

原位自生支撑剂及其关键材料研究进展

钟海莲* 余炜铭 高成佳庆 黄杰 李高岩

重庆科技大学 重庆 401331

摘要: 原位自生支撑剂技术 (In-situ Generated Proppants, ISGP) 是一种新兴的水力压裂方法, 其通过向地层注入特定液体或反应体系直接生成具有支撑和导流功能的球状固体颗粒, 旨在解决传统支撑剂 (如石英砂、陶粒) 存在的运移困难、易沉降堵塞等问题。本文系统梳理了近十年原位自生支撑剂的研究脉络, 并在此基础上对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 水力压裂; 支撑剂; 相变; 环氧树脂

引言

油气资源在我国能源安全中扮演着至关重要的角色, 而水力压裂作为油气开采中的关键技术, 其大致流程为: 首先, 地面上的高压泵组将携带支撑剂的压裂液泵入地层, 在超过地层压力承受极限时, 产生裂缝, 待压裂液返排后, 留下支撑剂防止裂缝闭合, 以此提高油气井的产量。而传统的固体支撑剂存在较多问题。如密度大、沉降快、易造成砂堵和设备磨损, 且难进入远端及微小裂缝。而原位自生支撑剂可以实现以液体形式进入储层、并在原位发生固化、对裂缝进行有效支撑, 并具备低密度、高强度等性能特点。

一、原位自生支撑剂研究进展

原位自生支撑剂的概念早期多出现于研究者的构想中, 例如Chang等人^[1]较早提出了地下原位生成高渗透性块和支撑剂的设想, 以规避支撑剂难以运移和铺置不理想的问题。随后, 有研究者提出利用地层矿物在自身环境条件下进行水热反应原位生成无机矿物颗粒。Tong等人^[2, 3]探索了利用注入的化学试剂 (如磷酸盐) 与富含钙离子的页岩发生水热反应, 在岩石裂缝表面生成羟基磷灰石晶体。该方法对裂缝导流能力有显著提升, 并且能够在较广矿化度范围的压裂液中实现晶体生长。Huang等人^[4]也提出了类似概念, 旨在开发一种能在裂缝内自主转化为微支撑剂或形成“支柱-通道”结构的压

裂液, 以增强不同尺度裂缝的导流能力。这类方法的优势在于可就地取材, 对于降低开采成本方面具备可行性, 但反应速率、可控性及是否会对储层产生潜在影响是需要持续关注的话题。

与此同时, 另一条技术路线也开始蓬勃发展。即基于有机高分子材料发生相变生成支撑剂。Zhao、Luo等团队^[5-7]提出了一种“自支撑”或“自生固相”压裂技术。通过研发一种由相变流体和非相变流体组成的混合体系, 注入地层后, 在温度刺激下, 其中的相变流体发生液-固转变, 形成固体颗粒, 而原先非相变流体所占据的空间在返排后形成油气流动通道。研究表明, 该技术在降低砂堵风险和um提高裂缝支撑效率方面具有较大潜力。而罗志锋、张楠林等人^[8, 9]进一步对该理论进行了深入研究, 通过构建反应动力学和耦合温度场数值模型, 对压裂液性能参数、相变热等与相变过程和缝内温度分布的作用规律进行了分析, 为工艺优化提供了理论工具。

此外, 为赋予原位自生支撑剂更多功能, 除了上述基础体系, 研究者们还在不断创新。例如, 仝少凯等人^[10]探索了基于NiTi形状记忆合金复合材料的可控温度-膨胀支撑剂, 利用其热致膨胀特性来达到支撑裂缝的目的。吴绍伟等人^[11]则通过分子设计和工艺调控, 开发出一种高成球率、高强度且疏水可控的环境友好型自生支撑剂体系。

二、环氧树脂型原位自生支撑剂

环氧树脂作为一种具备成熟工业应用基础的材料, 其特点包括良好的热稳定性、耐化学腐蚀性、粘接性、以及强度和可调控的固化反应 (见图1), 成为原位自生

基金项目: 重庆科技大学研究项目 (YKJCX2420528) 资助。

第一作者及通讯作者: 钟海莲 (2000-), 女, 汉族, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 油气田化学。

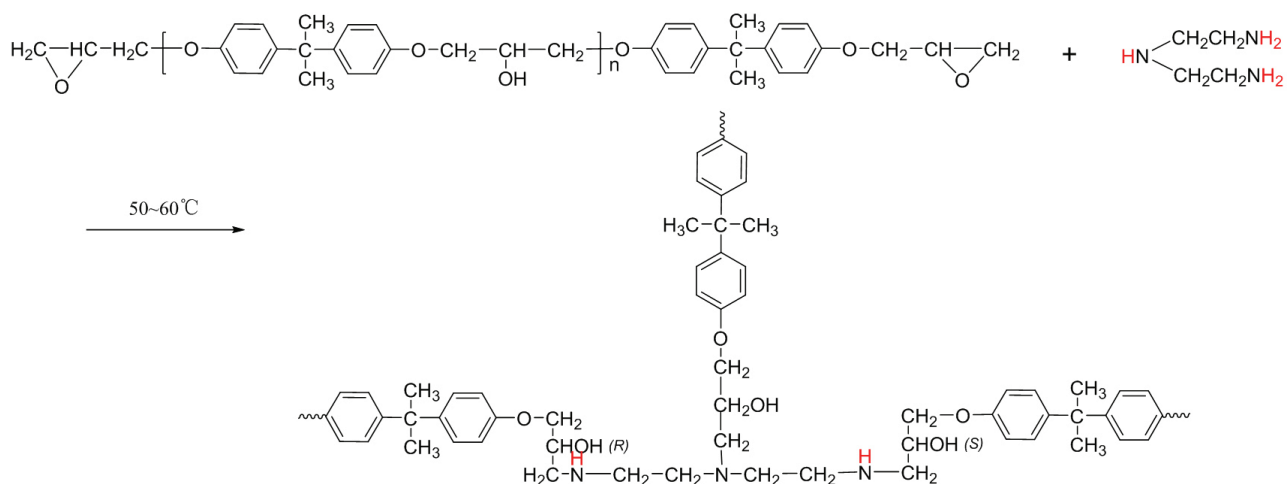


图1 环氧树脂固化机理

支撑剂的重要候选材料。其研究方向为：将高粘度环氧体系降粘以便泵送。

Fan 等人^[12]率先报道了一类具备低粘度、低密度改性环氧树脂的自生支撑剂。通过将石墨粒子作为增强剂添加至化学合成的低粘树脂以提高其抗压强度，再利用乳化技术形成乳状液。该体系注入地层后，可转化为不同尺寸的固体颗粒以支撑裂缝。曲占庆等人^[13]进一步运用 Pickering 乳化技术（以纳米 SiO₂ 作为乳化剂），成功制备出从 0.5 mm 到 4.5 mm 多种粒径的支撑剂，并对其运移和导流性能进行了系统评价，证实了该体系在高闭合压力的非常规储层的适应性。

在纯环氧树脂自生支撑剂的成型工艺方面，Singh 等人^[14]采用悬浮聚合法合成交联环氧树脂颗粒，该团队系统研究了分散剂用量等条件对树脂颗粒尺寸、热稳定性以及分布的影响。李晓娟等人^[15]则通过选择特殊原料（如中空玻璃微珠）来展开研究，在甲基硅油载体中制备了密度约 1.1 g/cm³，且性能优良的支撑剂。而对于更全面更系统的性能评价，杨哲等人^[16]在密度、溶解度、破碎率和导流能力等模块付出了努力。

三、展望

由于对非常规及复杂储层油气资源高效开发的迫切需求，实现包括微小及远端裂缝的全尺度有效支撑，ISGP 经过十余年的发展，已从一种创新构想成长为具有明确技术路径且拥有丰富材料体系的研究领域，实现了水力压裂从“携带固体”到“生成固体”的思路转变。形成了无机矿物水热合成与有机高分子相变生成两大主流方向。该技术的成熟与推广有望在传统能源非常规开

发问题上打开新的局面。

参考文献

- [1]Chang F F, Berger P D, Lee C H. In-situ formation of proppant and highly permeable blocks for hydraulic fracturing[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. SPE, 2015: D021S005R004.
- [2]Tong S, Miller C, Mohanty K. Generation of in-situ proppant through hydro-thermal reactions[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. SPE, 2019: D021S006R004.
- [3]Tong S, Miller C, Mohanty K K. In situ generated proppants for shale reservoirs[J]. Fuel, 2022, 319: 123776.
- [4]Huang J, Gong W, Lin L, et al. In-situ proppant: beads, microproppant, and channelized-proppant[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, 2019: D011S007R002.
- [5]Zhao L, Chen Y, Du J, et al. Experimental Study on a new type of self-propping fracturing technology[J]. Energy, 2019, 183: 249-261.
- [6]Luo Z, Zhang N, Zhao L, et al. Thermoresponsive in situ generated proppant based on liquid-solid transition of a supramolecular self-propping fracturing fluid[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(11): 10659-10666.
- [7]赵立强, 陈一鑫, 刘平礼, 等. 一种新型自支撑压裂液体系实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 121-127.

[8] 罗志锋, 张楠林, 赵立强, 等. 自生固相化学压裂缝内温度分布数值模拟[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 117-123.

[9] 张楠林, 刘福深, 姜亮亮, 等. 自支撑相变压裂技术中相变热对裂缝温度的影响[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1374-1383.

[10] 全少凯, 岳艳芳, 张宏忠, 等. 非常规油气藏可控温度-膨胀支撑剂压裂技术研究[C]//西安石油大学, 2025: 256-268.

[11] 吴绍伟, 尹金容, 李真勇, 等. 环境友好型高成球产率自生支撑剂的构筑与性能[J]. 油田化学, 2024, 41(2).

[12] Fan J C, Qu Z Q, Guo T K, et al. Development of self-generated proppant based on modified low-density and

low-viscosity epoxy resin and its evaluation[J]. Petroleum Science, 2022, 19(5): 2240-2252.

[13] 曲占庆, 樊家铤, 郭天魁, 等. 基于Pickering乳化技术环氧树脂相变支撑剂的制备及评价[J]. 中国石油大学学报, 2023, 47(4).

[14] Singh A, Singla P, Sahoo S C, et al. Synthesis and characterization of cross-linked epoxy resin beads by suspension polymerization technique[J]. Journal of Polymer Research, 2020, 27(7): 180.

[15] 李晓娟, 王峰, 柯杰曦, 等. 低密度环氧树脂压裂支撑剂的研制[J]. 塑料工业, 2022, 50(05): 196-199+206.

[16] 杨哲, 卢渊, 黄丹, 等. 新型树脂材料支撑剂的性能评价[J]. 石油化工应用, 2018, 37(12): 64-66+69.