局部坍塌。

因此，驻留机理研究应同时关注“形成机制”和“稳定机制”。前者回答堵漏材料如何在通道中停

**表2　代表性CFD-DEM研究的模型设置、定量结果及适用边界**

| 研　究 | 模型及边界 | 关键计算设置 | 定　量　结　果 | 机制认识与适用边界 |
|---|---|---|---|---|
| 冯永存等[16] | 刚性颗粒/裂缝流动模型 | 粒径、浓度与通道几何参数扫描 | 揭示几何收缩与颗粒匹配共同控制架桥 | 适用于刚性颗粒敏感性分析;接触和变形描述有限 |
| 张敬逸[17] | 解析式CFD-DEM;粗糙/光滑裂缝 | $d/W$=0.4;摩擦系数0.5;入口0.1 m/s | 8%在3 s内未封堵;10%、20%分别在2.6、2.2 s封堵;光滑壁面20%仍未封堵 | 粗糙捕获和摩擦改变浓度阈值;不能仅用粒径比预测驻留 |
| 许成元等[22] | CFD-DEM+光弹力链实验;楔形裂缝开度3→1 mm、长50 mm | 架桥概率、摩擦、强力链占比 | 强力链11.64%对应0.22 MPa;异形复配16.20%～16.61%对应0.35～0.53 MPa | 强力链网络控制承压;接触参数可由光弹试验校核 |
| 李洁等[13] | 介观尺度裂缝;多级刚性颗粒 | 压差、接触力、堆积与冲刷过程 | 区分封堵层形成、承载和冲刷破坏阶段 | 适合研究封堵层演化;高温与颗粒形变仍被简化 |
| 许成元等[25] | CFD-DEM+承压实验+现场验证 | 绝对架桥加量与补差紧密堆积 | 承压提高100%～229%;漏失降低31%～38%;用量降低28%～76% | 可定量分配骨架与填充用量;适用于连续/重叠粒度分布 |
| 黄尹剑[19] | 桥接颗粒细观动力学模型 | 碰撞、摩擦、粒径分布 | 给出初始桥接与冲刷失稳的细观响应 | 适合分析接触拓扑;柔性与破碎过程需扩展 |
| 张帅[18] | 多尺度裂缝与差异化配方模型 | 缝宽、级配和材料组合 | 不同尺度裂缝对应不同粒级和增强材料组合 | 适合配方分级筛选;需补充细观力链与高温耦合 |
| 张爱[28] | 楔形裂缝长150 mm;开度2→1 mm | 颗粒0.2～1.2 mm;DEM $10^{-6}$ s;CFD $10^{-4}$ s | $R$=0.2～0.4;浓度15%;片/条/块形状产生不同搭接与滑移 | 多形状复配改善稳定性;边界设置需在复现时核对 |
| 解宏涛[29] | 幂律流体;裂缝开度2～5 mm;温敏形状记忆颗粒 | 四粒级4:5:5:2;体积分数16%;黏度20～40 mPa·s | 裂缝入口开度×出口开度3 mm×2 mm至5 mm×4 mm;封堵0.11～0.25 s;漏失率4.6%～12.3% | 热恢复与几何级配协同;需匹配激活温度和输送时间 |
| 闫霄鹏等[21] | 多粒径刚性颗粒DEM裂缝模型 | 粒径组合、级配和接触参数 | 多粒级复配降低封堵层孔隙并改善受力连续性 | 适合级配比较;载液反馈需由双向耦合补充 |
| 夏雪芹[27] | 非解析CFD-DEM;三维裂缝长100 mm | 网格2 mm;DEM $10^{-6}$ s;CFD $10^{-3}$ s;入口0.5 m/s | (0.50～0.67) $W$、颗粒质量分数8%、钻井液动力黏度50 mPa·s、密度1.4 g/cm$^3$、摩擦系数0.7～0.9较优 | 完成90余组参数扫描并以5类因素实验验证;阈值具有模型依赖性 |

留并形成桥接,后者回答封堵层为何能够持续承压而不被破坏。材料设计中,骨架颗粒提供承载基础,细颗粒降低渗流通道,纤维和片状材料提高抗拉和抗冲刷能力,凝胶或固结相提高黏附和整体性。对于深层-超深层井段,还必须考虑高温老化后上述功能是否仍能保持。

## 3　堵漏浆流变性与触变性对驻留的调控作用

### 3.1　高温高压条件下钻井液和堵漏浆流变变化

堵漏浆本质上是含多级固相颗粒和功能材料的复杂非牛顿流体。其流变性决定材料能否被泵送、能否携带颗粒进入漏失通道以及进入后能否形成有效驻留。深层-超深层井下温度高、压力高、盐度高,钻井液和堵漏浆的表观黏度、塑性黏度、动切力、静切力和滤失性能均会发生变化。温度升高通常会降低连续相黏度,削弱颗粒悬浮能力;压力升高和高密度加重材料又可能增加体系结构复杂性。高温老化还会导致聚合物降解、处理剂失效和颗粒表面性质改变[37-39]。

对于堵漏浆而言,流变设计需要在泵送性与驻留性之间取得平衡。若黏度过低,颗粒容易沉降和分层,进入裂缝后难以形成均匀封堵层;若黏度过高,浆体难以泵送,也可能无法进入深部漏失通道。

理想堵漏浆应在高剪切泵送过程中表现出较低黏度，在进入漏失通道、剪切速率降低后快速恢复结构强度，从而提高颗粒驻留和封堵层稳定性。

### 3.2 非牛顿流体中颗粒沉降与悬浮

颗粒沉降是影响堵漏浆有效性的关键问题。堵漏材料粒径和密度通常差异较大，若基浆悬浮能力不足，大颗粒会在井筒或管柱中沉降，导致进入漏失通道的材料级配与设计级配不一致。非牛顿流体中的颗粒沉降受屈服应力、剪切变稀、颗粒形状、壁面效应和颗粒间相互作用影响。屈服应力可在一定程度上支撑颗粒重力，降低沉降速度；剪切变稀使高剪切区域黏度降低，有利于泵送，而低剪切区域黏度较高，有利于颗粒悬浮[35,40]。

纤维对颗粒沉降具有显著影响。纤维加入后可形成空间网络，提高体系黏度和屈服应力，同时增加颗粒运动阻力，使终端沉降速度降低。在堵漏浆中，纤维既是流变调控剂，也是封堵结构增强材料。纤维长度、浓度和柔性需要与颗粒级配匹配，过少难以发挥作用，过多则会显著增加泵送阻力并诱发入口聚集[34,36]。

颗粒携带能力同样存在条件最优区间。夏雪芹[27]在其裂缝模型中比较载液黏度与密度后，50 mPa·s和1.4 g/cm$^3$组合的封堵效果较优；黏度继续升高虽可减缓沉降，却会增大入口阻力并改变颗粒到达桥接位置的时间。该结果说明，流变参数应以“目标位置处的颗粒通量和级配保持”为评价对象，而不能仅追求高黏度或高切力。

### 3.3 触变性与结构恢复

触变性是堵漏浆实现“可泵送、可驻留”的重要性能。具有触变性的体系在强剪切作用下结构被破坏，黏度降低，便于泵送和挤入；当剪切减弱或停止后，体系结构逐渐恢复，黏度和弹性增强，有利于材料在裂缝中停留并抵抗流体冲刷。对于大开度裂缝和缝洞型漏失通道，触变恢复可弥补单纯颗粒桥接不足的问题，使堵漏浆在缺乏明显几何收缩的位置也能通过结构重建实现滞留[23,41]。

触变凝胶、高黏附凝胶和剪切响应型凝胶是近年来的重要方向。此类材料在泵送阶段应具有较好流动性，进入漏失通道后可快速恢复凝胶结构，并通过岩壁黏附、颗粒包裹和网络重构提高封堵层完整性。部分抗温抗盐触变凝胶在高温和高盐环境下仍能保持较高结构恢复率和岩壁黏附强度，并可与桥接材料复配封堵毫米级裂缝。这类研究表明，堵漏浆设计不应只关注固相颗粒级配，还应将流变恢复和界面黏附纳入评价体系[23,42]。

触变或温敏响应时间必须与施工时间窗相匹配。解宏涛[29]的典型形状记忆体系在升温后2～5 min开始恢复、7～13 min恢复率超过95%；若激活过早，材料可能在井筒或裂缝入口聚集，若激活过迟，则已随漏失流体进入远端。因而，动态控制指标应至少包括高剪切泵送黏度、停剪后的结构恢复曲线、目标温度下的响应起始时间和95%恢复时间，而不仅是单点表观黏度。

### 3.4 动态滤失与封堵层致密化

堵漏过程中，滤失并非完全不利。适度滤失可促使颗粒在裂缝入口或桥接结构后方浓缩，形成滤饼或封堵层；但过快滤失会导致浆体失水、颗粒堆积失控或封堵层过早形成于入口。非牛顿动态滤失研究显示，屈服应力和剪切变稀会改变颗粒沉积形态、滤饼厚度和流量衰减规律。较高屈服应力可抑制颗粒沉降，使颗粒层分布更加均匀；剪切变稀可在低剪切区提高局部黏度，降低流速和颗粒迁移[39,43]。

因此，堵漏浆流变设计应考虑动态过程，而不能仅依赖静态黏度或常规六速读数。更合理的评价指标应包括高温高压条件下的流变曲线、屈服应力、触变环面积、结构恢复率、静置后颗粒沉降率、动态滤失量和封堵层承压能力。

## 4 高温高压下堵漏材料性能退化与抗温材料发展

### 4.1 常规堵漏材料的高温损伤

深层-超深层漏失治理中，高温是影响材料性能的关键因素。植物类颗粒、核桃壳、纤维、橡胶和部分聚合物材料在常温下具有良好变形能力和封堵效果，但在高温长期老化后可能发生热降解、碳化、脆化、强度降低和摩擦性能下降。材料单体性能下降会进一步传递到封堵层，使其抗冲刷能力和承压能力降低[9,14]。

高温损伤不仅表现为材料质量损失或外观变化，更重要的是颗粒强度、压缩变形能力、摩擦特性、表面粗糙度和与基浆相容性的变化。例如，若骨架颗粒高温后强度显著下降，封堵层在压差作用下可能发生颗粒破碎和结构塌陷；若纤维高温后韧性降低，则难以维持缠结增强作用；若聚合物处理

剂降解,堵漏浆悬浮能力和触变恢复能力也会减弱。

### 4.2　无机颗粒和刚性材料

无机颗粒如碳酸钙、石墨、矿物颗粒和部分陶瓷类材料具有较好的热稳定性,是高温堵漏体系中的重要组成。刚性颗粒可作为骨架材料,在裂缝中形成初始支撑结构。不同粒径碳酸钙常用于填充和调节粒径级配,石墨类材料可提供一定弹性和润滑性,矿物类颗粒可提高高温下颗粒尺寸和强度稳定性。

但无机刚性颗粒也存在局限。其变形能力有限,难以适应复杂粗糙裂缝和变开度通道;单独使用时封堵层韧性不足,压力波动下易发生颗粒重排或冲刷;在大开度裂缝中,仅依靠刚性颗粒往往需要较大粒径和较高浓度,可能带来泵送困难。因此,高温堵漏体系通常需要刚性颗粒与纤维、弹性颗粒、凝胶或固结材料协同。

### 4.3　固结型与可固化材料

固结型堵漏材料适用于大开度裂缝、孔洞型漏失和承压要求较高的井段。水泥类、树脂类、可固化凝胶、膨润土-水泥-油体系等可在进入漏失通道后发生水化、交联、固化或硬化,形成强度较高的封堵体。对于传统颗粒材料难以桥接的大开度裂缝,固结型材料可通过整体填充和强度增长实现封堵[44-45]。

膨润土-水泥-油体系体现了“流动-水化-膨胀-硬化”的设计思路。其通过分步注入或与水接触后快速水化,形成具有一定强度的封堵体。水泥提供强度,膨润土提供膨胀和自修复潜力,油相调节初始流动和水化过程。这类材料适合解释大开度裂缝中传统颗粒桥接不足时的替代路径。

树脂和可固化聚合物材料具有较高固结强度和较好温度适应性,可用于高温裂缝封堵。但其应用需要控制固化时间、泵送窗口和井下反应位置。若固化过快,可能造成井筒风险;若固化过慢,则材料可能被漏失流体带入深部而无法在目标位置形成封堵。因此,固结型材料的关键不是单纯提高强度,而是实现可控驻留和可控固化[46-47]。

### 4.4　凝胶、膨胀材料与智能响应材料

凝胶、膨胀和智能响应材料的基体化学组成决定其耐温、成胶与结构恢复能力。延迟交联凝胶通常以丙烯酰胺、丙烯酸或2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸等亲水单体构筑聚合物主链,并以酚醛、聚乙烯亚胺或金属离子形成延迟交联网络;吸水膨胀颗粒多以交联聚丙烯酸盐、聚丙烯酰胺或复合吸水树脂为基体;树脂和形状记忆材料则可采用环氧树脂-多元胺等热固化体系[29,48-51]。不同单体和交联方式分别控制高温水解、盐敏感性、凝胶时间与最终强度。

从驻留方式看,凝胶依靠剪切后的网络恢复和岩壁黏附滞留,膨胀颗粒依靠吸水或升温后的体积增长填充孔隙,形状记忆聚合物依靠地层温度触发的恢复变形实现自适应跨缝。解宏涛[29]采用环氧树脂E51与多元胺制备温敏形状记忆材料,测得高温模量42.73 MPa、热失重起始温度约382.7 ℃、最大恢复率97.8%,并封堵3 mm×2 mm至5 mm×4 mm裂缝,承压约8～10 MPa。需要强调,热分解温度仅反映短时热稳定性,不能等同于长期井下服役温度;有效评价还应包括目标温度下模量保持、恢复时间、循环热老化及与载液的相容性。

超分子和自修复体系多利用氢键、疏水缔合、主客体作用或金属配位构筑可逆网络,可在剪切破坏后重建结构,并改善高盐条件下的黏附和韧性[42]。这类材料为复杂孔洞内无明显几何支点时的驻留提供了新路径,但实验室成胶温度、老化时间和小尺度承压结果仍不能替代长时间高温高压动态评价。

## 5　基于数值模拟证据的堵漏材料协同设计

### 5.1　从单一粒径准则到多级级配

几何匹配是堵漏材料设计的起点,但文献阈值具有模型依赖性。规则裂缝研究常以$D_{50}/W$不低于0.3、$D_{90}/W$接近或超过1.0作为初始桥接依据,Alsaba等[12]提出的更新准则取$D_{50}/W\geqslant0.3$和$D_{90}/W\geqslant1.2$;粗糙缝面实验中,球状材料$D_{90}/W$为0.95～1.00、片状材料1.10～1.30时滞留概率较高[26];夏雪芹[27]在特定模型中得到粒径为0.50～0.67 $W$时封堵较优;解宏涛[29]针对2～5 mm裂缝采用6～50目四粒级按4:5:5:2复配、颗粒体积分数约16%。这些数值应作为初始搜索点,而非跨井况通用标准。

这些结果说明,同一裂缝开度下的匹配条件随材料形状和接触特性变化:球形颗粒主要受粒径比和摩擦控制,片状或条状颗粒还受姿态翻转与搭接影响,形状记忆材料则增加了温度触发变形。因

而，本综述不再人为给出“大开度”的统一数值界限，而是保留各研究的原始开度、材料和边界条件，并在相近工况之间进行比较。

### 5.2 骨架-填充-增强结构

基于驻留机制的材料结构可概括为“骨架-填充-增强”。骨架相宜选用碳酸钙、矿物、陶瓷、核桃壳等刚性或半刚性粗颗粒，负责跨缝与传递接触力；填充相采用中细颗粒和可压缩颗粒降低骨架孔隙；微细相采用细粉控制渗透率和滤失；增强相由纤维、片状材料、弹性颗粒、凝胶或固结相提供缠结、黏附、韧性和抗冲刷能力。

现有研究已从经验配比推进到可量化的骨架-填充设计。许成元等[25]以绝对架桥加量确定骨架颗粒下限，再用补差紧密堆积补充各级填充颗粒。与经验配方相比，3组对比体系的承压能力分别提高101%、100%和229%，累计漏失量分别降低32%、38%和31%，材料总用量分别降低61%、76%和28%（图4）。在井深6846.9 m的现场试验中，优化体系一次堵漏成功，泵压升至23 MPa，等效漏失量为24.7 mL。该方法说明“更多材料”并不等于“更稳定封堵”，关键是以足够架桥概率形成骨架，再用连续粒级降低孔隙率；其百分比仍受试验裂缝和材料体系约束。

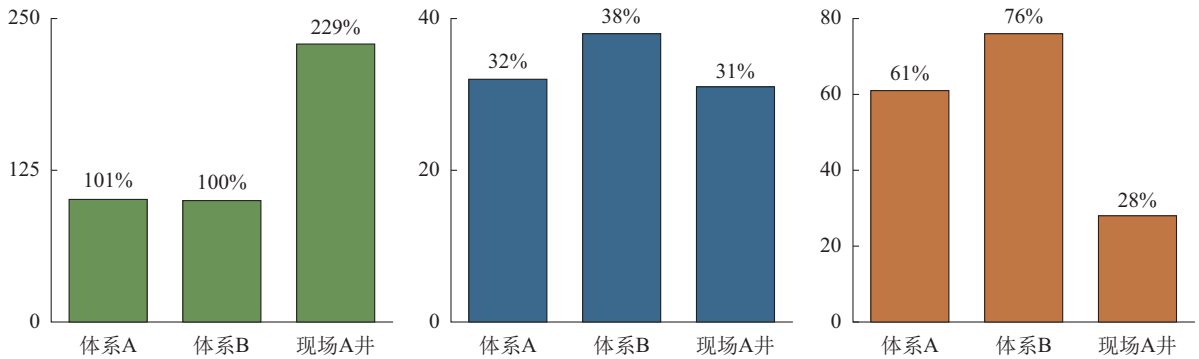



**图4 绝对架桥加量与补差紧密堆积设计的优化效果[25]**

### 5.3 流变调控与几何设计耦合

几何级配决定初始桥接的可能性，载液流变性则影响颗粒携带、进入和驻留。夏雪芹[27]在其刚性颗粒和三维裂缝模型中得到50 mPa·s的较优黏度，但该值同时受粒径0.50～0.67 $W$、浓度8%和颗粒-壁面摩擦系数0.7～0.9约束；解宏涛[29]采用幂律流体和约16%颗粒体积分数，所得四粒级比例对应2～5 mm裂缝。两项研究的差异表明，黏度或浓度不能脱离材料与通道条件单独比较。

因此，综述流变参数时应同时报告基浆本构模型、温度、剪切速率、颗粒体积分数、通道开度和入口速度。泵送阶段关注高剪切黏度与压耗，进入阶段关注携带能力和入口压差，驻留阶段关注低剪切屈服应力、触变恢复和沉降；但现有堵漏模拟尚未形成可直接推广的阶段阈值，相关指标仍需结合高温流变实验和动态封堵结果标定[23,27,29,38,41]。

### 5.4 高温适应性约束

高温适应性应并入材料选择，而不再单列评价章节。文献中天然植物颗粒和纤维多在120～180 ℃内评价，橡胶及普通树脂多集中于150～200 ℃，抗温凝胶、改性树脂和复合聚合物常以180～220 ℃为目标，无机矿物、陶瓷和水泥类骨架则可在200 ℃以上评价[9,14,44-51]。这些区间仅反映常见试验范围，不能替代特定盐度、压差和老化时间下的功能保持测试。不同材料的组成和主要约束见表3。

模拟所用材料参数也应来自目标温度下的实验。骨架颗粒需输入老化后的强度和摩擦参数，凝胶或树脂需输入成胶、黏附和黏弹特性，膨胀或形状记忆材料还需描述体积或形变随温度和时间的演化。处理剂之间的竞争吸附、盐析、聚合物水解或交联失控会改变浆体级配和流变，因此不能将常温接触参数直接用于高温驻留模拟。

### 5.5 协同设计图版构想

面向深层-超深层缝洞型漏失通道，协同设计不宜先按“微裂缝—大裂缝—孔洞”设定固定尺度

**表3　堵漏材料常见高温评价区间及主要约束**

| 材料类别 | 主要组成 | 常见评价区间 | 高温优势 | 主要约束 |
|---|---|---|---|---|
| 植物颗粒/天然纤维 | 核桃壳、木质纤维、果壳 | 120～180 ℃ | 摩擦与变形性较好 | 长期高温易碳化、脆化和强度衰减[9] |
| 无机刚性颗粒 | 碳酸钙、石墨、矿物、陶瓷 | 200 ℃及以上 | 粒径和骨架强度保持较好 | 韧性与壁面适应性不足[9,14] |
| 橡胶/普通树脂 | 橡胶颗粒、热塑或热固树脂 | 150～200 ℃ | 可变形并提高封堵层韧性 | 软化、老化和基浆相容性受配方影响[46] |
| 抗温凝胶/改性树脂 | AM/AA/AMPS类聚合物、延迟交联剂 | 180～220 ℃ | 可控成胶、黏附和整体封堵 | 泵送窗口和长期稳定性需验证[45,48-49] |
| 水泥/无机固结体系 | 水泥、膨润土、无机胶凝相 | 200 ℃以上 | 固化强度高,适合扩容通道 | 稠化时间、污染与不可逆性需控制[44-45] |
| 温敏形状记忆材料 | 环氧树脂-多元胺等 | 按激活温度设计 | 可热触发恢复并自适应跨缝 | 热分解温度不等于长期服役温度[29] |

边界,而应以开度分布、局部收缩比、粗糙度、扩容比、分支数和远端连通性构成通道参数空间。几何参数用于确定骨架粒径搜索区间和桥接位置,载液本构与入口条件用于检验颗粒能否到达目标位置,高温物性用于判断到达后能否保持摩擦、强度、膨胀或结构恢复功能。

协同设计图版应输出“可输送、可进入、可驻留、可致密、可持续承压”五项判据,而不是单一最优配方。对每组候选材料,先用CFD-DEM筛除颗粒全部滑出、入口提前封门或无法形成连续力链的组合,再用多级堆积降低孔隙率,并以目标温度下的流变、老化和动态承压实验校正。若现场泵压、注入量或复漏特征与预测不符,应反演修正通道连通边界和接触参数,形成图5所示闭环。

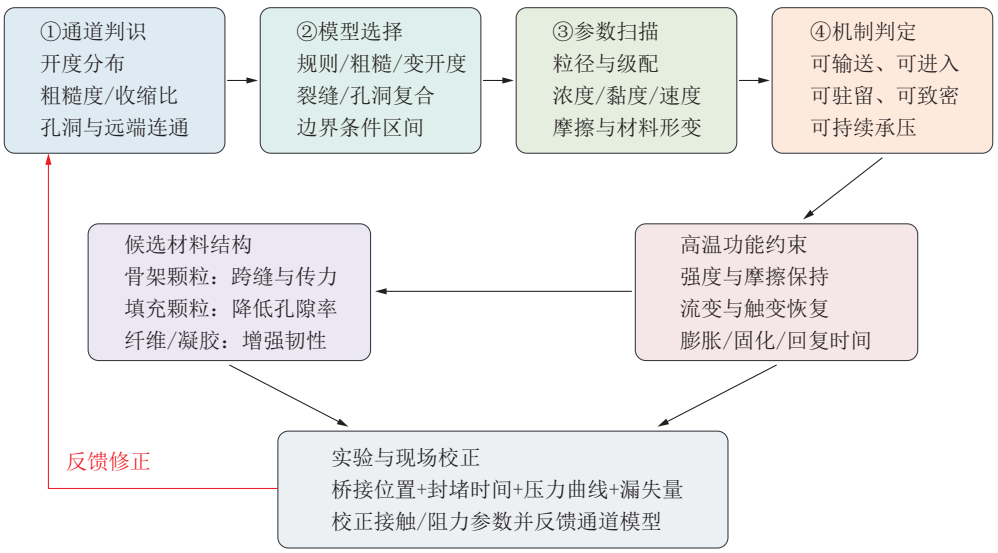



**图5　基于驻留机制的堵漏材料几何-流变-高温协同设计流程**

### 5.6　面向工程应用的设计流程

从工程应用角度,模拟证据向材料设计转化可分为四步。第一步是通道判识:综合漏失速率、泵压响应、成像测井、地震属性和邻井资料,提取开度分布、粗糙度、局部收缩、孔洞扩容和远端连通边界。若这些输入无法由现场资料约束,应采用参数区间进行敏感性分析,而不预设统一的“大开度”界限。

第二步是选择与材料相匹配的模拟方法。刚性颗粒可重点改变粒径分布、浓度和摩擦参数;片状、条状或纤维材料需表征姿态、长径比和搭接作用;凝胶、膨胀或形状记忆材料还需耦合黏弹、体积

变化或温度触发过程。粒径和级配的初值可参考Alsaba等[12]、张敬逸[26]、夏雪芹[27]和解宏涛[29]，但必须保留原研究的材料及通道条件。

第三步是比较参数响应而非直接套用最优值。模拟应至少输出颗粒运移距离、桥接位置、接触力或力链、局部固相浓度、压降和漏失衰减，并分别分析粒径、浓度、入口速度、载液黏度及壁面摩擦的作用。只有当多个参数组合同时满足可输送、可进入和可驻留要求时，才可作为候选配方。

第四步是实验与现场校正。候选参数须在目标温度、压力、盐度和老化时间下开展流变、沉降及动态裂缝封堵试验，并用桥接位置、压力曲线和破坏形态校正接触及阻力模型。现场施工后的注入量、泵压和复漏情况再用于反演通道及封堵位置，形成“模型输入-参数响应-实验验证-现场反馈”的闭环。

这一流程强调，堵漏材料设计不应从材料库直接跳到配方，而应从漏失通道特征出发，逐步确定几何级配、流变参数和高温材料约束。其本质是把现场经验转化为可检验、可修正的设计逻辑。

## 6 实验评价与数值模拟方法

### 6.1 室内物理模拟评价

室内物理模拟是验证堵漏材料设计方法的重要手段。传统堵漏评价多采用砂床、孔板、裂缝板或高温高压滤失仪，能够快速比较不同材料体系的滤失量和承压能力。但对于深层-超深层缝洞型漏失而言，单一砂床或孔板难以反映裂缝开度、壁面粗糙度、孔洞扩容和通道连通性对堵漏浆驻留的影响。因此，物理模拟装置需要从“能否堵住”向“如何形成封堵”转变[18,24]。

裂缝模型应根据研究目的分级设计。对于粒径匹配和初始架桥研究，可采用透明平板裂缝或楔形裂缝，便于观察颗粒运动和桥接位置；对于粗糙壁面对颗粒滞留的影响，可采用人工粗糙裂缝或三维打印裂缝模型；对于缝洞型漏失，可构建裂缝-孔洞串联、裂缝-孔洞并联和多分支连通模型，模拟颗粒在扩容空间中的沉降、分散和再富集行为。透明可视化装置能够记录颗粒前缘、桥接位置、封堵层厚度和破坏方式，是揭示驻留机制的有效工具；高温高压动态封堵装置则更适合评价深层井下条件下的承压稳定性[13,17]。

评价指标也应相应扩展。除累计漏失量、突破压力和最终承压能力外，还应记录初始桥接时间、封堵层形成位置、封堵层增长速率、压力曲线变化、返排后封堵层完整性和重复承压能力。对于大开度裂缝，还应区分入口封门、裂缝内有效驻留和深部无效流失三类现象。只有将可视化过程与承压结果结合，才能判断材料体系是否真正符合驻留机制要求。

### 6.2 高温物性与流变触变评价

深层-超深层堵漏浆评价必须引入温度维度。常规室温下的粒径、强度和流变结果不能直接代表井下状态。高温物性评价应首先对单一材料开展老化试验，测试老化前后质量变化、粒径变化、抗压强度、弹性恢复、摩擦系数、热失重和微观结构。对于植物类、聚合物类和弹性类材料，应重点关注热降解和脆化；对于无机颗粒，应重点关注粒径保持、表面变化和与基浆相容性；对于凝胶和树脂，应关注凝胶时间、固化时间、强度增长和长期稳定性[9,45]。

堵漏浆流变评价应在目标温度和压力下进行。表观黏度、塑性黏度和动切力可反映基本流动性能，但不足以描述触变驻留过程。更有价值的指标包括屈服应力、低剪切黏度、触变环面积、剪切破坏后的结构恢复率、静置后颗粒沉降率和高温老化后的流变保持率。对于触变凝胶和自修复材料，还应测试结构恢复时间、黏附强度、抗剪切破坏能力和重复破坏-恢复性能[38,41]。

动态滤失评价应与流变评价结合。堵漏浆进入裂缝后，滤失会改变固相浓度和封堵层结构。高温高压动态滤失实验可以揭示滤失速率、滤饼厚度、颗粒富集和封堵层致密化之间的关系。对于流变调控型堵漏浆，理想状态不是完全无滤失，而是在可控滤失过程中形成稳定致密的封堵层。

### 6.3 CFD-DEM参数标定、验证与不确定性分析

CFD-DEM的价值在于补充实验难以观测的颗粒速度、接触力和力链结构，但模型可信度首先取决于分层标定。载液应由目标温压下的流变曲线确定本构参数；颗粒密度、粒径和形状应由实测分布输入；恢复系数、摩擦和黏附参数应分别由碰撞、滑移或堆积试验约束。若在最终承压曲线上同时反演全部参数，即使曲线吻合，也无法保证颗粒运动和封堵位置正确。

验证应至少包含过程量与结果量。过程量包括颗粒前缘速度、沉降距离、桥接位置、封堵时间和封堵层增长;结果量包括压降、累计漏失量、最终承压和破坏模式。夏雪芹[27]对5类因素的实验—模拟趋势进行了比较,许成元等[22]以光弹力链校核接触网络,二者分别代表宏观响应验证和细观结构验证。对于裂缝-孔洞复合模型,还应通过可视化或CT检查颗粒是形成跨通道结构,还是仅沉积在孔洞底部。

参数反演应给出不确定性区间。可先对粒径、浓度、黏度、入口速度、摩擦和通道开度开展全局敏感性分析,识别决定桥接时间和漏失衰减的主控变量,再用独立实验数据校正。输出除最优组合外,还应报告网格与时间步收敛、质量守恒误差、重复计算离散性及参数变化导致的置信区间,使模拟结果能够用于协同设计图版而非仅作定性示意。

现有计算还存在明显尺度限制。解析式模型适合少量颗粒和局部粗糙捕获,非解析式模型适合多颗粒参数扫描,但难以直接描述柔性纤维缠结、颗粒破碎、凝胶固化和温度触发形变。对上述材料,应采用等效黏附、键合、柔性链或体积演化模型,并通过独立试验标定;在缺乏标定数据时,应明确将结果限定为机制假设,避免把模型输出直接转化为工程阈值。

### 6.4　现场反馈与设计修正

室内实验和数值模拟最终需要通过现场反馈修正。深层-超深层井漏失具有强不确定性,现场漏失通道可能与室内等效模型存在差异。堵漏施工中的泵压变化、注入量、返出情况、承压试验结果、复漏情况和后续钻进稳定性,都是判断设计合理性的关键数据。若堵漏浆用量大但承压提高不明显,可能说明材料未能在目标位置驻留;若泵压快速升高但复漏明显,可能说明入口封门而非有效深部封堵;若初次承压良好但压力波动后失效,则可能说明封堵层韧性和抗冲刷能力不足[52-53]。

因此,协同设计方法应是动态修正过程。第一次设计依据漏失通道识别和材料评价确定配方;施工后根据现场压力响应和漏失变化反推通道特征和封堵位置;再通过调整粒径级配、纤维比例、触变性或固结材料含量进行修正。这种“识别-设计-验证-反馈”的闭环,是由经验堵漏向机制导向堵漏转变的重要标志[54-55]。

## 7　研究不足与发展趋势

目前深层-超深层缝洞型漏失堵漏研究虽已取得较多进展,但仍存在若干不足。

(1)大缝洞漏失通道概念和尺度分类尚不统一。不同研究中“大裂缝”“大孔洞”“缝洞型”“断控缝洞”等概念使用不完全一致,导致实验模型、材料粒径和评价指标之间缺乏统一标准。未来可从堵漏角度出发,按通道开度、孔洞扩容、连通性和漏失强度建立工程化分类,而不是仅依据储层地质分类[10-11]。

(2)漏失通道识别与堵漏模型之间衔接不足。地震、测井和电成像研究能够识别缝洞体位置和形态,但这些成果尚未充分转化为堵漏实验和数值模拟中的几何参数。未来应加强井震资料、漏失动态和封堵实验之间的对应关系,建立具有代表性的等效通道模型[30-31]。

(3)颗粒架桥准则对复杂缝洞通道的适用性有限。现有$D_{50}$、$D_{90}$和$W/D_{50}$等准则主要针对规则裂缝,在变开度、粗糙壁面、大孔洞和强连通条件下需要修正。文献给出的粒径比、浓度和黏度最优值均对应特定模型,尚不能直接作为厘米级裂缝和裂缝-孔洞复合漏失的统一阈值;此时必须考虑纤维、弹性颗粒、凝胶和固结材料共同作用[12,15,26-29]。

(4)堵漏浆流变触变与颗粒驻留的耦合研究不足。现有研究常将流变性作为钻井液性能指标,而较少将其与颗粒沉降、架桥位置、封堵层形成和动态滤失直接关联。未来应在高温高压条件下开展流变-颗粒-封堵一体化评价,明确临界屈服应力、触变恢复率和颗粒沉降稳定性之间的关系[23,36]。

(5)高温高压下材料性能退化机制仍需深入。许多材料仅报告耐温温度或封堵承压结果,但缺少高温老化后的微观结构、力学性能、摩擦性能和流变保持分析。未来应建立材料高温损伤与封堵层承压能力之间的定量关系[9,14]。

(6)CFD-DEM模型仍需向热-流-固-颗粒多场耦合发展。现有研究已能计算颗粒输运、碰撞和架桥,但温度对载液本构、颗粒弹性模量、摩擦、膨胀和凝胶固化速率的影响通常未被同步更新;同时,简单平板或楔形裂缝不能代表裂缝—孔洞扩容、分支和远端连通。后续应利用CT、真实缝面扫描和井震约束建立参数化复合通道,并至少采用2~3个粒级检验分选、架桥和填充过程[13,27,33]。

(7)数值研究的可复现性仍需提高。建议统一报告几何尺寸、开度分布、网格/颗粒尺度比、时间步、耦合交换频率、入口与出口边界、接触和曳力模型、粒级数量、颗粒注入方式、收敛标准及计算成本;同时公开桥接判据,例如连续接触链、流量衰减比例或稳定压差持续时间。只有判据和原始工况完整,跨研究的阈值比较才具有意义。

总体来看,未来研究应从“给出一个最优配方”转向“给出模型条件、响应区间和验证证据”。针对本研究方向,可优先开展三项工作:提取开度分布、粗糙度、局部收缩和连通性并构建裂缝-孔洞等效模型;建立含2~3个粒级、非牛顿载液和温度依赖参数的CFD-DEM模型,量化颗粒从输运到驻留及封堵层破坏;以绝对架桥加量、紧密堆积和动态流变恢复为设计变量,通过高温动态实验和现场反馈形成可修正的协同设计图版。

## 8 结论

(1)深层-超深层缝洞型漏失通道的核心困难不是单纯“尺度大”,而是开度突变、粗糙捕获、局部扩容和远端连通共同造成入口封门、深部耗散与封堵层失稳。等效模型应以开度分布、局部收缩比、粗糙度、扩容比和连通边界为参数,并根据研究目标选择平板、楔形、粗糙缝面或裂缝-孔洞模型。

(2)CFD-DEM已能量化由输运向驻留的转变,但阈值具有明显模型依赖性。在$d/W=0.4$、摩擦系数0.5和入口0.1 m/s的粗糙裂缝中,颗粒体积分数由8%增至10%和20%后,封堵由3 s内未发生转变为2.6 s和2.2 s形成;另一模型得到粒径0.50~0.67 $W$、浓度8%、黏度50 mPa·s和摩擦系数0.7~0.9的较优组合。上述数值只能作为同类几何和边界下的初始搜索区间。

(3)模型可信度需要由多尺度证据约束。仅比较最终承压不足以验证驻留机理,应同时校核颗粒前缘、桥接位置、封堵时间、压力/漏失曲线和封堵层结构,并报告网格、时间步、边界条件、参数来源和计算收敛。现有研究对温度依赖流变、柔性纤维、颗粒破碎、响应材料形变和真实缝洞拓扑的耦合仍不足。

(4)材料设计可由“骨架-填充-增强”功能分工转化为可计算流程。绝对架桥加量与补差紧密堆积在3组对比中使承压提高100%~229%、漏失降低31%~38%、用量降低28%~76%,说明架桥概率与孔隙填充应联合优化。后续应把几何级配、载液流变、目标温度下的功能保持和实验—现场反馈纳入同一闭环,而不设脱离工况的统一粒径或黏度阈值。

## 参考文献:


[1] 孙金声,杨景斌,吕开河,等.深层超深层钻井液技术现状与展望[J].深地能源科技,2025,1(1):27-35.

[2] 康毅力,闫丰明,游利军,等.塔河油田缝洞型储层漏失特征及控制技术实践[J].钻井液与完井液,2010,27(1):41-43,46,90-91.

[3] 李伟,白英睿,李雨桐,等.钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策[J].科学技术与工程,2021,21(12):4733-4743.

[4] 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].青岛:中国石油大学(华东),2020.

[5] 倪新锋,沈安江,乔占峰,等.塔里木盆地奥陶系缝洞型碳酸盐岩岩溶储层成因及勘探启示[J].岩性油气藏,2023,35(2):144-158.

[6] 卜旭强,王来源,朱莲花,等.塔里木盆地顺北油气田奥陶系断控缝洞型储层特征及成藏模式[J].岩性油气藏,2023,35(03):152-160.

[7] 修乃岭,耿忠娟,熊伟,等.缝洞型碳酸盐岩油藏开发特征和水动力学模拟[J].石油钻采工艺,2008(2):72-74.

[8] 罗平亚,王路一,白杨.深井超深井钻井液技术应用现状及发展展望[J].钻采工艺,2024,47(2):10-18.

[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].石油学报,2019,40(2):215-223.

[10] 闫丰明,康毅力,孙凯,等.缝洞型碳酸盐岩储层漏失模型及控制对策[J].钻井液与完井液,2012,29(3):78-80,97-98.

[11] 孙金声,沈子尧,白英睿,等.深层缝洞型地层钻井液恶性漏失堵漏技术研究现状及展望[J].中国石油大学学报(自然科学版),2026,50(1):99-111.

[12] Alsaba M, Al Dushaishi M F, Nygaard R, et al. Updated criterion to select particle size distribution of lost circulation materials for an effective fracture sealing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017,149:641-648.

[13] 李洁,冯奇,张高峰,等.介观尺度下裂缝内堵漏颗粒封堵层形成与破坏机理CFD-DEM模拟[J].钻井液与完井液,2022,39(6):721-729.

[14] Vivas C, Salehi S. Screening of lost circulation materials for geothermal applications: Experimental study at high temperature [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2022, 144(3): 033008.

[15] 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.

[16] 冯永存,马成云,楚明明,等.刚性颗粒封堵裂缝地层漏失机制数值模拟[J].天然气工业,2021,41(7):93-100.

[17] 张敬逸.岩体裂隙钻井堵漏浆流动过程中颗粒架桥封堵行为研究[D].成都:西南石油大学,2022.

[18] 张帅.多尺度裂缝性地层漏失机理及堵漏配方研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.

[19] 黄尹剑.裂缝性漏失桥接堵漏颗粒动力学行为细观模拟研究

[D].成都:西南石油大学,2023.
[20] Wang G, Cao C, Pu X, et al. Experimental investigation on plugging behavior of granular lost circulation materials in fractured thief zone [J]. Particulate Science and Technology, 2016, 34(4): 392-396.
[21] 闫霄鹏,邓嵩,彭浩平,等.裂缝地层多粒径刚性颗粒封堵离散元模拟[J].常州大学学报(自然科学版),2024,36(6):12-18.
[22] 许成元,张敬逸,康毅力,等.裂缝封堵层结构形成与演化机制[J].石油勘探与开发,2021,48(1):202-210.
[23] 王晨烨.剪切响应型凝胶体系及裂缝堵漏机理研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2021.
[24] 余海峰.裂缝性储层堵漏实验模拟及堵漏浆配方优化[D].成都:西南石油大学,2014.
[25] 许成元,阳洋,蒲时,等.基于高效架桥和致密填充的深层裂缝性储层堵漏配方设计方法研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):534-544.
[26] 张敬逸.粗糙缝面裂缝内固相颗粒运移与滞留行为研究[D].成都:西南石油大学,2018.
[27] 夏雪芹.裂缝性地层漏失堵漏颗粒运移封堵规律研究[D].荆州:长江大学,2024.
[28] 张爱.颗粒在裂缝中的堵漏行为数值模拟研究[D].成都:西南石油大学,2023.
[29] 解宏涛.形状记忆聚合物的制备及其堵漏效果实验和模拟研究[D].北京:中国地质大学(北京),2023.
[30] 张滨鑫,张冠杰,刘敬寿,等.碳酸盐岩缝洞型储层识别与雕刻方法研究进展[J].地球物理学进展,2024,39(2):580-593.
[31] 朱佐民.基于M区块电成像测井的碳酸盐岩缝洞定量识别与评价[D].荆州:长江大学,2025.
[32] 蔺学旻,肖红琳.缝洞型储层声波远探测测井响应模拟及应用——以塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):312-327.
[33] 胡金帅,张光伟,李峻岭,等.基于CFD-DEM耦合模型的岩屑运移数值模拟分析[J].断块油气田,2022,29(4):561-566.
[34] 李司帅.毫米级裂缝封堵颗粒与纤维配方优化研究[D].北京:中国石油大学(北京),2024.
[35] 王贵,谭凯,曹成.形状差异的岩屑颗粒沉降规律及曳力系数模型[J].钻井液与完井液,2022,39(6):707-713.
[36] 刘衍前.响应面法优化堵漏材料在井筒内的悬浮能力[J].化工管理,2022(10):75-79.
[37] 徐佳旭,徐志鹏,陈小强,等.地层温度对钻井泥浆流变性及循环压耗影响研究[J/OL].工程科学与技术,1-13[2026-10-08]. https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250319.1439.001.
[38] 蒋官澄,吴学涛,鄢捷年,等.深井水基钻井液高温高压流变特性的研究[J].钻井液与完井液,1994,(5):21-26,74-77.
[39] 赵怀珍,薛玉志,李公让,等.抗高温水基钻井液超高温高压流变性研究[J].石油钻探技术,2009,37(1):5-9.
[40] 耿明亮,王艳萍,邓晓烽,等.单颗粒和双颗粒在聚丙烯酰胺溶液中沉降过程的数值模拟[J].浙江理工大学学报(自然科学),2024,51(5):674-680.
[41] 王志祥,韩庆,欧涛,等.改性聚脲作为钻井液触变性改良剂的实验研究[J].四川地质学报,2022,42(S1):18-22,30.
[42] 贺垠博.分子自组装在钻井液技术中的应用研究[D].北京:中国石油大学(北京),2019.
[43] 卜海,孙金声,王成彪,等.超高温钻井液的高温流变性研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4):122-126.
[44] 杜江波.高温条件下可固化钻井堵漏材料的研究[D].天津:天津大学,2020.
[45] 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.
[46] 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.
[47] 杨岳鹏,张佳楠,张丽辉,等.高温深层裂缝性地层钻井用复合堵漏材料[J].油田化学,2025,42(1):14-21.
[48] 章江.抗高温延迟交联型聚合物凝胶堵漏剂研制及应用[D].成都:成都理工大学,2021.
[49] 罗明望.抗高温可控凝胶堵漏技术研究[D].荆州:长江大学,2021.
[50] 张海城,王鹏,高建章,等.抗高温可膨胀水基堵漏剂的制备与性能评价[J].钻采工艺,2022,45(6):123-128.
[51] 孙欢,朱明明,李录科,等.高温型温控体膨颗粒堵漏工作液研制与应用[J].石油化工应用,2025,44(12):37-41.
[52] 孙金声,王建华.深地塔科1井钻井液技术[J].钻井液与完井液,2025,42(2):155-166.
[53] 丁剑.玛湖井区钻井液防漏堵漏技术研究与应用[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
[54] 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,2019,47(6):15-20.
[55] 罗鸣,韩成,陈浩东,等.南海西部高温高压井堵漏技术[J].石油钻采工艺,2016,38(6):801-804.

(编辑　王文)