

纤维对支撑剂回流影响实验研究

杨松林¹, 张华英², 杨晨曦¹, 钱雅慧^{3*}

¹中国石油化工股份有限公司西南油气分公司采气三厂, 四川 德阳

²成都理工大学博物馆, 四川 成都

³重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年2月4日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月16日

摘要

支撑剂回流对压裂井有着不利影响, 为消除或减小回流的影响, 油气田上提出许多种办法, 其中纤维控制支撑剂回流技术具有工艺简单, 压后简单, 压后快速返排的特点。为此开展纤维对支撑剂回流影响的实验研究。本文通过室内回流实验, 系统研究了不同浓度纤维对40/70目陶粒和30/50目石英砂支撑剂回流临界流量的影响规律。实验在5~45 MPa闭合压力范围内进行模拟实验。结果表明: 纤维的加入能显著提升两种支撑剂的抗回流能力。对于40/70目陶粒, 当纤维浓度为0.3%时, 其抗回流性能最优, 在5 MPa闭合压力下临界流速可达0.80 m/s。对于30/50目石英砂, 纤维浓度在0.1%~0.2%时效果较好, 继续增加浓度提升效果不明显。纤维的稳定效果在低闭合压力下更为显著。本研究为水力压裂施工中优化纤维加量以控制支撑剂回流、维持裂缝导流能力提供了实验依据。

关键词

水力压裂, 支撑剂回流, 纤维, 临界流速

Experimental Study on the Effect of Fibers in Controlling Proppant Flowback

Songlin Yang¹, Huaying Zhang², Chenxi Yang¹, Yahui Qian^{3*}

¹Gas Production Plant No.3, Sinopec Southwest Oil & Gas Company, China Petroleum & Chemical Corporation, Deyang Sichuan

²The Museum of Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

³College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: February 4, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 16, 2026

*通讯作者。

文章引用: 杨松林, 张华英, 杨晨曦, 钱雅慧. 纤维对支撑剂回流影响实验研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(1): 134-144. DOI: 10.12677/jogt.2026.481016

Abstract

Proppant flowback exerts an adverse impact on fractured wells. To eliminate or mitigate such impact, a variety of approaches have been proposed in oil and gas fields, among which the fiber-based proppant flowback control technology is featured by simple processes, easy post-fracturing operations and rapid post-fracturing flowback. For this reason, an experimental study on the influence of fibers on proppant flowback was conducted. In this paper, through laboratory flowback experiments, the influence laws of fibers with different concentrations on the critical flowback rates of 40/70 mesh ceramic proppants and 30/50 mesh quartz sand proppants were systematically investigated. Experiments were performed under simulated closure pressures ranging from 5 MPa to 45 MPa. The results indicate that the addition of fibers significantly enhances the flowback resistance of both types of proppant. For 40/70 mesh ceramic proppant, the optimal flowback resistance was achieved at a fiber concentration of 0.3%, with a critical flow velocity reaching 0.80 m/s under a closure pressure of 5 MPa. For 30/50 mesh quartz sand, a fiber concentration between 0.1% and 0.2% yielded the best improvement in flowback resistance, while further increasing the concentration showed no significant additional benefit. The stabilizing effect of fibers was more pronounced under lower closure pressures. This study provides experimental evidence for optimizing fiber dosage in hydraulic fracturing operations to control proppant flowback and maintain fracture conductivity.

Keywords

Hydraulic Fracturing, Proppant Flowback, Fiber, Critical Flow Velocity

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

在实际生产中,地层流体产出易引发支撑剂回流,不仅冲蚀损坏井下与地面设备、增加运维风险,更会导致裂缝闭合、导流能力下降,严重制约油气井长期稳产[1],储层应力、流体流速、支撑剂粒径与强度等影响因素对其有很大的影响。为控制该问题,采用纤维加砂压裂,因操作简便、效果显著成为主流技术之一[2]。纤维混入携砂液后形成复合支撑体系,通过多重机理稳固支撑剂:与颗粒间产生摩擦作用,分散形成空间交联网状结构增强内聚力,同时提升砂拱阻力与耐冲刷性,使松散支撑剂形成整体[3][4]。近年来,针对纤维复合压裂体系的研究不断深入,可降解聚乳酸纤维、改性聚酯纤维等新型纤维材料被应用于压裂工程,其耐温耐盐性能与支撑剂协同作用效果得到显著提升,为低渗透油气藏压裂提供了新的技术路径[4][5];而纤维-树脂复合胶凝体系的研究,更是实现了支撑剂充填层的立体加固,大幅降低了高流速工况下的回流风险。

支撑剂回流控制技术的研发也朝着材料复合化、性能精准化方向发展,纳米二氧化硅改性的纤维压裂液可通过颗粒吸附与纤维缠绕的双重作用,进一步优化支撑剂的悬浮与稳定效果;超亲水改性纤维则能通过改善与压裂液的相容性,提升纤维在支撑剂颗粒间的分散性,避免局部团聚导致的加固失效[5]。此外,针对非常规油气藏高闭合压力的工况特点,耐高压弹性纤维的研究实现了纤维网络在高压下的结构保形性,有效解决了传统纤维易被压实剪断的问题[6]。目前纤维控回流技术已在国内外油田推广,但现有研究多聚焦于单一纤维类型或单一支撑剂体系,对于不同粒径支撑剂与纤维浓度的适配规律,尤其

最佳添加浓度与地层闭合压力的耦合关系，仍缺乏系统的实验验证，且新型纤维材料的现场应用参数尚未形成统一标准，难以指导不同储层条件下的精准施工[7]。

基于此，本文以 40/70 目陶粒与 30/50 目石英砂支撑剂为对象，开展不同纤维浓度下的回流室内模拟实验，测量不同闭合压力下的回流临界流量，分析二者对支撑剂充填层稳定性的影响。本研究可厘清核心参数耦合机制，填补理论空白，同时为现场纤维选型与浓度优化提供实验依据，有效控制回流问题，保障裂缝导流能力与油气井稳产，对提升非常规油气开发效率、降低成本具有重要价值[8]。

2. 实验材料与设备

实验所用支撑剂为 40/70 目陶粒与 30/50 目石英砂，两种支撑剂的性能参数均严格符合 SY/T 5108-2016《水力压裂和砾石充填作业用支撑剂性能评价方法》行业标准，可有效模拟现场支撑剂的导流与铺置特性。实验所用纤维为油气田压裂专用合成纤维，具有优异的耐高温性能、耐酸碱腐蚀性及良好的分散性。压裂液采用现场常用的低黏度破胶液，实验前配置其黏度为 1~2 mPa·s。

实验主要设备包括：裂缝导流能力测试仪(型号：DL-2000)，是本次支撑剂回流实验的关键装置(如图 1)，同时 API 标准线性导流槽内上下分别有两块相近尺寸大小的钢板，用于模拟地层岩板，上下钢板之间的区域即为支撑剂充填层铺置区域；液压加载系统，配套高精度压力传感器；恒温系统，能维持实验过程中裂缝模型及压裂液的温度稳定性；精密输液泵，可实现压裂液的恒速注入；计算机采集系统、数据控制处理软件；导流室出口处添加了一个有机玻璃砂样回收器(如图 2)；裂缝模型采用高强度钢板模拟，其内部空腔尺寸为长 17.6 cm、宽 3.6 cm、高 1.5 cm。



Figure 1. Fracture conductivity testing instrument (Model: DL-2000)

图 1. 裂缝导流能力测试仪(型号：DL-2000)



Figure 2. Flowback test conductivity cell

图 2. 回流实验导流室

3. 实验方法

实验前,首先启动 DL-2000 型裂缝导流能力测试仪,进行 30 分钟预热处理,使仪器核心部件温度达到稳定状态;同时按照标准对上下游压力表及闭合压力传感器进行校准,校准精度控制在 ± 0.01 MPa 以内,消除仪器系统误差。随后拆卸导流仪 API 导流室出口의普通接头,更换为定制化回流专用接头,确保接头与导流室、下游管线的密封贴合,避免压裂液渗漏;借助配套钢板工装对裂缝高度进行校零操作,校零后进行误差控制,确保裂缝模型初始尺寸一致性。

将 40/70 目陶粒与 30/50 目石英砂分别通过标准筛网进行二次筛分,去除杂质及不合格粒径颗粒,随后采用电子天平称取预定质量的支撑剂,保证每次实验支撑剂铺置浓度一致。若实验涉及纤维添加,需在干燥环境下将纤维与支撑剂按照设定比例混合,且要确保纤维均匀分散于支撑剂中,避免局部纤维团聚影响抑回流效果。

将处理好的支撑剂装入导流室的裂缝模型中,随后将导流室置于液压机上,施加 5.0 MPa 的初始闭合应力。接着,连接回流集砂器及下游管线以构成完整的回流测试系统,并设定预热罐与导流室至目标温度。待导流室温度稳定至设定值并保持 15 分钟后,以 10 mL/min 的初始流量向系统内泵入预制好的低黏度破胶液。实验过程中密切监测下游集砂器,若其内液体出现浑浊或可见支撑剂颗粒,则判定发生支撑剂回流,随即停止实验,记录此时的临界流量与实时缝宽。单次压力点实验完成后,以 10 MPa 为增量逐级提高闭合压力至下一预设测试点(预设压力点为 5 MPa、15 MPa、25 MPa、35 MPa、45 MPa,覆盖现场常见闭合压力范围),稳压 10 分钟后重复上述温度稳定、压裂液注入、回流监测及数据记录步骤。直至完成所有预设压力条件下的实验。

实验方案涵盖两种支撑剂(40/70 目陶粒、30/50 目石英砂),每种支撑剂分别测试纤维添加浓度为 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%的情况。

4. 结果与分析

4.1. 0.0%纤维对 40/70 目陶粒支撑剂回流的影响

估计是由于钢板和密封材料的原因,40/70 目陶粒临界流量似乎偏大,为了确定纤维对支撑剂回流临界流速的影响,采用钢板开展了 40/70 目陶粒实验,实验结果见图 3。

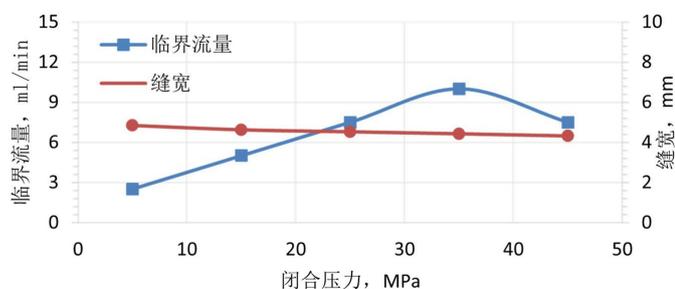


Figure 3. Results of the flowback experiment for 40/70 mesh ceramic proppant
图 3. 40/70 目陶粒回流实验结果

4.2. 0.1%纤维对 40/70 目陶粒支撑剂回流的影响

同样采用钢板做 40/70 目陶粒 + 0.1%纤维回流实验,实验结果见图 4。对比 40/70 目陶粒实验结果,除在 35 MPa 外支撑剂回流临界流速都提高了,表明纤维有助于稳定支撑剂充填层。这是因为纤维加入支撑剂体系后,会在支撑剂颗粒之间形成三维网络结构,增强了颗粒间的相互作用力和空间约束,同时,

裂缝宽度也增大了。

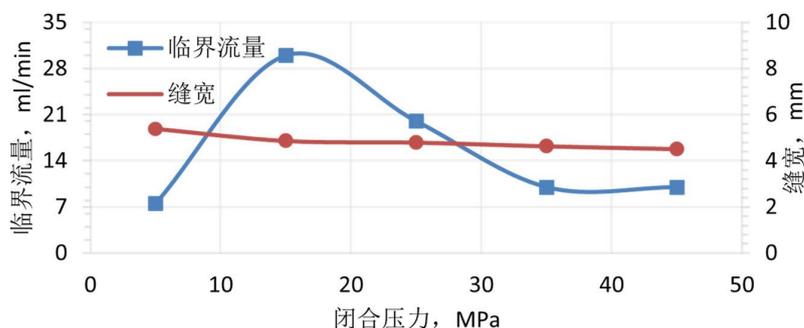


Figure 4. Results of the flowback experiment for 40/70 mesh ceramic proppant with 0.1% fibers
图 4. 40/70 目陶粒 + 0.1%纤维回流实验结果

4.3. 0.2%纤维对 40/70 目陶粒支撑剂回流的影响

40/70 目陶粒 + 0.2%纤维回流实验结果图 5。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量先增大后减小。5 MPa 时的临界流量为 50 ml/min，15 MPa 时的临界流量为 80 ml/min，而 45 MPa 闭合压力时在 20 ml/min 发生回流。与加入 0.1%回流实验结果相比，0.2%纤维的临界流量在所有闭合压力下都明显更高。这是因为纤维含量增加后，会形成更致密的三维网络结构，对支撑剂颗粒的桥接、缠绕与约束作用随之增强，使得支撑剂充填层的稳定性大幅提升，只有当流体流速达到更高水平时，才能将颗粒携带流出。

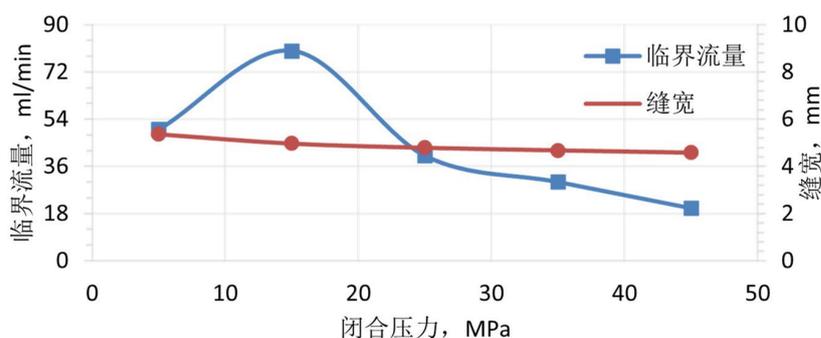


Figure 5. Results of the flowback experiment for 40/70 mesh ceramic proppant with 0.2% fibers
图 5. 40/70 目陶粒 + 0.2%纤维回流实验结果

4.4. 0.3%纤维对 40/70 目陶粒支撑剂回流的影响

40/70 目陶粒 + 0.3%纤维回流实验结果见图 6。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量逐渐提高。5 MPa 时的临界流量为 100 ml/min，25 MPa 时的临界流量为 30 ml/min，而 45 MPa 闭合压力时在 10 ml/min 发生回流。与加入 0.2%的纤维回流实验结果相比，加入 0.3%的纤维明显提高了支撑剂回流临界流量。这是因为致密的纤维网络也减少了支撑剂颗粒间的孔隙，降低了流体穿透和携带颗粒的效率，因此需要更高的流量才能引发回流

0.3%纤维体系的裂缝宽度在低闭合压力(5 MPa)时比 0.2%更高，但随着压力升高，下降幅度也更大。因为在初期更多的纤维在低压力下能更有效地支撑裂缝，分散应力，维持更大的开度。而在后期在高闭合压力下，过量的纤维可能因过度压实而发生变形或失效，导致支撑剂充填层的结构稳定性略有下降，裂缝宽度随之降低。

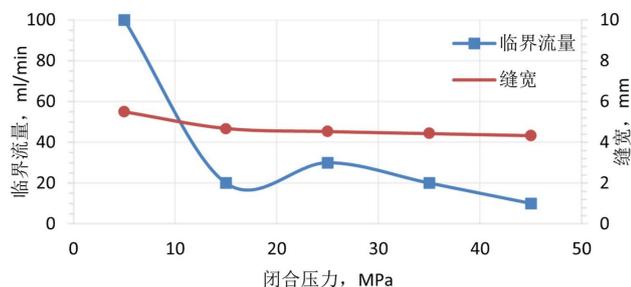


Figure 6. Results of the flowback experiment for 40/70 mesh ceramic proppant with 0.3% fibers
图 6. 40/70 目陶粒 + 0.3%纤维回流实验结果

4.5. 0.4%纤维对 40/70 目陶粒支撑剂回流的影响

40/70 目陶粒 + 0.4%纤维回流实验结果见图 7。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量先提高后降低。5 MPa 时的临界流量为 70 ml/min，25 MPa 时的临界流量为 20 ml/min，而 45 MPa 闭合压力时在 20 ml/min 发生回流。对比 0.3%与 0.4%纤维的实验结果可以发现，支撑剂的临界返排流量不升反降，在 5 MPa 低闭合压力下尤为明显，且全压力区间的临界流量均未超过 0.3%体系，而裂缝宽度也未展现进一步提升，这说明纤维浓度对支撑剂稳定性的提升存在饱和效应，0.3%左右是该实验条件下的最优浓度，继续增加纤维浓度不仅无法增强抗返排能力，还可能因颗粒过度缠绕、孔隙堵塞或压实失效而削弱充填层的稳定性。

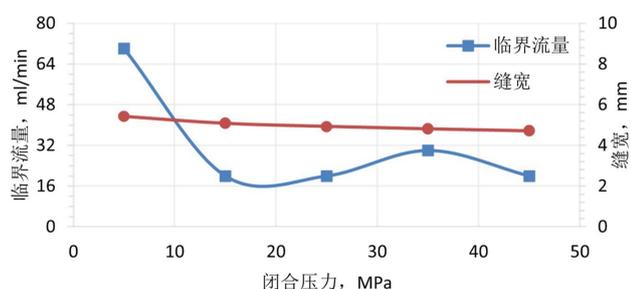


Figure 7. Results of the flowback experiment for 40/70 mesh ceramic proppant with 0.4% fibers
图 7. 40/70 目陶粒 + 0.4%纤维回流实验结果

4.6. 0.0%纤维对 30/50 目石英砂支撑剂回流的影响

30/50 目石英砂 + 0%纤维回流实验结果见图 8。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量先提高后降低。5 MPa 时的临界流量为 2 ml/min，25 MPa 时的临界流量为 6 ml/min，而 35 MPa 闭合压力时在 8 ml/min 发生回流。

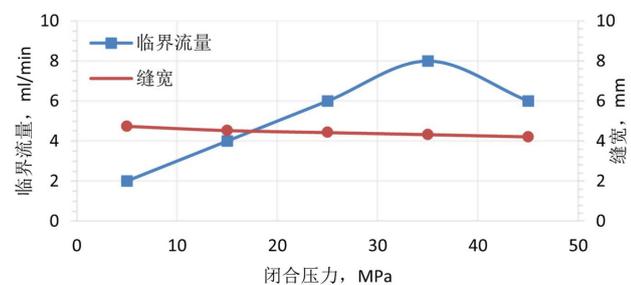


Figure 8. Results of the flowback experiment for 30/50 mesh quartz sand with 0% fibers
图 8. 30/50 目石英砂 + 0%纤维回流实验结果

4.7. 0.1%纤维对 30/50 目石英砂支撑剂回流的影响

30/50 目石英砂 + 0.1%纤维回流实验结果见图 9。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量先提高后降低。5 MPa 时的临界流量为 6 ml/min，15 MPa 时的临界流量为 24 ml/min，而 35 MPa 闭合压力时在 8 ml/min 发生回流。这是因为在 5~15MPa 的低 - 中压阶段，纤维在支撑剂颗粒间形成桥接与缠绕结构，随着压力升高，充填层被压实，纤维的约束作用进一步增强，提升了充填层的抗冲刷能力，从而使临界流量上升；而当压力超过 15 MPa 进入中 - 高压阶段时，过度的压实会让颗粒间空隙急剧减小，纤维被挤压、剪断而失去有效约束，甚至导致支撑剂颗粒破碎产生易被携带的碎屑，此时压力的破坏效应超过了纤维的加固效应，使得回流临界流量随之下降。整体来看，0.1%纤维的加入确实提升了支撑剂的抗回流能力，且在 15 MPa 左右时效果最佳。

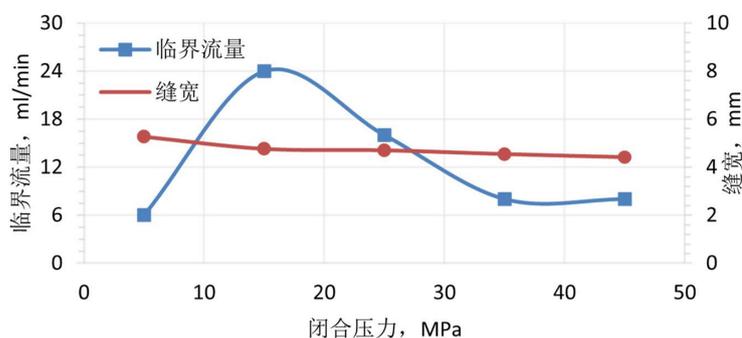


Figure 9. Results of the flowback experiment for 30/50 mesh quartz sand with 0.1% fibers
图 9. 30/50 目石英砂 + 0.1%纤维回流实验结果

4.8. 0.2%纤维对 30/50 目石英砂支撑剂回流的影响

30/50 目石英砂 + 0.2%纤维回流实验结果见图 10。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量先提高后降低。5 MPa 时的临界流量为 40 ml/min，15 MPa 时的临界流量为 64 ml/min，而 35 MPa 闭合压力时在 24 ml/min 发生回流。与加入 0.1%回流实验结果相比，加入 0.2%的纤维明显提高了支撑剂回流临界流量。在 5~15 MPa 的阶段，随着压力升高，充填层被压实，纤维的约束作用进一步增强，抗冲刷能力显著提升，临界流量从 40 mL/min 上升至 64 mL/min；当压力超过 15 MPa 时，压力的破坏效应超过纤维的加固效应，临界流量随之下降，在 35 MPa 时降至 24 mL/min。与 0.1%纤维体系相比，0.2%纤维在各压力下的回流临界流量均更高，说明增加纤维浓度能进一步提升支撑剂的抗回流能力，且同样在 15 MPa 左右时效果最佳。

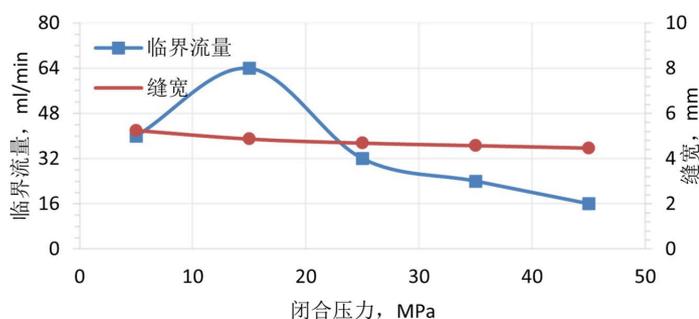


Figure 10. Results of the flowback experiment for 30/50 mesh quartz sand with 0.2% fibers
图 10. 30/50 目石英砂 + 0.2%纤维回流实验结果

4.9. 0.3%纤维对 30/50 目石英砂支撑剂回流的影响

30/50 目石英砂 + 0.3%纤维回流实验结果见图 11。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量呈现波动。5 MPa 时的临界流量为 80 ml/min，显示高浓度纤维在初始状态下即可形成强约束网络；15 MPa 时的临界流量为 16 ml/min，临界流量出现阶段性下降，反映过度压缩导致部分纤维结构失效；而 25 MPa 闭合压力时在 24 ml/min 发生回流。与加入 0.2%回流实验结果相比，0.3%纤维在各压力节点上的回流临界流量均处于更高水平，说明进一步提升纤维浓度可增强支撑剂充填层的抗冲刷能力，但过高压力仍会破坏纤维的约束作用，导致临界流量出现波动而非持续上升。

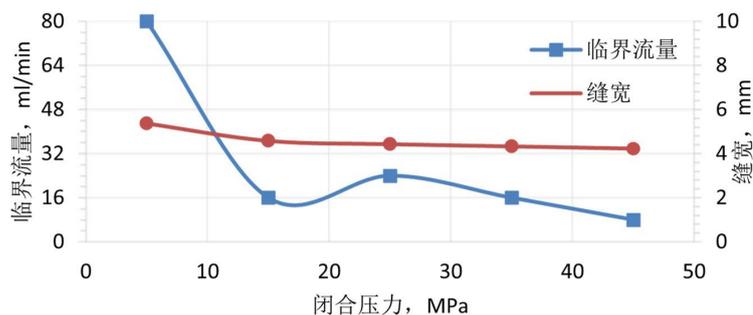


Figure 11. Results of the flowback experiment for 30/50 mesh quartz sand with 0.3% fibers
图 11. 30/50 目石英砂 + 0.3%纤维回流实验结果

4.10. 0.4%纤维对 30/50 目石英砂支撑剂回流的影响

30/50 目石英砂 + 0.4%纤维回流实验结果见图 12。随着闭合压力的增大，支撑剂回流临界流量呈现波动。5 MPa 时的临界流量为 56 ml/min，但已低于 0.3%纤维体系的初始值；随着压力升至 15 MPa，临界流量骤降至 16 mL/min，显示高浓度纤维在中等压力下更易因过度挤压而失去约束作用；后续压力继续升高至 35 MPa 时，临界流量仅小幅回升至 24 mL/min，整体抗冲刷能力未得到有效提升。与 0.3%纤维体系相比，0.4%纤维在各压力节点的回流临界流量并未出现明显优势，说明纤维浓度的提升存在边际效应，当浓度超过 0.3%后，继续增加纤维用量无法进一步增强支撑剂的抗回流能力，甚至可能因纤维堆积反而削弱充填层结构稳定性。

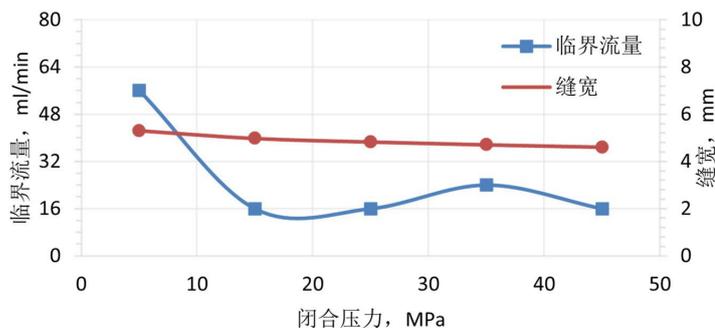


Figure 12. Results of the flowback experiment for 30/50 mesh quartz sand with 0.4% fibers
图 12. 30/50 目石英砂 + 0.4%纤维回流实验结果

4.11. 结果对比

不同纤维浓度下 40/70 目陶粒与 30/50 目石英砂的支撑剂回流临界流速随闭合压力的变化规律分别

如表 1~表 4 所示, 两类支撑剂的抗回流性能对纤维浓度的响应存在显著差异, 核心差异根源并非仅为陶粒与石英砂的材料属性差异, 支撑剂粒径级配带来的颗粒接触特征、孔隙结构及纤维网络适配性是决定最佳纤维浓度的关键物理机制, 材料的表面特性仅为次要影响因素。

无纤维添加时, 40/70 目陶粒充填层的临界流速为 0.02~0.10 m/s, 30/50 目石英砂为 0.02~0.06 m/s, 石英砂临界流速整体更低。此现象并非仅因石英砂表面更光滑、颗粒间摩擦力小, 更核心的是 30/50 目粗粒径石英砂的颗粒间接触点更少, 充填层孔隙尺寸更大且孔隙分布更不均, 流体易形成高速渗流通道, 携带颗粒的效率更高; 而 40/70 目细粒径陶粒的颗粒比表面积更大、接触点更密集, 充填层孔隙更细小且连通性更差, 流体穿透和携砂的阻力天然更高, 这也是粗粒径支撑剂更易发生回流的核心粒径机理。

添加纤维后, 两类不同粒径支撑剂对纤维浓度的适配性呈现截然不同的规律, 本质是纤维网络的形成效率与支撑剂粒径带来的孔隙尺度、颗粒包裹需求高度相关。

对于 40/70 目细粒径陶粒, 其最佳纤维浓度为 0.3%。细粒径陶粒的颗粒尺寸小, 单个体积对应的包裹面积大, 且充填层孔隙细小, 需要更高浓度的纤维才能在颗粒间形成连续、致密的三维网络结构: 0.1%~0.2%纤维仅能在局部颗粒间形成桥接与缠绕, 无法实现全充填层的纤维网络覆盖, 而当浓度提升至 0.3%时, 纤维可充分填充细粒径形成的微小孔隙, 在大量颗粒接触点间形成有效拉结, 大幅增强颗粒间的内聚力和砂拱稳定性, 因此临界流速在 5 MPa 低闭合压力下高达 0.80 m/s; 当纤维浓度超过 0.3%至 0.4%时, 细粒径陶粒的孔隙空间已无法容纳更多纤维, 过量纤维会在颗粒表面团聚, 反而破坏充填层的初始堆积结构, 导致纤维网络的约束作用下降, 临界流速出现回落, 呈现纤维浓度的饱和效应。

对于 30/50 目粗粒径石英砂, 其最佳纤维浓度为 0.1%~0.2%, 继续提升浓度无法实现抗回流性能的持续增强, 甚至出现性能波动。粗粒径石英砂的颗粒尺寸大, 颗粒间接触点少且充填层孔隙尺度大, 纤维网络的形成无需高浓度即可实现有效覆盖: 0.1%~0.2%的纤维可在粗颗粒的关键接触点间形成桥接, 依托大孔隙的空间形成跨孔隙的网状结构, 有效提升砂拱的抗冲刷能力, 在 5 MPa 和 15 MPa 下临界流速分别达到 0.31 m/s 和 0.68 m/s; 当纤维浓度提升至 0.3%及以上时, 粗粒径的大孔隙中会出现纤维的过度堆积, 部分纤维无法与颗粒形成有效结合, 反而成为充填层的薄弱环节, 在闭合压力作用下, 堆积的纤维易被挤压、剪断, 导致纤维网络结构失效, 临界流速出现大幅波动且整体呈下降趋势。同时, 粗粒径颗粒的单个体积包裹面积小, 高浓度纤维无法充分发挥缠绕与约束作用, 进一步降低了纤维的利用效率, 这也是粗粒径支撑剂对纤维浓度更敏感、最佳浓度更低的核心原因。

从闭合压力与粒径的耦合效应来看, 低闭合压力(5~15 MPa)下, 纤维对不同粒径支撑剂的稳定效果均更显著, 且粒径差异带来的最佳纤维浓度差异更突出。低压力下支撑剂充填层的孔隙结构未被压实, 细粒径陶粒的微小孔隙需要高浓度纤维填充形成网络, 粗粒径石英砂的大孔隙仅需低浓度纤维即可形成有效桥接; 而在高闭合压力(25~45 MPa)下, 各类支撑剂的充填层均被压实, 孔隙尺寸大幅减小, 纤维网络的作用均因压实而被削弱, 粒径带来的孔隙结构差异被压缩, 因此不同粒径支撑剂在高压下的临界流速差异逐渐缩小, 纤维浓度的影响也随之降低。

Table 1. Effect of fibers on critical flow rate (40/70 mesh ceramic proppant)

表 1. 纤维对临界流量的影响(40/70 目陶粒)

闭合压力, MPa	临界流量, ml/min				
	0.0%纤维	0.1%纤维	0.2%纤维	0.3%纤维	0.4%纤维
5	2.5	7.5	50	100	70
15	5	30	80	20	20

续表

25	7.5	20	40	30	20
35	10	10	30	20	30
45	7.5	10	20	10	20

Table 2. Effect of fibers on critical flow velocity (40/70 mesh ceramic proppant)**表 2.** 纤维对临界流速的影响(40/70 目陶粒)

闭合压力, MPa	临界流速, m/s				
	0.0%纤维	0.1%纤维	0.2%纤维	0.3%纤维	0.4%纤维
5	0.02	0.06	0.41	0.80	0.57
15	0.05	0.27	0.71	0.19	0.17
25	0.07	0.18	0.37	0.29	0.18
35	0.10	0.09	0.28	0.20	0.27
45	0.08	0.10	0.19	0.10	0.19

Table 3. Effect of fibers on critical flow rate (30/50 mesh quartz sand)**表 3.** 纤维对临界流量的影响(30/50 目石英砂)

闭合压力, MPa	临界流速, m/s				
	0.0%纤维	0.1%纤维	0.2%纤维	0.3%纤维	0.4%纤维
5	2	6	40	80	56
15	4	24	64	16	16
25	6	16	32	24	16
35	8	8	24	16	24
45	6	8	16	8	16

Table 4. Effect of fibers on critical flow velocity (30/50 mesh quartz sand)**表 4.** 纤维对临界流速的影响(30/50 目石英砂)

闭合压力, MPa	临界流速, m/s				
	0.0%纤维	0.1%纤维	0.2%纤维	0.3%纤维	0.4%纤维
5	0.02	0.04	0.31	0.75	0.38
15	0.03	0.24	0.68	0.14	0.13
25	0.05	0.14	0.29	0.23	0.14
35	0.8	0.07	0.22	0.16	0.22
45	0.06	0.07	0.14	0.07	0.13

5. 结论

(1) 通过实验研究, 筛选出了适合用于纤维增强加砂压裂技术的最佳纤维浓度为 0.3%。

(2) 从实验结果来看, 支撑剂回流临界流量随闭合压力先升后降: 在 5~15 MPa 低-中压阶段, 压力压实强化纤维约束效应, 临界流量上升; 15 MPa 左右抗回流效果最佳; 15~35 MPa 中-高压阶段, 过度

压实破坏纤维结构、引发颗粒破碎，临界流量下降。

(3) 对于 40/70 目陶粒，纤维添加浓度约为 0.3%时，抗回流综合效果最优，尤其在低闭合压力下提升幅度巨大。对于 30/50 目石英砂，纤维的稳定效果存在上限，推荐添加浓度约为 0.1%~0.2%，过高浓度无法带来进一步的显著收益。

(4) 本实验条件下最优纤维浓度为 0.3%：该浓度下支撑剂在全压力区间均具备良好抗回流性能，可为现场压裂工程预防支撑剂回流提供技术参考。

参考文献

- [1] 柳自青. 纤维控制支撑剂回流机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- [2] 盖玉磊, 薛仁江. 深层低渗透油藏纤维加砂压裂工艺技术[J]. 特种油气藏, 2011, 18(1): 121-125+142.
- [3] 王雪飞. 柔性纤维悬砂压裂液多相耦合动力学模型及输运规律研究[D]: [博士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [4] 甘霖, 祁国栋, 李照川, 等. 可降解纤维压裂液的研究及其在苏里格气田的应用[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(2): 248-252.
- [5] 陈锦风, 梁英毅, 王泽浩, 等. 改性支撑剂技术在油田的应用[J]. 化工管理, 2022(4): 58-60+74.
- [6] 胡阳明, 赵振峰, 李宪文, 等. 榆林储气库高气量纤维网络抗支撑剂回流实验[J]. 断块油气田, 2021, 28(6): 786-791.
- [7] 蔡克, 薛凯, 陈奋华, 等. 油气开采用功能压裂支撑剂的研究进展[J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(2): 5-13.
- [8] Hall Jr., C.D. and Harrisberger, W.H. (1970) Stability of Sand Arches: A Key to Sand Control. *Journal of Petroleum Technology*, **22**, 821-829. <https://doi.org/10.2118/2399-PA>