

页岩油气藏压裂支撑剂发展综述与展望

庞英明, 张昶, 黄子松, 牛一旭, 肖伊娜, 俞家豪, 周俊鹏, 何竞怡*

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月6日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月28日

摘要

保障国家能源安全是我国经济社会发展的重要基石。页岩油气是我国油气资源增储上产的核心接替领域与战略重点, 目前四川盆地海相页岩气、鄂尔多斯盆地陆相页岩油已实现规模化商业开发。深层与陆相页岩储层普遍具有低孔低渗、强非均质性特征, 需依托水平井体积压裂技术实现经济高效采集, 而压裂支撑剂作为体积压裂的核心功能材料, 其运移铺置、力学性能与长期导流能力, 直接决定压裂效果、单井产能与开发效益, 是制约页岩油气高效开发的关键“卡脖子”材料。当前, 常规支撑剂在页岩储层中面临破碎嵌入、泵送难度大等固有短板, 新型功能型支撑剂也存在储层适配性不足、工程化成本高等问题, 现有研究对页岩油气专用支撑剂的技术演进、性能适配边界与共性瓶颈仍缺乏系统性评述。基于此, 文章围绕页岩油气开发核心需求, 系统梳理了支撑剂70余年的技术发展脉络, 分析了常规体系的应用局限, 重点综述了页岩油气专用新型支撑剂的研究进展与作用机理, 并明确了该领域的核心瓶颈与创新发展方向, 旨在为我国页岩油气专用支撑剂的国产化研发与工程化应用提供系统理论参考, 对保障国家能源安全具有重要意义。

关键词

压裂支撑剂, 非常规油气, 自悬浮支撑剂, 功能型支撑剂, 智能材料

Review and Outlook on Fracturing Proppants for Shale Oil and Gas Reservoirs

Yingming Pang, Chang Zhang, Zisong Huang, Yixu Niu, Yina Xiao, Jiahao Yu, Junpeng Zhou, Jingyi He*

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

Received: May 6, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 庞英明, 张昶, 黄子松, 牛一旭, 肖伊娜, 俞家豪, 周俊鹏, 何竞怡. 页岩油气藏压裂支撑剂发展综述与展望[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1058-1069. DOI: 10.12677/me.2026.144105

Abstract

National energy security serves as a fundamental pillar of China's socioeconomic development, with shale oil and gas representing the primary frontier for reserve accretion and production growth. In China, large-scale commercial development has been successfully established in the marine shale gas plays of the Sichuan Basin and the continental shale oil reservoirs of the Ordos Basin. These deep and continental shale formations are inherently characterized by low porosity, low permeability, and pronounced heterogeneity, rendering horizontal well stimulation with multi-stage hydraulic fracturing indispensable for achieving economic production rates. Within this framework, fracturing proppant functions as the enabling material that dictates fracture geometry, proppant transport and placement efficiency, and long-term conductivity, thereby exerting first-order control over stimulation effectiveness, well productivity, and project economics. Despite its critical role, conventional proppant systems exhibit inherent limitations in shale applications, including susceptibility to crushing and embedment under high closure stress, as well as significant pumping challenges. Meanwhile, emerging functional proppants, while offering promising performance enhancements, remain constrained by insufficient reservoir-specific adaptability and prohibitive field-scale costs. Furthermore, a systematic synthesis of proppant technology evolution, performance envelopes, and persistent technical bottlenecks specific to shale oil and gas development is notably absent from the current literature. To address this knowledge gap, this paper presents a comprehensive review of the seven-decade technological trajectory of fracturing proppants, critically assesses the application boundaries and limitations of conventional proppant classes, and highlights the recent advances and underlying mechanisms of novel proppant technologies engineered for shale reservoirs. The study delineates core technical challenges and identifies strategic innovation pathways, with the objective of establishing a systematic theoretical foundation to guide domestic R&D and accelerate the field-scale deployment of fit-for-purpose proppants in China's shale oil and gas operations, thereby contributing substantively to the national energy security agenda.

Keywords

Fracturing Proppant, Unconventional Oil and Gas, Self-Suspended Proppant, Functional Proppant, Smart Materials

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

页岩油气是我国油气资源增储上产的核心领域，更是保障国家能源安全的战略重点。我国四川盆地海相页岩气、鄂尔多斯盆地陆相页岩油已实现规模化商业开发，但深层与陆相页岩储层低孔低渗、强非均质性的地质特征，决定了其必须依靠水平井体积压裂技术实现经济高效动用。压裂支撑剂作为体积压裂改造的核心功能材料，其在页岩储层中的运移铺置、力学性能与长期导流能力，是控制压裂效果、单井产能与开发效益的核心因素。

当前，常规支撑剂体系在页岩储层中面临破碎嵌入、泵送难度大、涂层降解失效等固有短板，新型功能型支撑剂也存在储层适配性不足、工程化成本高、长效性不明等关键问题。现有研究多聚焦单一体系性能优化，对页岩油气专用支撑剂的技术演进逻辑、性能适配边界与共性科学瓶颈缺乏系统性评述。

为此，本文围绕页岩油气藏开发的核心工程需求，系统梳理了页岩油气开发驱动下压裂支撑剂的技

术发展脉络，科学分析了常规支撑剂的储层适配性与应用局限，重点综述了页岩油气专用新型支撑剂的研究进展与作用机理，最终明确了该领域的核心技术瓶颈与未来创新发展方向，旨在为我国页岩油气专用压裂支撑剂的国产化研发与工程化应用提供系统的理论参考。

2. 压裂支撑剂发展历程

支撑剂技术的发展历程可追溯至 20 世纪 40 年代，距今已有 70 多年的历史(见图 1)。1947 年，美国 Hugoton 油田首次使用河沙作为支撑剂，开启了支撑剂技术应用先河。20 世纪 50 年代，高质量矿砂逐步替代易破碎河沙，提升了支撑效果；60 年代，引入核桃壳、玻璃珠等圆球度材料，但天然材料存在强度低、耐温性差等缺陷。70 年代，以铝矾土、高岭土烧结的陶粒支撑剂问世，其抗压强度高、热稳定性优，成为深层高压储层核心材料。80 年代，树脂覆膜技术兴起，通过包覆石英砂/陶粒形成预固化/可固化产品，提升抗压强度并减少微粒运移。90 年代至今，新型支撑剂技术涌现：自悬浮支撑剂通过水凝胶包覆降密、聚合物涂层增稠降速，或表面活性剂吸附气泡增浮等改性手段，有效解决了颗粒沉降问题，从而实现了清水压裂；原位生成支撑剂通过地层化学转化生成颗粒；功能型支撑剂如疏水/示踪剂实现降低产水量、实时监测裂缝形态等功能。支撑剂技术始终围绕提高导流能力、降低成本、适应复杂地质条件三大目标创新，推动油气开采效率与可持续性提升。

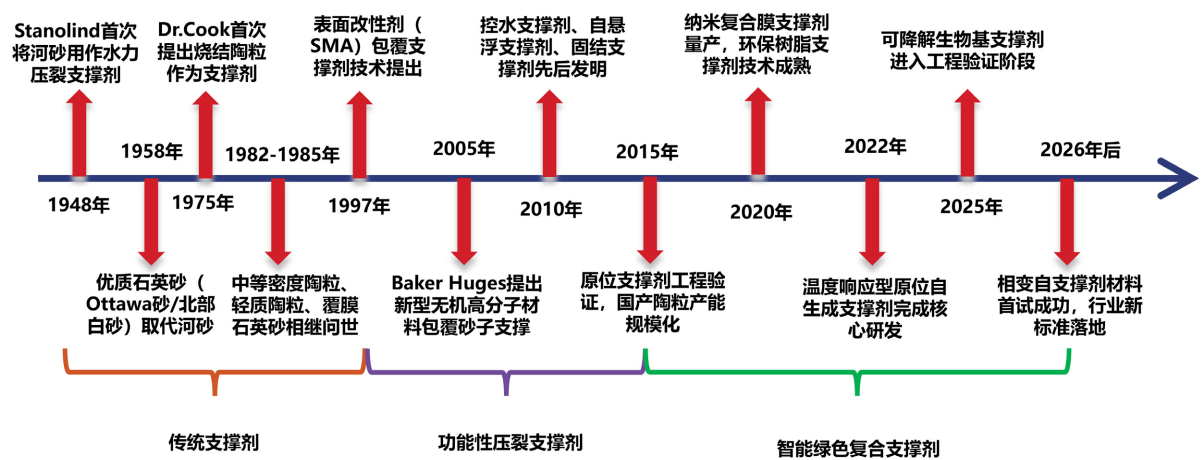


Figure 1. Timeline of proppant development [1]

图 1. 支撑剂的发展时间轴[1]

3. 压裂支撑剂应用现状

常规支撑剂是页岩油气压裂改造中技术成熟、应用最广泛的材料体系，主要包括石英砂、陶粒和树脂覆膜支撑剂三类，三者成分、制备工艺与性能上各具特征，形成了适配不同储层条件的互补应用体系。

3.1. 石英砂支撑剂

石英砂支撑剂以 SiO_2 为主、含少量 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等氧化物，相对密度约 2.65，经沉淀、破碎、洗涤、烘干、筛分制得。目前主要分为白砂、棕砂两种，白砂石英含量高、性能较好；而棕砂杂质较多、性能相对较差。国外石英砂主要产自明尼苏达州东南部、威斯康星州南部、得克萨斯州等地。我国主要产于甘肃兰州、河北承德、湖南岳阳等地，适配于低闭合应力各类储层，兼具密度低、泵送便捷、价格低廉且易获取的优势，但强度偏低，破碎压力约 28 MPa，高闭合应力下易破碎并引发微粒运移、孔喉堵塞，导致裂缝导流能力大幅下降，主要应用于低闭合应力浅井。因此，如何将低成本的石英砂投入深井裂缝使用

成为一项技术难题。杨立峰[2]等利用气藏数值模拟方法,研究储层作用在支撑剂上的有效应力和支撑剂铺置浓度,提出了一种支撑剂铺置方法,成功将石英砂铺置于井下 3000 m 处,在保持稳产的情况下,单井节约成本 70 万元左右。

3.2. 陶粒支撑剂

陶粒支撑剂以铝矾土为主要成分,复配高岭土、硅酸镁等添加剂,相对密度 2.55~3.9,制备需经破碎、粉磨、制球、煅烧、冷却、筛分等工序。目前人造陶粒主要制备工艺有两种:熔融喷吹法和烧结法。前者利用高压蒸汽将高温加热融化后的原料喷吹成珠状产物;后者则先将原料研磨成粉末后造粒,再高温加热使其致密化成型。由于熔融喷吹法制备成本高且不易成球,因此烧结法的使用更为广泛。烧结法制备的陶粒按密度可分为高、中、低及超低密度四类,具备抗压强度高、破碎率低、粒径均匀等优势,能形成高孔隙度和高渗透率的充填层,非常适用于高闭合应力的深井及超深井。然而,该工艺也存在密度偏高、对施工要求严苛及生产成本较高等问题。陶粒的密度主要受 Al_2O_3 含量影响,含量越高,其密度和强度也随之提升,但泵送难度也会相应增加。鉴于低密度陶粒难以满足深井作业需求,研发“低密高强”的陶粒支撑剂已成为近年来的重点方向。丰铭等[3]以二级铝矾土(Al_2O_3 质量分数 70.3%)与粉煤灰(质量比 3:2)为基础原料,并添加白云石作为烧结助剂,在 1350℃下成功制备出低密度高强度陶粒支撑剂。研究表明,当白云石添加量为 6%时,样品性能达到最优:其体积密度为 1.45 g/cm³,视密度为 2.60 g/cm³;在 35 MPa 闭合压力下,破碎率仅为 6.5%,且圆度与球度均大于 0.9,能够良好地适配煤层气井的压裂需求。

3.3. 树脂覆膜支撑剂

为规避传统陶粒、石英砂等支撑剂的性能短板,树脂覆膜支撑剂应运而生。该类支撑剂以石英砂、陶粒、纤维等为骨架骨料,外部包覆酚醛树脂、环氧树脂、呋喃树脂等高分子聚合物涂层,经加热、混合搅拌、冷却破碎、筛分制成,相对密度为 2.55~2.6,可按密度、润湿性及功能分为低密度/超低密度、中性润湿/疏水、自悬浮/孔隙型等类型,按包覆方式又可分为预固化与可固化两类,前者入地层前已完全固化,主打导流作用,后者在地层内完成固化,主要用于防砂。树脂涂层不仅能填平支撑剂表面,使其受力均匀、提升抗压载荷能力,还可降低支撑剂密度,且覆膜后支撑剂能在地层流体、温度作用下粘连成网状结构,避免回流,同时有效降低破碎率、减缓微粒运移堵塞,改善裂缝内支撑剂分布、增加裂缝长度,抗压强度表现较好,适配较高闭合应力的中、深井压裂需求。

但树脂覆膜支撑剂仍存在明显短板,树脂涂层化学稳定性不足,易受储层流体、压裂液性质及地层温度影响而分解破碎,堵塞渗流通道,高闭合应力下还易出现粘接现象,导致裂缝导流能力大幅下降;加之高分子聚合物制备工艺复杂、造价较高,其使用范围受限。针对不同储层条件研发定制化、高性能的改性树脂覆膜支撑剂,成为该领域未来的研究热点。

对于这三种常规支撑剂的性能分析,郭天魁等人[4]采用 FCES-100 型裂缝导流仪,模拟地层温度(常温)及闭合压力(10~90 MPa),进行了地层岩心的支撑剂嵌入和非嵌入导流能力实验,从而对比石英砂、陶粒以及树脂覆膜砂性能。实验研究发现:支撑剂的嵌入使导流能力大幅度降低;不同类型的支撑剂在相同条件下嵌入程度不同,嵌入程度从大到小依次为石英砂、陶粒、树脂覆膜砂;铺砂浓度越大,嵌入对导流能力的伤害程度越小;支撑剂的嵌入程度随支撑剂粒径和闭合压力的增加而增高;在相同的地层条件下,支撑剂在碎屑岩中的嵌入程度要高于碳酸盐岩;不同常规性能的各种陶粒,在相同的条件下嵌入程度很接近。

4. 压裂支撑剂研究进展

普通支撑剂主要用于油气井压裂裂缝的物理支撑,随着油气资源开发进程的加快,所面对的油气储

层条件愈发苛刻, 开采过程中遇到的技术瓶颈日益增多, 这就要求在支撑剂设计过程中被赋予更多智能化、功能化的作用, 以实现从“单一支撑”到“主动调控”的技术跨越。

4.1. 低密度支撑剂

低密度支撑剂通过“内部成孔 + 外部包覆”双路径实现“低密高强”特性: 以尿素、碳酸氢铵等为成孔模板, 在骨料内部构建多孔结构, 降低体积密度与视密度; 外部采用硅石、铝矾土粉等高强度材料包覆, 保障抗压性能, 同时优化颗粒圆球度与粒径分布, 减少泵送阻力, 减缓沉降速率, 扩大裂缝铺砂面积, 避免砂堵问题。其核心性能是在降低密度的同时, 通过矿物相优化(如莫来石晶体发育)维持足够抗压强度, 适配低粘度压裂液的携砂需求。

Rickards 等[5]以胡桃壳为骨料, 经环氧树脂浸渍包覆制备 ULW 支撑剂, 体积密度低至 0.85 g/cm^3 , 在 42 MPa 闭合压力、 80°C 高温下保持结构稳定, 实现深井地层有效支撑; 苗博等[6]研发超轻密度交联聚苯乙烯有机聚合物支撑剂, 通过调控单体配比优化物理性质与导流能力, 为有机体系低密度支撑剂提供新思路。徐永驰[7]以硅石为包覆材料、尿素为成孔剂, 经分段保温制备空心支撑剂, 视密度仅 1.69 g/cm^3 , 27.6 MPa 下破碎率 $< 4.71\%$; 牟军等[8]利用铝矾土粉与尿素复合, 添加二氧化锰优化烧结工艺, 制得视密度 2.47 g/cm^3 的多孔支撑剂, 25 MPa 下破碎率 5.21% 。Gu 等[9]以核桃壳为生物质骨料, 经环氧树脂、酚醛树脂浸渍包覆, 支撑剂视密度低至 1.25 g/cm^3 ; 郭宗艳等[10]通过酚醛环氧树脂包覆陶粒, 树脂质量分数 35% 时体积密度 1.18 g/cm^3 , 69 MPa 下破碎率仅 2.81% , 远超国标要求。此外, 董丙响等[11]利用低含铝铝矾土与粉煤灰等工业固废, 经烧结法制备出体积密度 1.50 g/cm^3 、视密度 2.70 g/cm^3 的高性能低密度陶粒支撑剂, 实现固废资源化利用与低密特性的协同。

4.2. 自悬浮支撑剂

自悬浮支撑剂以传统支撑剂为硬质骨料, 通过表面功能改性构建“刚性骨料 - 功能表层”复合结构, 核心特性是无需依赖增稠剂即可在清水中稳定悬浮, 综合了压裂液与传统支撑剂的优势, 实现清水压裂简化配液流程、提升压裂效率的核心目标。根据三种不同的悬浮机理, 自悬浮支撑剂可分为膨胀型自悬浮支撑剂、黏弹型自悬浮支撑剂和气悬浮支撑剂(见图 2)。

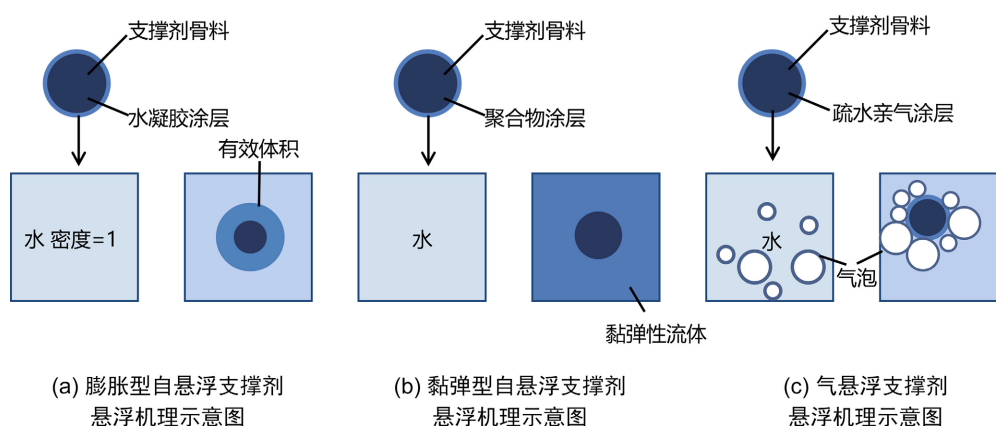


Figure 2. Schematic diagram of the suspension mechanism of three self-suspending proppants

图 2. 三种自悬浮支撑剂悬浮机理示意图

① 膨胀型(见图 2(a))以硅烷偶联改性石英砂为核心, 接枝丙烯酰胺等聚合物, 遇水后水凝胶涂层水合膨胀 $5\sim 15$ 倍形成水凝胶球, 有效视密度降至 $1.05\sim 1.1 \text{ g/cm}^3$, 受阳离子浓度抑制效应显著($\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} >$

$K^+ > Na^+$), 通过水化层交互构建悬浮网络延缓沉降;

② 黏弹型(见图 2(b))依托聚丙烯酰胺与纳米二氧化硅复合涂层, 遇水溶解后使压裂液具备黏弹性, 提升流体密度与稠度系数, 降低支撑剂沉降速度;

③ 气悬浮型(见图 2(c))通过支撑剂表面“亲气”改性, 使气体微泡主动附着在颗粒表面, 形成“气-固”复合结构, 显著降低支撑剂在低粘度滑溜水中的有效密度; 气泡的浮力效应与稳定吸附特性, 保障支撑剂在低粘度体系中的悬浮稳定性, 实现高砂比、长距离输送, 同时气泡逸散后不残留有害物质, 压裂液破胶液对储层伤害极低, 适配低渗气藏低伤害改造需求。

性能优化上, 张鑫等[12]采用偶联剂与高分子树脂制备黏弹型、膨胀型产品, 最低体积密度达 1.24 g/cm^3 , 显著提升悬浮稳定性与铺置效能; 张龙胜等[13]以膨胀性树脂包覆石英砂, 产品经 540 s^{-1} 剪切 10 min 后稳定时间仍达 30 min , 满足现场施工对抗剪切性的要求。场景适配方面, 郭江等[14]研发耐温耐盐型产品, 通过水化层改性适配高矿化度地层; 张光波等[15]开发可降解型产品, 实现煤层气开发中支撑功能与储层保护的协同。在机理与应用研究中, 黄博等[16]揭示骨料密度、溶胀倍数与悬浮性能及导流能力的关联规律, 现场应用于玛湖油田 H 井、苏北油田陈 101 井后, 日产油量显著提升。气悬浮支撑剂技术表现突出, 钟颖等[17]研发的气悬浮剂由有机溶剂、起泡剂等组成, 改性后的石英砂、陶粒在常温常压(粘度 $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)滑溜水中可完全悬浮, 砂比 $20\%\sim 30\%$ 、粒径 $30/50 \text{ 目}\sim 40/70 \text{ 目}$ 范围内悬浮效果稳定, 80°C 、 25 MPa 高温高压条件下仍保持良好悬浮能力, 压裂液破胶液对岩心伤害率仅约 10% , 现场应用于鄂尔多斯盆地及四川盆地致密砂岩气藏, 压后产量为邻井常规压裂技术的 1.23 倍; 该技术已在北美、阿根廷超低渗储层完成工业化应用, 进一步拓宽了自悬浮支撑剂的应用边界。

4.3. 自生支撑剂

以液体形式注入地层, 基于自由基聚合机理, 在温度、压力等环境刺激下, 通过“苯乙烯-二乙烯基苯(Styrene-Divinylbenzene, St-DVB)”共聚物交联结构原位生成固体支撑颗粒: 可相变组分与不可相变组分混合形成压裂液, 在地层温压作用下触发液-固相变, 通过调控引发体系(偶氮二异庚腈、过氧化苯甲酰等)实现相变时间精准控制; 添加无机填料(纳米石墨、碳酸钙)可强化机械隔离与诱导成核作用, 提升颗粒强度与生长速率, 实现对复杂缝网的全方位支撑, 规避传统固体支撑剂砂堵、远端支撑不足等问题。

尹金容等[18]构建“St-DVB”共聚物体系, 通过调控引发剂种类(偶氮二异庚腈、偶氮二异丁腈、过氧化苯甲酰等), 实现相变时间在 $9\sim 66 \text{ min}$ 宽范围可控; 添加纳米石墨后, 自生支撑剂平均单颗粒强度达 56.2 N , 生长速率提升 20% , 产率 80% 左右, 80% 尺寸分布于 $20\sim 40 \text{ 目}$, 球形度 > 0.9 。该研究还建立了相变与生长过程的监测方法, 主观观测与粘度法联用监测相变过程, 误差仅 $0\sim 2 \text{ min}$, 结合 DSC、液相色谱等技术实现生长过程动态追踪。沙特阿美石油公司[19]开展自支撑相变体系室内研究, 两相液体在 66°C 下混合 30 min 后原位形成固体支撑剂颗粒, 可保持裂缝长期导流能力并控制回流; 西南石油大学赵立强教授团队[20]报道热致凝胶型自生支撑剂压裂液, 两组分混合搅拌数分钟后形成并硬化固体支撑剂, 为现场应用提供技术参考。

4.4. 其他多功能支撑剂

① 除硫/放射性吸附型: 通过涂层改性或复合材料复合实现功能集成, 研究进展集中于吸附材料与支撑剂的协同设计。Goyal [21]采用聚氨酯涂层改性支撑剂, 实现 H_2S 与放射性物质 Ra-226 的同步吸附捕捉; Alen V. Gusa [22]则通过硫酸锶溶液与石英砂混合, 在砂粒表面形成功能性吸附层, 强化对 Ra-226 的捕获能力(见图 3)。该类支撑剂的核心优点是兼具裂缝支撑与污染物净化双重功能, 可针对性解决含硫、含放射性物质储层改造中的环保与设备维护难题, 适配特殊储层开发需求。但其现存问题亦较为突出, 吸附材料的吸附容量存在上限, 长期服役后易达到饱和状态, 难以维持长效净化效果, 且吸附功能与支

撑强度的协同优化难度大，部分吸附涂层的引入可能削弱支撑剂的抗压性能，影响裂缝长期稳定性。

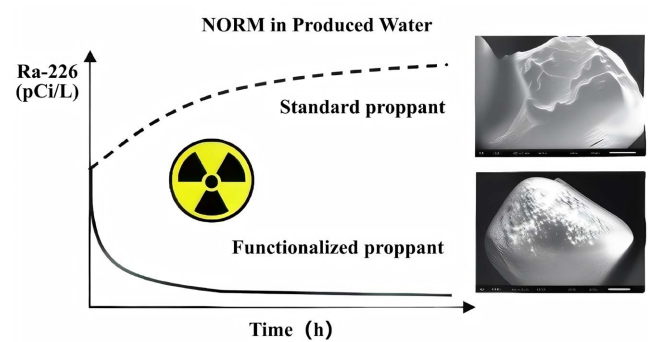


Figure 3. Adsorption curves of Ra-226 by functionalized and conventional proppants
图 3. 功能化支撑剂与普通支撑剂对 Ra-226 的吸附曲线图

② 疏水疏油改性型：以表面润湿性重构为核心技术路径，研究进展体现在功能材料分散与涂层包覆工艺的优化。Naima Bestaoui-Spurr [23]将疏水/疏油材料分散于支撑剂表面，通过流体选择性通过机制解决孔隙堵塞问题，如图 4 所示，A 和 B 中的孔隙被水和油所堵塞，但 C 可实现疏水疏油的功能，从而可以使油气顺利产出，回收液体和产油时间提前了 43%，具有较大的提升采收率潜力；王建忠等[24]以陶粒、石英砂为骨料，含氟聚合物溶液为涂层材料，制备憎油憎水型支撑剂，显著优化了表面化学稳定性与导流能力。其突出优点是低表面能特性可阻止压裂液与地层流体润湿渗透，从本质上降低裂缝堵塞风险，提升油气产出效率，适配多相流体共存的复杂储层。然而，该类支撑剂面临规模化应用的关键瓶颈，氟化聚合物等核心涂层材料成本偏高，且包覆工艺复杂，涂层与骨料的结合稳定性不足，在高温高压地层环境下易发生脱落，进而影响裂缝导流能力的长效性。

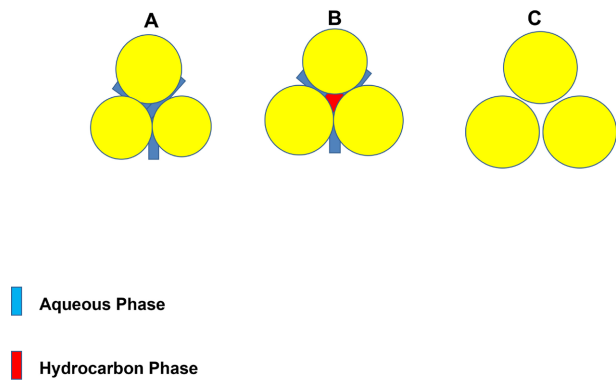


Figure 4. Model diagram of functionalized proppant
图 4. 功能支撑剂模型图

③ 中性湿促进型：通过共价改性实现表面官能团调控，研究进展聚焦于亲油疏水基团的精准接枝。Green [25]通过该技术制备的支撑剂，可牺牲水流通道的选择性增加油相通过量，实现油气产出效率的定向优化(见图 5)。其核心优点是针对性适配高含水储层改造需求，能够通过润湿性调控缓解水相干扰，为水驱开发后期储层的增产提供技术支持。但该类支撑剂的性能稳定性受地层环境影响显著，在高矿化度、高含水条件下，亲油疏水基团的改性效果易衰减，且油相选择性促进机制的理论与实际应用衔接不足，不同储层条件下的增产效果差异较大，仍需深化机理研究与工艺优化。

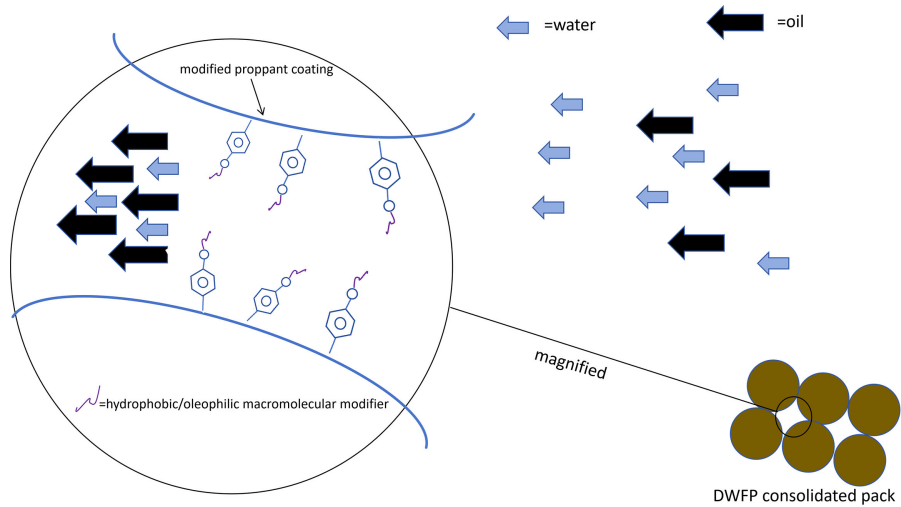


Figure 5. Schematic diagram of the selective promotion of oil flow by functional proppant
图 5. 功能支撑剂选择性促进油的流动示意图

④ 智能记忆型：智能记忆型支撑剂以热固性形状记忆聚合物(SMPs)为核心材料，研究进展体现在形变性能与地层适应性的优化。Santo [26]开发的产品在 75℃~90℃ 下可发生 10%~20%的可控形变，初始压缩呈圆盘状，升温后能恢复球形结构，实现对复杂缝网的动态适配。其显著优点是可通过形状记忆效应缓解裂缝交叉处导流能力骤降问题，同时抑制支撑剂回流，适配非常规储层复杂缝网的长效支撑需求(见图 6)。但该类支撑剂的应用场景受限，形状记忆聚合物的耐温耐盐性不足，在温度 > 100℃ 的高温或高矿化度地层中易失效，且制备工艺复杂导致成本偏高，形变恢复的重复性与长效性尚未经过大规模工业应用验证。

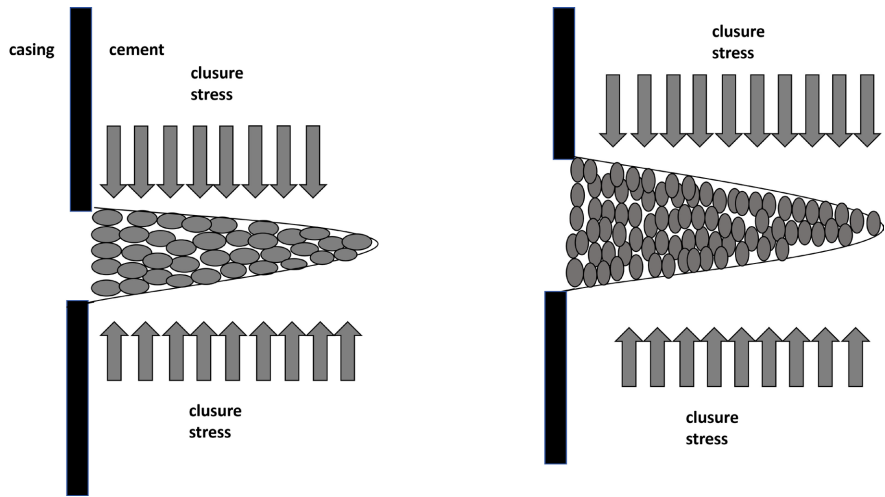


Figure 6. Schematic diagram of spherical memory polymer coating proppant support
图 6. 球形记忆聚合物涂层支撑剂支撑示意图

⑤ 示踪定位型：示踪定位型支撑剂通过示踪剂包裹、标记元素掺杂等技术实现功能集成，研究进展涵盖示踪体系优化与监测精度提升。Zhao [27]将示踪剂包裹于支撑剂中，结合磁性纳米颗粒或导电涂层实现裂缝位置追踪；陈前等[28]利用蒙特卡罗数值模拟优选钆元素为示踪剂；马兵等[29]开发氧化铽、铈标记的零污染示踪技术；李灿然等[30]研制非放射性钆标记支撑剂，进一步拓展了应用场景。其核心优点是可精准反馈支撑剂铺置状态、裂缝扩展形态及充填层完整性，为压裂效果评估提供直观数据支撑，非

放射性标记技术还规避了环境风险。现存问题主要包括示踪剂释放速率难以精准调控，易导致监测数据失真；非放射性示踪剂检测灵敏度较低，深部地层或低浓度条件下监测难度大；标记元素与支撑剂的相容性有待优化，部分示踪剂可能影响支撑剂力学性能。

⑥ 磁电检测型：磁电检测型支撑剂通过表面包覆导电涂层或附着磁性材料构建功能体系，研究进展集中于检测精度与地层适应性提升，可通过聚合物粘合剂将铁、铁氧体等磁性材料附着在支撑剂表面，制备的磁性支撑剂在 45°斜面上可稳定驻留，兼具回流控制与磁定位功能；导电涂层改性支撑剂则可为井下电磁裂缝绘图提供载体，结合电磁法实现支撑剂分布定位与三维裂缝图生成[31]。其突出优点是能够精准判断井间连通性及裂缝闭合状态，为压裂效果评估提供三维可视化支撑，磁性改性产品还可同步解决支撑剂回流问题。但该类支撑剂的规模化应用面临多重挑战，导电/磁性涂层制备成本较高，且易受地层流体腐蚀，影响检测精度与长效性；电磁信号在深部地层中传输易受干扰，导致三维裂缝图的分辨率与准确性不足，仍需优化涂层性能与检测技术。

5. 对现有支撑剂的建议及展望

当前支撑剂技术虽已取得长足进步，但通过对七类支撑剂在密度、强度、耐温、导流、输送、成本及环保等核心维度的系统对比(如表 1 所示)，各类材料的性能边界与固有短板清晰呈现：常规支撑剂在“成本 - 强度 - 导流”三角约束下已近极限，难以在三个维度上同时满足深层页岩气井的严苛作业要求；新型支撑剂虽在密度与输送性能上实现突破，但成本普遍偏高、技术成熟度不足，长期导流能力衰减仍存争议。基于对比揭示的共性挑战，未来的发展设想将突破传统“被动支撑”的理念，向“主动适应、智能响应、绿色低碳、功能一体化”的方向演进。

Table 1. Comprehensive comparison of key performances of conventional and novel proppants
表 1. 常规与新型支撑剂关键性能综合对比

对比维度		常规支撑剂			新型支撑剂		
类型	石英砂	陶粒	树脂覆膜砂	超轻/低密度 (ULWP)	自悬浮(SSP)	气悬浮	原位/自生
核心原理	天然矿物破碎筛分	铝矾土高温烧结	骨料 + 树脂涂层	内部成孔 + 外部包覆	水凝胶遇水膨胀	表面亲气吸附气泡	液 - 固相变原位生成
视密度(g/cm³)	~2.65	2.55~3.90	2.55~2.60	1.08~2.60	1.05~1.24	大幅降低	~1.18
抗压/破碎特性	耐压 < 41 MPa; 35 MPa 下大量破碎	耐压 34~69+ MPa; 52 MPa 下≤5%~6.5%	耐压 < 55 MPa; 69 MPa 下 1.21%~3.01%	52 MPa < 5%; 69 MPa < 7%	取决于骨料	取决于骨料	单颗粒~32~56 N; 与陶粒相当
耐温极限	≤65℃	≤232℃	≤121℃	80℃~120℃	≤120℃	≤80℃	≤150℃
导流能力	低 - 中等	高	高	良好(铺置远)	良好(分布均匀)	良好	与陶粒相当
页岩适配场景	浅层/低压页岩	深层/高压页岩	中深页岩、防砂	滑溜水长距离输送	清水压裂	致密气低伤害	远端微裂缝充填
沉降/输送优势	差(快速沉降)	差(密度大、需高粘携砂)	中等	沉降为陶粒 1/20	清水/盐水中长期悬浮	低粘流体完全悬浮	液态注入、全缝网覆盖
防回流能力	差	中等	良好(树脂粘结)	中等	中等	中等	良好(原位固化)
细粒运移控制	差	低	低(树脂减少细粒)	低	低	低	极低
技术成熟度	最成熟	最成熟	成熟	已商业化	已现场应用	现场试验	先导试验
成本(元/lb)	0.14~0.42	1.94~6.48	1.40~1.76	中等(~2~4)	中等偏高(~3~5)	中等(~2~4)	较高(~5~8)
大型页岩压裂经济性	最优	最差, >50%成本	中等	较优	较优	较优	待验证
环保性	开采影响	高能耗烧结	树脂化学品	低密节能	清水携砂	低伤害	无固废
核心局限	强度不足、深井失效	密度大、成本高、能耗高	涂层高温降解、长期衰减	高应力下变形/嵌入	剪切降解、长期稳定性争议	高温气泡失效	相变控制、规模化难题

注：成本数据引自 Shafiq 等(ACS Omega, 2025) [32]，按 1 美元 ≈ 7.2 元人民币换算；破碎率测试参照 API RP 19C/19D 标准。

5.1. 对现有支撑剂的一些改进建议

对七类支撑剂的系统对比表明, 常规支撑剂受困于“成本-强度-导流”三角约束, 新型支撑剂则面临“性能-成本-成熟度”的阶段瓶颈。基于上述分析, 本文提出以下四项改进建议。

1) 进一步开发响应变化的储层条件的温敏/压敏变形支撑剂。例如, 在具备“软输送-硬支撑”的原位生成支撑剂内部包覆一层能够在裂缝处释放并聚合的修复剂(如单体、催化剂), 实现自动愈合损伤, 恢复部分导流能力, 极大地延长裂缝的有效寿命。

2) 将单一性功能支撑剂进行融合组装以应对多目标问题。例如, 可以开发“核壳结构”或“模块化”多功能集成支撑剂, 内核: 高强度陶粒或轻质合金; 外壳第一层: 遇水膨胀的聚合物, 实现自悬浮; 外壳第二层: pH 或温度响应性树脂, 到达地层后固化, 实现原位固结; 最外层: 负载纳米催化剂的智能润湿性材料, 既能控水, 又能在地层温度下催化重质原油降粘, 提高流动性。通过这种模块化设计, 单颗粒支撑剂可同时具备支撑、悬浮、固结、控水、降粘等多种能力。

3) 坚持绿色发展理念, 进一步迈向“绿色与循环经济”开发。例如, 研发废弃物源化支撑剂: 利用工业固废(如粉煤灰、煤矸石、冶金渣)或天然废弃物(如稻壳灰)作为主要原料, 通过绿色工艺制备高性能、低成本的支撑剂。这不仅降低成本, 更符合碳中和目标; 研发可回收/再激活支撑剂: 开发具有磁响应性或特殊表面标记的支撑剂。在生产末期, 通过物理或化学手段(如磁力打捞、选择性溶解)将其从返排液中高效分离并回收, 经处理后重复利用。或通过井下注入“激活剂”, 使因堵塞而失效的旧支撑剂层恢复部分功能。

4) 近年来, 采用超临界 CO₂、氮气等无液相介质的气体压裂技术逐渐兴起。该技术从根本上规避了水力压裂因水相侵入导致的水锁效应、黏土膨胀及储层伤害等问题。因此, 亟需加快针对此类技术的配套支撑剂研发。例如, 基于仿生学的蒲公英支撑剂, 通过学习研究蒲公英种子的空气动力学结构制作支撑剂表层结构使之具备高纵向铺置率、高导流能力和高抗压能力, 并改进支撑剂内核基体的材料使之具备低密度高强度的性能, 从而实现更优的气体压裂开发效果。

5.2. 未来展望

未来支撑剂技术将向智能化与多功能化方向演进, 通过集成智能材料实现实时监测调控, 并赋予示踪、控水、防砂等复合功能; 针对超深高温高压地层, 聚焦低密度高强度覆膜、疏水改性降产水及智能响应型支撑剂的创新研发, 以材料功能化与智能化设计平衡裂缝导流能力与开发成本, 为支撑剂技术可持续发展提供科学支撑; 注重生物合成与仿生设计, 借鉴自然界(如贝壳的强度、荷叶的疏水性), 利用合成生物学技术培育微生物, 使其在常温常压下经生物矿化合成具有极高强度与复杂多孔结构的支撑剂, 从而彻底革新现有高能耗的制备工艺。

总之, 支撑剂的未来, 是一场从“材料”到“系统”的转变。其发展路径将深度融合材料科学、微纳技术、人工智能和生物技术, 最终目标是创造出能够自主感知、智能决策、动态适应并主动优化油气生产全过程的新一代智能支撑系统, 为油气工业的降本增效与可持续发展提供核心驱动力。

基金项目

重庆科技大学大学生创新训练计划项目(项目编号: 2025201006)。

参考文献

- [1] 朱亚军, 孟令韬, 赵健, 等. 功能性压裂支撑剂研究进展与应用现状[J]. 石油化工应用, 2023, 42(11): 1-4+11.
- [2] 杨立峰, 田助红, 朱仲义, 等. 石英砂用于页岩气储层压裂的经济适应性[J]. 天然气工业, 2018, 38(5): 71-76.

- [3] 丰铭, 吉国荣, 高云峰, 等. 低密度高强度陶粒支撑剂的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(12): 4571-4577+4587.
- [4] 郭天魁, 张士诚. 影响支撑剂嵌入的因素研究[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 527-529+544.
- [5] Rickards, A.R., Brannon, H.D., Wood, W.D. and Stephenson, C.J. (2006) High Strength, Ultralightweight Proppant Lends New Dimensions to Hydraulic Fracturing Applications. *SPE Production & Operations*, **21**, 212-221. <https://doi.org/10.2118/84308-pa>
- [6] 苗博. 高分子材料超轻密度支撑剂导流能力研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 中国石油大学, 2018.
- [7] 徐永驰. 低密度支撑剂的研制及性能评价[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [8] 牟军, 薛妃, 董朋朋, 等. 铝矾土空心陶粒支撑剂的制备及性能研究[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(7): 1244-1249.
- [9] Gu, M., Dao, E. and Mohanty, K.K. (2015) Investigation of Ultra-Light Weight Proppant Application in Shale Fracturing. *Fuel*, **150**, 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.019>
- [10] 郭宗艳, 姚晓, 马雪. 多孔莫来石基低密度高强度支撑剂的制备及性能[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 39-43.
- [11] 董丙响, 蔡景超, 李世恒, 等. 新型低密度高强度水力压裂支撑剂的研制[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(2): 117-120+125.
- [12] 张鑫. 自悬浮支撑剂的制备及性能评价[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- [13] 张龙胜, 秦升益, 雷林, 等. 新型自悬浮支撑剂性能评价与现场应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 105-108.
- [14] 郭江, 段誉, 李泽龙, 等. 耐温耐盐自悬浮支撑剂的制备及其性能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2026, 44(3): 118-126+154.
- [15] 张光波, 张遂安, 马文峰, 等. 可降解自悬浮支撑剂在煤层气开发中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 129-133+141.
- [16] 黄博, 熊炜, 马秀敏, 等. 新型自悬浮压裂支撑剂的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(1): 67-70.
- [17] 钟颖, 张浩, 杨波, 等. 低渗气藏低伤害气悬浮支撑剂压裂技术[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). 成都: 油气藏地质及开发工程国家重点实验室成都理工大学, 2023: 110-118.
- [18] 尹金容. 自生支撑剂的制备及相变和生长过程研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- [19] Chang, F.F., Berger, P.D. and Lee, C.H. (2015) *In-Situ* Formation of Proppant and Highly Permeable Blocks for Hydraulic Fracturing. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, The Woodlands, 3-5 February 2015, SPE-173328-MS.
- [20] Luo, Z., Zhang, N., Zhao, L., Pei, Y., Liu, P. and Li, N. (2019) Thermoresponsive in Situ Generated Proppant Based on Liquid-Solid Transition of a Supramolecular Self-Propping Fracturing Fluid. *Energy & Fuels*, **33**, 10659-10666. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02501>
- [21] Goyal, S., Raghuraman, A., Aou, K., Aguirre-Vargas, F., Medina, J.C., Tan, R., *et al.* (2017) Smart Proppants with Multiple down Hole Functionalities. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*, Dallas, 24-26 January 2017, SPE-184853-MS. <https://doi.org/10.2118/184853-ms>
- [22] Gusa, A.V. and Vidic, R.D. (2018) Development of Functionalized Proppant for the Control of NORM in Marcellus Shale Produced Water. *Environmental Science & Technology*, **53**, 373-382. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05710>
- [23] Bestaoui-Spurr, N., Sun, S., Williams, V., Volk, A. and Nguyen, S. (2017) Using Properties in Nature to Modify Proppant Surfaces and Increase Flow. *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*, Dallas, 3-5 April 2017, SPE-184543-MS. <https://doi.org/10.2118/184543-ms>
- [24] 王建忠, 王锐, 李彦普. 憎水憎油型支撑剂研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 159-161+200-201.
- [25] Green, J., Dewendt, A., Terracina, J., Abrams, B. and Harper, A. (2018) First Proppant Designed to Decrease Water Production. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, 24-26 September 2018, SPE-191394-MS. <https://doi.org/10.2118/191394-ms>
- [26] Santos, L., Dahi Taleghani, A. and Li, G. (2018) Expandable Proppants to Moderate Production Drop in Hydraulically Fractured Wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **55**, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.04.026>
- [27] Zhao, B., Panthi, K. and Mohanty, K.K. (2020) Tracer Eluting Proppants for Hydraulic Fracture Characterization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **190**, Article 107048. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107048>
- [28] 陈前, 张锋, 张泉滢, 等. 基于热中子探测评价裂缝的示踪剂特性研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(2): 52-57.

-
- [29] 马兵, 宋汉华, 李转红, 等. 零污染压裂示踪诊断技术在长庆低渗透油田的应用[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(3): 128-130+10.
- [30] 李灿然, 李向辉, 逄永周, 等. 一种非放射性压裂效果评价用钆标记压裂支撑剂的研制[J]. 陶瓷学报, 2019, 40(1): 57-61.
- [31] Hoversten, G.M. and Schwarzbach, C. (2021) Monitoring Hydraulic Fracture Volume Using Borehole to Surface Electromagnetic and Conductive Proppant. *Geophysics*, **86**, E93-E109. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0410.1>
- [32] Shafiq, M.U., Alajmei, S., Aljawad, M.S., Wang, L. and Bahri, A. (2025) A Comprehensive Review of Proppant Selection in Unconventional Reservoirs. *ACS Omega*, **10**, 13046-13059. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09936>