

# 页岩储层多粒径支撑剂运移规律及导流能力研究



宋丽阳\*, 王纪伟

中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要:** 针对页岩储层体积压裂过程中难以实现缝网系统高效支撑的问题, 分析支撑剂在裂缝中的运移沉降机理, 应用真三维模拟软件研究支撑剂在不同粒径、不同组合条件下的运移规律, 模拟计算支撑剂浓度分布及裂缝导流能力, 以此为基础判断不同裂缝形态下不同粒径支撑剂的适用性, 优化支撑剂粒径组合, 最大程度实现缝网系统全支撑, 提高缝网系统导流能力, 实现页岩储层高效压裂改造。研究表明: 压裂裂缝宽度极小, 平均缝宽小于 1mm 时, 中/大粒径支撑剂难以进入裂缝网络, 无法实现裂缝有效支撑, 建议采用小/微粒径支撑剂; 平均缝宽大于 1mm, 大粒径支撑剂可有效进入裂缝中的条件下, 大粒径+中粒径支撑剂组合颗粒沉降速度快, 且砂堤孔隙度大, 可达到较大的平衡高度, 增大裂缝的有效支撑宽度, 更有利于缝网导流能力的提高; 裂缝导流能力既与支撑剂铺置浓度有关, 又取决于缝内支撑剂的铺置结构, 裂缝在实现有效支撑后, 进一步增大支撑剂浓度会堵塞裂缝系统, 降低导流能力, 因此在泵入大/中粒径支撑剂后, 不适合再泵入小粒径支撑剂, 以免对支撑裂缝造成不必要的堵塞, 小粒径支撑剂适合在泵注前期使用。

**关键词:** 页岩储层; 支撑剂; 运移规律; 导流能力

**DOI:** 10.57237/j.jest.2023.01.003

## A Study on the Migration Rule and Flow Conductivity of Multi-particle Size Proppant in Shale Reservoir

Song Liyang\*, Wang Jiwei

Gas Reservoirs Production of Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China

**Abstract:** To solve the problem that it is difficult to realize efficient prop of fracture network system in the volume fracturing process of shale reservoir, the migration and settlement mechanism of proppant in fractures is analyzed, the migration law of proppant under different particle size and different combination conditions is studied by using true three-dimensional simulation software, and the distribution of proppant concentration and fracture conductivity are simulated. On this basis, the applicability of proppant with different particle sizes under different fracture morphology is judged, and the combination of proppant particle sizes is optimized to maximize the full prop of the fracture network system, improve the conductivity of the fracture network system, and realize efficient fracturing stimulation of shale reservoirs. The research shows that when the fracture width is very small and the average fracture width is less than 1mm, it is difficult for medium/large size proppant to enter the fracture network and achieve effective fracturing prop. Therefore, it is recommended to use small/micro size proppant. Under the condition that the average fracture width is

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“基于机器学习的致密页岩油藏 CO<sub>2</sub> 压采一体化方法研究” (52204070).

\*通信作者: 宋丽阳, songly.syky@sinopec.com

收稿日期: 2022-11-24; 接受日期: 2023-02-25; 在线出版日期: 2023-03-02

<http://www.energysci-tech.org>

greater than 1mm and the proppant with large particle size can effectively enter the fracture, the combination of large size + medium size proppant particles settle quickly, and the porosity of the sand dike is large, which can reach a larger equilibrium height, increase the effective support width of the fracture, and improve the conductivity of the fracture network. The fracture conductivity is not only related to the proppant placement concentration, but also depends on the proppant placement structure in the fracture. After the fracture is effectively propped, further increasing the proppant concentration will block the fracture system and reduce the conductivity. Therefore, it is not suitable to pump small size proppant after pumping large/medium size proppant, so as to avoid unnecessary plugging to the proppant. Small size proppant is suitable for use in the early pumping phase.

**Keywords:** Shale Reservoir; Proppant; Migration Rule; Flow Conductivity

## 1 前言

在对页岩储层开展体积压裂过程中, 会形成大量复杂窄裂缝网络, 单一大粒径支撑剂难以进入次生缝网, 无法实现有效支撑[1, 6]。在高闭合压力下, 大粒径支撑剂会发生破碎, 导致裂缝导流能力下降, 而对于宽度较大的主裂缝网络, 采用微粒径、小粒径支撑剂无法有效形成高导流通道[2-13]。针对这些问题, 建议采用不同粒径的支撑剂组合, 实现全尺度支撑。

不同粒径的支撑剂在裂缝网络中可发挥不同的作用: 微/小粒径支撑剂可进入次生裂缝网络, 支撑窄裂缝; 中粒径支撑剂可用于支撑主裂缝, 相对大粒径支撑剂, 不易破碎; 大粒径支撑剂如果可有效进入主裂缝网络, 比微/小粒径支撑剂和中粒径支撑剂更易形成高导流通道[14-22]。然而, 支撑剂在复杂裂缝中运移过程复杂, 难以预测和控制, 需进一步明晰其运移规律, 形成方便可行的施工方案。本文在剖析支撑剂在复杂裂缝中运移沉降机理的基础上, 应用真三维模拟软件模拟研究不同支撑剂粒径组合条件下支撑剂在缝网中的运移、分布规律, 为压裂泵注方案的优化设计提供指导性建议。

## 2 支撑剂运移沉降机理

携砂液中支撑剂颗粒主要受到水平方向液体携带力、垂向浮力、重力、颗粒沉降阻力等, 如图 1 所示。

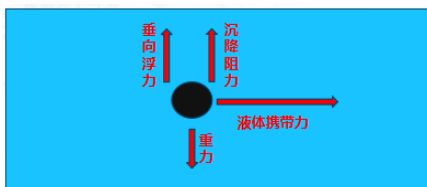


图 1 携砂液中支撑剂受力特征

Figure 1 Mechanical characteristics of proppant in the fracturing fluid

支撑剂在裂缝中的运移沉降过程可分为 3 个阶段, 如图 2 所示。第 1 阶段, 在重力作用下, 支撑剂颗粒在入口射流的滞止点产生沉降, 首次达到平衡高度后, 扩流和沉积作用成为影响支撑剂沉降运移主要因素, 支撑剂颗粒在近井筒周围逐渐堆积, 支撑剂堤体增加, 过流断面高度逐渐减小, 压裂液流速增大; 第 2 阶段, 支撑剂堤体长度不变, 后部分高度继续增加, 裂缝顶部与支撑剂堤体顶端距离达到临界点, 堤体中流化支撑剂颗粒数目与压裂液所携带支撑剂颗粒数目相当, 达到相对平衡状态, 支撑剂颗粒只能运移到堤体背面进行沉降; 第 3 阶段, 支撑剂堤体保持一定的平衡高度继续沉降, 长度不断增加。

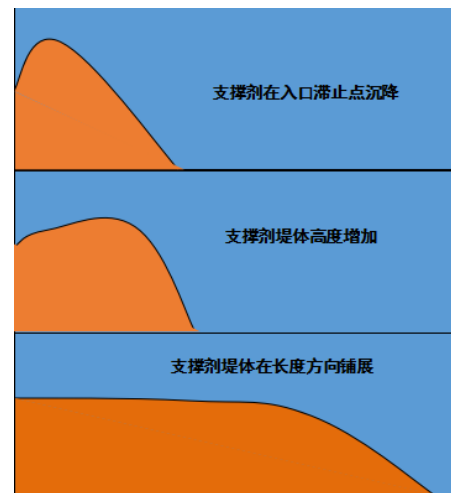


图 2 支撑剂在裂缝中的运移沉降过程

Figure 2 Proppant transport and settlement process in fracture

携砂液中支撑剂以越阶式充填方式向前缘沉降, 前端天然坡度相互平行。支撑剂堤体的平衡高度越大, 对裂缝的支撑作用越好。平衡高度可表示如下:

$$H = \frac{mV}{1-\phi} t \quad (1)$$

其中,  $m$  为支撑剂颗粒质量,  $V$  为支撑剂颗粒沉降速度,  $\phi$  为支撑剂堤体孔隙度,  $t$  为支撑剂沉降时间。平衡高度与支撑剂颗粒沉降速度成正比, 与支撑剂堤体孔隙度成反比。

进一步细化描述, 可将最终支撑剂浓度沿缝高方向的分布划分为四个区域: 固体区、动平衡区、悬浮区和液体区。如图 3 所示。

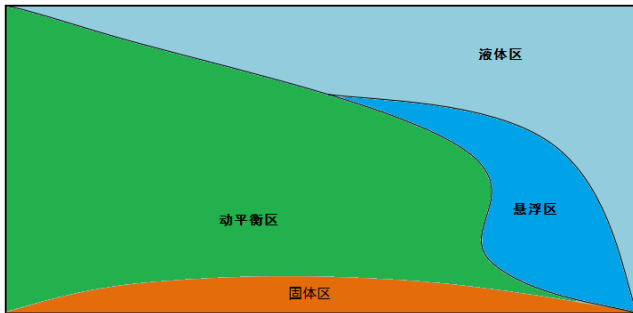


图 3 支撑剂沿缝高方向分布图  
Figure 3 Proppant distribution along fracture height

图中, 固体区为已经沉降下来的处于稳定状态的支撑剂堤体; 在动平衡区, 支撑剂颗粒处于滚动状态, 颗粒的卷起与沉降处于动平衡; 在悬浮区, 支撑剂受到的重力和液体的粘滞阻力相等, 支撑剂颗粒悬浮在携砂液中; 在液体区, 已基本不存在支撑剂颗粒, 只剩下携砂液。通常, 支撑剂的粒径越小, 越易受携砂液流动状态影响, 动平衡区越大。

### 3 单一粒径支撑剂运移规律研究

应用真三维模拟软件研究单一不同粒径支撑剂运移、分布规律, 压裂施工基本参数如表 1 所示。

表 1 压裂施工基本参数 (单一粒径支撑剂)

Table 1 Basic fracturing construction parameters (single particle size proppant)

液体类型	施工液量 ( $\text{m}^3$ )	排量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	砂比 (%)
滑溜水压裂液	900	9	30

采用 100 目、40/70 目和 30/50 目支撑剂, 压裂裂缝平均缝宽为 0.06-0.1cm, 缝高 6-8m。对比不同粒径支撑剂在裂缝中的浓度分布和裂缝导流能力。

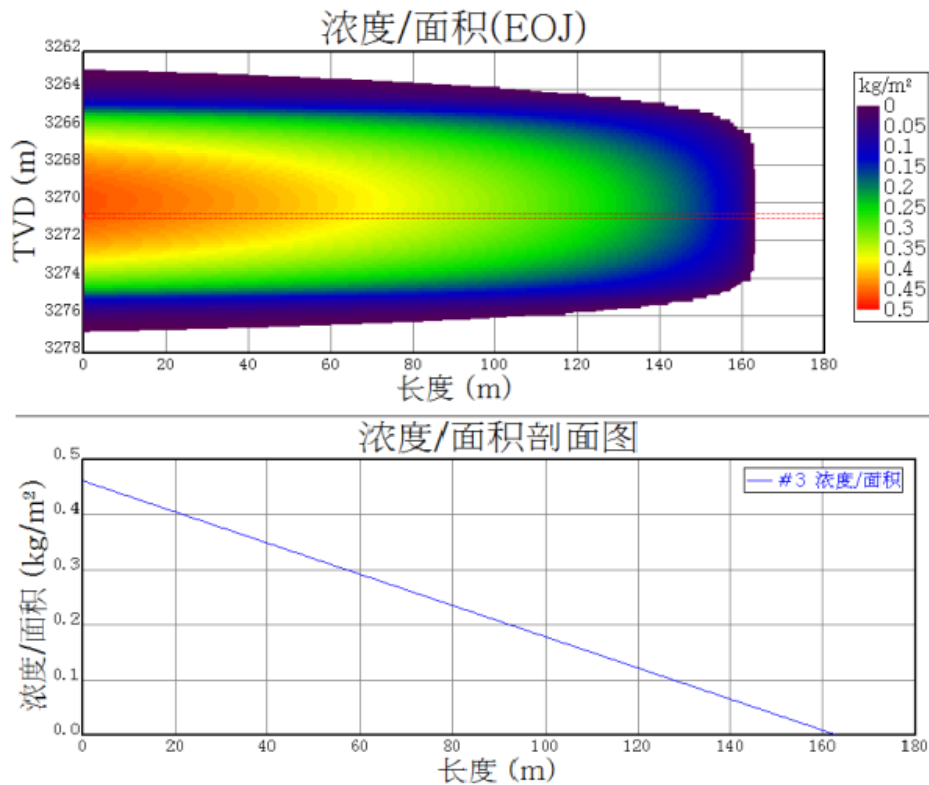


图 4 100 目支撑剂浓度分布  
Figure 4 Concentration distribution (100 mesh)

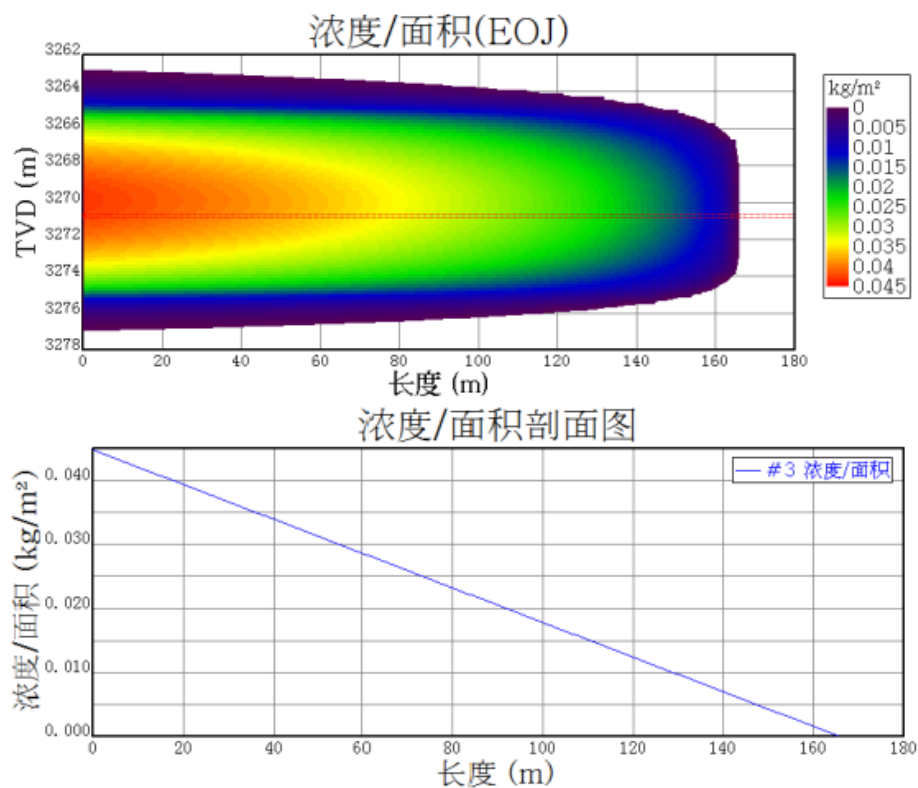


图 5 40/70 目支撑剂浓度分布  
Figure 5 Concentration distribution (40/70 mesh)

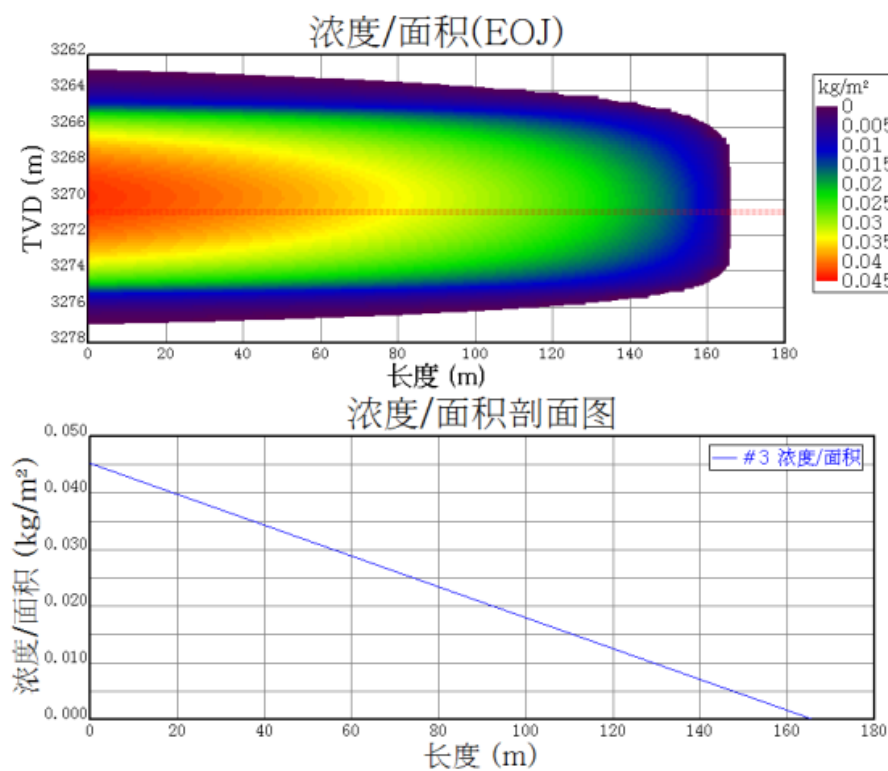


图 6 30/50 目支撑剂浓度分布  
Figure 6 Concentration distribution (30/50 mesh)

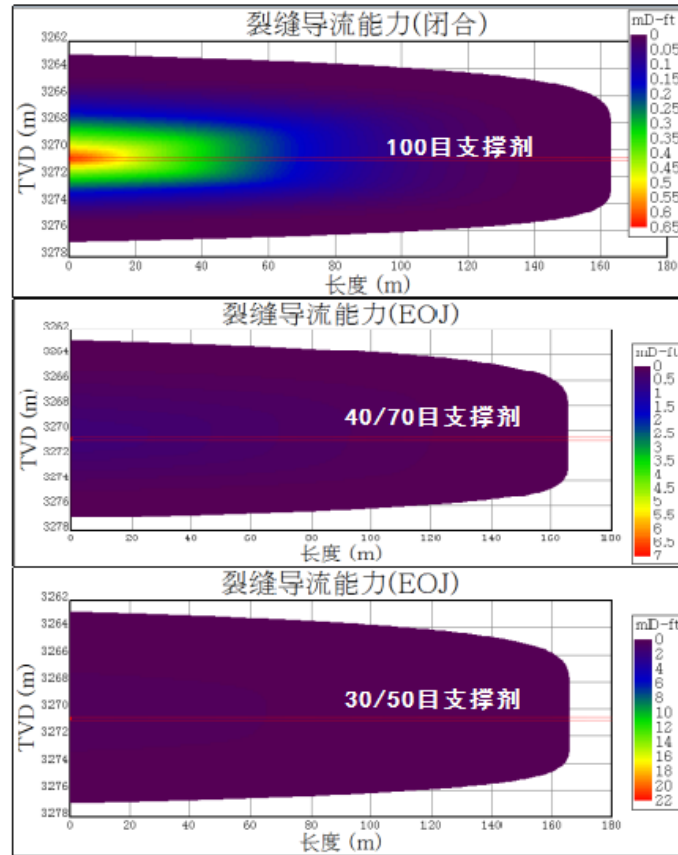


图 7 不同粒径支撑剂导流能力

Figure 7 Conductivity of different proppant sizes

当裂缝宽度小于 1mm 时，中粒径、大粒径支撑剂在裂缝中的浓度明显低于 100 目小粒径支撑剂，难以进入体积压裂缝网中实现有效支撑，裂缝导流能力极低。

## 4 多粒径支撑剂组合运移规律研究

将不同粒径的支撑剂按照不同的泵注顺序泵入裂缝中，研究不同支撑剂粒径组合条件下支撑剂浓度分布及裂缝导流能力。固定施工排量  $9\text{m}^3/\text{min}$ ，砂比 30%，设计 11 种泵注方案。如表 2 所示。

表 2 泵注方案设计

Table 2 Pump injection design

序号	泵注方案
1	100 目支撑剂携砂液 ( $1200\text{m}^3$ 液量)
2	100 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量) + 40/70 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量)
3	100 目支撑剂携砂液 ( $400\text{m}^3$ 液量) + 40/70 目支撑剂携砂液 ( $400\text{m}^3$ 液量) + 30/50 目支撑剂携砂液 ( $400\text{m}^3$ 液量)
4	100 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量) + 30/50 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量)
5	40/70 目支撑剂携砂液 ( $1200\text{m}^3$ 液量)
6	40/70 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量) + 100 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量)
7	40/70 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量) + 30/50 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量)
8	30/50 目支撑剂携砂液 ( $1200\text{m}^3$ 液量)
9	30/50 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量) + 100 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量)
10	30/50 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量) + 40/70 目支撑剂携砂液 ( $600\text{m}^3$ 液量)
11	30/50 目支撑剂携砂液 ( $400\text{m}^3$ 液量) + 40/70 目支撑剂携砂液 ( $400\text{m}^3$ 液量) + 100 目支撑剂携砂液 ( $400\text{m}^3$ 液量)

首先研究泵入不同粒径支撑剂组合条件下支撑剂浓度分布,对比先泵入 100 目支撑剂四种方案的浓度分布曲线,如图 8 到图 11 所示。

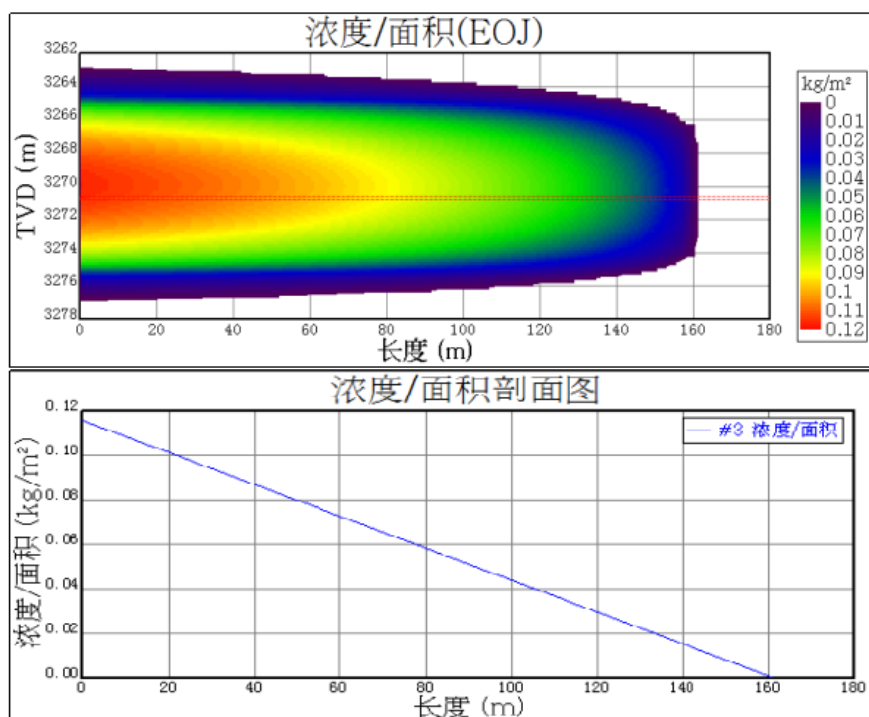


图 8 100 目支撑剂浓度分布

Figure 8 Concentration distribution (100 mesh)

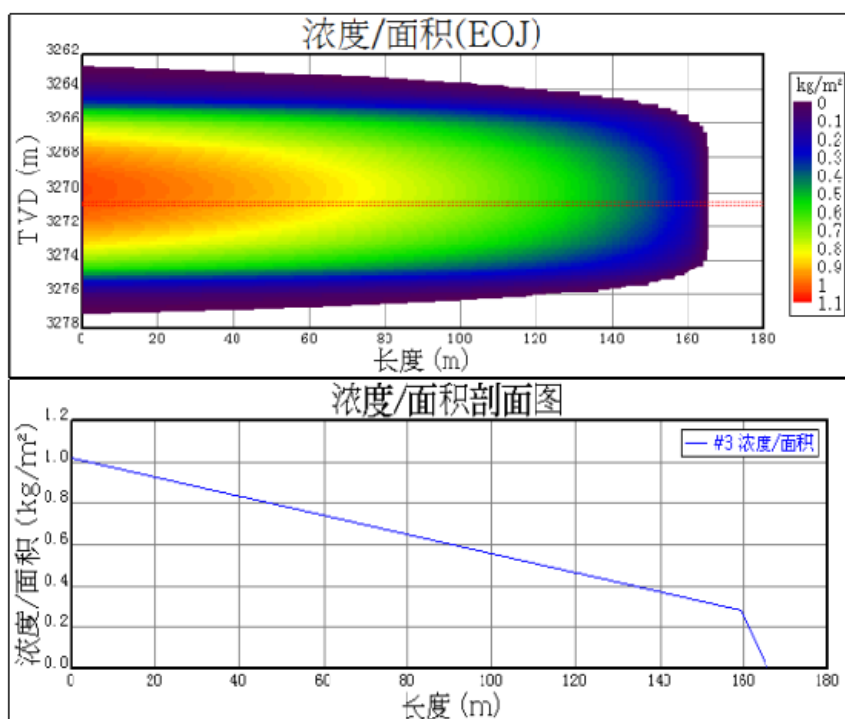


图 9 100 目+30/50 目支撑剂浓度分布

Figure 9 Concentration distribution (100+30/50 mesh)



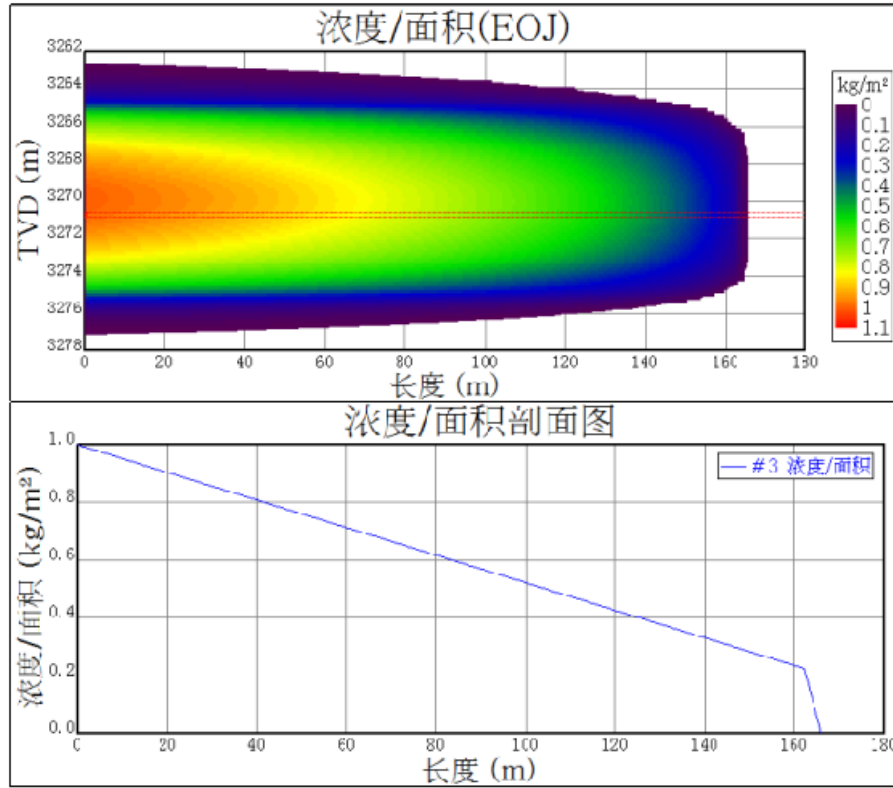


图 10 100 目+40/70 目+30/50 目支撑剂浓度分布

Figure 10 Concentration distribution (100+40/70+30/50)

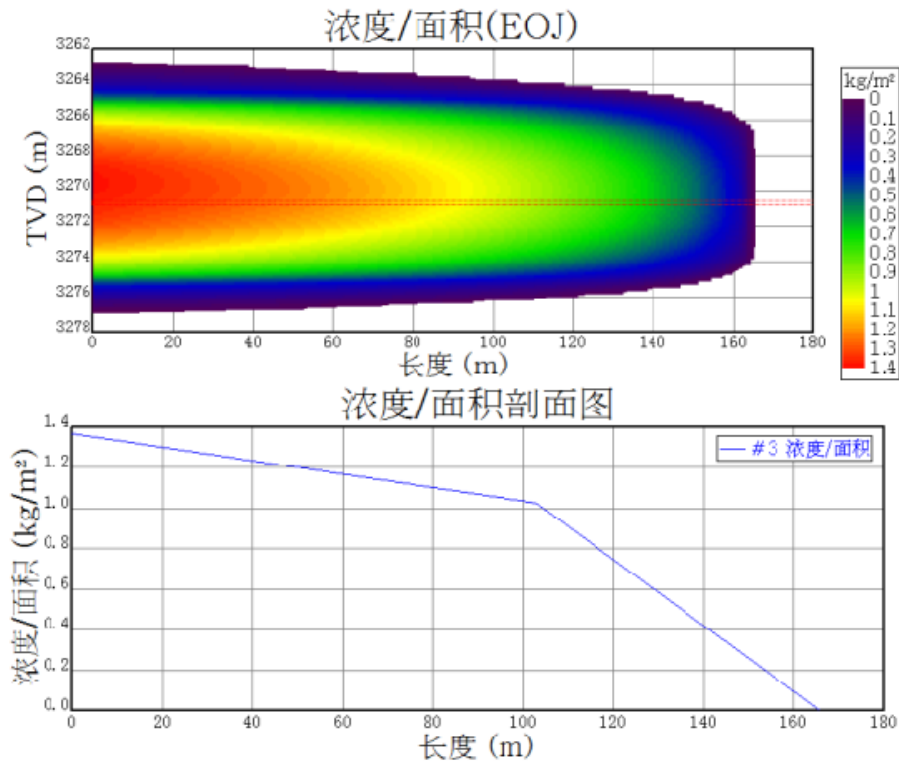


图 11 100 目+40/70 目支撑剂浓度分布

Figure 11 Concentration distribution (100+40/70)

对比发现，泵入 100 目+30/50 目支撑剂浓度最小，泵入 100 目+40/70 目支撑剂浓度最大。对比先泵入 30/50 目支撑剂的四种方案浓度分布曲线，如图 12 到图 15 所示。

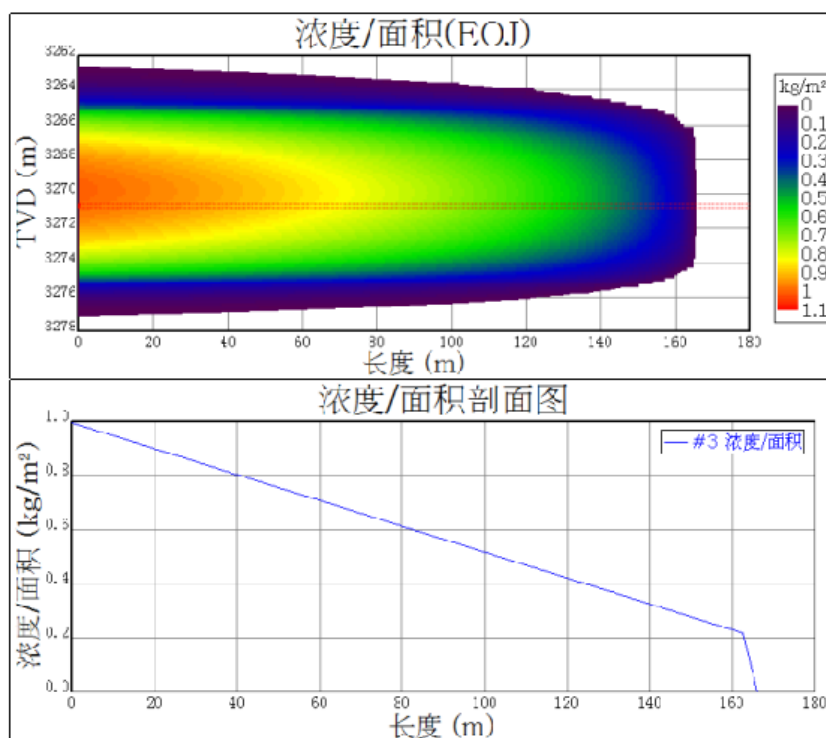


图 12 30/50 目支撑剂浓度分布

Figure 12 Concentration distribution (30/50)

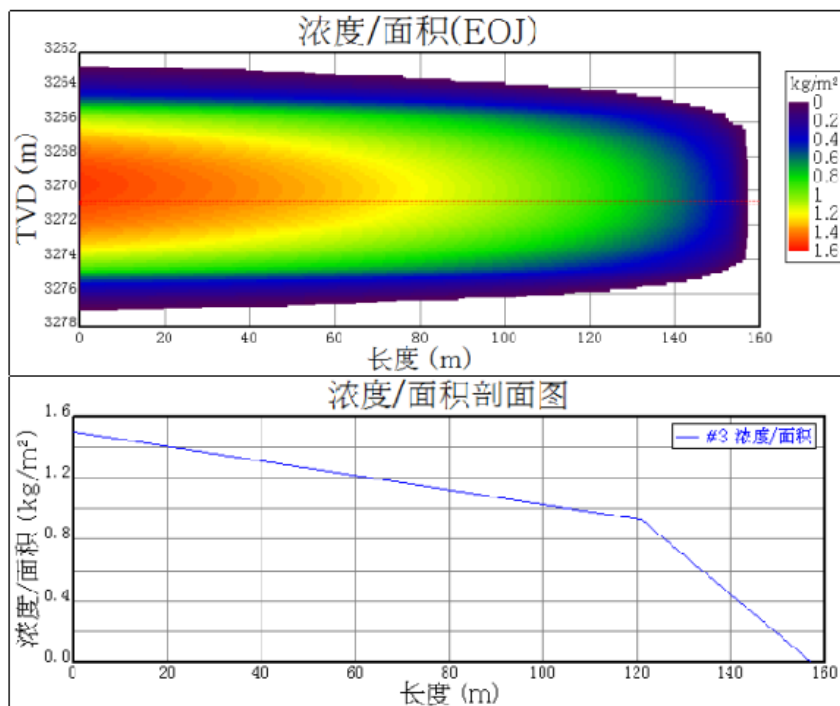


图 13 30/50 目+40/70 目+100 目支撑剂浓度分布

Figure 13 Concentration distribution (30/50+40/70+100)



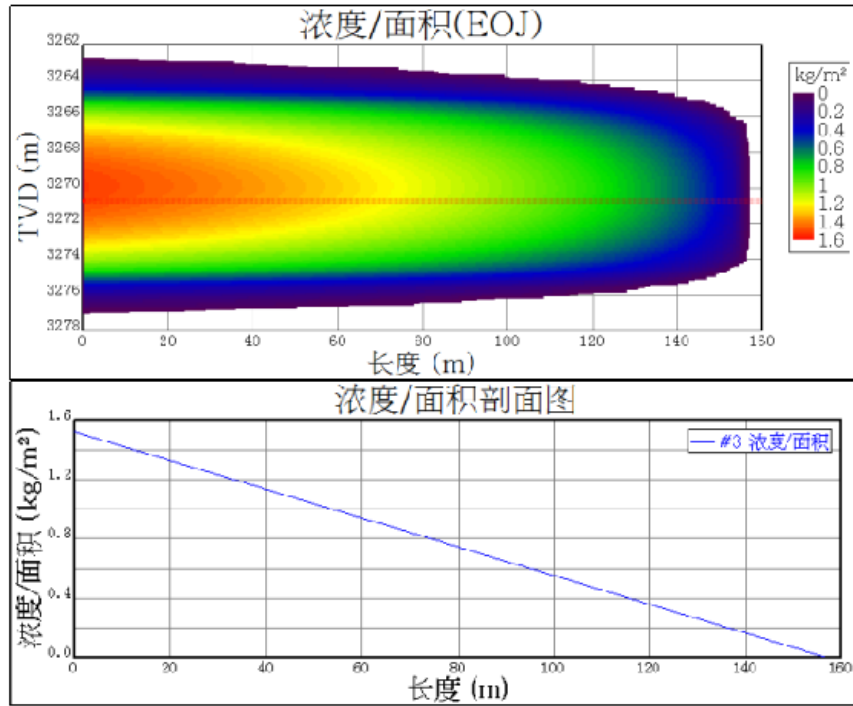


图 14 30/50 目+100 目支撑剂浓度分布

Figure 14 Concentration distribution (30/50+100)

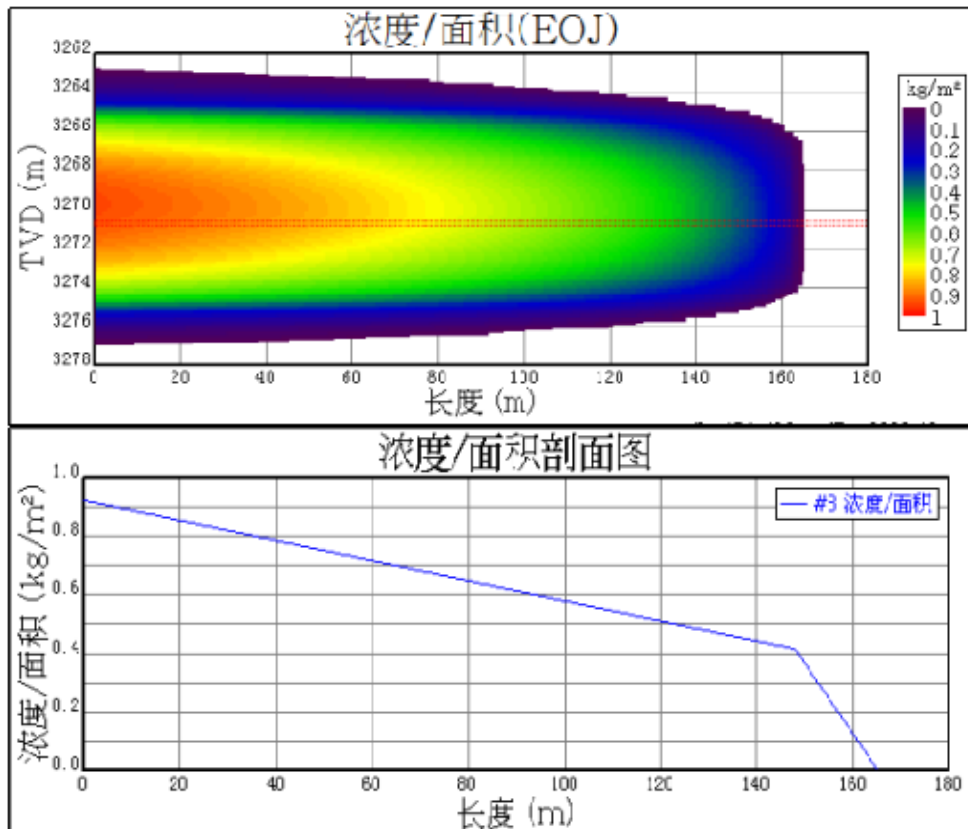


图 15 30/50 目+40/70 目支撑剂浓度分布

Figure 15 Concentration distribution (30/50+40/70)

对比发现,泵入 30/50 目+40/70 目组合支撑剂浓度最小,为 11 种方案中支撑剂浓度最小方案;泵入 30/50 目+40/70 目+100 目组合支撑剂浓度最大,为 11 种方案中支撑剂浓度最大方案。

进一步研究和对比泵入不同粒径支撑剂组合条件下裂缝导流能力。首先对比先泵入 100 目支撑剂的四种方案,如图 16 所示。

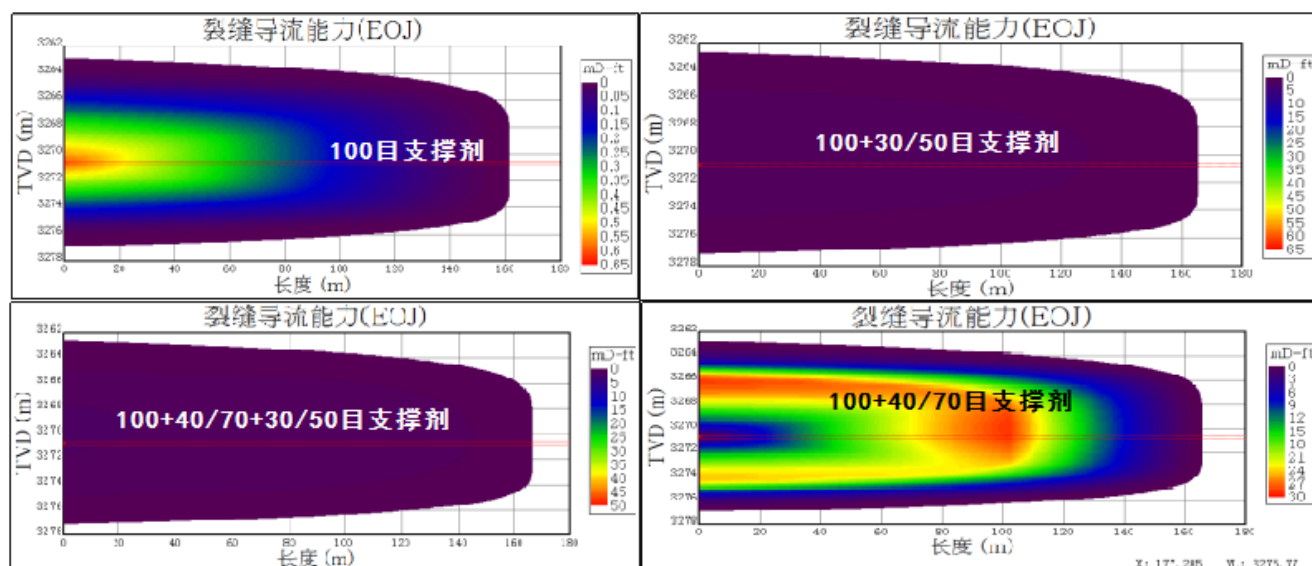


图 16 不同粒径支撑剂组合裂缝导流能力 (先泵入 100 目支撑剂)

Figure 16 Fracture conductivity with different proppant sizes (100 mesh proppant is pumped in first)

对比发现,100 目+40/70 目组合导流能力最大,而对于先泵入小/中粒径支撑剂,再泵入大粒径支撑剂的情况,由于大粒径支撑剂未有效进入裂缝及支撑剂分布结构不合理等原因,裂缝导流能力极低。

对比先泵入 30/50 目支撑剂的四种方案裂缝导流能力,如图 17 所示。

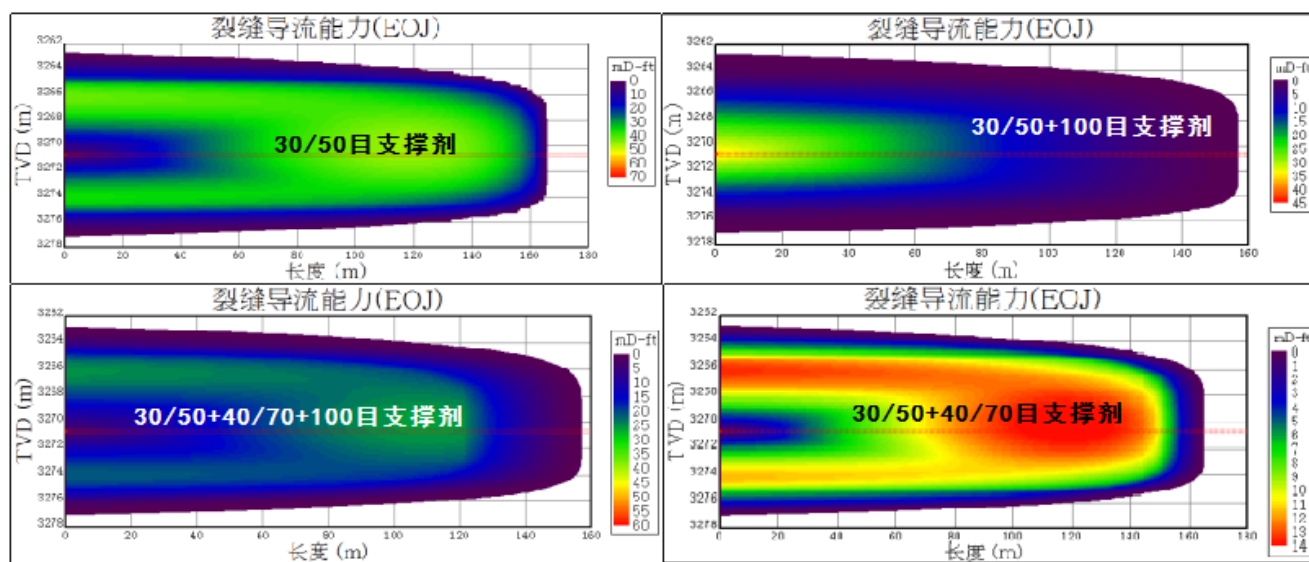


图 17 不同粒径支撑剂组合裂缝导流能力 (先泵入 30/50 目支撑剂)

Figure 17 Fracture conductivity with different proppant sizes (30/50 mesh proppant is pumped in first)

对比发现, 30/50 目+40/70 目组合导流能力最大, 而对于先泵入大/中粒径支撑剂, 再泵入小粒径支撑剂的情况, 即便支撑剂浓度增大, 裂缝导流能力急剧降低。

## 5 结论

1. 平均缝宽小于 1mm 时, 中/大粒径支撑剂难以进入裂缝网络, 无法实现有效支撑, 建议采用小/微粒径支撑剂。
2. 平均缝宽大于 1mm, 采用 100 目+40/70 目和 30/50 目+40/70 目组合皆可形成高导流裂缝, 大粒径支撑剂可有效进入裂缝中的条件下, 采用大粒径+中粒径支撑剂更有利于缝网导流能力的提高。这是由于大粒径+中粒径支撑剂组合颗粒沉降速度快, 且砂堤孔隙度大, 可达到较大的平衡高度, 增大裂缝的有效支撑宽度。
3. 30/50 目+40/70 目+100 目支撑剂粒径组合虽可达到最大的支撑剂浓度, 支撑裂缝导流能力未有效提高, 主要是由于裂缝中支撑剂分布结构不合理, 导致裂缝最终失效。泵入大/中粒径支撑剂后, 不适合再泵入小粒径支撑剂, 小粒径支撑剂适合在泵注前期使用。

## 参考文献

- [1] 潘林华, 张烨, 程礼军等. 页岩储层体积压裂复杂裂缝支撑剂的运移与展布规律 [J]. 天然气工业, 2018 (05): 61-70.
- [2] 赵俊, 赵银明, 陈仙江. 支撑剂在滑溜水中的运移规律研究 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2017, 14 (17): 20-25+4.
- [3] 战永平, 温庆志, 段晓飞. 压裂支撑剂运移和铺置虚拟仿真装置的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2016, 35 (06): 74-76+82.
- [4] Penny G S. An evaluation of the effects of environmental conditions and fracturing fluids upon long term conductivity of proppant [J]. SPE-16900. 1987.
- [5] Parker M A. Daniel B W. Fracturing treatment design improved by conductivity measurements under in situ conditions. SPE-16901. 1987.
- [6] 石豫. 页岩气井水力压裂支撑剂沉降及运移规律研究 [D]. 西安石油大学, 2016.
- [7] 王博学. 射孔孔道中压裂液流动与支撑剂运移规律研究 [D]. 西安石油大学, 2016.
- [8] 温庆志, 段晓飞, 战永平, 刘华, 李杨, 王淑婷. 支撑剂在复杂缝网中的沉降运移规律研究 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2016, 31 (01): 79-84.
- [9] 李吉斌. 致密储层水平井压裂裂缝中支撑剂沉降与运移规律研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2015.
- [10] Cobb S L, Farrell J J. Evaluation of long term proppant stability. SPE-14133. 1986.
- [11] Adam Dayan, Shaun M. Stracener, Peter E. Clark. Proppant Transport in Slickwater Fracturing of Shale Gas Formations [C]. SPE 125068, 2009.
- [12] Sahai R, Miskimins J L, Olson K E, et al. Laboratory Results of Proppant Transport in Complex Fracture Systems [C]. SPE168579, 2014.
- [13] Msalli A. Alotaibi and Jennifer L. Miskimins. Slickwater Proppant Transport in Complex Fractures: New Experimental Findings & Scalable Correlation [C]. SPE174828, 2015.
- [14] 李杨. 体积压裂复杂缝网支撑剂沉降规律研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2015.
- [15] 杨尚谕, 杨秀娟, 闫相祯, 许建国, 樊恒. 煤层气水力压裂缝内变密度支撑剂运移规律 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (12): 2459-2465.
- [16] 李靛. 压裂缝内支撑剂沉降和运移规律实验研究 [D]. 西南石油大学, 2014.
- [17] 温庆志, 翟恒立, 罗明良等. 页岩气藏压裂支撑剂沉降及运移规律实验研究 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19 (06): 104-107+118.
- [18] Atul Bokane, Siddharth Jain. Transport and Distribution of Proppant in Multistage Fractured Horizontal Wells: A CFD Simulation Approach [C] SPE166096, 2013.
- [19] Yajun Liu. Settling and hydrodynamic retardation of proppant in hydraulic fractures [D]. The university of Texas at Austin, 2006.
- [20] 张鹏. 煤层气井压裂液流动和支撑剂分布规律研究 [D]. 中国石油大学, 2011.
- [21] 郭建春, 曾凡辉, 余东合, 赵金洲, 林怀璟. 压裂水平井支撑剂运移及产量研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2009, 31 (04): 79-82+203.
- [22] 郭大立, 纪禄军, 赵金洲. 支撑剂在三维裂缝中的运移分布计算 [J]. 河南石油, 2001 (02): 32-34+62.