

煤田地质与勘探
Coal Geology & Exploration
ISSN 1001-1986, CN 61-1155/P

《煤田地质与勘探》网络首发论文

题目: 井地联合压裂长输管路支撑剂悬浮运移规律模拟研究
作者: 李浩哲, 姜在炳, 孙四清, 朱传勇, 范耀, 郭勇, 程斌
收稿日期: 2023-01-15
网络首发日期: 2023-09-05
引用格式: 李浩哲, 姜在炳, 孙四清, 朱传勇, 范耀, 郭勇, 程斌. 井地联合压裂长输管路支撑剂悬浮运移规律模拟研究[J/OL]. 煤田地质与勘探.
<https://link.cnki.net/urlid/61.1155.P.20230904.1810.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

井地联合压裂长输管路支撑剂悬浮运移规律模拟研究

李浩哲^{1,2}, 姜在炳², 孙四清², 朱传勇³, 范耀², 郭勇³, 程斌²

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266000)

摘要：井地联合压裂是煤矿井下长钻孔分段压裂的发展趋势之一，压裂液经地面压裂泵加压后通过地面贯通井、煤矿井下长输管路进入煤矿井下长钻孔实施大排量压裂。支撑剂在长输管路中的悬浮运移规律对于优化设计加砂参数、避免管路中砂堵具有重要意义。通过室内实验评价压裂液的流变性能和携砂性能；基于欧拉-颗粒流理论构建数值模拟模型，研究水平管内支撑剂悬浮运移规律及其影响因素；探讨压裂液携带支撑剂运移的流态以及临界沉降流速的计算模型。结果表明：1%降阻剂的加入能够使活性水压裂液黏度提高3~5倍，支撑剂密度越小，压裂液黏度、砂比越高，支撑剂在压裂液中的沉降速度越小；支撑剂在水平管内的流动受到多因素的综合影响，压裂液流速越小，支撑剂密度和粒径越大，支撑剂在管道底部的沉积越严重，携砂效果越差；随着管路直径的增大，管道出口截面支撑剂体积分数最大的位置由管道中下部移动至管道底部，支撑剂流动对于管路的磨损加重；砂比越大，支撑剂间的相互作用越强，压裂液携砂能力降低；优选采用疏浚技术规范推荐的模型计算活性水携砂条件下的支撑剂临界沉降速度，随着管路直径的增大，所需的临界携砂排量呈指数式增大，提高压裂液黏度可降低携砂所需的临界排量。建立的携砂运移临界排量模型和总结的支撑剂运移规律可对管路直径和压裂液排量进行优化匹配，为井地联合压裂施工提供理论支撑。

关键词：井地联合压裂；长输管路；支撑剂悬浮运移；携砂性能；欧拉-颗粒流；临界沉降速度

中图分类号：TE35 **文献标志码：**A

Study on suspension and migration law of proppant in long-distance pipeline for ground-coalmine combined hydraulic fracturing

LI Haozhe^{1,2}, JIANG Zaibing², SUN Siqing², ZHU Chuanyong³, FAN Yao², GUO Yong³, CHENG Bin²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Xi'an Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 3. College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266000, China)

Abstract: Ground-coalmine combined hydraulic fracturing is one of the development trend of staged fracturing of long boreholes in underground coal mines. After the fracturing fluid is pressurized by the ground fracturing pump, it enters the long boreholes in underground coal mines through the through-well and long pipeline to conduct large-pump-rate fracturing. The suspension and migration law of proppant in the long pipeline is of great significance for optimizing the sanding parameters and avoiding sand blockage in the pipeline. The rheological properties and sand carrying properties of fracturing fluid were evaluated by laboratory tests. Then, based on the Euler-particle flow theory, a numerical simulation model was constructed to study the transport law of proppant in horizontal pipe. The flow pattern of fracturing fluid and the calculation model of critical settlement velocity were discussed. The results show that the addition of 1% friction reducer can increase the viscosity of active water fracturing fluid by 3~5 times. The smaller the proppant density, the larger the fracturing fluid viscosity and sand concentration, and the smaller the settling velocity of proppant in fracturing fluid. The flow of proppant in horizontal pipe is affected by many factors. The smaller the flow rate of fracturing fluid, the larger the density and particle size of proppant, and the more serious the deposition of proppant at the bottom of the pipe, and the worse the sand carrying effect is. With the increase of pipeline diameter, the maximum volumetric concentration of proppant at the outlet moves from the middle and lower part of the pipeline to the bottom of the pipeline, and the flow of proppant aggravates the wear of the pipeline. The larger the sand concentration is, the stronger the interaction between proppants is, and the sand carrying capacity of fracturing

收稿日期：2023-01-15；修回日期：2023-08-28

基金项目：天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目（2022-2-TD-ZD007）；中煤科工西安研究院（集团）有限公司顶层示范项目（2020XAYDC04-04）；陕西省创新能力支撑计划项目（2022TD-02）

第一作者：李浩哲，1990年生，男，河南洛阳人，博士研究生，助理研究员，从事煤层气开发与储层改造研究。E-mail: lihaozhe@cctegxian.com

通信作者：姜在炳，1970年生，男，重庆人，博士，研究员，博士生导师，从事煤层气勘探与开发研究。E-mail: jiangzaibing@cctegxian.com

fluid is reduced. The model recommended by dredging technical specification is preferred to calculate the critical settling velocity of proppant under the condition of active water fracturing fluid. With the increase of pipeline diameter, the required critical sand carrying pump rate increases exponentially. Increasing the viscosity of fracturing fluid can reduce the critical sand carrying pump rate. According to the critical pump rate model of sand carrying migration, the pipeline diameter and fracturing fluid pump rate can be optimized and matched. The research results can provide theoretical support for ground-coalmine combined hydraulic fracturing.

Keywords: ground-coalmine combined hydraulic fracturing; long-distance pipeline; proppant suspension and migration; sand-carrying performance; Euler-granular theory; critical deposition velocity

我国煤层普遍渗透性低, 矿井瓦斯治理难度大。为提高瓦斯抽采效果, 引入定向长钻孔分段加砂压裂技术作为煤层增透措施, 用于提高瓦斯抽采效果^[1-4]。受煤矿井下作业条件、装备性能限制, 现有压裂施工排量不高于 $1.5\text{m}^3/\text{min}$, 加砂砂比不高于 5%。为进一步提高长钻孔压裂施工效果, 发挥地面压裂设备以及煤矿井下施工定向长钻孔的成本优势, 井地联合压裂施工模式是未来的发展趋势^[5-6]: 依靠地面压裂泵, 通过地面贯通井、高压输送管汇, 将携砂压裂液从地面输送至煤矿井下, 实现煤矿井下长钻孔的大排量、高砂比分段压裂。施工过程中, 压裂液携带支撑剂在长输管路内运移数百米甚至上千米才能进入地层。研究支撑剂在长输管路内的悬浮运移规律对于压裂施工过程中支撑剂的选择、支撑剂施工砂比等参数的优化设计以及避免管道内沉砂造成砂堵具有十分重要的意义。

地面煤层气水平井分段压裂时, 压裂液携带支撑剂在套管内长距离运移进入地层, 与支撑剂在长输管路内的运移过程相似。压裂液携带支撑剂在管道内的流动过程已经得到了一定的研究。Oroskar A R & Turian R M^[7]基于大量的实验数据拟合建立了水平管内携砂液悬浮流动的临界速度计算模型。Gillies R G 等^[8]开展室内试验研究了不同颗粒粒径、颗粒体积分数条件下的出口支撑剂分布和流动摩阻。Ekambara K 等^[9]、SWAMY M 等^[10]采用数值模拟方法研究携砂流体在水平管路内的流动。温庆志等^[11]采用室内实验研究滑溜水压裂条件下支撑剂在水平井筒内的沉降规律, 分析了水平井直径、排量、砂比、压裂液黏度等参数对临界沉降速度和临界再悬浮速度的影响。吕其超等^[12]采用管流测试装置, 对新型聚合物压裂液在水平管及竖直管内的携砂性能进行了研究。曾思睿等^[13]开展室内试验, 研究对比了水平井中不同倾角井段的携砂流速变化规律及其影响因素。刘巨保等^[14]结合模拟试验和数值方法分析了缩扩管携砂液流动特征。杨思齐等^[15]数值模拟研究了高压管汇弯管部位压裂液固液两相流动及流固耦合效应。以上研究表明, 支撑剂在压裂管道内的运移规律受到管路直径、压裂液性质、支撑剂性质、支撑剂体积分数等多种因素的综合影响,

并且压裂液携带支撑剂运移存在临界流速。

但是, 目前缺乏针对煤层压裂应用较多的活性水压裂液的研究, 缺乏携砂液流态的对比分析。笔者基于井地联合压裂施工模式, 以煤层气压裂常用的活性水压裂液为研究对象, 在测试压裂液流变性能、携砂性能的基础上, 数值模拟分析支撑剂在管路内的悬浮运移规律及影响因素, 分析携砂液在管内的流态, 并构建支撑剂悬浮流动的临界排量模型, 为施工参数的优化设计提供理论支撑。

1 压裂液性能测试

1.1 压裂液流变性能

采用 MCR102 流变仪测试压裂液黏度随温度的变化曲线。此外为了对比降阻剂的影响, 实验选择在压裂液中加入 800 万分子量非离子聚丙烯酰胺(PAM)。压裂液 1 配方: 水+1%KCl; 压裂液 2 配方: 水+1%KCl+1%聚丙烯酰胺。两种压裂液黏度曲线如图 1 所示。压裂液 1 和压裂液 2 的黏度都随着温度的增加而降低。压裂液 1 的黏度较小, 当温度从 20°C 提高至 80°C 黏度下降幅度小。由于只添加了 1%的 KCl, 其黏度与纯水极为接近。随着温度的变化, 压裂液 2 的黏度约为压裂液 1 黏度的 3~5 倍。添加降阻剂的压裂液黏度受温度影响较大, 随着温度的上升, 压裂液 2 的黏度下降较明显, 但始终高于压裂液 1 的黏度。

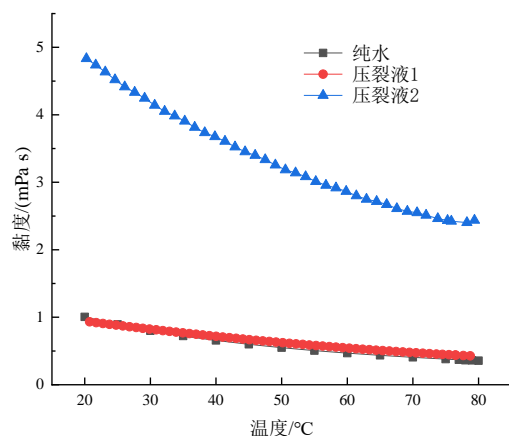


图 1 压裂液的黏温曲线

Fig.1 Viscosity-temperature curve of fracturing fluid

1.2 压裂液携砂性能

携砂性能是压裂液的一种重要性能，针对上述两种配方的压裂液、4种支撑剂(石英砂、覆膜砂、覆膜核桃壳、轻质陶粒)，开展携砂性能测试，支撑剂粒径为 $425\text{ }\mu\text{m}\sim 850\text{ }\mu\text{m}$ 。试验中所用的支撑剂如图2所示。首先测试支撑剂平均颗粒密度和体积密度，结果见表1。

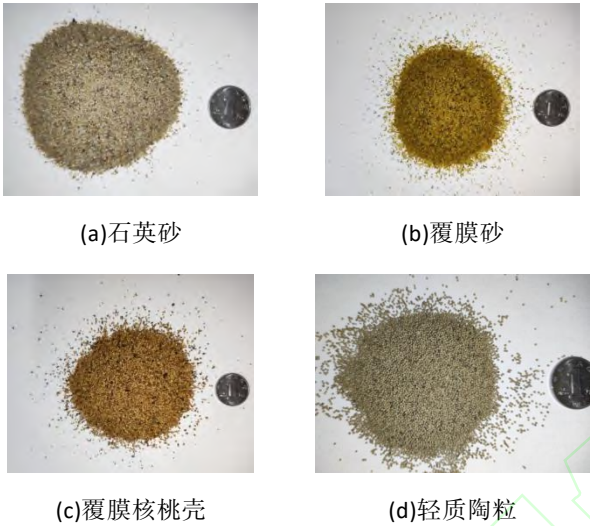


图2 支撑剂
Fig.2 Proppant

表1 支撑剂性质
Table 1 Proppant property

支撑剂类型	平均颗粒密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	体积密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
石英砂	2.65	1.65
覆膜砂	2.48	1.59
覆膜核桃壳	1.18	0.65
轻质陶粒	2.40	1.30

目前对携砂液携砂性能的评价主要有两种方式，即单颗粒支撑剂沉降法和悬砂性能测试法。考虑到单颗粒支撑剂沉降法反映不出携砂液携带一定体积分数支撑剂的特性，本试验采用悬砂性能测试法对比携砂液的携砂性能。

试验选择6%、10%和15%3种砂比，共开展试验组数为24组，结果见表2。其中，完全沉降时间是指支撑剂颗粒全部沉降或不再有支撑剂发生沉降所经历的时间。平均沉降速度是通过统计数十个发生沉降的支撑剂颗粒的沉降速度并求取平均值得到。

从表2可知，随着砂比的增加，所有试验组的平均沉降速度均有所减小。这主要是因为随着砂比的增加，支撑剂在压裂液中的分散性能变差，有聚集团出现，各聚集团相互阻碍减缓了沉降速度，且聚集团中

易夹杂空气，导致整个聚集团密度变小，这也进一步导致平均沉降速度的减小。

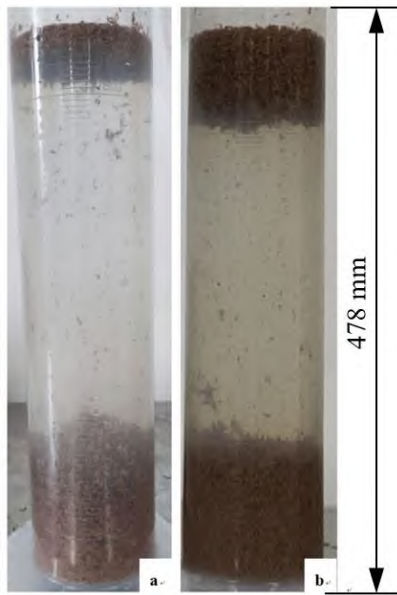
表2 支撑剂沉降试验结果
Table 2 Experiment results of proppant settlement

方案	砂比/ %	支撑剂	压裂液 类型	完全沉降 时间/s	平均沉降 速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	6	石英砂	压裂液1	5.0	9.5
2	10			5.2	9.2
3	15			5.5	8.7
4	6	覆膜砂	压裂液1	9.5	9.0
5	10			10.5	8.8
6	15			11.5	8.5
7	6	覆膜核桃壳	压裂液1	64.0	4.8
8	10			87.0	4.6
9	15			99.0	4.3
10	6	轻质陶粒	压裂液1	4.0	7.9
11	10			4.4	7.7
12	15			5.6	7.2
13	6	石英砂	压裂液2	21.5	6.6
14	10			25.7	5.7
15	15			27.3	5.3
16	6	覆膜砂	压裂液2	26.8	6.3
17	10			29.5	5.8
18	15			35.8	5.5
19	6	覆膜核桃壳	压裂液2	88.0	2.7
20	10			105.0	2.5
21	15			114.0	2.4
22	6	轻质陶粒	压裂液2	24.8	5.25
23	10			25.5	5.2
24	15			26.5	5.1

对比支撑剂的平均沉降速度发现，随着支撑剂密度的增加，含砂压裂液的平均沉降速度增加，完全沉降时间减少。石英砂是平均沉降速度最大和完全沉降时间最短的支撑剂；覆膜核桃壳是平均沉降速度最小和完全沉降时间最长的支撑剂。

将压裂液1和压裂液2中的沉降情况对比，同一种支撑剂在压裂液2中的平均沉降速度明显小于在压裂液1中的平均沉降速度。压裂液2中聚丙烯酰胺的存在极大地降低了支撑剂的平均沉降速度。

此外，对于覆膜核桃壳试验组，支撑剂不能完全沉降，并且沉降率与砂比、压裂液的性质有关。支撑剂无法完全沉降是因为覆膜核桃壳的颗粒密度不均匀，只有部分核桃壳的密度大于压裂液，从而导致密度小于压裂液的覆膜核桃壳支撑剂颗粒不发生沉降。在不同的压裂液中，覆膜核桃壳的沉降情况有所差别，如图3所示，“砂比10%-压裂液1”试验中覆膜核桃壳支撑剂颗粒完全沉降量约为90%，而“砂比10%-压裂液2”试验中覆膜核桃壳支撑剂颗粒完全沉降量仅为75%，这是由于压裂液2中添加有降阻剂提高了压裂液的密度及黏度。相对于覆膜核桃壳，其他三种支撑剂均可在一定时间内完全沉降，这是由于其支撑剂颗粒密度均大于压裂液。



(a) 砂比 10%-压裂液 1 (b) 砂比 10%-压裂液 2

图 3 不同压裂液中覆膜核桃壳沉降情况

Fig.3 Settlement of covered walnut shell in different fracturing fluids

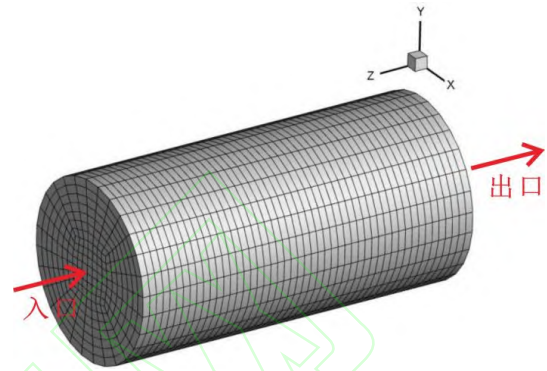
2 压裂液携砂运移影响因素数值模拟

2.1 模型构建

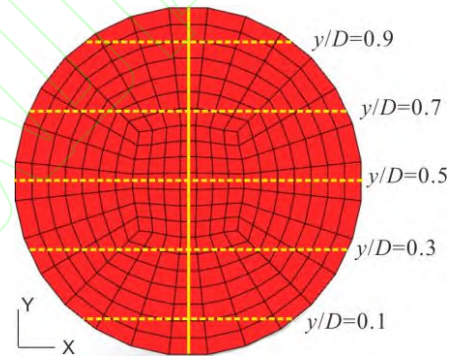
携砂液一般为固液两相混合流动,且离散相(固相)体积分数较高,常采用三维欧拉-颗粒两相流理论对携砂液在管路中的流动过程进行描述^[16-17]。携砂液流动过程中,将支撑剂(固相)作为拟流体,并把固、液两相置于欧拉坐标系。压裂液流动过程中其与支撑剂相之间相互耦合。携砂液在管道内流动过程中,压裂液对支撑剂会产生浮力和曳力,且固相颗粒加速会对流体产生虚拟质量力,其他相间作用力影响可忽略不计。此外,假设支撑剂颗粒均匀且粒径相同,并且支撑剂颗粒相不发生相变,采用平均粒径对支撑剂进行表征。

基于 ANSYS 软件,建立的数值模型如图 4 所示。采用前处理软件 ICEM 对模型进行网格剖分,基于 Fluent 对模型进行求解。综合考虑模型形状及计算稳定性,模型采用六面体网格,压裂液出入口截面采用 O 型剖分方法。水平管固体边界设置为无滑移边界条件。圆管左端为压裂液与支撑剂颗粒入口,设置为速度入口边界条件;圆管右端为携砂液流出出口,设置为压力出口边界条件且出口压力为 0 Pa。采用入口边界条件对模型进行初始化。本研究中的管长较长,要求压力与速度耦合模型能够求解大范围的多相流且鲁棒性强,优选 Phase Coupled Simple 算法处理压力与速度的耦合。采用颗粒流动力学理论处理支撑剂与支

撑剂、压裂液与支撑剂的相互作用。参考管道内以及压裂缝内支撑剂运移数值模拟^[18],取支撑剂堆积极限为 0.64,支撑剂颗粒间的摩擦角为 30°。控制方程离散格式为一阶迎风格式,迭代步计算收敛标准为各项残差均小于 1×10^{-4} 。采用瞬态计算方法计算至稳态,单步步长 0.001 s,计算时间 100 s,以保证流动充分发展。



(a) 管流数值模型



(b) 出入口截面 O 型剖分网格

图 4 数值模型

Fig.4 Numerical model

2.2 模型验证

为验证模型的准确性,将模型计算结果与文献[8]的室内试验结果进行对比。验证模型与试验中相关参数保持一致,其中,管道内径为 103 mm,管道长度为 10 m,注入速度为 5.4 m/s,固体颗粒为石英砂,密度为 2 650 kg/m³,支撑剂体积分数分别为 0.10、0.20 和 0.30。

Gillies R G 等在试验中采用密度计测量管流截面的混合液密度,在垂向上测量弦平均混合液密度,然后转化为混合物中颗粒的体积分数。在本文的数值模拟中,采用同样的方法,计算出口处管流截面的弦平均体积分数,弦平均固体颗粒体积分数^[10]的计算方法为:

$$C_v\left(\frac{y}{D}\right)=\frac{1}{2x}\int_{-x}^xC\left(x,\frac{y}{D}\right)dx \quad (1)$$

式中： C_v 为管流截面任意位置处弦平均支撑剂体积分数，小数； C 为空间体积分数，小数； x 为水平方向坐标； y 为距离管子底部的高度，m； D 为管子直径，m。其中，选择 y/D 分别为0.1、0.3、0.5、0.7和0.9的5个位置处(图4b)，计算弦平均支撑剂体积分数。

模拟计算了出口处的弦平均支撑剂体积分数分布情况，与室内试验结果对比如图5所示。数值模拟结果与室内试验结果出口处支撑剂体积分数分布呈现相同的趋势，误差在合理范围之内，证明了模型的有效性和正确性。

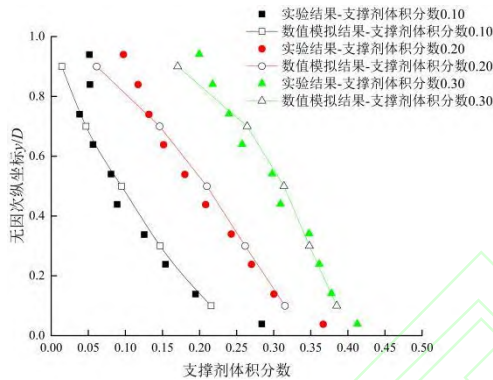


图5 数值模拟与室内试验结果对比

Fig.5 Comparison of numerical simulation and experimental results

2.3 模型参数选取

采用验证后的模型，研究不同条件下支撑剂的悬浮运移规律。模型管径参照4 1/2寸套管进行设置，以壁厚为7 mm的套管为例，管道内径设置为100 mm。压裂液和支撑剂相关参数基于第1节中的室内试验结果进行设置。压裂液性质参照压裂液1，密度1000 kg/m³，压裂液黏度1 mPa·s。支撑剂性质参照试验中使用的20/40目石英砂进行设置，支撑剂平均粒径600 μm，支撑剂密度2 650 kg/m³。边界条件方面，入口采用恒定速度注入，并且假设通过管道前压裂液和支撑剂经过充分混合，压裂液与支撑剂注入速度相同。考虑到井上下联合压裂施工条件，在基础模型中设置排量为5 m³/min。

模拟计算的管路长度对于支撑剂运移流态具有重要影响，为此，对比了当管道长度为1、10和20 m时活性水压裂液的携砂运移情况。从图6中可以看出，长度为1 m时出口截面的支撑剂体积分数分布较长度

为10 m和20 m时更加均匀，说明流动长度短，压裂液与支撑剂的两相流动尚未得到充分发展。当管道长度从10 m增大至20 m时，流动计算至稳态后出口截面支撑剂体积分数分布情况相同，说明计算模型中管道长度为10 m时压裂液与支撑剂的两相流动已经可以得到充分发展，能够满足模拟计算要求，因此，后续计算模型中管道长度均采用10 m。

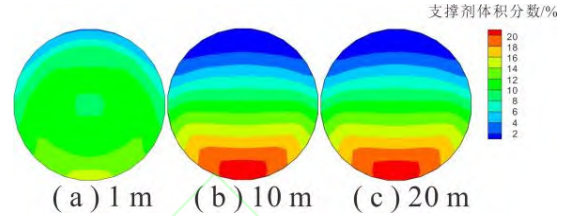


图6 不同管道长度压裂液携砂运移对比

Fig.6 Comparison of sand for different pipeline lengths

2.4 影响因素分析

2.4.1 压裂液排量

在管径一定的条件下，压裂液排量决定了压裂液的携砂流速。数值模拟研究了当压裂液排量从1 m³/min增大至9 m³/min时的压裂液携砂沉降规律，出口截面支撑剂体积分数分布如图7所示。当排量为1 m³/min时，在出口截面的下半部分颗粒体积分数高，上半部分颗粒体积分数低。随着排量的增大，压裂液对于支撑剂的湍流携带作用增强，管道上部颗粒体积分数逐渐增大，管道出口截面支撑剂体积分数在垂向上的分布更加均匀，代表支撑剂悬浮程度增大，压裂液携砂能力逐渐增强。

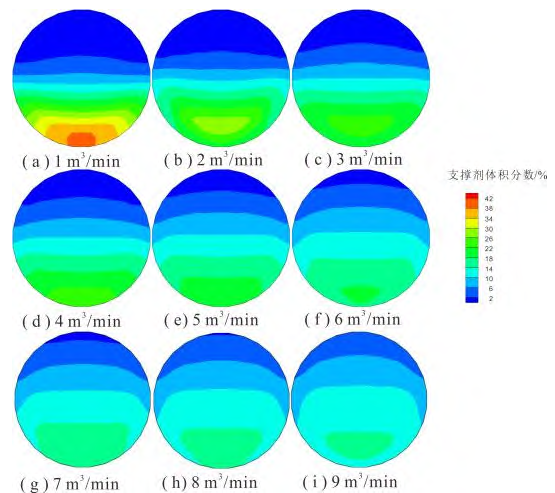


图7 不同排量条件下出口截面支撑剂体积分数分布

Fig.7 Sand volumetric concentration distribution at the outlet for different pump rates

2.4.2 支撑剂密度

支撑剂密度对于支撑剂在压裂液中的沉降速度具有重要影响。数值模拟研究了石英砂、覆膜砂、覆膜核桃壳、轻质陶粒 4 种支撑剂的运移规律。模拟过程中,其他参数保持不变。出口截面支撑剂体积分数分布如图 8 所示。覆膜核桃壳支撑剂密度与压裂液密度最为接近,出口处支撑剂体积分数分布最为均匀。随着支撑剂密度的增大,支撑剂密度与压裂液密度的差异增大,在重力作用下支撑剂在压裂液中更容易发生沉降,压裂液携砂难度相应增大、携砂能力降低,支撑剂在管道底部沉降更加明显,携砂液流动过程中对于管道底部的磨损加剧。

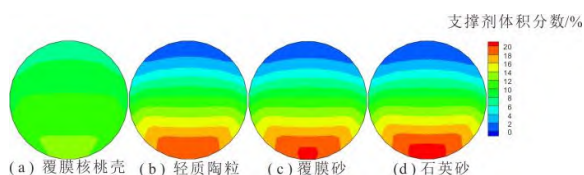


图 8 不同支撑剂密度条件下出口管流截面支撑剂体积分数分布

Fig.8 Sand volumetric concentration distribution at the outlet for different proppant densities

2.4.3 支撑剂粒径

数值模拟研究了支撑剂平均粒径分别为 150 μm 、300 μm 、600 μm 时的支撑剂运移规律。模拟过程中,其他参数保持不变。出口截面支撑剂体积分数分布如图 9 所示。出口截面支撑剂体积分数最大的位置均位于管子底部,支撑剂粒径为 150 μm 时,纵向上的支撑剂体积分数分布最为均匀,压裂液携砂效果最好。随着支撑剂粒径的增大,单个支撑剂颗粒的质量增大,支撑剂在压裂液中更易发生沉降,压裂液对支撑剂的携带能力降低。

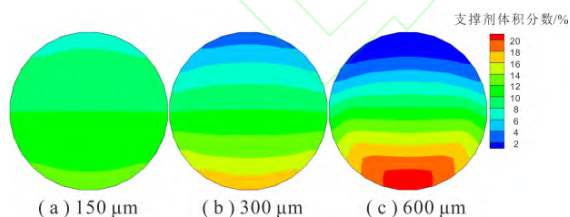


图 9 不同支撑剂粒径条件下出口截面支撑剂体积分数分布

Fig.9 Sand volumetric concentration distribution at the outlet for different particle sizes

2.4.4 管道直径

数值模拟研究了管道直径分别为 62、76、100 和 124.3 mm 时的支撑剂运移规律。模拟过程中,其他参数保持不变。出口截面支撑剂体积分数分布如图 10 所示。管径越大,支撑剂沉降越明显。当管径为 62 mm

和 76 mm 时,出口处支撑剂体积分数最大的区域位于管道中下部。当直径为 100 mm 和 124.3 mm 时,出口处支撑剂体积分数最大的区域位于管子底部。这是由于随着管径的增大,液体流动的雷诺数降低,压裂液流动对于支撑剂的湍流携带作用减弱,携砂液流动过程中对于管道的磨损将加重。在压裂液排量一定的条件下,增大管道直径,相应的携砂流速降低,支撑剂在管道底部的沉降也更加明显,压裂液对支撑剂的携带能力减弱。

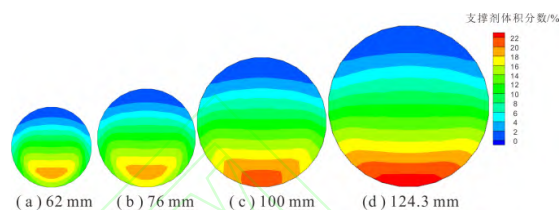


图 10 不同管径条件下出口截面支撑剂体积分数分布

Fig.10 Sand volumetric concentration distribution at the outlet for different pipeline diameters

2.4.5 砂比的影响

数值模拟研究了砂比分别为 10%、15%和 20%时的支撑剂运移规律。模拟过程中,其他参数保持不变。出口截面支撑剂体积分数分布如图 11 所示。随着支撑剂砂比的增大,支撑剂沉积量增大。并且对于砂比为 10%和 15%的情况,支撑剂体积分数最大的区域位于管道底部,并且与管道底部接触。而对于砂比为 20%的情况,支撑剂体积分数最大的区域位于管道中下部,与管道底部并未接触,并且由于支撑剂体积分数增大,管道内部支撑剂相互作用增强,出口处支撑剂体积分数最大区域由管道底部上移。在同样的流速条件下,压裂施工加砂砂比越高,压裂液携砂能力降低,管道内发生砂堵的风险变大。

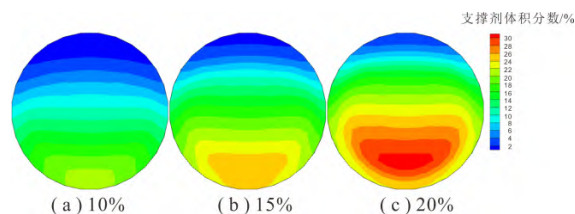


图 11 不同砂比条件下出口截面支撑剂体积分数分布

Fig.11 Sand volumetric concentration distribution at the outlet for different injected sand concentrations

3 压裂液携砂运移流态分析

压裂液携带支撑剂在管道中流动时,根据支撑剂在管道内的悬浮/沉降、砂堤形成与否等情况,压裂液携砂运移流态可分为 4 种^[19-22]:静态砂堤流动

(stationary-bed flow)、移动砂堤流动(moving-bed flow)、非均匀流动(heterogeneous flow)和均匀流动(homogeneous flow),四种流态如图12所示^[23]。对于静态砂堤流动,支撑剂沉降于管子底部,形成具有一定厚度的砂堤,支撑剂颗粒运移速度慢甚至趋于零;对于移动砂堤流动,支撑剂以移动砂堤的形式向前移动,仅有少量支撑剂悬浮在砂堤之上;对于非均匀流动,支撑剂悬浮量增大,上部支撑剂的运移速度大于下部支撑剂;对于均匀流动,更多的支撑剂悬浮分散在压裂液中,支撑剂运移速度的纵向均匀性增强。随着压裂液流速由低到高,支撑剂流态由静态砂堤流动向均匀流动过渡。随着压裂液流速的增大,支撑剂流态发生变化,当流态由移动砂堤流动向非均匀流动转变时,支撑剂不发生沉降,此时对应的流速被称为临界沉降速度。许多学者已经建立了临界沉降速度的计算模型。首先,采用数值模拟方法计算得到支撑剂体积分分数分布情况,通过分析支撑剂体积分分数在压裂液流动方向上的变化规律,确定压裂液携带支撑剂的流态;然后,与前人临界沉降速度的计算结果进行对比,对前人建立的计算模型进行优选。

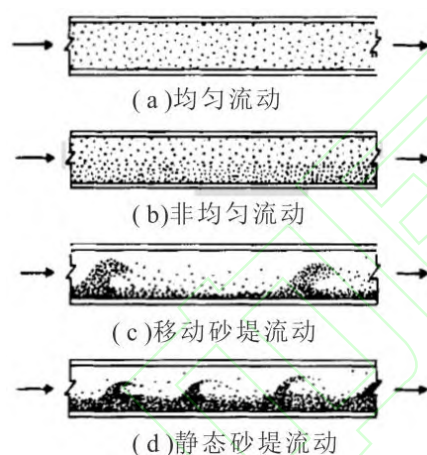


图12 支撑剂流态(据文献[24],修改)

Fig.12 Flow regimes of slurry transport

采用数值模拟方法,同样以管道内径为100 mm为例,研究了当支撑剂平均粒径分别为150、300和600 μm 时的支撑剂悬浮运移情况。沿压裂液流动方向截取管道中间部位的支撑剂体积分分数分布如图13所示,图中管道长度为10 m,管长方向与高度方向的比值为0.02:1。对于数值模拟的9组结果,对比支撑剂体积分分数分布情况,当排量为0.5 m^3/min ,3种支撑剂粒径条件下流态均为移动砂堤流动;当排量增大至1.0 m^3/min ,支撑剂粒径为150 μm 时的流态为非均匀流动,

支撑剂粒径为300 μm 和600 μm 时的流态转变为移动砂堤流动;当排量为2.0 m^3/min ,3种支撑剂粒径条件下流态均为非均匀流动。

前人建立的典型临界沉降速度计算模型见表3。以活性水压裂液携带支撑剂过程为研究对象,支撑剂密度为2650 kg/m^3 ,压裂液密度为1000 kg/m^3 ,压裂液黏度1 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,支撑剂砂比10%,管道直径为100 mm。采用不同的临界沉降速度计算模型,计算当支撑剂粒径由100 μm 增大至1000 μm 时对应的临界沉降速度,结果如图14所示,其中,临界沉降速度曲线以上区域为非均匀流动和均匀流动,曲线以下区域为移动砂堤流动和静态砂堤流动。对比各个数学模型的计算结果,Newitt et al模型计算的临界沉降速度在研究的支撑剂粒径范围内变化幅度最大。疏浚技术规范和Zanddi I & Govatos G模型计算结果较为接近。Durand模型和Jufin Lopatin模型的计算结果较为接近,当支撑剂粒径较小时,其对临界沉降速度的预测结果大于疏浚技术规范和Zanddi I & Govatos G模型,随着支撑剂粒径的增大,其对临界沉降速度的预测结果小于疏浚技术规范和Zanddi I & Govatos G模型。MTI Holland模型和Oroskar A R & Turian R M模型对临界沉降速度的预测趋势更加接近,且Oroskar A R & Turian R M模型稍大于MTI Holland模型。

结合以上分析结果对临界沉降速度计算模型进行优选。首先,从2.4节的数值模拟分析结果可知,活性水携带支撑剂运移过程受到压裂液流速、支撑剂密度、支撑剂粒径、管道直径、砂比等因素的综合影响,应优选包含上述所有因素的数学模型。Newitt et al模型未考虑支撑剂体积分分数的影响,Jufin Lopatin模型未考虑支撑剂密度的影响。然后,将图13中数值模拟的9种情况标注在图14中,将数值模拟得到的流态与不同模型的计算结果进行对比。当排量为1.0 m^3/min 、支撑剂粒径为300 μm 和600 μm 时的流态为移动砂堤流动,而MTI Holland模型和Oroskar & Turian模型的计算结果与数值模拟结果不符。此外,对于疏浚技术规范模型,当支撑剂粒径 $d < 0.05 \text{ mm}$ 时,模型与Durand模型相似,当 $d > 0.05 \text{ mm}$ 时,模型与Zandi & Govatos模型相似,因此,优选采用疏浚技术规范推荐的模型,计算活性水携砂条件下的支撑剂临界沉降速度。

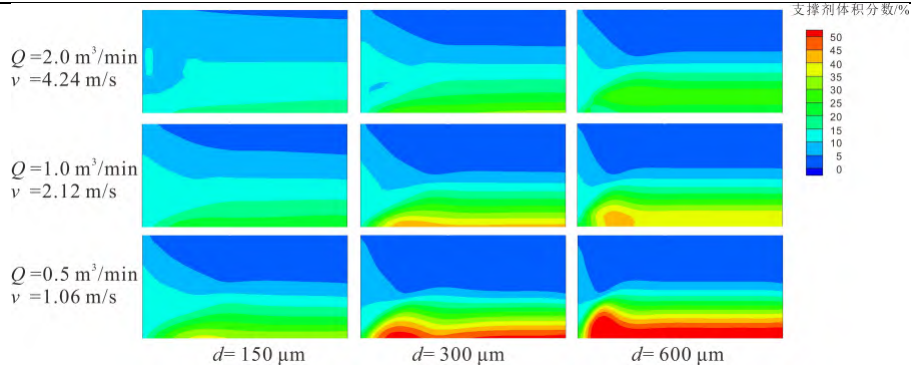


图 13 沿管长方向支撑剂体积分数分布

Fig.13 Sand volumetric concentration distribution along the pipe

表 3 典型支撑剂临界沉降速度计算模型

Table 3 Typical model for calculation of critical deposited velocity

序号	来源	数学模型	特点
1	Newitt et al. ^[24]	$17v_t < v_c < (1800gDv_t)^{1/3}$ v_t 为支撑剂颗粒在静态压裂液中的沉降速度	未考虑支撑剂体积分数的影响, 提出了支撑剂均匀流动的临界速度
2	Zandi & Govatos ^[24]	$v_c > (40C)^{1/2} g^{1/4} D^{1/2} v_t^{1/2} d^{-1/4}$ v_t 为支撑剂颗粒在静态压裂液中的沉降速度	与疏浚技术规范中 $d > 0.05 \text{ mm}$ 时的公式形式相似
3	Durand ^[24]	$v_c > F_L \sqrt{2gD(s-1)}$ F_L 为支撑剂粒径和支撑剂砂比的函数	仅给出了当支撑剂体积分数为15%、10%、5%和2%时对应的 F_L 值
4	Jufin Lopatin ^[24]	$v_c > 8.3D^{1/3} (C\psi)^{1/6}$ ψ 取决于支撑剂粒径	给出了不同支撑剂粒径范围对应的 ψ 取值; 未考虑支撑剂密度的影响。
5	MTI Holland ^[24]	$v_c > 1.7 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{d}}\right) \sqrt{D} \left(\frac{C}{C+0.1}\right)^{1/6} \sqrt{\frac{s-1}{1.65}}$	
6	Oroskar & Turian ^[7]	$v_c > 1.85C^{0.1536} (1-C)^{0.3564} \left(\frac{d}{D}\right)^{-0.378} N_{Re}^{0.09} F^{0.30}$ N_{Re} 为修正雷诺数, 且 $N_{Re} = D\rho\sqrt{gd(s-1)}/\mu$, F 通常接近于1($F > 0.95$)	基于大量的实验数据拟合得到
7	疏浚工程技术规范 ^[25]	$v_c > \begin{cases} 0.928C^{0.105} d^{0.056} \sqrt{2gD(s-1)} & (d < 0.05\text{mm}) \\ (90C)^{1/3} g^{1/4} D^{1/2} v_t^{1/2} d^{-1/4} & (d > 0.05\text{mm}) \end{cases}$	对于不同的支撑剂粒径范围, 采用不同的方程形式, 当 $d < 0.05\text{mm}$ 时, 模型与 Durand 模型相似, 当 $d > 0.05\text{mm}$ 时, 该模型与 Zanddi I & Govatos G 相似

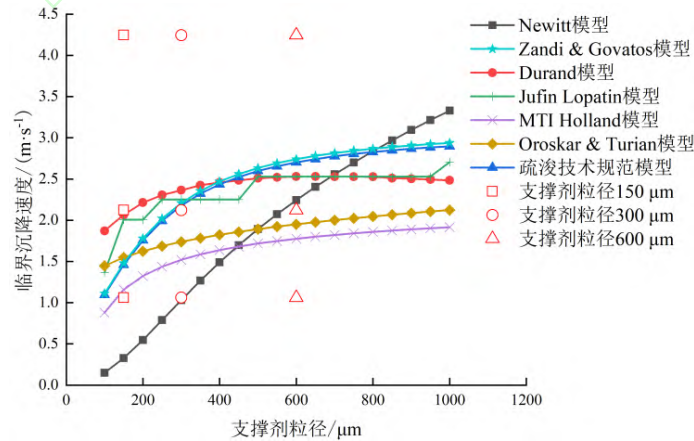


图 14 不同数学模型预测临界沉降速度

Fig.14 The predicted critical deposited velocity of different models

4 基于支撑剂运移的管路直径优选

对于井地联合压裂施工模式，压裂液携带支撑剂需要经过长距离运移，才能到达裂缝进入地层。考虑到压裂液输送管线存在水平段、倾斜段等复杂情况，为保证支撑剂顺利运移，采用疏浚技术规范模型计算速度的 3 倍为临界沉降速度，由此，得到活性水压裂液携带支撑剂所需的临界排量为：

$$Q_c = \begin{cases} 45\pi D^2 \times 0.928 C^{0.105} d^{0.056} \sqrt{2gD(s-1)} & (d < 0.05 \text{ mm}) \\ 45\pi D^2 \times (90C)^{1/3} g^{1/4} D^{1/2} v_t^{1/2} d^{-1/4} & (d > 0.05 \text{ mm}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： Q_c 为携带支撑剂所需的临界排量， m^3/min ； v_c 为压裂液携带支撑剂颗粒的临界流速， m/s ； C 为携砂液中砂子的体积分数，小数； d 为支撑剂平均粒径， m ； g 为重力加速度， m/s^2 ； D 为管道内径， m ； s 为支撑剂密度与压裂液密度之比； v_t 为支撑剂颗粒在静水中的沉降速度， m/s ，根据斯托克斯沉降公式计算。

以支撑剂平均粒径 $600 \mu\text{m}$ 、砂比为 5% 为例，计算得到不同管路直径对应的临界排量关系(图 15)。随着管路直径的增大，对应的临界排量呈指数式增大。首先，可根据所选择的管路直径，确定携带支撑剂所需的最低施工排量。当压裂液黏度为 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时，若管路内径为 73 mm ，其对应的临界注入排量为 $2.16 \text{ m}^3/\text{min}$ ，即压裂施工泵注排量应不低于 $2.16 \text{ m}^3/\text{min}$ 才能保证支撑剂的顺利携带。同样地，当压裂液黏度为 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时，对应于 3、4、5、6 m^3/min 的排量，其对应的临界管路直径为 82.0、92.0、101.0、108.0 mm ，即管路直径应不大于该临界值。此外，当压裂液黏度由 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 增大至 $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，在管路直径一定的情况下，对应的临界排量降低，如管路直径为 73 mm 、压裂液黏度为 $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，其对应的临界排量为 $0.97 \text{ m}^3/\text{min}$ ，较压裂液黏度为 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时降低约 55.09%，因此，在压裂施工过程中可在压裂液中加入对煤层伤害较低的降阻剂，一方面可降低地面泵注压力，另一方面也可提高携砂效果。

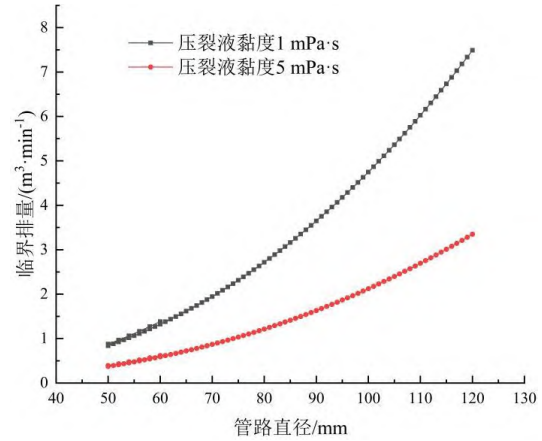


图 15 不同管路直径下的临界排量

Fig.15 Critical displacement corresponding to different pipe inner diameters

5 结论

a. 通过室内试验测试了压裂液流变性能和携砂性能，降阻剂的加入能够提高活性水压裂液黏度 3~5 倍，支撑剂密度越小、砂比越高，支撑剂完全沉降时间越长，平均沉降速度越小。

b. 建立了压裂液携砂运移模型，模拟实验得出：随着压裂液流速的增大，支撑剂在管道底部的沉积逐渐减弱，支撑剂体积分数分布均匀性增强；支撑剂密度和支撑剂粒径越大，支撑剂在管道底部的沉积越严重；管道直径较小时，支撑剂体积分数最大的位置为管道中下部，管道直径较大时，支撑剂体积分数最大的位置为管道底部；砂比越大，支撑剂间的相互作用越强。

c. 压裂液携带支撑剂的流动状态可分为静态砂堤流动、移动砂堤流动、非均匀流动和均匀流动，对比了 Newitt 等建立的 7 个临界沉降速度计算模型，分析了各个模型的不同特点，结合数值模拟与流态分析，优选采用疏浚技术规范模型计算活性水携砂条件下的支撑剂临界沉降速度。

d. 基于疏浚技术规范模型，构建了压裂液携砂运移的临界排量计算模型，根据该模型可对长输管路直径、压裂液注入排量进行匹配与优化。压裂施工中，可通过添加降阻剂，提高压裂液黏度和携砂性能，进而降低携带支撑剂所需的临界排量。

参考文献(References)

- [1]孙四清, 李文博, 张俭, 等.煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J].煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 1-15.

- SUN Siqing, LI Wenbo, ZHANG Jian, et al. Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 1-15
- [2] 贾秉义, 李树刚, 陈冬冬, 等. 煤矿井下高压端连续水力加砂压裂增透技术与装备研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 54-61.
- JIA Bingyi, LI Shugang, CHEN Dongdong, et al. Study of technologies and equipment of continuous hydraulic sand fracturing for permeability enhancement at high pressure side of coal mine downhole[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 54-61.
- [3] 刘乐, 张俭, 方秦月, 等. 碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 91-100.
- LIU Le, ZHANG Jian, FANG Qinyue, et al. Application of hydraulic sand staged fracturing in directional long drilling of roof in broken soft and low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 91-100.
- [4] 张俭, 刘乐, 赵继展, 等. 煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂技术与装备[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 37-44.
- ZHANG Jian, LIU Le, ZHAO Jizhan, et al. Research on hydraulic fracturing technology and equipment of directional long drilling with sand in coal seam roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 37-44.
- [5] 姜在炳, 张群, 范耀, 等. 碎软低渗煤层井上下联合压裂区域瓦斯高效抽采方法: 202010380658.5[P]. 2020-08-14.
- [6] 赵学良. 井地联合压裂长钻孔技术实践[J]. 煤矿安全, 2019, 50(2): 169-172.
- ZHAO Xueliang. Practice of Integrated Well and Ground Fracturing Long Drilling Technology[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(2): 169-172.
- [7] Oroskar A R, Turian R M. The critical velocity in pipeline flow of slurries[J]. Aiche Journal, 1980, 26(4): 550-558.
- [8] Gillies R G, Shook C A, XU Jihuai. Modelling heterogeneous slurry flows at high velocities[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, 82(5): 1060-1065.
- [9] Ekambara K, Sanders R S, Nandakumar K, et al.. Hydrodynamic simulation of horizontal slurry pipeline flow using ANSYS-CFX[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(17): 8159-8171.
- [10] SWAMY M, DÍEZ N, González TWERDA A. Numerical modelling of the slurry flow in pipelines and prediction of flow regimes[J]. WIT Trans Eng Sci, 2015, 89: 311-322.
- [11] 温庆志, 高金剑, 邵俊杰, 等. 滑溜水压裂支撑剂在水平井筒内沉降规律研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(4): 73-78+8.
- WEN Qingzhi, GAO Jinjian, SHAO Junjie, et al. Study on settlement law of proppant within horizontal wellbore in slickwater fracturing[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2015, 30(4): 73-78+8.
- [12] 吕其超, 李兆敏, 李宾飞, 等. 新型聚合物压裂液管内携砂性能研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 101-104+156.
- LÜ Qichao, LI Zhaomin, LI Binfei, et al. Research on Proppant Carrying Capacity of New Polymer Fracturing Fluid in Tube[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 101-104+156.
- [13] 曾思睿, 董长银, 卫然, 等. 水平井不同倾角井筒临界携砂流速对比实验及其拟合应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(6): 54-59.
- ZENG Sirui, DONG Changyin, WEI Ran, et al. Comparing experiments and their matching application of the borehole critical sand-carrying velocity in the horizontal well with different pitching angles[J]. Petroleum geology and oilfield development in daqing, 2018, 37(6): 54-59.
- [14] 刘巨保, 姚利明, 李星月, 等. 缩扩管内携砂压裂液的压力损失实验与数值模拟[J]. 石油学报, 2019, 40(1): 86-98.
- LIU Jubao, YAO Liming, LI Xingyue, et al. Pressure loss experiment and numerical simulation of sand-carrying fracturing fluid in contraction-expansion pipe[J]. ACTA PETROLEI SINICA, 2019, 40(1): 86-98.
- [15] 杨思齐, 樊建春, 张来斌. 高压弯管压裂液两相流模拟及流固耦合分析[J]. 石油机械, 2020, 48(3): 128-133.
- YANG Siqi, FAN Jianchun, ZHANG Laibin. Numerical simulation of two-phase flow and analysis of fluid-structure interaction of fracturing fluid in high pressure elbow[J]. CHINA PETROLEUM MACHINERY, 2020, 48(3): 128-133.
- [16] 刘芳, 金阿芳, 热依汗古丽·木沙. 欧拉颗粒流模型下的近床面风沙跃移速度分布特征[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2157-2163.
- LIU Fang, JIN Afang, Reyihanguli Musa. Velocity distribution of aeolian saltation on sand bed surface in euler-granular model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2157-2163.
- [17] 左伟芹, 谢坤容, 韩红凯, 等. 清洁压裂液携带作用下支撑剂运移铺置规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(12): 42-47.
- ZUO Weiqin, XIE Kunrong, HAN Hongkai, et al. Study on proppant migration and placement under sand-carrying action of clean fracturing fluid[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(12): 42-47.
- [18] 张涛, 郭建春, 刘伟. 清水压裂中支撑剂输送沉降行为的CFD模拟[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 74-82.
- ZHANG Tao, GUO Jianchun, LIU Wei. CFD simulation of proppant transportation and settling in water fracture treatments[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(1): 74-82.
- [19] Zhou M M, Kuang S, Luo K, et al. Modeling and analysis of flow regimes in hydraulic conveying of coarse particles[J]. Powder Technology, 2020, 373: 543-554.
- [20] Ravelet F, Bakir F, Khelladi S, et al. Experimental study of hydraulic transport of large particles in horizontal pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 45: 187-197.
- [21] Miedema S A. The heterogeneous to homogeneous transition for slurry flow in pipes[J]. Ocean Engineering, 2016, 123: 422-431.
- [22] Ramsdell R C, Miedema S A. An overview of flow regimes describing slurry transport[J]. WODCON XX, 2013: 15.
- [23] Raffi M. Turian, Tran-Fu Yuan. Flow of slurries in pipelines[J]. AICHE Journal, 23(3), 1977, 232-243.
- [24] Zandi Iraj. Advances in solid-liquid flow in pipes and its application[M]. Elsevier, 2013: 16-21.
- [25] 中华人民共和国交通部. 疏浚工程技术规范: JTJ319-99[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.