

高性能暂堵剂在裂缝中的运移与稳定封堵机制

杨雅淳, 吴梦霞, 王 强, 吴宇蕊

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年11月19日

摘 要

随着非常规油气和裂缝性地层的高效开发, 对压裂改造的均匀性与裂缝控流能力提出了更高要求。传统暂堵材料在高温高压和复杂裂缝条件下容易出现封堵不牢、返排困难等问题, 难以满足现代压裂作业的技术需求。本文系统综述了高性能暂堵剂的研究进展, 从材料类型、运移规律、封堵层稳定性及性能优化等方面进行了分析与归纳。研究表明, 高性能暂堵剂的运移过程可分为进入、筛分、桥接、堆积和压实等阶段, 受粒径级配、携液黏度、流速及裂缝几何结构等多因素耦合影响; 封堵层通常呈现出由骨架层、填充层到界面压实层的分层结构, 其承压性能与稳定性取决于颗粒间的力学传递与流体扰动作用。可降解高分子、弹性高分子及纤维复合体系在封堵强度、稳定性和可控降解性方面表现优异, 智能响应型暂堵剂则展现出良好的环境适应能力。未来研究应加强多尺度机理模型与实验验证的结合, 推动暂堵技术向智能化、可控化与可持续化方向发展, 为复杂裂缝储层的高效压裂与油气增产提供理论支撑与技术保障。

关键词

高性能暂堵剂, 裂缝运移, 封堵机制, 稳定性

Transport and Stable Sealing Mechanisms of High-Performance Temporary Plugging Agents in Fractures

Yachun Yang, Mengxia Wu, Qiang Wang, Yurui Wu

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

Received: October 13, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 19, 2025

Abstract

With the rapid development of unconventional oil and gas reservoirs, higher requirements have been placed on the uniformity of hydraulic fracturing and the controllability of fracture flow.

文章引用: 杨雅淳, 吴梦霞, 王强, 吴宇蕊. 高性能暂堵剂在裂缝中的运移与稳定封堵机制[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1431-1437. DOI: 10.12677/me.2025.136158

Traditional temporary plugging materials often suffer from poor sealing and difficult flowback under high temperature, high pressure, and complex fracture conditions, which limits their application. This paper provides a systematic review of recent advances in high-performance temporary plugging agents (TPAs), focusing on material classification, transport mechanisms, sealing stability, and performance optimization. The migration of TPAs in fractures can be divided into several stages—entry, sieving, bridging, accumulation, and compaction—governed by the coupling of particle size distribution, carrier fluid viscosity, flow rate, and fracture geometry. The formed plugging layer usually exhibits a multilayer structure composed of a skeleton layer, a filling layer, and an interfacial compaction layer, whose integrity depends on mechanical interaction and fluid disturbance. Degradable polymers, elastic composites, and fiber-reinforced systems show superior strength and stability, while intelligent responsive materials offer adaptive performance in complex downhole environments. Future research should focus on integrating multi-scale modeling with experimental validation to achieve intelligent, controllable, and sustainable plugging technologies for efficient hydraulic fracturing and reservoir stimulation.

Keywords

High-Performance Temporary Plugging Agent, Fracture Transport, Sealing Mechanism, Stability

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

随着非常规油气和裂缝性储层的高效开发，对压裂改造均匀性和裂缝控制能力的要求不断提高。传统暂堵材料在高温高压、宽裂缝或复杂裂缝条件下易出现封堵不牢、返排困难等问题，难以满足现代油气开发需求[1][2]。因此，高性能暂堵剂逐渐成为研究热点。此类材料通常具有高强度、可变形、可降解与良好流变适应性等特征，能够在复杂裂缝体系中实现高效运移与稳定封堵，兼顾施工安全性与后期导流恢复[3][4]。

高性能暂堵剂的运移特性直接决定其能否在目标位置形成稳定的封堵结构。研究表明，其运移行为受颗粒粒径级配、形状、浓度、携带液黏度及裂缝几何结构等多因素影响[5]。在裂缝中，暂堵剂经历“进入-筛分-桥接-堆积-压实”多阶段过程，不同阶段的颗粒力学响应及相互作用决定了封堵层的致密性和承压性能[6]。为解决传统暂堵剂封堵层易冲刷、承压低的问题，学者们开发了多种高性能体系，如可降解高分子颗粒、弹性复合粒子、纤维增强材料及智能响应型暂堵剂等。这些材料能在高温高压下保持结构稳定，并在作业结束后通过化学或物理方式自降解，减少对储层导流能力的不利影响[7]。

近年来，国内外针对高性能暂堵剂的研究已从材料设计扩展到运移机理与封堵稳定性的系统探讨。总体来看，高性能暂堵剂的研究正从经验设计走向机理驱动，其在裂缝中的高效运移与稳定封堵机制已成为压裂暂堵技术的重要发展方向。

2. 高性能暂堵剂的类型与性能特征

目前，高性能暂堵剂主要包括可降解颗粒型、复合纤维型、弹性高分子型以及智能响应型四大类。不同类型的暂堵剂在结构组成、力学性能、流变特征及封堵稳定性方面各有优势，可针对不同裂缝环境实现高效暂堵与后期返排。

2.1. 可降解颗粒型暂堵剂

该类暂堵剂以聚乳酸、聚乙醇酸、聚己内酯等可降解高分子为主要成分，能够在高温、高压或特定化学环境下发生水解或热解反应，实现封堵后的自降解功能。研究表明，适当的分子量与结晶度可在保证封堵强度的同时有效调节降解速率，从而兼顾暂堵效果与导流恢复性能[4] [5]。这类材料具有环保、残留少、易加工等优点，目前已在页岩气压裂暂堵转向施工中得到广泛应用。

2.2. 复合纤维型暂堵剂

复合纤维类材料由高强度纤维与可降解颗粒复配而成，利用纤维的桥接与颗粒的填充作用形成多层次封堵结构。纤维能够提高封堵层的抗冲刷能力与柔韧性，使其在高流速条件下仍保持较好的稳定性[8]。此外，纤维增强体系能显著改善暂堵剂在宽缝或非规则裂缝中的桥接效率，有效提升封堵层承压能力。

2.3. 弹性高分子型暂堵剂

此类材料一般选用具有良好变形恢复能力的弹性聚合物(如丁腈橡胶、热塑性聚氨酯、交联凝胶等)，在高压作用下可发生可逆形变，从而增强裂缝贴合性与封堵密实度[9]。弹性暂堵剂特别适用于周期性压力波动或非均匀缝宽条件，可有效防止封堵层提前破裂。

2.4. 智能响应型暂堵剂

智能型暂堵剂可通过温度、pH 值、离子强度或外加电场等刺激实现性能调控。例如，温敏凝胶暂堵剂在井下温度升高时可快速凝胶化形成封堵体，而在降温或稀释条件下恢复流动性，实现封堵与返排的动态平衡[10]。这种响应型体系为实现暂堵过程的可控性提供了新的方向。

四类高性能暂堵剂的典型封堵强度、稳定性、降解特征及工程适用性对比见表 1。

Table 1. Engineering applicability and key-metric comparison of four high-performance temporary plugging agents
表 1. 四类高性能暂堵剂的工程适用性与关键指标对比

类别	封堵强度(MPa)	稳定性/抗冲刷	降解方式与半衰期(℃, h)	返排可控性	成本级别	典型应用场景
可降解颗粒	5~20 (实验常见); 特定组合装置上限达 50.39	中等; 受排量与粗糙度影响显著(CFD-DEM 显示前缘剪切升高时易冲刷破坏)	150℃热处理 4 h 可完全降解(体系示例); PLGA 降解速率随共聚比/尺寸变化显著	好: 降解后导流恢复率高(需结合体系评估)	中 - 高(聚酯可降解原料成本高于矿物/核桃壳类)	高温井段、重复转向(需高强度且可返排)
复合纤维	可达~17.9 (复合暂堵酸压,); 2 mm 酸蚀缝内纤维主导桥接	高: 纤维桥架与拉伸承载提高抗冲刷性	依材料(酸溶/水溶纤维); 需按配方与温度标定	中 - 好: 返排需控制纤维残留(配方可溶/酸溶时更优)	中	酸蚀裂缝、非均匀粗糙裂缝、较高排量工况
弹性高分子	≥15; 常见范围 17.8~25.2 (砂管实验, 不同渗透率)	高: 非均匀缝宽与脉动压差下保持封堵层完整; 损伤率<5% (示例)	随温度/交联剂浓度调控; 降解后黏度<20 mPa·s(示例)	好: 降解后低黏返排、渗透率可基本恢复	中 - 高	非均匀缝宽、强剪切/脉动压差、需要较强承压稳态
智能响应	突破压差可至 ≈ 8.34 (SDRP, 实验装置); 部分超分子凝胶在楔形裂缝 30 cm 达 ≈ 5.96	中 - 高: 固化后承压稳定; 循环加载下强度随次数衰减可控	70℃~120℃下 3~10 d 可自降解; 完全降解后溶液黏度<20 mPa·s	优: 按温度/催化剂/交联度设定“定时开关”	高(功能单体/催化剂)	高温井段、需要“定时解除”的转向/封隔作业

2.5. 小结

近年来关于高性能暂堵剂的研究，逐渐从“材料学改性”转向“材料 - 裂缝几何 - 工况”三者耦合

的机制 - 指标化评估。整体上形成了三点共识：其一，可降解颗粒(PLA/PGA 等)通过分子量、结晶度与粒径级配协同，可在目标缝宽内快速桥接并在温度作用下实现可控返排，适合高温井段与重复转向作业，现场与实验均有验证(但降解窗口受温度/矿化度制约) [11]；其二，纤维 - 颗粒复合体系在中高流速下更易形成稳定的“骨架 - 填充 - 压实”三层结构，能加速压差建立、提高抗冲刷性，且在酸蚀或非均匀粗糙裂缝中优势更明显[12]；其三，数值模拟(CFD-DEM)与可视化实验在“桥接起始条件、力链演化与破坏模式”上相互印证：中等黏度与适中排量易在中段触发桥接，过高排量会把剪切集中推至前缘，导致冲刷破坏概率上升[13]。

但不同研究在关键设计准则与评价口径上仍存在分歧与局限。例如，关于粒径 - 缝宽匹配，有工作延续了“Abrams/三分之一”类桥接判据或 D90/IPT 级配思想，但其适用性在“粗糙裂缝、非定常排量与复合材料”条件下并不一致，且若未统一温度、黏度、排量与浓度口径，跨文献的承压/抗冲刷对比容易失真[14]。再如，关于复合材料的协同效应，实验普遍观察到“混配优于单材”，但多数证据来自小尺度、短时试验；对长期压差脉动、重复启闭与高矿化度返排环境下的耐久性，目前仍缺规范化加载谱与统一失效判据，难以直接外推到现场全寿命周期。另外，可降解体系虽能降低残余伤害，但不同聚酯体系在高温高盐环境下的降解动力学与产物处置成本差异明显，现有研究常以“半衰期”单指标替代全程评价，对返排液处理与环境影响的量化不足[15]。

3. 高性能暂堵剂在裂缝中的运移机制

高性能暂堵剂在裂缝中的运移行为直接决定其能否在目标位置形成致密稳定的封堵结构。综合现有研究结果，可以将其运移过程划分为进入、迁移、筛分、桥接、堆积和压实六个阶段。不同阶段受颗粒粒径、形态、浓度、携带液黏度及裂缝几何结构等因素共同影响[11]。总体规律表明，适中的粒径级配与携液黏度有助于形成均匀桥接层，而过高流速和高压梯度则可能造成颗粒冲刷和封堵层不稳定。

在流体 - 颗粒相互作用方面，CFD-DEM 模拟研究揭示了暂堵剂的双向耦合特征：流体剪切力主导初始迁移与筛分阶段，而颗粒间碰撞与堆积力决定封堵结构的形成。实验与模拟均显示，裂缝入口易形成骨架区，中段形成致密层，尖端则多为残余堆积区。这说明暂堵层并非均质整体，而是“分区承压 - 分层稳定”的多层结构，其整体性能取决于各层间的受力传递。

不同类型暂堵剂的迁移模式亦存在差异。可降解颗粒在高温条件下易发生表面软化，形成“黏结 - 压实”式封堵；而纤维增强体系则依靠桥梁结构提供拉伸支撑，提高抗冲刷能力。相比之下，弹性高分子材料通过形变吸能和界面贴合实现稳定封堵，在非均匀裂缝中的表现更为优越。这表明材料本身的力学响应与流动特性共同决定其在裂缝中的迁移和驻留行为。

总体来看，尽管不同研究方法得到的细节结果存在差异，但可以归纳出以下三点共性认识：

- (1) 暂堵剂在裂缝中的运移是受颗粒动力学与流体剪切共同控制的多场耦合过程；
- (2) 封堵层形成表现出由“骨架搭建 - 颗粒填充 - 界面压实”逐级演化的结构特征；
- (3) 暂堵剂的材料特性决定其在迁移阶段的响应方式，从而影响最终的封堵位置与稳定性。

4. 封堵层稳定性与影响因素

封堵层的稳定性是衡量高性能暂堵剂有效性的核心指标。封堵层通常由骨架层、填充层和界面压实层组成，其整体承压能力取决于多层结构间的应力传递与界面结合强度。在外部压力作用下，骨架层提供主要支撑，填充层起到能量吸收与颗粒重排作用，而界面层则决定整体的抗冲刷与抗剥离性能。当压差超过临界值时，封堵层会出现颗粒滑移与局部通道再开启现象，表明结构强度受流体动能冲击显著影响。

从外部条件看，压力梯度、流速与温度是影响封堵层稳定性的主要外因。高压梯度会导致封堵层前

缘受剪切力集中, 易发生局部破坏; 流速升高会增强流体扰动, 使颗粒间力链结构松散; 而高温环境则会改变可降解材料的弹性模量, 削弱其支撑效果。利用动态堵漏装置开展实验发现, 承压能力与携液黏度成正比, 而与流体湍流强度成反比。

从内部因素来看, 粒径级配、颗粒形貌与材料刚度对封堵层的稳固性具有决定作用。多级粒径体系能够形成由大颗粒骨架 - 中颗粒填充 - 小颗粒压实的稳定结构; 不规则或片状颗粒可增强相互咬合作用, 延缓冲刷破坏。纤维增强暂堵剂能有效提高封堵层的抗拉性能, 使其在脉动压差作用下保持完整。相反, 单级粒径或低模量材料则容易在持续冲刷下发生塌陷。

在封堵层破坏模式方面, 学者普遍将失稳过程分为冲刷破坏、滑移剥离、热降解破裂与压力塌陷四种类型。当剪切应力集中于界面处时, 封堵层容易出现“滑脱通道”现象; 而在颗粒软化或溶解条件下, 则可能形成“降解破裂”路径。总体来看, 封堵层破坏往往呈现“局部破坏 - 扩展贯通”的级联特征。

5. 封堵性能优化与未来研究方向

高性能暂堵剂的研究目标在于实现高封堵强度、优良稳定性与可控降解性的统一。前期研究表明, 暂堵剂的封堵性能不仅取决于材料的物理化学特性, 还受到裂缝结构、流体条件以及注入工艺等多因素耦合影响。要进一步提升封堵效果, 应在材料设计、结构构筑与工艺控制三个方面协同优化, 从而实现“强封堵 - 可降解 - 易返排”的综合性能。

在材料层面, 当前研究重点正在由单一聚合物体系向多功能复合体系转变。可降解高分子、弹性粒子、纤维及微胶囊材料的复配能够在保持封堵强度的同时, 提高材料的适应性与可控性。可降解聚合物暂堵体系通过调整分子链结构与结晶度, 实现了温度响应型降解; 高弹性暂堵剂在高温高压条件下表现出良好的形变贴合能力, 有效提高了裂缝口和中段的封堵强度。今后的材料研究应更加关注智能响应特性, 通过引入温敏、pH 敏或离子响应基元, 使暂堵剂能够在不同井下环境中实现自适应封堵与自降解调节。

在结构层面, 分级结构设计是提升封堵层稳固性的关键。多粒径颗粒与纤维增强体系可形成由骨架层、填充层和压实层组成的多层封堵结构, 实现从“点桥接”向“体支撑”的转变。合理的级配设计可使封堵层内部的力链分布更加均匀, 增强承压能力并延缓冲刷破坏。复合凝胶和超分子网络结构的引入, 为封堵层提供了更高的韧性与抗变形能力, 使其在动态载荷作用下仍能保持结构完整。

在工艺层面, 注入排量、暂堵剂浓度和携液黏度等参数直接影响颗粒的迁移路径与桥接位置。中等排量与适度黏度有助于颗粒均匀分布, 并在裂缝中段形成稳定封堵区。

6. 现场应用中的工程挑战与对策

高性能暂堵剂在现场应用中面临四类核心挑战: 配伍性、泵送工艺、成本控制、以及环境影响。

(1) 配伍性

可降解聚酯/凝胶类暂堵剂的降解动力学对温度与介质组分高度敏感; 若仅给出单一“半衰期”而不标明温度、TDS、pH 与剪切史, 则现场返排时序与导流恢复易失配。建议在方案比选时, 完成“温度 - 矿化度 - pH”三维标定, 并给出降解 $t_{1/2}$ ($^{\circ}\text{C}$, pH, TDS) - 残液黏度 - 导流恢复率三联指标作为准入门槛; 对需要高承压同时可返排的场景, 可选用经验证在 $150^{\circ}\text{C} \times 4\text{ h}$ 可完全降解且最大暂堵压可达 50.39 MPa 的可降解颗粒/复配体系作为上限参考(注意装置与口径差异)。

(2) 泵送工艺

纤维 - 颗粒复配体系在中等黏度与适中排量下更易在缝中段触发桥接并形成稳定堵塞区; 排量过高会把剪切集中前移, 冲刷破坏概率上升。现场宜采用在线混配 + 低剪切转子以降低分散不均与筛网

堵塞风险，并通过压力-时间曲线识别“迁移→架桥→稳态”的拐点和平台段，从而校核投加时机/剂量是否合适。设计上应以 $D_{\max}$ 与缝宽 w 的比例与多峰级配(D90-D50-D10)为约束，辅以少量纤维提供桥架张力。

(3) 成本控制

颗粒暂堵方案流程简、材料可控，但空间定位不确定性会显著放大剂量与段间差异。建议将投加时机、剂量、分布策略纳入带物理约束的数值优化(耦合裂缝干扰/应力场)，以单位增产/吨剂成本为目标函数进行滚动优化；现场实践显示，通过联合模拟与实验筛选可在保证承压的同时将剂量压缩，并形成时机-剂量-段距的经验回归供后续井复用

(4) 环境影响

环境侧的关键是降解产物谱与返排液处理负荷。仅以“半衰期”衡量“环境友好”并不足以反映COD/固含与处理成本；建议在实验/现场记录中统一报告产物组成-残液黏度-导流恢复率，并在方案评估阶段进行返排-处理路线的情景分析。最新综述进一步强调了非常规开发中的水资源与水质风险，提示在选剂与剂量上预设更审慎的环境边界与监测计划。

7. 结论

高性能暂堵剂在裂缝性地层压裂与堵漏工程中的应用是提高储层改造效率和作业安全性的关键方向，具有广阔的工程应用前景。随着非常规油气开发的不断深入，复杂裂缝体系对暂堵材料的流变性能、承压能力及可降解性提出了更高要求。通过材料科学、流体力学与智能化技术的协同发展，暂堵剂的设计正逐步由经验型向机理主导型转变，封堵过程也逐渐实现可预测、可调控与可验证。

目前，高性能暂堵剂的研究正从单一颗粒体系向多功能复合体系与智能响应体系演进，材料在强度、稳定性及返排可控性方面均取得显著进展。多尺度模拟与可视化实验为揭示暂堵剂运移与封堵机理提供了新的手段，也为现场参数优化提供了理论依据。未来，应进一步加强对材料结构-流体耦合-裂缝力学之间关系的系统研究，推动暂堵技术向精准化、智能化与可持续化方向发展。

可以预见，高性能暂堵剂将在复杂储层压裂、漏失治理及油气增产等工程领域发挥越来越重要的作用。通过持续的基础研究和工程验证，将为我国非常规油气资源的高效开发和地下工程安全运行提供坚实的技术支撑。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新项目“裂缝系统中暂堵压裂材料运移行为及封堵性能研究”(YKJCX2420145)。

参考文献

- [1] Zhou, H., Wu, X., Song, Z., Zheng, B. and Zhang, K. (2022) A Review on Mechanism and Adaptive Materials of Temporary Plugging Agent for Chemical Diverting Fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **212**, Article ID: 110256. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110256>
- [2] 周福建, 袁立山, 刘雄飞, 等. 暂堵转向压裂关键技术与进展[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 365-381.
- [3] Li, M., Guo, J., Zhou, F., Li, M., Chen, J., Liu, H., *et al.* (2023) Experimental Study on Plugging Behavior of Degradable Diverters in Partially Open Fracture in Temporary Plugging and Diverting Fracturing. *ACS Omega*, **8**, 14066-14076. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00689>
- [4] Chen, Z., Wu, G., Zhou, J., Ai, C., Zhang, A., Xie, X., *et al.* (2023) Optimization of Degradable Temporary Plugging Material and Experimental Study on Stability of Temporary Plugging Layer. *Frontiers in Physics*, **11**, Article ID: 1167215. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1167215>
- [5] Xu, H., Zhang, L., Wang, J. and Jiang, H. (2023) Evaluation of Self-Degradation and Plugging Performance of

- Temperature-Controlled Degradable Polymer Temporary Plugging Agent. *Polymers*, **15**, Article No. 3732. <https://doi.org/10.3390/polym15183732>
- [6] Wang, D., Qin, H., Zheng, C., Sun, D. and Yu, B. (2023) Transport Mechanism of Temporary Plugging Agent in Complex Fractures of Hot Dry Rock: A Numerical Study. *Geothermics*, **111**, Article ID: 102714. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102714>
 - [7] Ma, C., Feng, Y., Dou, Y., Chu, M., Zhao, K. and Deng, J. (2024) Experimental Study on the Design Method of Lost Circulation Materials for Induced Fractures. *Geoenergy Science and Engineering*, **240**, Article ID: 213086. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213086>
 - [8] Zhang, L., Zhou, F., Feng, W., Pournik, M., Li, Z. and Li, X. (2020) Experimental Study on Plugging Behavior of Degradable Fibers and Particulates within Acid-Etched Fracture. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **185**, Article ID: 106455. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106455>
 - [9] Liu, Y., Chen, R., Liu, J., Yu, Y. and Zhu, K. (2024) Development and Field Application of Strongly Resilient Temporary Plugging Diversion Agent for Fracturing. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **14**, 2073-2088. <https://doi.org/10.1007/s13202-024-01814-7>
 - [10] Ma, B., Wang, H., Jiang, S., Chen, M. and Zhang, L. (2024) Development and Performance Evaluation of a New Conformance Control Agent Gel. *Gels*, **10**, Article No. 618. <https://doi.org/10.3390/gels10100618>
 - [11] Tian, A., Fu, G., Tang, J., *et al.* (2024) Numerical Simulation of the Transport and Sealing Law of Temporary Plugging Particles in Complex Fractures of Carbonate-Type Thermal Storage. *Energies*, **17**, 3283-3283. <https://doi.org/10.3390/en17133283>
 - [12] Chen, X. and Lu, Y. (2023) A Perspective Review on Degradable Polylactic Acid Diverters for Well Stimulations. *Fuel*, **348**, Article ID: 128557. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128557>
 - [13] Xu, W., Jiang, F., Wang, L., Liao, Y., Qiu, S., *et al.* (2024) Experimental Study on Plugging Behavior of Multitype Temporary Plugging Agents in Hydraulic Fractures. *SPE Journal*, **29**, 6756-6774. <https://doi.org/10.2118/223625-PA>
 - [14] Liu, Y.Q., *et al.* (2023) Study on Particle Plugging in Propagating Fractures Based on CFD-DEM. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article ID: 1037532. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1037532>
 - [15] Yang, X., Feng, J., Li, G., Li, R., Li, Z. and Li, H. (2024) Transport Behavior of Particles and Evolution of Plugging Zones in Rough Fractures: Insights from a Novel Coupled CFD-DEM Model. *Computers and Geotechnics*, **173**, Article ID: 106553. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106553>