

煤层气直井井筒煤粉沉降运移规律实验研究

张锦涛, 鲜保安, 张 洲, 任峻杉

(河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对煤层气开发过程中煤粉产出严重的问题, 进行了煤层气井井筒煤粉颗粒静态沉降及动态沉降运移实验。通过煤粉静态沉降实验, 测定了不同粒径煤粉颗粒的静态沉降末速。基于现场煤层气井煤粉产出特征设计的动态沉降运移实验发现: 粒径 $>0.20 \sim 0.30$ mm 的煤粉颗粒, 携带流速为 0.020 m/s; 而粒径 $>0.15 \sim 0.20$ mm 煤粉颗粒的携带流速为 0.010 m/s, 均大于煤粉颗粒的静态沉降末速; 当排水速度为 0.035 m/s 时, $0.0385 \sim 0.4500$ mm 混合粒径煤粉溶液, 能够较好地 将煤粉携带运移。

关键词: 煤层气直井; 煤粉; 沉降运移; 静态沉降末速; 动态运移; 排水速度

中图分类号: TD714

文献标志码: A

文章编号: 1008-4495(2025)02-0076-06

Experimental research on settlement migration law of pulverized coal in shaft of coalbed gas vertical well

ZHANG Jintao, XIAN Baoan, ZHANG Zhou, REN Junshan

(School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: A lot of pulverized coal is produced in the process of coalbed gas mining. In order to solve the problem, the static settlement and dynamic settlement and migration experiment of pulverized coal in shaft of coalbed gas well were carried out. The static settlement final velocity of pulverized coal particles with different particle sizes was measured by static settling experiment. Based on the characteristics of pulverized coal production in on-site coalbed gas wells, the dynamic settlement and migration experiment shows that when the drainage velocity is 0.020 m/s, the pulverized coal particles with a particle size of 0.20 mm to 0.30 mm can be carried and transported. When the drainage velocity is 0.010 m/s, the pulverized coal particles with a particle size of 0.15 mm to 0.20 mm can be carried and transported. All of them are greater than static settlement final velocity of pulverized coal particles. When the drainage velocity is 0.035 m/s, the pulverized coal solution with mixed particle size of 0.0385 mm to 0.4500 mm can carry the pulverized coal well.

Keywords: coalbed gas vertical well; pulverized coal; settlement migration; static settlement final velocity; dynamic migration; drainage speed

我国煤层气资源储量丰富, 埋深 $2\,000$ m 以浅的煤层气资源量为 30.05×10^{12} m³, 深部煤层气资源量达 40.71×10^{12} m³^[1]。作为一种清洁能源, 煤层气的高效开发利用对保障煤矿安全生产、缓解温室效应及优化能源结构等具有重要意义。但是在煤层气

排采过程中普遍存在煤粉产出问题^[2-4], 这一现象主要源于排采作业及增产措施导致的煤层结构改变。在储层压差和流体的作用下, 煤粉在裂隙内发生运移, 其中部分煤粉在裂隙中滞留并形成堵塞, 导致裂隙导流能力显著降低, 进而引起煤层气井产量衰

收稿日期: 2024-01-21 修订日期: 2024-03-19 DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20240086

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目(KIGG2022-1003)

作者简介: 张锦涛(1998—), 男, 河南长葛人, 硕士。E-mail: 1403914458@qq.com。

通信作者: 鲜保安(1966—), 男, 陕西西安人, 博士(后), 教授, 博士生导师。E-mail: 759267753@qq.com。

引用格式: 张锦涛, 鲜保安, 张洲, 等. 煤层气直井井筒煤粉沉降运移规律实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(2): 76-81.

ZHANG Jintao, XIAN Baoan, ZHANG Zhou, et al. Experimental research on settlement migration law of pulverized coal in shaft of coalbed gas vertical well[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(2): 76-81.



移动阅读下载

减^[5];另一部分煤粉运移至井筒,在井筒内发生聚集沉降或进入排采设备,造成机械磨损,引发埋泵、卡泵等事故,严重影响煤层气井的连续稳定生产^[6]。因此,深入研究煤粉颗粒在井筒中的运移沉降规律,对优化煤层气开发工艺参数、制订科学的生产措施具有重要的理论指导意义。

近年来,国内外学者针对煤粉颗粒运移规律开展了大量研究工作。刘子亮等^[7]通过实验探究了不同水化学性质对煤粉在煤层裂隙中运移行为的影响;ZHANG 等^[8]分析了煤粉在水平井中运移的受力条件;张健等^[9]基于微乳相模型,构建了考虑煤粉运移的气-液-固三相流动数学模型,并分析了煤粉运移沉降对煤层气开发的影响;张芬娜等^[10-11]推导了适用于深部煤层气井垂直井筒的颗粒沉降末速计算公式;宋金星^[12]、张惜图^[13]、胡胜勇^[14]等探讨了煤储层裂隙中煤粉的运移规律;慕甜等^[15]系统研究了多相流条件下粒度、压差、管道倾角等对煤粉启动运移的影响;魏迎春^[16]、杜军军^[17]等通过煤粉静态沉降实验,研究了不同粒度煤粉的沉降特征;LAN 等^[18]采用数值模拟的方法,研究了煤粉粒径和井液流入速度对煤粉产出的影响;郑春峰等^[19]采用数值模拟的方法,分析了不同粒径煤粉的运移规律及沉降特征;HAN 等^[20]通过煤粉静态沉降实验建立了计算煤粉临界携流速度的关联式。

目前,针对煤粉颗粒运移规律的研究主要采用理论建模、数值模拟,以及静态沉降和携粉运移实验等方法,揭示煤粉的沉降规律及其在煤储层裂缝中的运移规律,进而确定煤粉沉降末速和最小携粉速度等关键参数。针对煤层气直井在排水降压单相流阶段井筒内煤粉动态运移沉降规律的研究较为匮乏。因此,笔者首先进行不同粒径煤粉颗粒的静态沉降实验,测定各粒径煤粉颗粒的沉降末速。在此基础上,基于自主研发的煤层气井煤粉动态运移沉降测试系统,结合现场煤层气生产特征及煤粉产出特征,设计符合实际生产条件的煤粉动态运移实验方案。通过开展不同煤粉粒径、煤粉浓度、排水速度下的煤层气井筒煤粉动态运移实验,探讨排水降压单相流阶段煤层气直井井筒煤粉的动态沉降规律。研究成果对现场煤层气井生产过程中生产策略的制订具有一定的指导意义。

1 煤粉沉降实验

在静水条件下,煤粉颗粒在自然沉降过程中,首先进行短暂的加速运动,最终进行匀速运动(此时的速度即为煤粉颗粒沉降末速)。煤粉颗粒沉降末速是研究颗粒携带流速的一个重要指标。因此,设计

了不同粒径煤粉颗粒静态沉降实验,以获取不同粒径煤粉颗粒的沉降末速。同时,基于自主研发的煤层气井煤粉动态沉降测试系统,进行不同粒径、排水速度条件下的煤粉动态沉降运移实验。

1.1 煤粉颗粒静态沉降实验

采用颗粒追踪法测定不同粒径煤粉颗粒在垂直井筒流体中的静态沉降末速。实验选用 5 种不同粒径范围的煤粉颗粒,其粒径分布如下: $>0.30\sim0.45$ 、 $>0.20\sim0.30$ 、 $>0.15\sim0.20$ 、 $>0.075\sim0.150$ 、 $0.038\sim0.075\ 0\ \text{mm}$ 。

根据煤粉颗粒的物性特征,在实验前需提前对煤粉颗粒进行沉降处理,最终选择完全下沉并润湿的煤粉颗粒进行实验。实验过程中,选取微量某粒径煤粉颗粒静置于充满水的垂直沉降筒中,等待煤粉颗粒下沉。煤粉颗粒几乎在启动的瞬间立即达到了沉降末速,所以只需记录煤粉颗粒沉降至井筒底部的时间和距离,便可计算出该粒径煤粉颗粒所对应的沉降末速。对不同粒径的煤粉颗粒重复该实验步骤,得到不同粒径煤粉的沉降末速,结果见表 1。

表 1 不同粒径的煤粉颗粒的沉降末速实验结果
Table 1 Experimental results of static sedimentation at the end velocity of different pulverized coal particle sizes

煤粉粒径/mm	沉降末速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
$>0.30\sim0.45$	0.029
$>0.20\sim0.30$	0.018
$>0.15\sim0.20$	0.009
$>0.075\sim0.150$	0.006
$0.038\sim0.075\ 0$	0.004

由静态沉降实验可知,当煤粉粒径越小时,煤粉颗粒在水中越不容易沉降,所以需对煤粉颗粒施加一定的外力才会使其发生沉降。由表 1 可见,不同粒径的煤粉颗粒,其静态沉降末速存在较大差异;随着煤粉粒径的减小,静态沉降末速减小,煤粉颗粒越不容易发生沉降。

1.2 煤粉动态沉降实验

在煤层气排采生产过程中,煤粉的产出问题在排水降压阶段尤为严重。该阶段主要表现为单相水流特征(仅产水不产气),煤粉颗粒随着流体运移并进入井筒。实验主要通过改变搅拌罐中煤粉的浓度来模拟煤层气生产过程中的煤粉浓度。并通过改变螺杆泵泵入速度来模拟生产过程中不同的排水速度。实验过程中,通过音叉密度计来研究煤层气直井在排水降压单相流阶段井筒煤粉的沉降规律。

1.2.1 实验样品制备

使用高速粉碎机将煤块加工成粉末状,再用标

准筛对其进行分级筛分,获得不同粒径的煤粉颗粒。为使实验更符合现场实际情况,基于前期在潘河、柿庄南区块采集的煤层气井产出煤粉悬浮液样品,分别对其进行煤粉悬浮液浓度测量、粒径分析。实验选取产出煤粉浓度最高的 2 口典型井作为实验参考标准,其粒径分布特征如图 1 所示。

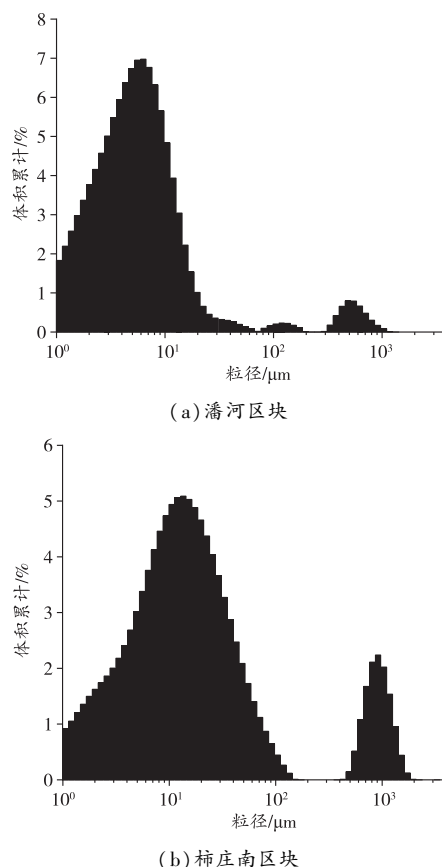


图 1 潘河及柿庄南区块典型井煤粉粒径分布特征
Fig. 1 Particle size distribution characteristics of pulverized coal in typical wells in Panhe and Shizhuangnan blocks

由图 1 可以看出,潘河区块产出煤粉粒径主要为 $1 \sim 50 \mu\text{m}$,柿庄南区块产出煤粉粒径为 $1 \sim 100 \mu\text{m}$,且 2 个区块产出煤粉以小粒径为主。基于现场实验结果,在实验室内利用高速粉碎机将煤样打碎研磨成粉末,粒径为 $0.038 5 \sim 0.450 0 \text{ mm}$ 。使用标准筛进行人工筛分,主要粒径如下: $>0.15 \sim 0.45$ 、 $>0.075 \sim 0.150$ 、 $0.038 5 \sim 0.075 0 \text{ mm}$,共 3 种粒径范围的样品,然后,按照质量比 $1:2:7$ 将 3 种粒径样品均匀混合。

1.2.2 实验设备

采用自主研发的煤层气井煤粉动态沉降测试系统开展实验研究。实验设备主要由数据采集系统、动力系统、模拟井筒三部分组成。实验测试系统如图 2 所示。



图 2 煤层气井煤粉动态运移沉降测试系统
Fig. 2 Dynamic migration and settlement testing system for coal powder in coalbed methane wells

该设备可通过螺杆泵、空压机向模拟井筒中注入气体、液体来模拟煤层气生产过程中煤粉的动态运移过程。螺杆泵通过无级变速来改变注入液体的流速,空压机通过气体流量计来控制气体流速,从而可以更好地模拟实际生产过程中的产水、产气情况。实验数据由数据采集系统实时采集、储存。动态沉降实验原理如图 3 所示。

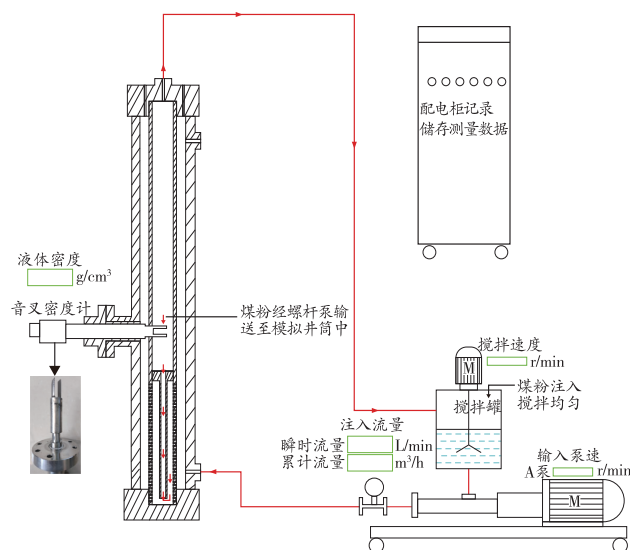


图 3 动态沉降实验原理
Fig. 3 Principle of dynamic settlement experiment

1.2.3 煤粉动态运移实验方案

在实验前期,共统计了 40 口煤层气井的产水量数据,根据产水量及实验设备相关参数确定排水速度,共设计了 $0.005 \sim 0.062 \text{ m/s}$ 内的不同排水速度。实验采用搅拌罐模拟煤储层环境,向搅拌罐中加入不同质量浓度的煤粉悬浮液并进行搅拌,防止发生沉淀。通过计算机调节螺杆泵参数,控制排水速度。向模拟井筒中注入煤粉悬浮液,使其流经音叉密度计,测量不同排水速度下的煤粉悬浮液密度变化。随着经过的介质浓度发生变化,音叉密度计测得的密度也会有所变化,从而判断不同排水速

度下煤粉悬浮液的浓度变化,最终通过音叉密度计测量数据来建立密度与煤粉悬浮液浓度之间的关系。通过此关系可以对煤层气生产时井底的煤粉浓度进行实时监测,从而及时对生产条件进行调整。

共设计了 2 种实验方案:方案一为不同煤粉颗粒粒径动态沉降实验,实验主要参数为煤粉质量浓度、排水速度及煤粉粒径,实验方案见表 2;方案二为更符合实际生产现场的混合粒径煤粉动态沉降实验,实验参数主要为煤粉质量浓度、排水速度,实验方案见表 3。

表 2 不同粒径煤粉动态迁移实验方案

Table 2 Experimental scheme of dynamic migration of pulverized coal with different particle sizes

煤粉粒径/mm	煤粉质量浓度/(g·L ⁻¹)	排水速度/(m·s ⁻¹)
>0.20~0.30, >0.15~0.20	1、2、4、6、8、10、15、20	0.005、0.010、0.015、 0.020、0.025、0.030、 0.035

表 3 混合粒径煤粉动态迁移实验方案

Table 3 Experimental scheme for dynamic migration of mixed particle size pulverized coal

煤粉粒径/mm	煤粉质量浓度/(g·L ⁻¹)	排水速度/(m·s ⁻¹)
0.038 5~0.450 0	10、15、20、25、30	0.005、0.010、0.015、 0.020、0.025、0.030、 0.035、0.045、0.055、 0.062

2 结果与讨论

实验结束后对数据进行处理分析,可得到不同质量浓度、排水速度下的音叉密度计测量数据变化曲线。

2.1 不同粒径的煤粉悬浮液动态沉降规律

对不同煤粉粒径、排水速度下的煤粉悬浮液密度变化曲线进行拟合处理,结果如图 4 所示。

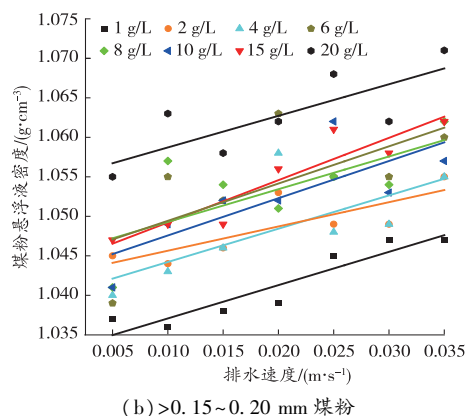
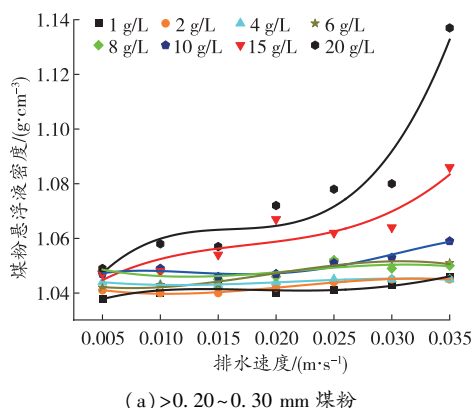


图 4 不同煤粉粒径、排水速度下的煤粉悬浮液密度变化曲线
Fig. 4 Variation curves of pulverized coal concentration under different particle sizes and different drainage rates

在恒定煤粉浓度条件下,随着排水速度的逐步提升,井筒内煤粉浓度呈现显著增高趋势。当搅拌罐中煤粉浓度处于较低水平时,可观察到油管内部一部分颗粒随流体持续向上运移,而另一部分颗粒则附着沉积在油管壁面上。随着煤粉浓度和排水速度的不断增大,油管透明度显著降低,最终由透明完全变黑。

对于粒径>0.20~0.30 mm 的煤粉颗粒,当排水速度小于 0.020 m/s 时,井筒底部沉淀着大量煤粉颗粒;当排水速度大于 0.020 m/s 并持续提高时,位于井底的煤粉开始发生晃动,表明此时有更多的煤粉随着水流被携带运移。对于粒径>0.15~0.20 mm 的煤粉颗粒,当排水速度达到 0.010 m/s 时,出现与粒径>0.20~0.30 mm 煤粉颗粒一样的规律。音叉密度计的测量值整体也随着煤粉浓度的增大(音叉密度计测量值为煤粉溶液密度,后续分析以浓度代指煤粉溶液的密度变化)整体呈现增大趋势,表明音叉密度计能够有效实现对煤粉溶液的实时监测。

2.2 不同排水速度下的煤粉悬浮液动态沉降规律

对混合粒径煤粉悬浮液动态沉降数据进行拟合处理,混合粒径煤粉悬浮液密度变化曲线如图 5 所示。

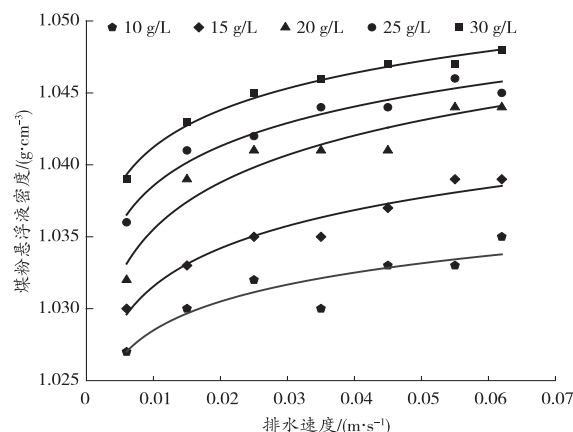


图 5 不同排水速度下混合粒径煤粉悬浮液密度变化曲线
Fig. 5 Variation curves of pulverized coal concentration under different drainage rates of mixed particle size

在煤层气实际生产过程中,井下产出的煤粉颗粒往往比较复杂,因此,采用混合粒径煤粉颗粒进行实验更符合现场实际情况。通过对实验结果进行拟合分析,发现音叉密度计测量值与排水速度在不同煤粉浓度条件下均呈现显著相关性。实验初期可观察到煤粉颗粒随流体缓慢上升,随后在油管内形成均匀悬浮体系。实验结果表明,随着排水速度的不断增大,音叉密度计测量值也在不断增大,即井筒中油管内煤粉浓度也在不断增大。这是因为增大的排水速度增强了流体对井底沉积煤粉的携带能力,使更多煤粉颗粒通过筛管进入油管。

当排水速度小于 0.035 m/s 时,大量煤粉沉降于井底,只有少量煤粉随着水流被携带运移至井口,此时埋泵、卡泵等事故发生概率增大;当排水速度达到 0.035 m/s 时,音叉密度计的测量值有较大的增长波动,井底煤粉也发生晃动,即此时的排水速度能够较好地井底沉降的煤粉携带至井口,减少埋泵、卡泵等事故的发生。对不同排水速度下的音叉传感器密度曲线进行纵向对比,可以看出,在恒定排水速度条件下,当煤粉浓度发生变化时,音叉传感器能够快速进行反应,从而及时对现场的排采工况做出调整。

在排水降压阶段,煤粉颗粒主要受到重力、浮力、流体阻力、流体拖曳力等作用力的影响。当煤粉颗粒受到向上的力大于向下的力时,煤粉颗粒才会被携带运移。当排水速度较低时,煤粉颗粒所受到向下的力大于向上的力,此时煤粉颗粒发生沉降,井筒卡泵、埋泵等事故风险变大;而当排水速度逐渐增大时,煤粉颗粒受到向上的力逐渐增大,颗粒被携带运移。通过室内实验得知,对于粒径 $>0.20\sim0.30\text{ mm}$ 的煤粉颗粒,排水速度需达到 0.020 m/s 及以上,煤粉才能够较好地携带运移;粒径 $>0.15\sim0.20\text{ mm}$ 的煤粉颗粒的排水速度需达到 0.010 m/s ;粒径 $0.0385\sim0.4500\text{ mm}$ 的混合煤粉颗粒的排水速度则需达到 0.035 m/s 。

在理想状态下,只需要流体速度达到煤粉的静态沉降速度,就可以使煤粉较好地携带运移。在实际生产过程中,实际临界携带流速均大于实际沉降末速。通过对比分析静态沉降实验与动态运移实验数据,发现煤粉临界携带流速均大于相对应的煤粉静态沉降末速。这是因为在实际生产过程中,煤粉的运移会受到温度、压差、井径、粒径、形状及其颗粒间相互作用的影响,均会导致临界携带流速发生改变。

3 结论

1)煤粉静态沉降实验结果表明,不同粒径煤粉

颗粒静态沉降末速如下:粒径 $>0.30\sim0.45\text{ mm}$ 的为 0.029 m/s ;粒径 $>0.20\sim0.30\text{ mm}$ 的为 0.018 m/s ;粒径 $>0.15\sim0.20\text{ mm}$ 的为 0.009 m/s ;粒径 $>0.075\sim0.150\text{ mm}$ 的为 0.006 m/s ;粒径 $0.0385\sim0.0750\text{ mm}$ 的为 0.004 m/s 。

2)通过煤粉动态沉降运移实验发现,对于粒径 $>0.20\sim0.30\text{ mm}$ 的煤粉颗粒,携带流速为 0.020 m/s ;而粒径 $>0.15\sim0.20\text{ mm}$ 的煤粉颗粒,携带流速为 0.010 m/s ,均大于煤粉颗粒的静态沉降末速。

3)通过分析现场煤层气井煤粉溶液粒径,配制了混合粒径 $0.0385\sim0.4500\text{ mm}$ 的煤粉溶液,发现当排水速度为 0.035 m/s 时,能够较好地将煤粉携带运移。

参考文献(References):

- [1] 黄中伟,李国富,杨睿月,等.我国煤层气开发技术现状与发展趋势[J].煤炭学报,2022,47(9):3212-3238.
HUANG Zhongwei, LI Guofu, YANG Ruiyue, et al. Review and development trends of coalbed methane exploitation technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3212-3238.
- [2] 陈振宏,王兵,孙平.煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制[J].煤炭学报,2009,34(2):229-232.
CHEN Zhenhong, WANG Yibing, SUN Ping. Destructive influences and effectively treatments of coal powder to high rank coalbed methane production[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 229-232.
- [3] 魏迎春,曹代勇,袁远,等.韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素[J].煤炭学报,2013,38(8):1424-1429.
WEI Yingchun, CAO Daiyong, YUAN Yuan, et al. Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1424-1429.
- [4] 张遂安,曹立虎,杜彩霞.煤层气井产气机理及排采控压控粉研究[J].煤炭学报,2014,39(9):1927-1931.
ZHANG Suian, CAO Lihu, DU Caixia. Study on CBM production mechanism and control theory of bottom-hole pressure and coal fines during CBM well production[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1927-1931.
- [5] 杨延辉,汤达祯,杨艳磊,等.煤储层速敏效应对煤粉产出规律及产能的影响[J].煤炭科学技术,2015,43(2):96-99.
YANG Yanhui, TANG Dazhen, YANG Yanlei, et al. Influence on velocity sensitivity effect of coal reservoir to production law of pulverized coal and gas productivity[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 96-99.
- [6] 魏迎春,李超,曹代勇,等.煤层气开发中煤粉产出机理及管控措施[J].煤田地质与勘探,2018,46(2):68-73.
WEI Yingchun, LI Chao, CAO Daiyong, et al. The output mechanism and control measures of the pulverized coal in coalbed methane development[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2): 68-73.
- [7] 刘子亮,魏迎春,张琦,等.水化学性质对支撑裂缝中煤粉运移的影响[J].煤炭学报,2023,48(9):3483-3493.
LIU Ziliang, WEI Yingchun, ZHANG Qi, et al. Effect of hydrochemical properties on the migration of coal fines in propped fractures[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3483-3493.
- [8] ZHANG Beibei, SHEN Junping, ZHANG Jin, et al. Force and control

- measures of pulverized coal migration in coalbed methane horizontal wells [J]. American Journal of Scientific Research and Essays, 2022(7):5.
- [9] 张健,朱苏阳,彭小龙,等.煤层气-水-固三相流动模型与数值模拟研究[J].中国海上油气,2022,34(1):117-127.
ZHANG Jian, ZHU Suyang, PENG Xiaolong, et al. Tri-phase flow model of coalbed methane-water-solid and numerical simulation study[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 117-127.
- [10] 张芬娜,宋云飞,朱洪迎,等.深部煤层气直井筒液携煤粉颗粒特性分析[J].中国矿业大学学报,2021,50(6):1060-1066.
ZHANG Fenna, SONG Yunfei, ZHU Hongying, et al. Analysis on characteristics of particles carried by vertical wellbore fluidflow in deep coalbed methane wells [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(6): 1060-1066.
- [11] 张芬娜,陈波,李明忠,等.煤粉颗粒在垂直井筒沉降规律试验研究[J].石油机械,2015,43(6):76-79.
ZHANG Fenna, CHEN Bo, LI Mingzhong, et al. Experimental research on settlement law of coal fines in vertical wellbore [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(6): 76-79.
- [12] 宋金星,史俊可,刘建壮.团聚型压裂液对煤粉运移的影响及作用机理[J].煤田地质与勘探,2022,50(2):48-54.
SONG Jinxing, SHI Junke, LIU Jianzhuang. Effects of the agglomerated fracturing fluid on the transportation of pulverized coal and its mechanism [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(2): 48-54.
- [13] 张惜图,胡胜勇,武玺,等.煤粉侵入对支撑裂缝渗透率的动态影响规律[J].煤炭学报,2024,49(5):2338-2346.
ZHANG Xitu, HU Shengyong, WU Xi, et al. Dynamic influence of coal fine intrusion on propped fracture permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2338-2346.
- [14] 胡胜勇,郝勇鑫,陈云波,等.煤粉运移与沉积对支撑裂缝渗透率动态影响规律[J].煤炭学报,2021,46(4):1288-1296.
HU Shengyong, HAO Yongxin, CHEN Yunbo, et al. Dynamic influence law of coal powder migration and deposition on propped fracture permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1288-1296.
- [15] 慕甜,马东民,陈跃,等.煤层气井多相流条件下不同粒径煤粉启动-运移规律[J].煤炭科学技术,2020,48(5):188-196.
MU Tian, MA Dongmin, CHEN Yue, et al. Start-migration law of coal powder with different particle sizes under multi-phase flow conditions in coalbed methane wells [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 188-196.
- [16] 魏迎春,崔茂林,张劲,等.煤层气开发中不同粒度煤粉的聚集沉降实验[J].煤田地质与勘探,2020,48(5):40-47.
WEI Yingchun, CUI Maolin, ZHANG Jin, et al. Aggregation and sedimentation experiments of coal fines with different particle sizes during CBM development [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 40-47.
- [17] 杜建军,刘联涛,崔金榜,等.煤层气井不同类型煤粉的静态沉降规律[J].煤炭学报,2018,43(增刊1):203-209.
DU Junjun, LIU Liantao, CUI Jinbang, et al. Static settlement of different types of pulverized coal in CBM wells [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Sup. 1): 203-209.
- [18] LAN W J, WANG H X, YANG S Y, et al. Study on the migration of pulverized coal in CBM wellbore [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 156: 740-747.
- [19] 郑春峰,包建银.井筒中煤粉运移规律的数值模拟研究[J].非常规油气,2016,3(6):99-103.
ZHENG Chunfeng, BAO Jianyin. Research on the numerical simulation for migration law of pulverized coal in wellbore [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(6): 99-103.
- [20] HAN G, LING K, WU H, et al. An experimental study of coal-fines migration in coalbed-methane production wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 1542-1548.
- (责任编辑:樊淑兰)

(上接第 75 页)

- [16] 秦跃平,徐浩,毋凡,等.密度梯度驱动的煤粒瓦斯解吸扩散模型及试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(1):169-176.
QIN Yueping, XU Hao, WU Fan, et al. Gas desorption and diffusion model driven by density gradient in coal particle and its experimental study [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 169-176.
- [17] 董骏.基于等效物理结构的煤体瓦斯扩散特性及应用[D].中国矿业大学,2018.
DONG Jun. Gas diffusion properties of coal mass based on equivalent physical structure and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2018.
- [18] 卢守青.基于等效基质尺度的煤体力学失稳及渗透性演化机制与应用[D].徐州:中国矿业大学,2016.
LU Shouqing. Mechanical failure and permeability evolution mechanism of coal based on equivalent matrix scale and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016.
- [19] 聂百胜,杨涛,李祥春,等.煤粒瓦斯解吸扩散规律实验[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):975-981.
NIE Baisheng, YANG Tao, LI Xiangchun, et al. Research on diffusion of methane in coal particles [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(6): 975-981.
- [20] 袁军伟.颗粒煤瓦斯扩散时效特性研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
YUAN Junwei. Study on time-related characteristics of gas diffusion from particles coal [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2014.
- [21] 胡彪.煤中多尺度孔隙结构的甲烷吸附行为特征及其微观影响机制[D].徐州:中国矿业大学,2022.
HU Biao. Methane adsorption behavior characteristics of multi-scale pore structure in coal and its microscopic influencing mechanism [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2022.
- [22] 张登峰,崔永君,李松庚,等.甲烷及二氧化碳在不同煤阶煤内部的吸附扩散行为[J].煤炭学报,2011,36(10):1693-1698.
ZHANG Dengfeng, CUI Yongjun, LI Songgeng, et al. Adsorption and diffusion behaviors of methane and carbon dioxide on various rank coals [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1693-1698.
- [23] WANG H Y, GUO S, XIE Y Y, et al. Study on competitive adsorption characteristics of CO/CO₂/CH₄ multi-component low concentration gases in coal [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2025, 47(1): 2775-2789.
- [24] HAO M, WEI C M, NIE Y. Influence of combustible gases from coal spontaneous combustion on CH₄ adsorption in the goaf [J]. Chemical Physics Letters, 2022, 803: 139806.
- (责任编辑:熊云威)