

铺置方式对组合粒径石英砂支撑剂裂缝导流能力的影响

梁梦琰^{1*}, 李子恒¹, 舒煜², 钱雅慧¹, 章跃¹, 蒋鑫¹

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2026年8月27日; 录用日期: 2026年9月30日; 发布日期: 2026年10月9日

摘要

为明确不同铺置方式对组合支撑剂裂缝导流能力的影响, 选取20/40目 + 30/50目、30/50目 + 40/70目和40/70目 + 70/140目3种石英砂组合, 分别采用尾追式铺置与混合式铺置, 在不同闭合压力条件下开展短期导流能力实验。结果表明, 3种组合支撑剂的导流能力均随闭合压力升高而降低。20/40目 + 30/50目和40/70目 + 70/140目组合在混合式铺置条件下表现出较高的导流能力, 且在高闭合压力下优势更明显; 30/50目 + 40/70目组合的导流能力则呈现阶段性反应, 不同闭合压力条件下两种铺置方式的导流能力存在差异。研究表明, 组合支撑剂导流能力受粒径组合、铺置结构及闭合压力共同控制, 其变化与颗粒堆积形成的孔隙结构及充填层承载稳定性相关。

关键词

组合支撑剂, 铺置方式, 裂缝导流能力, 石英砂

Effect of Placement Modes on Fracture Conductivity of Combined-Size Quartz Sand Proppants

Menglong Liang^{1*}, Ziheng Li¹, Yu Shu², Yahui Qian¹, Yue Zhang¹, Xin Jiang¹

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

²State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: August 27, 2026; accepted: September 30, 2026; published: October 9, 2026

*通讯作者。

文章引用: 梁梦琰, 李子恒, 舒煜, 钱雅慧, 章跃, 蒋鑫. 铺置方式对组合粒径石英砂支撑剂裂缝导流能力的影响[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(4): 566-574. DOI: 10.12677/jogt.2026.484060

Abstract

To clarify the effects of different proppant placement modes on fracture conductivity, three quartz sand combinations, namely 20/40 + 30/50 mesh, 30/50 + 40/70 mesh, and 40/70 + 70/140 mesh, were investigated. Short-term conductivity tests were conducted under different closure pressures using tail-in placement and mixed placement. The results show that the fracture conductivity of all three proppant combinations decreased with increasing closure pressure. For the 20/40 + 30/50 mesh and 40/70 + 70/140 mesh combinations, mixed placement yielded higher fracture conductivity than tail-in placement, with the advantage becoming more pronounced at high closure pressures. In contrast, the 30/50 + 40/70 mesh combination exhibited a stage-dependent response, with the relative conductivity performance of the two placement modes varying with closure pressure. The results indicate that the conductivity of combined proppants is jointly governed by particle-size combination, placement structure, and closure pressure, and is closely associated with the pore structure formed by particle packing and the load-bearing stability of the proppant pack.

Keywords

Combined Proppants, Placement Mode, Fracture Conductivity, Quartz Sands

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

水力压裂是低渗透及致密油气藏实现经济有效开发的重要增产技术。压裂施工过程中, 支撑剂随携砂液进入人工裂缝, 并在停泵后支撑裂缝壁面, 使裂缝在地层闭合应力作用下保持一定宽度, 从而形成油气由储层流向井筒的高渗流通道[1]。因此, 支撑剂充填层导流能力是评价压裂效果及压后产能的重要参数之一。支撑裂缝导流能力不仅受到支撑剂强度、粒径、铺砂浓度以及闭合压力等因素影响, 还与不同粒径支撑剂在裂缝内部的空间组合与铺置形态密切相关[2]。实际压裂施工中, 为兼顾支撑剂运移能力与裂缝导流能力, 往往不会始终采用单一粒径支撑剂, 而是根据施工阶段依次加入不同粒径的支撑剂。组合支撑剂进入裂缝后, 不同粒径颗粒之间的空间位置、接触关系和孔隙结构会因加砂方式不同而发生变化, 最终影响支撑剂充填层的渗透性和有效支撑宽度[3]。

关于支撑剂导流性能的研究主要集中于粒径、铺砂浓度及闭合压力等因素, 而不同粒径组合在不同铺置方式下的导流能力同样具有重要意义。与单一粒径相比, 多粒径体系可通过改变颗粒级配、接触网络和孔喉分布调节充填层的承载与渗流特征。Liu 等[4]建立考虑粒径分布的支撑裂缝导流模型, 指出多粒径支撑剂会改变最优颗粒间距及嵌入条件。曹科学等[5]在 25~35 MPa 闭合应力范围内比较石英砂-陶粒均匀混合与尾追铺置, 发现当石英砂与陶粒体积比为 1:1、2:1 和 3:1 时, 尾追型导流能力总体高于均匀混合型。随着闭合压力升高, 支撑剂充填层会发生颗粒重排、压密及局部破碎, 不同铺置方式可能表现出明显不同的抗压密能力[6]。Liang 等[7]也指出, 石英砂-陶粒组合导流能力随闭合应力升高而持续降低, 且石英砂占比越高, 导流能力衰减越快。Sun 等[8]对 20/40 目和 40/70 目石英砂-陶粒混合体系的研究表明, 20/40 目体系中加入 25%陶粒即可使导流能力达到纯石英砂的 1.27~3 倍, 而 40/70 目体系需要更高陶粒比例才能维持较好的导流能力, 说明粒径尺寸与颗粒抗压强度共同决定组合体系的高压稳定性。

上述研究对象多为不同材质支撑剂的混配,对于现场常用的石英砂体系,相邻粒径组合采用尾追式和混合式两种铺置方式后的导流能力差异及其随闭合压力的演化规律,仍需要进一步定量分析。本研究选取 20/40 目 + 30/50 目、30/50 目 + 40/70 目和 40/70 目 + 70/140 目三种粒径组合石英砂,组合质量比均设定为 4:6,分别采用尾追式和混合式两种铺置方式开展短期导流能力实验,研究不同闭合压力条件下裂缝导流能力的变化规律,明确粒径组合与铺置方式对导流能力的协同影响。

2. 铺置方式影响机理

尾追式铺置与混合式铺置的本质区别在于不同粒径颗粒在支撑剂充填层内的空间分布方式不同(图 1)[9]。尾追式铺置条件下,小粒径支撑剂先进入裂缝,大粒径支撑剂随后进入,因此不同粒径颗粒具有一定的空间分区特征。该方式能够保留不同粒径支撑剂各自的孔隙结构,但由于不同粒径支撑区之间的承载能力和孔隙特征存在差异,在闭合压力作用下容易产生不均匀压密[10]。

混合式铺置条件下,不同粒径大小支撑剂按照设定质量比例预先均匀混合,使大小颗粒共同构成充填层承载骨架。一方面,大颗粒能够提供主要的裂缝支撑空间;另一方面,小颗粒参与骨架接触及局部填充,改变颗粒之间的接触数量及孔喉结构[10]。

若细粒径支撑剂大量进入粗粒径支撑剂形成的有效渗流通道,可能造成孔隙空间被占据及局部孔喉收缩,从而降低支撑剂充填层的渗流能力;而当不同粒径颗粒能够形成较为稳定的多粒径承载结构时,可在一定程度上改善颗粒间的受力分布,减弱闭合压力作用下的局部压密及孔隙结构收缩[8]。因此,不同粒径支撑剂组合在不同铺置方式下形成的孔隙结构和承载特征存在差异,从而表现出不同的导流能力变化规律。

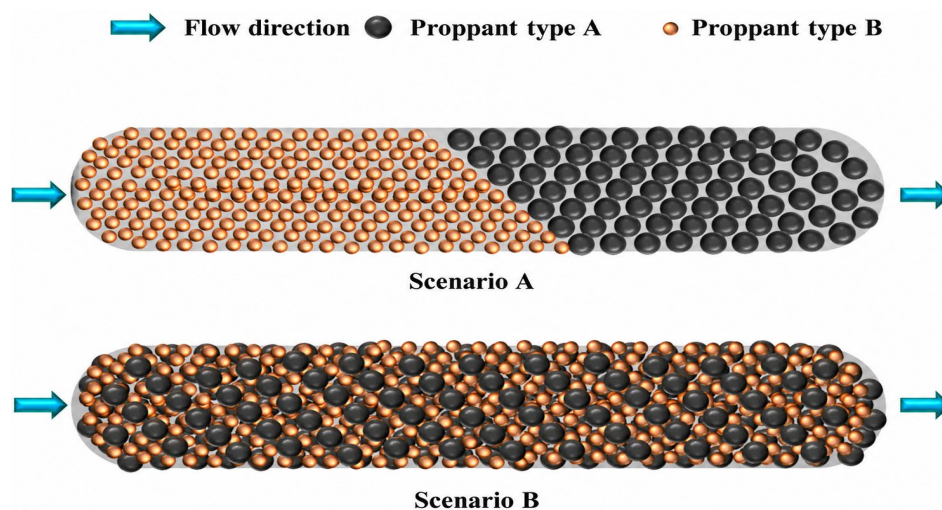


Figure 1. Schematic diagram of tail-in and mixed proppant placement modes

图 1. 尾追式与混合式铺置方式示意图

3. 实验准备

3.1. 实验材料

实验采用压裂用石英砂作为支撑剂,根据粒径范围分别选取:20/40 目,30/50 目,40/70 目,70/140 目。为研究铺置方式对组合支撑剂导流性能的影响,按照相邻粒径组合原则设置 3 组实验:

- ① 20/40 目 + 30/50 目石英砂;

- ② 30/50 目 + 40/70 目石英砂;
- ③ 40/70 目 + 70/140 目石英砂。

3 种组合支撑剂的质量比均设置为 4:6, 以保证不同实验组之间除粒径组合及铺置方式外, 其余测试条件保持一致。

3.2. 实验装置

导流能力实验依据 SY/T 6302—2019《压裂支撑剂导流能力测试方法》进行[11], 主要实验设备为 DL-2000 型酸蚀裂缝导流能力评价实验仪(图 2)。测试过程中使用岩板组成模拟裂缝, 通过液压加载系统施加闭合压力, 并利用上下游压力测试系统记录流体通过支撑剂充填层时产生的压差。

实验系统主要包括导流室、液压加载系统、柱塞泵、真空系统、压力及差压测试系统、液体输送系统和数据采集系统。



Figure 2. Acid-etched fracture conductivity testing apparatus
图 2. 酸蚀裂缝导流能力试验仪

3.3. 铺置方式

(1) 尾追式铺置

模拟现场先注入较小粒径支撑剂、后注入较大粒径支撑剂的施工过程。在导流室中按照对应空间顺序铺置两种粒径支撑剂, 使其形成具有粒径分区特征的组合充填层(图 3(a))。

(2) 混合式铺置

按照 4:6 质量比准确称取两种粒径支撑剂, 充分混合后均匀铺置于导流室中, 使大小粒径颗粒在支撑剂充填层内形成相对均匀的空间分布(图 3(b))。



(a) 尾追式铺置

(b) 混合式铺置

Figure 3. Proppant placement in the conductivity cell
图 3. 支撑剂装入导流室

4. 实验结果与分析

4.1. 20/40 目 + 30/50 目组合

由表 1 和图 4 可知, 20/40 目 + 30/50 目石英砂组合在两种铺置方式下导流能力均随着闭合压力升高而下降, 但在 5 个压力测试点下, 混合式铺置的导流能力均高于尾追式铺置。闭合压力由 10 MPa 增加至 50 MPa 时, 尾追式铺置导流能力由 $64.42\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 下降至 $21.81\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$, 降幅约为 66.14%; 混合式铺置则由 $72.55\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 下降至 $28.68\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$, 降幅约为 60.47%。说明在该粒径组合下, 混合式铺置不仅能够获得较高的初始导流能力, 而且在闭合压力增大过程中导流能力的保持效果也更好。

对于 20/40 目 + 30/50 目组合, 两种支撑剂颗粒粒径较大。混合式铺置后, 大颗粒仍可维持较大的孔隙通道, 而较小粒径颗粒分散于大颗粒支撑骨架之间, 有利于增加接触点、分散局部载荷并提高整个颗粒骨架在高闭合压力下的稳定程度。因此, 在高闭合压力阶段, 混合式铺置支撑结构可表现出更好的抗压密和抗颗粒重排能力。

Wei 等[12]研究发现, 20/40~70/140 目粒径组合在长期加载下, 均匀混合并未表现出稳定优势, 顺序分段铺置更有利于导流能力保持。相比本研究 20/40 目 + 30/50 目为相邻粗粒径组合, 粒径级差较小, 混合后细颗粒不易大量堵塞粗颗粒孔喉, 且可增加颗粒接触点、分散载荷, 因此在高闭合压力下表现出更好的结构稳定性。

Table 1. Fracture conductivity of the 20/40 + 30/50 mesh quartz sand combination under different placement modes
表 1. 20/40 目 + 30/50 目石英砂组合在不同铺置方式下的导流能力

闭合压力, MPa	导流能力, $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$		混合式铺置相对增幅, %
	尾追式铺置	混合式铺置	
10	64.42	72.55	+12.62
20	53.7	57.13	+6.39
30	41.25	43.3	+4.97
40	28.97	34.12	+17.78
50	21.81	28.68	+31.50

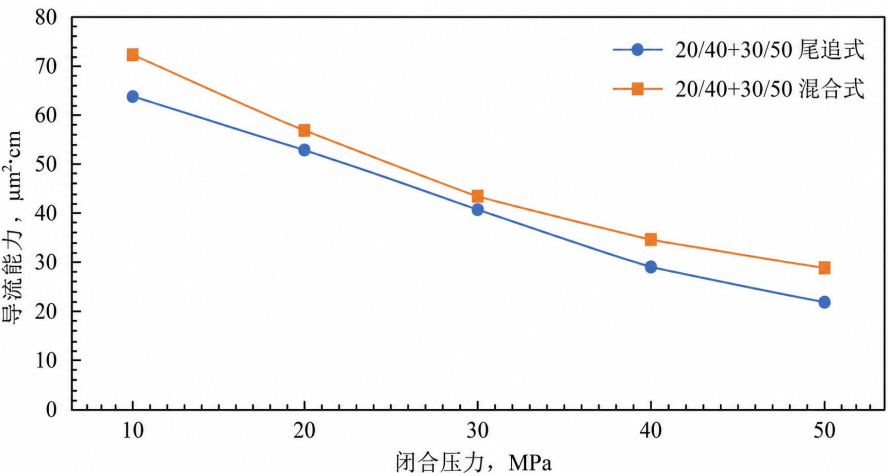


Figure 4. Fracture conductivity of the 20/40/50 mesh quartz sand combination under different placement modes
图 4. 20/40 目 + 30/50 目石英砂组合在不同铺置方式下的导流能力

4.2. 30/50 目 + 40/70 目组合

30/50 目 + 40/70 目石英砂组合在不同铺置方式下的导流能力如表 2 和图 5 所示, 实验数据表明, 该组合对铺置方式的反应明显不同于 20/40 目 + 30/50 目石英砂组合。10 MPa 时尾追式铺置导流能力为 $29.29\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$, 而混合式铺置为 $26.19\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$; 20 和 30 MPa 时混合式铺置略高于尾追式铺置, 但差值仅分别为 $0.52\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 和 $0.35\ \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$; 当闭合压力进一步增加至 40 和 50 MPa 时, 尾追式铺置重新超过混合式铺置。

这一现象说明, 不能简单认为混合式铺置在所有粒径组合条件下均具有优势。与 20/40 目 + 30/50 目组合相比, 该组合整体粒径减小, 混合后 40/70 目颗粒更容易分散至 30/50 目颗粒形成的孔隙空间中。当闭合压力较低时, 细颗粒对粗颗粒孔隙的占据会使有效孔喉尺寸减小, 因此 10 MPa 条件下混合式铺置导流能力低于尾追式铺置。在 20~30 MPa 阶段, 随着颗粒发生一定压密和重新排列, 混合式铺置的颗粒接触点可能提高充填层结构稳定性, 因此两种铺置方式下的导流能力差异很小。但在 40~50 MPa 高闭合压力阶段, 进一步压密使细颗粒进入粗颗粒孔隙, 同时颗粒破碎产生的细小颗粒也可能进一步堵塞渗流通道, 使混合式铺置结构中原有孔喉被持续压缩, 从而导致其导流能力下降幅度增大。

Wang 等[13]对 30/50 目与 70/140 目石英砂不同比例混合实验也为这一判断提供了依据, 适量细颗粒在高闭合应力下能够降低部分大颗粒所承受的局部载荷, 从而减轻破碎, 但最终导流能力仍取决于破碎减少所带来的正效应能否抵消细颗粒对孔隙通道的占据。因此, 30/50 目 + 40/70 目在 20~30 MPa 时出现短暂的混合式优势, 其实是增加接触点后的结构稳定效应暂时占优势; 而在 40~50 MPa 阶段, 进一步压密、颗粒重排及破碎细屑进入孔隙后, 孔隙损失效应重新占据主导, 最终使混合式导流能力下降。

Table 2. Fracture conductivity of the 30/50 + 40/70 mesh quartz sand combination under different placement modes
表 2. 30/50 目 + 40/70 目石英砂组合在不同铺置方式下的导流能力

闭合压力, MPa	导流能力, $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$		混合式铺置相对增幅, %
	尾追式铺置	混合式铺置	
10	29.29	26.19	-10.58
20	22.76	23.28	+2.28
30	18.86	19.21	+1.86
40	16.77	15.06	-10.20
50	15.74	11.41	-27.51

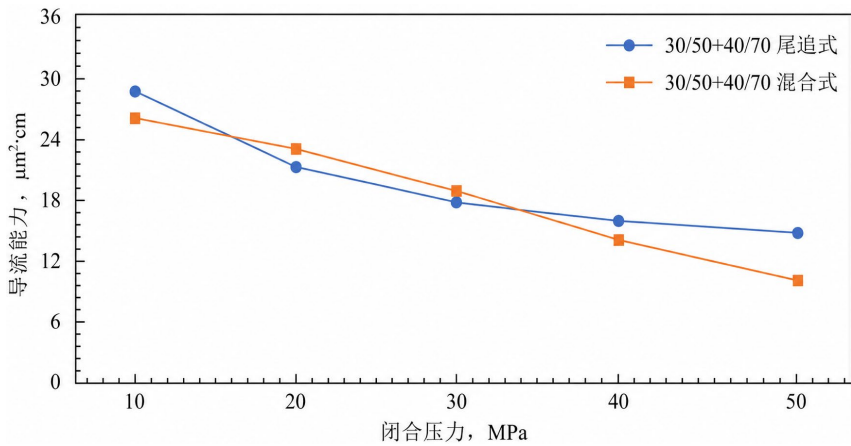


Figure 5. Fracture conductivity of the 30/50 + 40/70 mesh quartz sand combination under different placement modes
图 5. 30/50 目 + 40/70 目石英砂组合在不同铺置方式下的导流能力

4.3. 40/70 目 + 70/140 目组合

表 3 和图 6 的实验数据说明, 对于 40/70 目 + 70/140 目石英砂组合, 混合式铺置在所有测试压力条件下均具有更高的导流能力, 与 20/40 目 + 30/50 目石英砂组合的导流能力整体规律相似。但从导流能力数值来看, 两种铺置方式之间的差距并不大。随着闭合压力由 10 MP 升高至 50 MPa, 尾追式铺置导流能力由 $11.27 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 下降至 $3.23 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$, 降低约 71.34%; 混合式铺置由 $11.95 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 下降至 $4.22 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$, 降低约 64.69%。

该组合整体粒径较小, 其本身形成的孔喉尺寸有限, 因而裂缝整体导流能力明显低于前两组组合, 但相比于尾追式铺置, 混合式铺置充填层在高闭合压力下仍表现出更好的导流能力。对于细粒径体系, 混合式铺置后两种颗粒形成较均匀的多点接触结构, 有助于降低局部集中应力和颗粒强烈重排, 从而在高闭合压力下保持相对稳定的支撑骨架[14]。但由于颗粒尺寸总体较小, 即使混合式铺置能够提高支撑结构稳定性, 其导流能力仍受到较小孔喉尺寸的限制。

Li 和 Li [15]的研究表明, 40/70 目与 70/140 目支撑剂的铺置效果受粗细颗粒比例和空间顺序共同影响: 粗颗粒占比较高时, 分段铺置导流能力优于均匀混合; 随着细颗粒比例增加, 两种铺置方式的差异逐渐减弱。但由于其分段铺置顺序与本研究尾追式铺置相反, 且粒径配比不同, 因而两者结果不能直接对应, 但共同说明, 混合粒径支撑剂的导流能力受粒径配比及铺置顺序影响。

Table 3. Fracture conductivity of the 40/70 + 70/140 mesh quartz sand combination under different placement modes
表 3. 40/70 目 + 70/140 目石英砂组合在不同铺置方式下的导流能力

闭合压力, MPa	导流能力, $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$		混合式铺置相对增幅, %
	尾追式铺置	混合式铺置	
10	11.27	11.95	+6.03
20	8.38	8.75	+4.42
30	6.25	6.72	+7.52
40	4.55	5.18	+13.85
50	3.23	4.22	+30.65

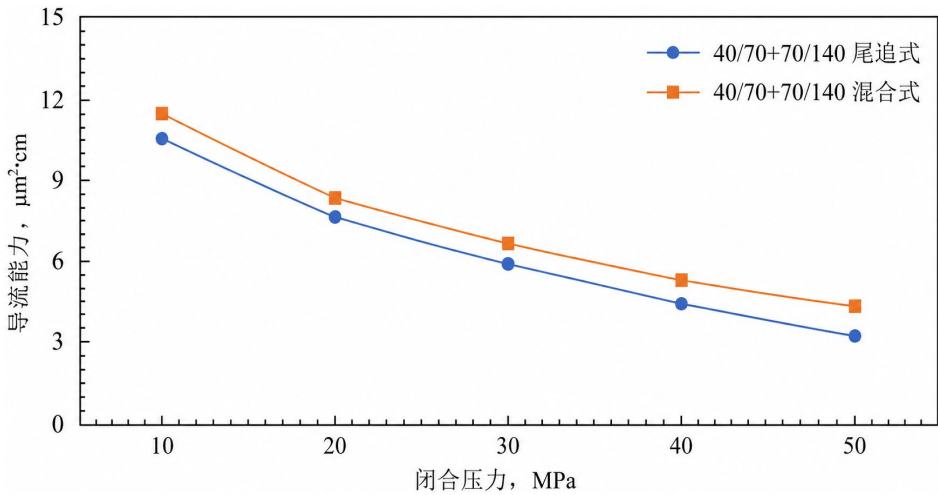


Figure 6. Fracture conductivity of the 40/70 + 70/140 mesh quartz sand combination under different placement modes
图 6. 40/70 目 + 70/140 目石英砂组合在不同铺置方式下的导流能力

4.4. 综合分析

综合以上实验结果可以发现, 三组不同粒径石英砂组合的导流能力在两种铺置方式下均表现出随闭合压力升高而下降的共同特征, 但无论采用何种铺置方式, 整体导流能力均表现为: 20/40 目 + 30/50 目 > 30/50 目 + 40/70 目 > 40/70 目 + 70/140 目, 这说明支撑剂粒径仍然是决定裂缝基础导流能力的重要因素。粗粒径支撑剂堆积后能够形成较大的颗粒间孔喉和较高的支撑层渗透率, 从而具有较高的初始导流能力。但粗粒径颗粒接触点数量较少, 在高闭合压力下单个接触点承受的局部应力较高, 也更容易发生破碎和重新排列。因此, 组合支撑剂的最终导流能力由颗粒堆积过程中孔隙结构变化与充填层承载稳定性之间的综合作用决定[16]。当增加接触点所产生的稳定作用大于细粒径颗粒填充造成的孔喉损失时, 支撑剂充填层能够保持更优的渗流通道结构, 表现出更高的导流能力; 反之, 若细粒径颗粒填充作用占主导, 则会造成有效流动空间减少, 使混合式铺置的导流能力低于尾追式铺置。

5. 结论

(1) 闭合压力是影响组合支撑剂导流能力的关键因素。在 10~50 MPa 范围内, 3 类组合支撑剂无论采用何种铺置方式, 其导流能力均随闭合压力升高而降低, 表现出明显的应力敏感特征。

(2) 20/40 目 + 30/50 目组合中混合式铺置具有明显优势。在全部测试压力下, 混合式铺置导流能力均高于尾追式铺置, 相对提高 4.97%~31.50%, 表明均匀混合形成的颗粒承载结构能够有效改善高闭合压力条件下的导流能力。

(3) 30/50 目 + 40/70 目组合在两种铺置方式下导流能力呈现阶段性变化特征。在 20~30 MPa 条件下, 混合式铺置导流能力略高于尾追式铺置, 而在 10、40 和 50 MPa 条件下尾追式铺置表现更优, 说明该粒径组合不存在适用于全压力范围的最优铺置方式。

(4) 40/70 目 + 70/140 目组合采用混合式铺置具有更好的高压导流保持能力。在 10~50 MPa 范围内, 混合式铺置导流能力整体高于尾追式铺置, 相对提高 4.42%~30.65%。但由于整体粒径较小, 其整体导流能力低于其他两种组合。

(5) 支撑剂铺置方式对导流能力的影响由粒径组合、颗粒排列结构及闭合压力共同作用。混合式铺置可通过增加颗粒接触点提高支撑结构稳定性, 但同时也可能因细颗粒填充粗颗粒间隙而降低渗透率。因此, 组合支撑剂铺置方式应将支撑剂粒径组合、混合比例及储层有效闭合压力进行综合考虑。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2520127)。

参考文献

- [1] 陈思源, 刘浩, 金衍, 等. 压裂支撑剂发展综述与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(3): 330-346.
- [2] 张学平, 刘友权, 张鹏飞, 周厚安. 大川中沙溪庙致密砂岩储层支撑裂缝导流能力的影响因素[J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(3): 92-97.
- [3] 郭天魁, 吕明锟, 陈铭, 胥云, 翁定为, 曲占庆, 戴彩丽, 侯健, 刘晓强. 体积压裂多分支裂缝支撑剂运移规律[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 832-844.
- [4] Liu, Y., Mu, S., Guo, J., Chen, C. and Wang, S. (2021) Model for Fracture Conductivity Considering Particle Size Distribution in a Proppant Monolayer. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **95**, Article ID: 104188. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104188>
- [5] 曹科学, 蒋建方, 郭亮, 王乐, 马凤, 安冬梅. 石英砂陶粒组合支撑剂导流能力实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(5): 684-688.
- [6] 朱海燕, 刘英君, 王向阳, 等. 考虑支撑剂颗粒破碎的页岩分支裂缝导流能力[J]. 中国石油大学学报(自然科学

- 版), 2022, 46(1): 72-79.
- [7] Liang, X., Zhou, F., Liang, T., Huang, Y., Wei, D. and Ma, S. (2020) The Effect of Combined Proppants upon the Fracture Conductivity in Tight Gas Reservoirs. *Energy Reports*, **6**, 879-884. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.04.007>
- [8] Sun, H., He, B., Xu, H., Zhou, F., Zhang, M., Li, H., *et al.* (2022) Experimental Investigation on the Fracture Conductivity Behavior of Quartz Sand and Ceramic Mixed Proppants. *ACS Omega*, **7**, 10243-10254. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06828>
- [9] Wu, B., Xiao, F., Kong, M., Wang, B. and Zhang, S. (2022) Research on Proppant Optimization and Field Test of Ultra-Deep Tight Conglomerate Sandstone Reservoir. *Frontiers in Energy Research*, **10**, Article 891063. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.891063>
- [10] 杨亚东, 邹龙庆, 王一萱, 等. 川南深层页岩气藏压裂裂缝导流能力影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2024, 31(5): 162-167.
- [11] 国家能源局. SY/T 6302-2019 压裂支撑剂导流能力测试方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- [12] Wei, J.G., Zhou, X.F., Fu, X.F., Chen, Y.H. and Bu, F. (2021) Experimental Investigation of Long-Term Fracture Conductivity Filled with Quartz Sand: Mixing Proppants and Closing Pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 32394-32402. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.083>
- [13] Wang, W., Zhou, D., Gu, T., Yan, Y., Yang, X. and Xu, S. (2025) Experimental Investigation on the Influence of Proppant Crushing on the Propped Fracture Conductivity. *Processes*, **13**, Article 2166. <https://doi.org/10.3390/pr13072166>
- [14] Tian, F., Jia, Y., Yang, L., Liu, X., Guo, X. and Martyushev, D.A. (2024) Experimental Study on Factors Affecting Fracture Conductivity. *Processes*, **12**, Article 1465. <https://doi.org/10.3390/pr12071465>
- [15] Li, B. and Li, H. (2026) Morphology-Aware Experimental Evaluation of Proppant-Supported Fracture Conductivity and Surface Roughness Evolution in Tight Sandstone Fractures. *Applied Sciences*, **16**, Article 6364. <https://doi.org/10.3390/app16136364>
- [16] Liu, Y., Mu, S., Guo, J., Yang, X., Chen, C. and Liu, H. (2022) Analytical Model for Fracture Conductivity with Multiple Particle Sizes and Creep Deformation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **102**, Article ID: 104607. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104607>