

微支撑剂在水力压裂中的应用进展

张恒^{1*}, 王昱晨^{1#}, 朱丹¹, 罗林波², 焦国盈¹, 舒煜¹, 何泽龙¹, 钱雅慧¹, 梁梦琬¹

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²中石化江汉油田分公司采气一厂, 湖北 利川

收稿日期: 2024年9月3日; 录用日期: 2024年12月9日; 发布日期: 2024年12月23日

摘要

微支撑剂作为水力压裂技术中的关键材料, 具有小粒径和高强度的特点, 用于保持裂缝的开放状态, 提升油气产量。微支撑剂的应用已显著提升了水力压裂的效果, 其在提高裂缝导流能力和减少生产成本方面发挥了重要作用。随着材料科学和工程技术的进步, 微支撑剂的应用在水力压裂技术中表现出了显著的优势。其种类和性能也不断优化, 包括其强度、耐磨性及化学稳定性。这些进展使得水力压裂在复杂地质条件下的应用更加高效和经济, 推动了石油和天然气的开发利用。

关键词

水力压裂, 微支撑剂, 应用, 进展

Advances in the Application of Micro-Proppants in Hydraulic Fracturing

Heng Zhang^{1*}, Yuchen Wang^{1#}, Dan Zhu¹, Linbo Luo², Guoying Jiao¹, Yu Shu¹, Zelong He¹, Yahui Qian¹, Menglong Liang¹

¹School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Gas Production Plant No. 1, Jiangnan Oilfield Branch, Sinopec, Lichuan Hubei

Received: Sep. 3rd, 2024; accepted: Dec. 9th, 2024; published: Dec. 23rd, 2024

Abstract

As a key material in hydraulic fracturing technology, micro-proppant, characterized by small particle size and high strength, is used to keep fractures open and enhance oil and gas production. The application of micro-proppant has significantly enhanced the effectiveness of hydraulic fracturing,

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张恒, 王昱晨, 朱丹, 罗林波, 焦国盈, 舒煜, 何泽龙, 钱雅慧, 梁梦琬. 微支撑剂在水力压裂中的应用进展[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(4): 445-450. DOI: 10.12677/jogt.2024.464054

and it plays an important role in improving fracture inflow capacity and reducing production cost. With the advancement of material science and engineering technology, the application of micro-proppant has shown significant advantages in hydraulic fracturing technology. Their types and properties have been continuously optimized, including their strength, abrasion resistance and chemical stability. These advances have made the application of hydraulic fracturing under complex geological conditions more efficient and economical, promoting the development and utilization of oil and natural gas.

Keywords

Hydraulic Fracturing, Micro-Proppant, Application, Advance

Copyright © 2024 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

在当今的能源开发领域中，水力压裂技术扮演着至关重要的角色，为获取油气资源提供了强有力的技术支持。然而，随着传统油气资源逐渐枯竭，以及对更高产量和更低成本的需求不断增加，水力压裂中的传统支撑剂面临着无法有效裂开岩层等一系列的挑战和限制。在这样的背景下，微支撑剂作为一种新兴的增产技术正在引起广泛关注和深入研究。

本文主要从微支撑剂的定义、类型及其性能，包括优异的物理性能(高抗压强度和化学稳定性)和良好的输送性能(低沉降速率)。现状显示，微支撑剂在页岩气和致密砂岩气开采中已经取得了显著成果，但仍面临环保和高温高压条件下的挑战。未来的发展趋势包括改进微支撑剂的环保性能和适应极端情况的能力，以提高其应用效率和环境友好性。

2. 微支撑剂的定义及其特点

支撑剂的粒径大小通常用支撑剂“目数”表示，目数指的是每平方英寸筛网上的孔眼数目，目数越高，孔眼越多。支撑剂的目数表示能够通过筛网的支撑剂粒径，支撑剂目数越高，其粒径越小[1]。支撑剂目数与粒径之间的关系如图1所示。

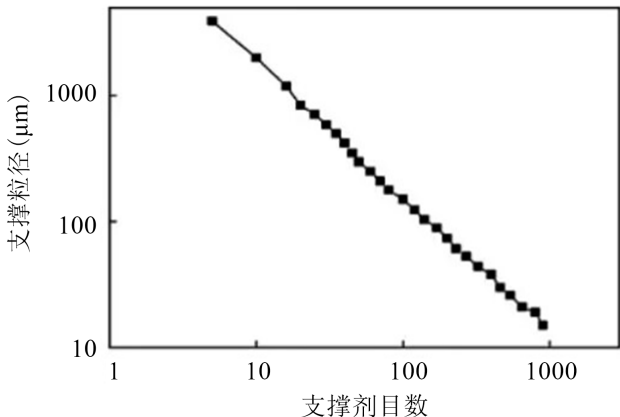


Figure 1. The relationship between proppant diameter and proppant mesh (logarithmic coordinate)

图1. 支撑剂粒径与目数关系图(对数坐标)

微支撑剂以微观尺度优势和精确控制能力著称,能够在油气井内形成稳定的支撑网络,提升压裂缝的稳定性和产能。通常微支撑剂被定义为目数大于 100 目即粒径小于 $150\ \mu\text{m}$ 的支撑剂,下图 2 为两种典型的网目大小以及相关的扫描电子显微照片(全部在 100 倍放大倍数下)用于尺寸比较。

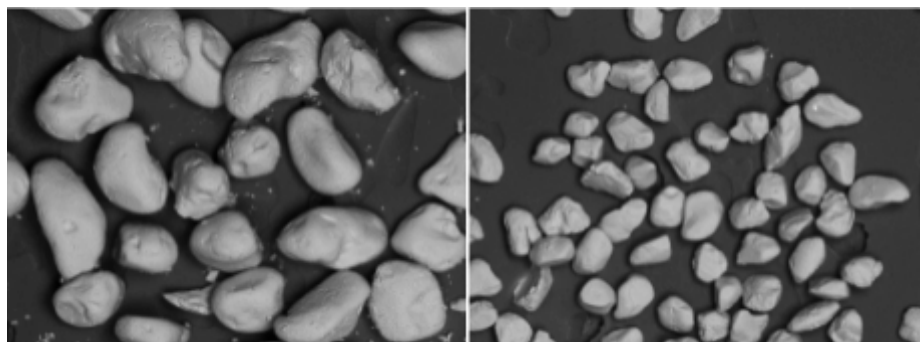


Figure 2. Schematic diagram of 100 mesh proppant and 200 mesh proppant (micro proppant)

图 2. 100 目支撑剂与 200 目支撑剂(微支撑剂)示意图

3. 微支撑剂的类型

微支撑剂主要分为纳米颗粒型支撑剂和纳米纤维型支撑剂。纳米颗粒型支撑剂具有纳米级别的颗粒尺寸,通常是各种金属氧化物或其他纳米材料,如二氧化硅、氧化铁等。它们能够形成高度稳定和有效的支撑结构,用于增强压裂缝的稳定性和持久性[2]。纳米纤维型支撑剂包括纳米级的纤维状结构,如碳纳米管或纳米纤维,具有高比表面积和优异的力学性能,能够形成复杂的三维网络,提升油气开采的产能和效率。而且微支撑剂粒径更小,更容易进入未开发区块的裂缝或次生裂缝网络中,下图 3 为微支撑剂进入未开发裂缝示意图。

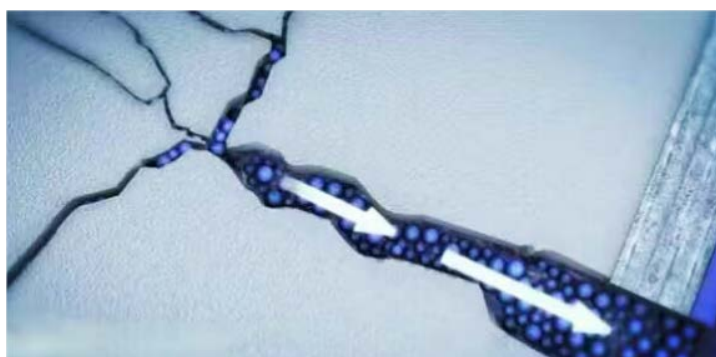


Figure 3. Schematic of micro-proppant entry into an unexplored fracture

图 3. 微支撑剂进入未开发裂缝示意图

微支撑剂主要用于油气开采和地下储层改造,特别是在低渗透油气藏中,微支撑剂的应用尤为显著,能够显著改善油气流动路径和采收率。

4. 微支撑剂性能

微支撑剂与传统压裂支撑剂在油气开采中有显著差异。微支撑剂具有非常良好的填隙效果和力学支撑,而传统支撑剂则以粗糙颗粒填充为主,在复杂地质环境下表现不稳定,难以实现良好的裂缝支撑和维持效果,而且其较大尺寸可能导致环境风险增加[3]。微支撑剂在环保性和技术创新方面显示出明显优势,尽管其仍在

技术发展阶段，但具有巨大的应用潜力和研究价值。下表 1 为传统支撑剂与微支撑剂在几个方面的对比。

Table 1. Comparative analysis of conventional proppant and micro proppant
表 1. 传统支撑剂与微支撑剂的对比分析

	尺寸和形态	作用机制	环境影响
传统支撑剂	通常为粗糙或球状颗粒，直径常在数百微米至毫米级别。	主要通过填充和支撑作用维持压裂缝的稳定。	由于尺寸较大和材料特性，可能导致地质风险和环境污染的问题，尤其是对地下水资源的影响。
微支撑剂	具有微米级的尺寸，形态多样，例如纳米纤维、纳米颗粒或类似物，具有高比表面积和特定的结构形态。	不仅填充缝隙，更重要的是能够形成坚固的三维网络结构，有效防止岩石闭合，提升了压裂缝的持久性和产能。	由于尺寸小、稳定性高以及化学惰性，相对环境友好，减少了地表和地下水资源的污染风险。

微支撑剂和常规支撑剂的主要差异在于颗粒大小和应用效果。微支撑剂颗粒较小，能够更好地填充岩石裂缝，提高流体的导流能力，适合于复杂地质条件和低渗透油气藏。而常规支撑剂颗粒较大，主要用于标准的水力压裂作业，适合中等渗透性地层。

4.1. 物理性能

由于粒径较小，微支撑剂不仅可以进入较小宽度的裂缝，而且沉降速度也会有所改善，因为沉降速度随颗粒尺寸的减小而成比例降低。实验室测试表明，标准 100 目支撑剂的沉降速度比微支撑剂快 3 倍 [4]。传统支撑剂与微支撑剂系列沉降速度的比较如图 4 所示。由于沉降速度显著降低，这些微支撑剂具有较强的运移能力。流动性能的加强使得支撑剂可以在低粘度流体和低体积流量下保持悬浮。改进的悬浮性能使得微支撑剂可以通过不规则和复杂几何形状的次生裂缝并远离井眼 [5]。由于可以接近裂缝尖端并增加裂缝有效长度因此可以获得更多的支撑面积。

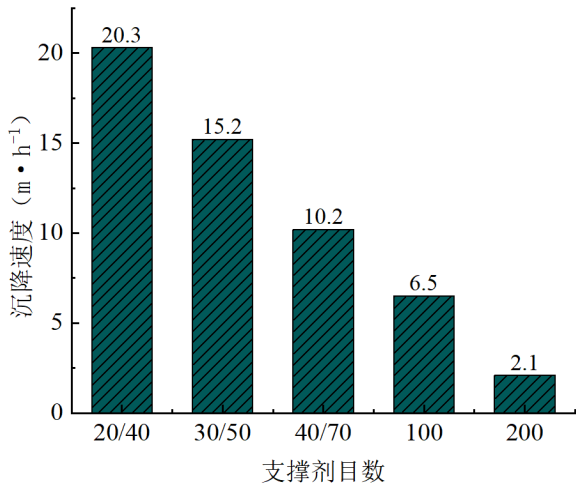


Figure 4. Comparison of settling velocity between conventional proppant and micro proppant series
图 4. 传统支撑剂与微支撑剂系列沉降速度的比较

4.2. 输送性能及增产机理

2013 年，Nguyen 等人首次进行微支撑剂实验室研究以来，微支撑剂已被广泛接受，两年后首次在

Barnett 页岩中进行了现场应用(Dahl, 2015) [6]。早期应用的主要目标是缓解非常规区块的产量下降。在复杂裂缝网络中产生的大多数未支撑的微裂缝在液压释放后不久就会恢复到闭合状态，或者在应用压降后立即开始生产。

微支撑剂在注入到井底后，会形成一个复杂的三维支撑网络结构，这些微小的颗粒或纤维能够填充和牢固支撑裂缝内的各种微小空隙和裂隙，防止岩石再次闭合，保持裂缝的开放状态[7]。下图 5 是未被支撑的微裂缝示意图。形成的支撑网络显著增强了水力压裂的效果和持久性，从而增加了裂缝的有效渗透面积和油气的流通过程。这种优化效果尤其在低渗透油气藏中尤为重要，即微支撑剂在形成的支撑网络中通过填充、支撑和稳定裂缝，可以显著提升水力压裂技术的效率和可靠性。

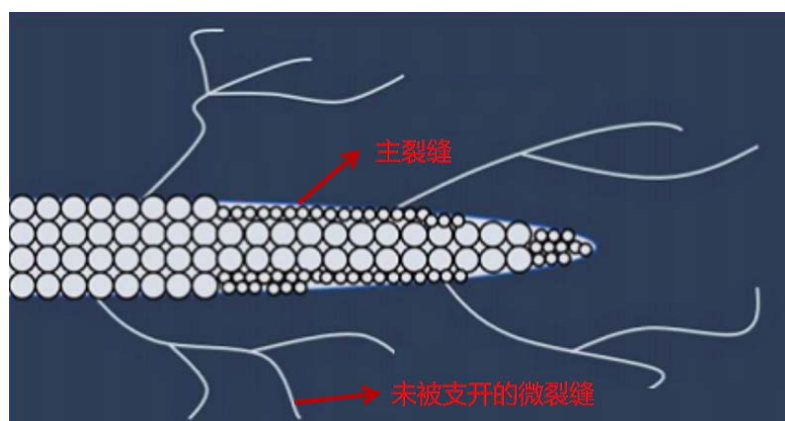


Figure 5. Unsupported microcracks

图 5. 未被支撑的微裂缝

5. 微支撑剂的适应能力

(1) 地质条件适应能力

多样性适应：微支撑剂的种类和形态多样，可以根据不同的地质条件选择合适的类型。例如，纳米颗粒型微支撑剂可以适应不同类型的岩石裂缝，填充微小的孔隙和裂隙；而纳米纤维型微支撑剂则能够形成更复杂的三维网络，适应复杂的地质结构[8]。

耐高压环境：在高压水力压裂环境下，微支撑剂能够稳定存在并有效地填充压裂缝，防止岩层闭合。这种能力使得微支撑剂在深井和高温高压条件下依然能够发挥作用，提高了压裂效果和持久性。

(2) 井筒环境适应能力

抗酸碱性能：微支撑剂通常具有良好的化学稳定性和抗酸碱性能，能够在酸性或碱性压裂液环境中保持稳定，不会被腐蚀或溶解。这种特性使得微支撑剂能够在各种井筒处理和压裂液条件下使用，确保其长期有效性[9]。

环境友好性：微支撑剂通常设计成环境友好型材料，不会对地下水或周围环境造成污染或其他负面影响。这一点对于符合现代环保标准的油气开采项目尤为重要，使得微支撑剂成为可持续开采技术的重要组成部分。

6. 发展趋势

(1) 材料创新

功能性材料：开发具有特定功能的微支撑剂，例如对酸碱环境具有更好抗性的材料、具有自修复能力的材料等，以应对复杂的地层和井筒环境条件。

生物可降解材料：研发生物可降解的微支撑剂，以减少其对环境的长期影响，符合可持续发展的要求。

(2) 技术应用扩展

多层次应用：将微支撑剂技术扩展到不同类型的油气藏和地质条件中，包括低渗透油气藏、复杂岩石结构和高压高温条件下的应用。

多功能组合应用：探索微支撑剂与其他增产技术的结合应用，如与水基纳米流体结合使用，以进一步优化油气开采效果[10]。

7. 结束语

在现代油气开采技术中，微支撑剂在水力压裂中作为一项关键技术，展现出了显著的应用优势和多重功能。通过优化裂缝的支撑效果和增强地层的抗压能力，微支撑剂有效地提升了水力压裂的成功率和产能效率，特别是在面对复杂地质条件时表现突出。支撑剂的性能要求也不断变得严格，以往的石英砂支撑剂以及陶粒支撑剂已远远不能满足现在的压裂施工所需要的条件，微支撑剂的应用在未来将会随着压裂工艺的精进更加完善。其环保和可持续发展的特性也使得其在环境保护和资源利用效率方面具备了重要意义。随着技术的不断创新和进步，微支撑剂的应用前景更加广阔，将继续为油气工业的发展注入新的动力和可能性。

基金项目

重庆科技大学创新计划项目“深层海相碳酸盐岩储层酸化实验研究”(2024201019)。

参考文献

- [1] 白冰洋. 微支撑剂在粗糙裂缝内的运移与支撑规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- [2] 张敬春, 任洪达, 俞天喜, 等. 压裂支撑剂研究与应用进展[J]. 新疆石油天然气, 2023, 19(1): 27-34.
- [3] Unconventional Resources Technology Conference: 20-22 July 2020, Austin, Texas, USA: Unconventional Resources Technology Conference, 1-14.
- [4] Kim, B.Y., Akkutlu, I.Y., Martysevich, V. and Dusterhoft, R. (2018) Laboratory Measurement of Microproppant Placement Quality Using Split Core Plug Permeability under Stress.
- [5] Calvin, J., Grieser, B. and Bachman, T. (2017) Impact of Microproppant on Production in the SCOOP Woodford Shale: A Case History.
- [6] Dahl, J., Calvin, J., Siddiqui, S., Nguyen, P., Dusterhoft, R., Holderby, E., *et al.* (2015) Application of Micro-Proppant in Liquids-Rich, Unconventional Reservoirs to Improve Well Production: Laboratory Results, Field Results, and Numerical Simulations.
- [7] 崔冰峡, 刘军, 陈耀斌, 等. 陶粒压裂支撑剂研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2): 458-463.
- [8] 刘让杰, 张建涛, 银本才, 等. 水力压裂支撑剂现状及展望[J]. 钻采工艺, 2003(4): 42-45+48.
- [9] Kumar, D., Gonzalez, R.A. and Ghassemi, A. (2019) The Role of Micro-Proppants in Conductive Fracture Network Development.
- [10] 邹雨时, 张士诚, 马新仿. 页岩气藏压裂支撑裂缝的有效性评价[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 52-55.