

引用格式: 孟文辉, 张文, 王博洋, 等. 保德区块煤粉产出特征及其影响因素剖析[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 441-450.
MENG Wenhui, ZHANG Wen, WANG Boyang, et al. Analysis of characteristics of coal fine production and its influence factors in Baode block[J].
Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 441-450.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.04.005

保德区块煤粉产出特征及其影响要素剖析

孟文辉¹, 张文¹, 王博洋², 郝帅¹, 王泽斌¹, 潘武杰³

(1. 中国石油煤层气有限责任公司, 北京 100020; 2. 东北石油大学非常规油气研究院, 黑龙江 大庆 163318;
3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤粉问题在煤层气开发中日益凸显, 合理控制煤粉运移与产出, 是煤层气井稳产、高产的关键。目前对于保德区块煤粉运移产出规律认识不清, 制约了本区部分井煤层气高效开发。基于上述问题, 借助煤粉驱替物理模拟实验, 探究不同地质与工程条件下煤粉产出特征, 并阐明地层水流速、矿化度、气水比、有效应力等因素对其控制作用。研究表明, 排水阶段较小的流速下产出煤粉量极少, 裂缝中煤粉发生运移但是堆积在出口处, 形成煤粉“滤饼”; 当超过临界流速后, 煤粉大量产出, 较大幅度的压力波动能将出口处堵塞的煤粉冲出。地层水矿化度越大, 携带煤粉运移能力越强; 单相流动无法有效驱替煤粉运移产出, 50:50 气水比的两相流具有更强的携带煤粉的能力。随着加载在煤岩上的有效应力增加, 产出液中煤粉的质量浓度不断下降, 且出口端的憋压压力具有相同的下降趋势, 但驱替压差在不断增加。研究结果为现场开展煤粉防治措施提供数据和理论基础。

关键词: 保德区块; 煤粉; 产出特征; 流速; 气水比; 有效应力

中图分类号: TE37

文献标识码: A

Analysis of characteristics of coal fine production and its influence factors in Baode block

MENG Wenhui¹, ZHANG Wen¹, WANG Boyang², HAO Shuai¹, WANG Zebin¹, PAN Wujie³

(1. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100020, China; 2. Institute of Unconventional Oil and Gas, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The issue of coal fine production is increasingly prominent in the development of coal-bed methane. Implementing appropriate measures to control the migration and production of coal fines is crucial for achieving stable and high production of coal-bed methane wells. However, the characteristics of coal migration and production in the coal seams of Baode block remain unclear, which hinders the efficient development of coal-bed methane in some wells in this area. To address the problem of coal fine production in coal-bed methane development, core flooding experiments were conducted to investigate the migration and production characteristics of coal fines concerning influencing factors such as formation water velocity, salinity, gas-water ratio, effective stress, etc. The experimental results revealed that during the drainage stage, the amount of coal fines produced at low formation water flow is minimal, with coal fines moving within fractures and accumulating at the outlet, forming a coal powder filter cake. However, when formation water flow surpasses the critical flow, a significant amount of coal fines is produced. A substantial pressure fluctuation can flush out the coal fines obstructing the outlet. Furthermore, the salinity of the formation water plays a role in carrying coal powder, with higher salinity increasing its transport capacity. While single gas phase flow is not effective in displacing the coal fine migration and production, two-phase flow with a gas-water ratio of 50:50 exhibits a stronger ability to carry

收稿日期: 2023-05-05。

第一作者简介: 孟文辉(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要从事煤层气井气藏动态分析及排采控制研究。地址: 山西省忻州市保德县府前大街76号, 邮政编码: 036699。E-mail: 824884475@qq.com

通信作者简介: 张文(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要从事煤层气开发、煤层气气藏动态分析、煤层气井动态监测研究。地址: 山西省太原市小店区龙城大街龙城壹号A座, 邮政编码: 030000。E-mail: zw1229@petrochina.com.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目“低阶煤储层煤粉产出对差异流体作用的响应及其机制”(42002186)。

coal powder. The concentration of coal fine in the produced liquid continued to decline with the increase of the effective stress loaded on the coal. Similarly, the holding pressure at the outlet follows a downward trend, but the displacement pressure difference increases. The research findings provide essential data and a theoretical basis for implementing on-site prevention and control of coal fine production.

Keywords: Baode block; coal fine; production characteristics; flow velocity; gas-water ratio; effective stress

煤粉是指煤层气开发过程中,存在、滞留或运移在储层、通道和排采设备系统中的固相颗粒物。鉴于我国煤盆地构造-热演化的复杂性以及煤储层的特殊性^[1-2],煤层气井在钻井、压裂和排采过程中引发的工程扰动,如机械碰撞、磨蚀、压力波动及气液冲刷等都将不可避免导致煤粉产生^[3-6],同时煤粉在储层中运移规律极其复杂^[7-8]。目前,保德区块煤层气田年排采井检泵结果显示煤粉影响相关的卡泵、堵塞井下设备和泵漏失故障占据了27%,煤粉影响是排采井发生故障的主要因素之一^[9]。煤粉产出问题在煤层气开发中日益凸显,成为制约煤层气高效开发的难题之一^[10]。

近年来煤粉研究在诸多方面已取得重大突破,如煤粉生成机理、排采过程中煤粉产出特征及主控要素、煤粉产出诱导储层伤害等^[11-12],但研究对象多集中在中高阶煤储层中^[13-14],中-低阶煤储层煤粉产出特征鲜有学者关注,然而工程实践表明,中-低阶煤层气井开发过程中同样存在煤粉产出问题^[15]。滞留在天然裂缝和支撑剂间隙中的煤粉会堵塞气体运移通道,进而降低煤储层导流能力^[16-17],因此,在煤层气开发过程中要考虑煤粉能否有效排出。相关研究表明,煤粉产出和运移受地层水流速、矿化度、气水比、有效应力、煤体结构等诸多因素影响^[18-23],导致不同地质条件下煤粉产出规律差异显著^[24-26]。当前保德地区煤粉产出已显著影响气井产能,但目前针对其煤粉运移产出机制和特征,缺乏科学系统以及定量化的研究,亟须构建相适应的方法体系,明确保德区块煤粉产出规律及其影响因素,为科学预测煤粉影响提供依据,进而为实现煤层气井高效稳定排采奠定基础。

基于此,通过煤粉运移产出模拟实验,探究煤粉产出特征规律,查明地层水流速、矿化度、气水比、有效应力等因素对煤粉运移产出的影响,掌握影响煤层煤粉产出的多种因素。其中,排水降压期和采气初期是排采过程中出煤粉最严重的阶段,研究排采

阶段煤粉的运移条件及储层物性影响规律对于合理制定煤层气井排液制度,提高煤层气单井产量以及开展煤粉防治措施具有重要指导意义。

1 研究区储层特征

保德区块位于山西省保德县和陕西省府谷县,面积为476.46 km²,构造位置位于鄂尔多斯盆地东部边缘的北部(图1),总体构造形态简单,表现为向西倾的单斜构造,走向近南北,断层和褶皱不发育^[27]。研究区地下水主要来自大气降水和奥陶系石灰岩的侧向补给,径流一般由东向西。该区主要含煤地层为二叠系山西组和石炭-二叠系太原组,主力煤层宏观煤岩类型为半暗半亮煤,割理裂隙较发育^[28]。保德区块煤岩显微组分中以有机质为主,有机质组分介于67.7%~91.7%,平均为82.3%^[29]。其中,显微组分以镜质组和惰质组为主,含少量壳质组^[30]。无机矿物含量最低为13.1%,最高含量可达32.3%,平均为18.9%,主要以黏土矿物为主,含少量碳酸盐、黄铁矿等。煤岩镜质体反射率介于0.71%~0.98%^[31],煤层演化程度低,以气煤为主,属于中-低阶煤^[32],渗透率为 $(2 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

保德区块自开发以来平均单井产气量为2500 m³/d,目前下降至1700 m³/d,平均产水量从25.6 m³/d下降至目前的7.5 m³/d,流体流速下降,携带煤粉能力变差,煤粉更容易沉积在渗流通道、井筒中。通过对井生产资料分析,全区出现煤粉影响的排采井共计492口,占全区51%(图1),影响日产气量约 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,从历年检泵结果发现,煤粉影响导致检泵维持在60井次以上,占检泵总井数的10%以上(图1)。

2 实验设计思路

2.1 实验样品

煤岩样品采用来源于保德8号煤层的气煤,埋深

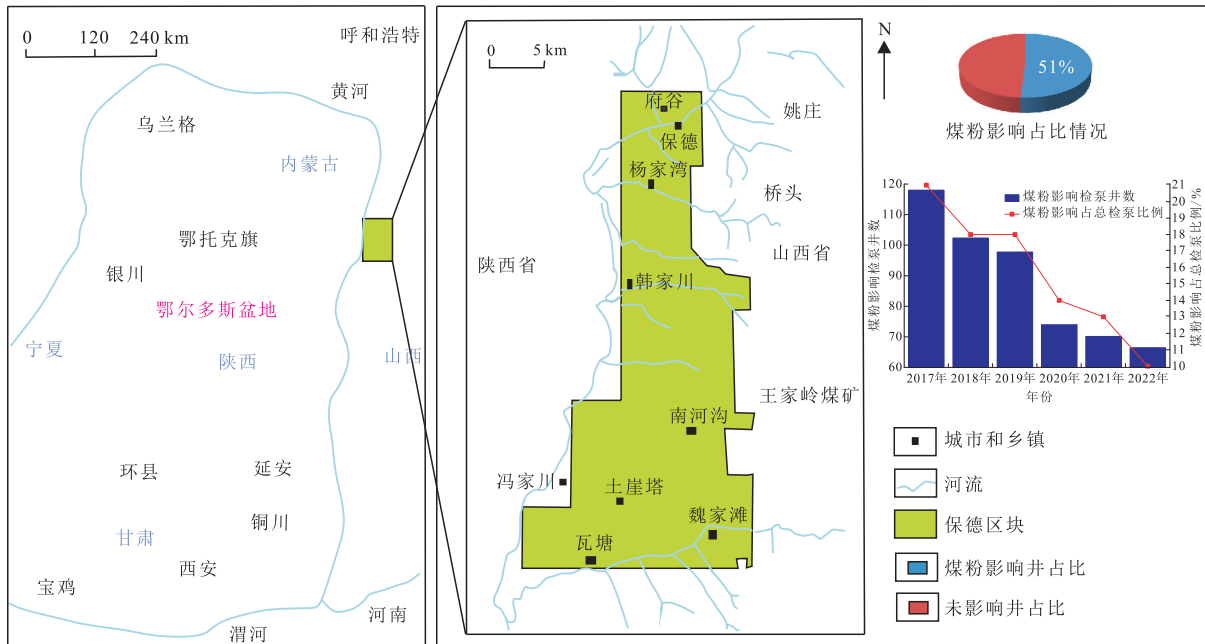


图1 鄂尔多斯盆地东缘保德区块位置及煤粉影响占比^[33]

Fig. 1 Geological location and coal fine influence ratio of Baode block in the eastern margin of Ordos Basin

约800 m,长度为9.86 cm,直径为5.051 cm,镜质体最大反射率 $R_{o,max}$ 为0.79%。通过线切割的方式将圆柱煤样沿轴线切成两半。作为支撑剂的石英砂和煤粉混合后平铺在其中一半的煤岩柱的切割截面,之后将另一半煤岩柱置于其上,将岩心套入热缩膜后,使用热风枪将热缩膜裹紧煤岩样品的四周,模拟水力压裂支撑剂充填的裂缝(图2),其中煤粉为原生结

构煤通过粉碎获得。实验所用地层水为根据保德区块水质资料在实验室配置而成,主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} ,主要阴离子为 Cl^{-} 、 HCO_3^{-} 。

2.2 实验条件

为了模拟不同地质与工程条件下煤粉产出特征,实验温度设置为40℃,在不同流体流速、不同矿化度地层水、不同气水比、不同有效应力条件下开展煤粉驱替实验,具体实验参数如表1、表2、表3所示。



图2 支撑剂煤粉充填裂缝的原生结构煤岩样品

Fig. 2 Primary structure coal-rock samples with fractures filled by proppant and coal fine

表1 不同矿化度及流速下的煤粉产出实验条件设置
Table 1 Experimental conditions for coal fine production under different salinity and flow velocity

温度/℃	支撑剂目数	矿化度/(mg/L)	流速/(mL/min)
40	20~40	1 000	5
			10
			20
			30
			40
40	20~40	1 000	10
		3 000	
		5 000	
		8 000	

表2 不同气水比条件下煤粉产出实验条件设置
Table 2 Experimental conditions for coal fine production under different gas water ratio

温度/°C	支撑剂目数	气水比	流速/(mL/min)
40	20~40	0:100	10
		20:80	
		50:50	
		80:20	
		100:0	
40	20~40	0:100	20
		20:80	
		50:50	
		80:20	
		100:0	

表3 不同有效应力条件下煤粉产出实验条件设置
Table 3 Experimental conditions for coal fine production under different effective stress

温度/°C	支撑剂目数	有效应力/MPa	矿化度/(mg/L)
40	20~40	1	1 000
		2	
		3	
		5	
		7	

2.3 实验流程

实验设备主要包括岩心驱替系统、温度控制系统、气液收集及计量、数据采集系统,实验流程如图3所示。

实验过程主要包括4个步骤:

- 1) 煤岩清洗,恒温烘干,测量岩心的重量、长度、直径,然后制备支撑剂和煤粉充填裂缝煤岩样品;
- 2) 设置温度至40 °C,将岩心夹持器预热后,把岩心放入夹持器中抽真空饱和地层水,保持24 h使夹持器中煤岩样品被充分加热;
- 3) 通过设置围压调节煤岩有效应力,以不同的流速、气水比向煤岩中注甲烷和不同矿化度的地层水,驱替总体积为1 000 mL,停止实验;
- 4) 实验过程中通过排水集气法收集并记录出口端产生的气体和液体,观察出口端煤粉产出动态,测试产出液中煤粉质量浓度、出口端的憋压以及驱替压差。

3 结果与讨论

3.1 不同流速下煤粉产出特征

煤层排水阶段,不同地层水流速下煤粉产出特征如图4所示。产出液体煤粉相对质量浓度用来定量表征产出液中煤粉质量浓度,即将1 g/L的煤粉悬浊液质量浓度定义成煤粉质量浓度为100%;0代表产出煤粉极少,无法检测煤粉溶液质量浓度。

当地层水矿化度为1 000 mg/L,支撑剂目数为20~40目时,支撑剂充填裂缝中地层水注入的流速越大,产出液中煤粉质量浓度越大。其中,出口端产

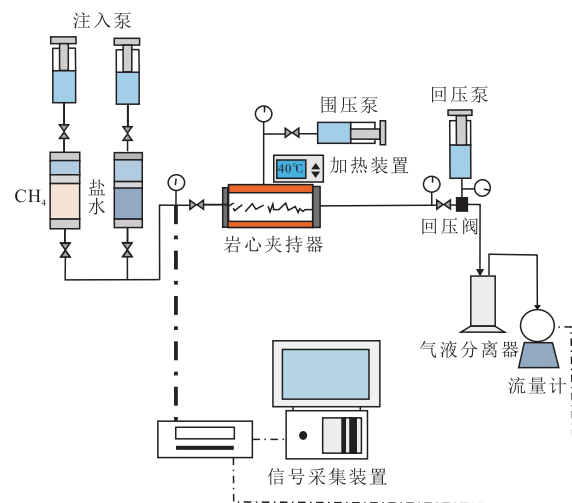


图3 煤粉产出模拟实验装置

Fig. 3 Coal fine production simulation experimental device

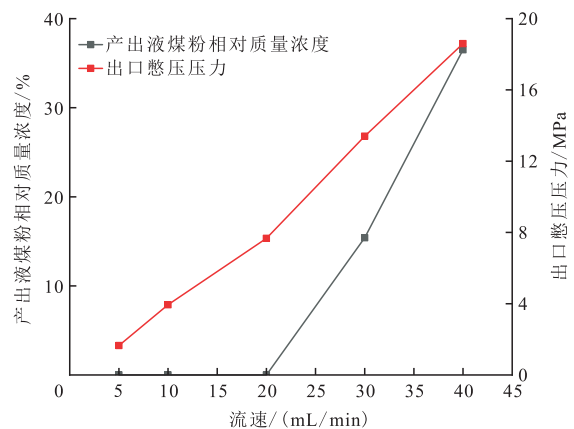


图4 不同地层水流速下煤粉产出特征

Fig. 4 Characteristics of coal fine production under different formation water velocity

出液煤粉质量浓度代表了煤粉产出程度,出口处由于煤粉堵塞造成的憋压压力的大小则代表了煤岩裂缝中煤粉运移的规模,憋压压力越高,表明更多的煤粉运移至出口处堆积。

在地层水流速介于5~20 mL/min,出口端产出液基本为透明的清澈的地层水,1 000 mL的产出液无法有效检测其煤粉质量浓度,出口端通过吸附棉纸收集了较少产出的煤粉颗粒(图5)。然而对比不同注入流速下吸附棉纸上的煤粉的量,虽然低流速下煤粉产出极少,但是随着注入流速的增加,出口端产出的煤粉的量有增加的现象,这一现象表明随着流体流速的增加,煤粉产出量处于增加的趋势。

当地层水流速介于30~40 mL/min,出口端吸附棉纸上吸附大量煤粉,当吸附棉纸吸附煤粉饱和后,大量煤粉透过吸附棉纸,形成煤粉悬浊液(图6)。结果表明,当地层水流速越大,出口端产出煤粉量越大,产出液中煤粉质量浓度越大,流速对支撑剂充填裂缝中煤粉的运移起到关键作用。

此外,煤粉大量产出存在一个临界流速,低于临界流速出口端煤粉产出量极少,高于临界流速煤粉产出量急剧增加,在此次实验条件下临界流速处于20 mL/min。通过实验数据及目标区块现场生产数据,根据公式(1),结合煤层厚度等数据简化出实验

室流速与气井产水量对应关系曲线(图7)。对于现场生产来讲,排水阶段尽可能使流速大于临界流速,即8.9 m³/d,可将堵塞在支撑剂裂缝中的煤粉携带冲出,减缓煤粉在支撑剂裂缝中的堆积,增大支撑剂充填裂缝的导流能力。

$$q = \frac{69.12Q_R r_w d_r}{D^2} \quad (1)$$

式中: q 为日产液量,单位m³; Q_R 为实验室条件下流速,单位m³/s; r_w 为井眼半径,单位m; d_r 为储层厚度,单位m; D 为岩心直径,单位m。

虽然在较低的流速下出口端煤粉产出量极少,产出液为清澈的地层水,然而这并不代表较低流速下支撑剂充填裂缝中煤粉不发生运移现象。在地层水注入过程中,出口端的压力不断上升,这是由于煤粉运移到出口处,由于出口处流体流动截面减小,造成裂缝内煤粉溶液中煤粉在此处堆积,形成煤粉“滤饼”效应,造成出口处地层水流动阻力过大,产生憋压的现象。

从图4可以看出,地层水流速越大,出口处憋压越高,原因可能为流速越大在出口处堆积的煤粉量越大,导致更高的憋压。对于现场排水阶段来讲,在气井井筒外围射孔处,由于流体流动截面突变减小,产生大量煤粉在射孔处堆积的现象,不利于地层水的排出。因此,排水阶段流体最大的流动阻力来源于煤粉在井筒外围的堆积堵塞,清除此处堆积的煤粉更有利于气井排水降压^[34]。

实验过程通过调节地层水的注入流速,在煤岩的流体流动空间内造成较大幅度的压力波动,岩心

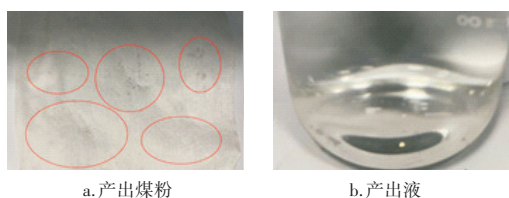


图5 地层水流速为20 mL/min时出口端产出煤粉及产出液

Fig. 5 Coal fine and liquid produced at the outlet with the formation water flow rate is 20 mL/min

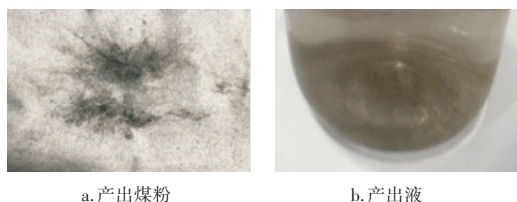


图6 地层水流速为30 mL/min时出口端产出煤粉及产出液

Fig. 6 Coal fine and liquid produced at the outlet with the formation water flow rate is 30 mL/min

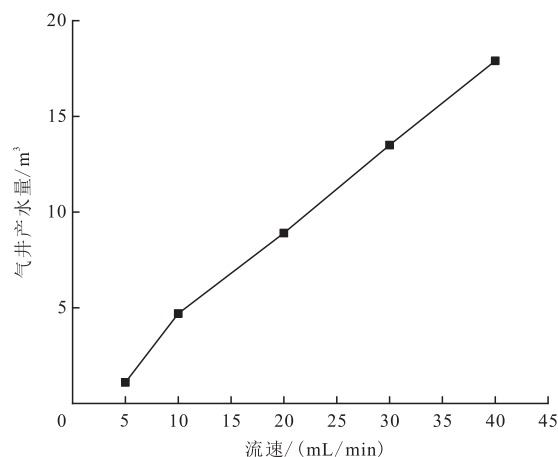


图7 实验室流速与气井产水量对应曲线

Fig. 7 Relationship between flow velocity and water production

出口端堆积堵塞的煤粉大量喷出,喷出煤粉悬浊液质量浓度为 $3.2 \sim 3.9 \text{ g/L}$ 。出口处堆积煤粉和喷出的高质量浓度煤粉悬浊液如图8所示。

此外,压力波动清除出口端堵塞煤粉的现象只在较高的压力波动幅度下发生,即较大的地层水注入流速。根据文中实验,能明确煤粉堵塞的驱替压差波动幅度下限值为 10 MPa 。对于现场生产,可采用压力波动的方法,清除井筒外围聚集堵塞的煤粉,降低井筒的表皮系数,增加射孔井筒的流体流通能力。

3.2 地层水矿化度控制下的煤粉产出特征

地层水矿化度是煤粉运移的重要影响因素^[35-36]。地层水流速为 10 mL/min 且支撑剂颗粒大小相同的条件下,地层水矿化度越大,产出液中煤粉质量浓度越高,出口处憋压压力较高(图9)。这一现象表明,矿化度较高的地层水携带煤粉运移的能力更强,

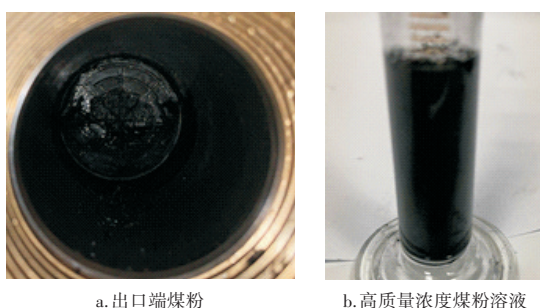


图8 出口端堆积的煤粉和喷出高质量浓度煤粉溶液
Fig. 8 Accumulated coal fine at the outlet and ejected high-quality concentrated coal fine solution

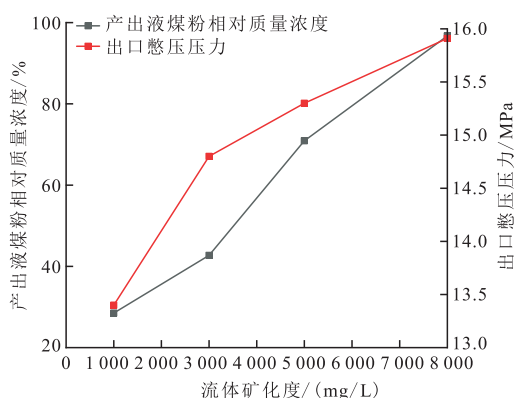


图9 不同地层水矿化度下煤粉产出特征
Fig. 9 Characteristics of coal fine production under different formation water salinity

更多的煤粉被携带到出口处堆积。尤其是当矿化度为 8000 mg/L 时,出口端产出液中观察到煤粉,煤粉相对质量浓度可达 $78.4\% \sim 96.7\%$ 。一方面是由于高矿化度地层水中的离子更容易使煤粉脱离原位并悬浮;另一方面高矿化度更大的密度使其悬浮携带煤粉运移的能力更强,且煤粉沉积速度较低,更容易发生运移。因此,出口端煤粉堵塞越严重,出口端憋压压力也越高。

3.3 流体气水比影响下的煤粉产出特征

当流体以 10 mL/min 的流速注入地层水和气体时,单纯气相或者液相渗流时,出口处产出煤粉量以及出口处憋压压力都较小,表明煤粉运移和产出的规模小。即当低流速下,煤岩中只有单相流体流动时,支撑剂充填的裂缝中不发生煤粉的运移,或者发生运移的现象不明显,导致出口端憋压压力较小。

气水两相流动具有更高的携带煤粉运移的能力,出口处煤粉产出质量浓度和憋压压力都更高。值得注意的是当气水比为 $50:50$ 时,产出液中煤粉的质量浓度最高,注入流体中气的比例高或者地层水的比例高时,产出液中煤粉的质量浓度相对较低,这表明 $50:50$ 的气水比具有更强的携带煤粉的能力。因此,当气井处于上产期时,气水比逐渐上升,此时煤粉运移规模更大,即更多的煤粉流向井筒,井筒内产出液中煤粉质量浓度更高。当气井开发后期,纯产气阶段煤粉运移和产出规模都较小,产出液中煤粉质量浓度相对较低。

流体注入流速为 20 mL/min 时,总体煤粉产出量要高于注入速度为 10 mL/min ,出口处憋压压力相对更高。尤其是气相单相或者液体单相流动时出口端产出液均具有一定的煤粉含量和一定的憋压压力,这表明较大的流速下,单相流体渗流过程中,如果流速高于一定值,也存在大规模的煤粉运移和产出。高流速下气水两相流体渗流携带煤粉运移的能力也更强(图10、图11)。

3.4 有效应力影响下的煤粉产出特征

实验结果表明,随着加载在煤岩上的有效应力的增加,产出液中煤粉的质量浓度不断下降,且出口端的憋压压力具有相同的下降趋势,但驱替压差在不断增加(图12、图13)。这可能是由于有效应力越大,裂缝闭合程度越高,支撑剂可能出现嵌入裂缝壁

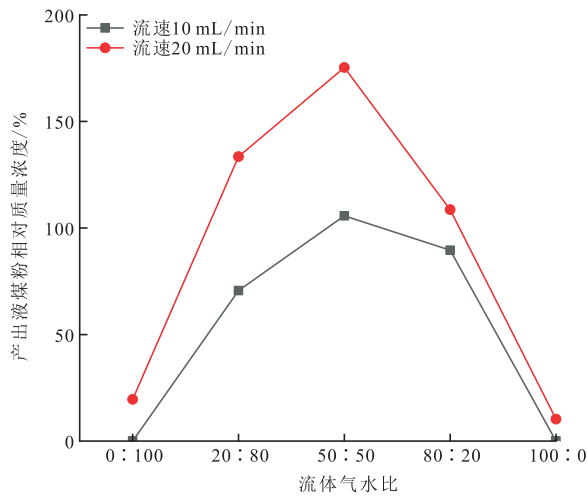


图10 不同气水比条件下产出煤粉特征

Fig. 10 Characteristics of coal fine production under different gas water ratios

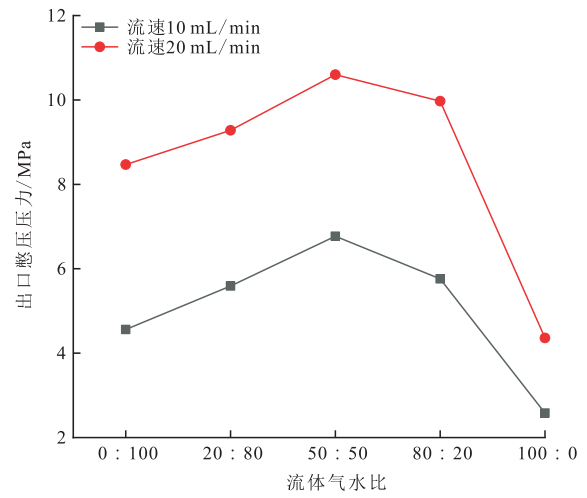


图11 不同气水比条件下出口憋压压力

Fig. 11 Outlet holding pressure under different gas water ratios

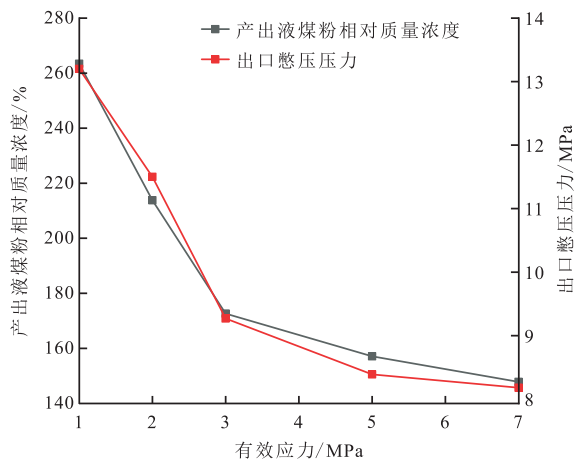


图12 不同有效应力下产出液煤粉质量浓度与出口憋压压力变化

Fig. 12 Changes in coal fine concentration and holding pressure under different effective stresses

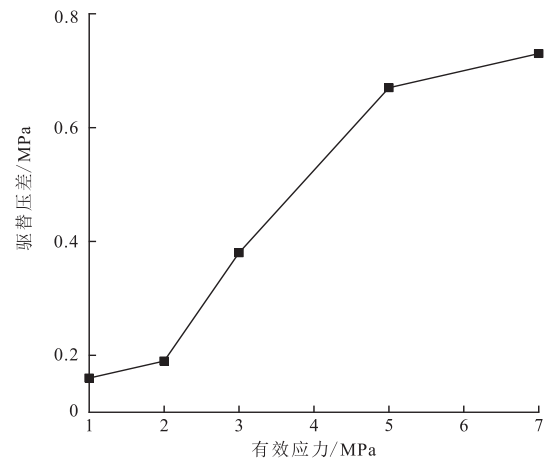


图13 不同有效应力下驱替压差变化

Fig. 13 Change in displacement pressure difference under different effective stresses

面的情况,裂缝中煤粉受到的约束性更强,煤粉运移的规模小,且出口端产出煤粉量也小,同时出口处憋压压力也低。驱替压差的大小则反映了铺砂裂缝的导流能力,驱替压差越小则表明裂缝导流能力越强。煤层中裂缝的导流能力与裂缝的开度有关,同时也与煤粉的运移堵塞相关。

在较低的有效应力下,煤岩裂缝在支撑剂的作用下,能保持一定的开度,此时消耗驱替压差较小,虽然此时煤粉运移情况比较严重,但是对裂缝的导流能力影响较小,大量煤粉运移至出口端形成“滤饼”堵塞。此外,在较低的有效应力范围内,产出液

中煤粉质量浓度下降趋势较快,对有效应力的变化较为敏感。这是由于在较低的有效应力下,有效应力的增加能有效降低裂缝的开度,此时裂缝的开度对有效应力的变化较为敏感。

随着有效应力的增加,裂缝的闭合程度已经到达一个较高的水平,继续闭合的空间较小,因此,有效应力较大时,增加有效应力,裂缝的导流能力变化不大,导致煤粉运移难度变化较小,产出液体中煤粉的质量浓度变化较小。此外,较大的有效应力下支撑剂已经嵌入裂缝壁面,尤其是煤岩可能出现碎裂的情况,裂缝的导流能力大大下降,导致驱替压差不

断增加。此时虽然煤粉运移难度较大,对裂缝的导流能力影响较小,但是由于此时裂缝的开度较小,较少的煤粉运移也能造成裂缝的堵塞。一旦此种现象发生后,裂缝的开度受到有效应力变化的影响较小。因此,也导致在较高的有效应力下,裂缝的导流能力和产出液中煤粉质量浓度变化对有效应力的变化不敏感。

3.5 保德区块煤粉产出机制

基于上述分析可知,本研究重点关注了不同流体作用下研究区煤粉产出特征。流体作用包含2个方面:一为力学作用,如流速、有效应力、气水比等条件改变诱发流体压力的变化,进而导致煤粉的分离、启动与运移;二为化学作用,即流体化学性质(如不同矿化度)对煤粉分散、团聚的影响。

1) 力学作用

研究表明单相流动阶段伴随流速的增大,产出煤粉质量浓度呈增大趋势(图4),其机理为流速越大对裂缝内壁产生的黏滞力越强,其对煤岩产生的破坏主要为剪切破坏,当黏滞力大于煤层本身抗剪强度时,煤体结构发生更加剧烈的显微破裂与矿物颗粒的平衡失稳,进而导致大量煤粉产出。对于实际工程而言,近井地带的流速显著大于远井地带,故前者更容易发生堵塞,降低渗透率,严重影响降压效果。对此现象,本研究发现压力波动能够有效解决此问题(图8)。

排水降压过程,对于煤储层而言其本质为有效应力增大过程。本次研究表明产出煤粉相对质量浓度与有效应力整体呈负相关关系(图12)。当有效应力小于3 MPa时,煤粉相对质量浓度递减速率较大;当有效应力大于3 MPa时,煤粉相对质量浓度递减速率较弱。其机理为在较小的有效应力作用下,裂缝具有较高的导流能力,大量煤粉易于产出。伴随有效应力增大,一方面孔裂隙被压缩,导流能力下降,另一方面当压力增大超过煤层抗压强度时,煤体破裂会产生大量的煤粉,但受储层导流能力下降制约,大量煤粉难以运移产出,体现在相同流速下有效应力越高,煤样两端的驱替压差越大(图13)。

气水两相流阶段相比于单相流阶段具有更高的煤粉产出能力,主要取决于地层水的携带力与气水混合的扰动力。与单相气流动(气水比为100:0)相比,单相地层水流动(气水比为0:100)时出口端具有

一定的憋压压力,说明其具有一定的携带煤粉能力。伴随气体比例增大时,产出液煤粉质量浓度相对增大,表明气水混合的扰动力增大了煤粉的相对运移,但当气水比超过50:50后,气体占比远超液体占比时,产出煤粉质量浓度降低,表明气水混合的扰动力应以液体的携带力为基础,即只有当气水比近似一致时才能达到最大的煤粉产出(图10、图11)。

2) 化学作用

本次所用驱替流体为 NaHCO_3 ,伴随驱替流体矿化度增大,产出煤粉质量浓度呈增大趋势,其机理为 NaHCO_3 在水中由于具有弱酸根,因此,既发生电离,又发生水解反应。伴随矿化度增大,水解产生的阴离子 OH^- 使煤粉颗粒表面负电荷增加,增强煤粉间排斥力,煤粉易于分散而不利于团聚,因此,在相同的流速作用下,高矿化度更易形成大范围的煤粉运移与产出^[37](图9)。

4 结论

1) 较低的流速下出口端产出煤粉量极少,裂缝中煤粉发生运移但是堆积在出口处,形成煤粉“滤饼”。流速超过一定的阈值后,产出煤粉量大大增加。多轮次较大幅度的压力波动能将出口处堵塞的煤粉冲出。地层水矿化度越大,携带煤粉运移的能力更强,产出液中煤粉质量浓度越高,出口处憋压压力较高,其主要受控于 NaHCO_3 水解产生的 OH^- 增大了煤粉间的排斥力,煤粉易于分散运移与产出。

2) 产出煤粉相对质量浓度与有效应力整体呈负相关关系,产出煤粉相对质量浓度递减速率随有效应力增大呈两段式变化,其主要受控于裂缝导流能力与煤层抗压强度的综合影响。当有效应力小于3 MPa时,裂缝具有较高的导流能力,大量煤粉易于产出;当有效应力超过煤层抗压强度时,虽然煤体破裂会产生大量的煤粉,但导流空间的减小阻碍了煤粉的大量产出。

3) 气水两相流阶段相比于单相流阶段具有更高的煤粉产出能力,主要取决于地层水的携带力与气水混合的扰动力。伴随气体比例增大时,产出液煤粉质量浓度相对增大,表明气水混合的扰动力增大了煤粉的相对运移;但当气水比超过50:50后,气体占比远超液体占比时,产出煤粉质量浓度降低,表明气水混合的扰动力应以液体的携带力为基础,即

只有当气水比近似一致时才能达到最大的煤粉产出。

4) 现场生产过程中煤层气井排水阶段和上产阶段煤粉运移产出规模大。排水阶段尽可能使流速大于临界流速或采用压力波动方法,减缓煤粉在支撑剂裂缝和井筒射孔孔眼处的堆积;上产阶段则同样需要提高产液量,携带出更多的煤粉,防止裂缝和井筒被煤粉堵塞。

参考文献

- [1] 姚红生,肖翠,陈贞龙,等.延川南深部煤层气高效开发调整对策研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):545-555.
YAO Hongsheng, XIAO Cui, CHEN Zhenlong, et al. Adjustment countermeasures for efficient development of deep coalbed methane in southern Yanchuan CBM Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 545-555.
- [2] 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 Sui'an, CAO Lihu, DU Caixia. Study on gas production mechanism, pressure control and powder control in coalbed methane wells[J]. Journal of Coal Industry, 2014, 39(9): 1927-1931.
- [3] 李智.煤层气水平井筒煤粉迁移特征实验研究[D].西安:西安科技大学,2017.
LI Zhi. Experimental study of CBM horizontal well pulverized coal migration characteristics[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [4] KESHAVARZ A, YANG Y L, BADALYAN A, et al. Laboratory-based mathematical modelling of graded proppant injection in CBM reservoirs[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 136: 1-16.
- [5] BAI T H, CHEN Z W, AMINOSADATI S M, et al. Experimental investigation on the impact of coal fines generation and migration on coal permeability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 159: 257-266.
- [6] WEI Y C, Li C, CAO D Y, et al. The effects of particle size and inorganic mineral content on fines migration in fracturing proppant during coalbed methane production[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 182: 1-11.
- [7] TAO S, TANG D Z, XU H, et al. Fluid velocity sensitivity of coal reservoir and its effect on coalbed methane well productivity: a case of Baode block, northeastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 152: 229-37.
- [8] HUANG F S, KANG Y L, YOU L J, et al. Massive fines detachment induced by moving gas-water interfaces during early stage two-phase flow in coalbed methane reservoirs[J]. Fuel, 2018, 222: 193-206.
- [9] 李袖臣,张文,吕洋,等.煤层气排采井防煤粉技术研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2021,43(5):498-501.
LI Xiuchen, ZHANG Wen, LYU Yang, et al. Coal powder control technology for coalbed methane well[J]. Journal of Hubei University(Natural Science), 2021, 43(5): 498-501.
- [10] 刘晓,崔彬,吴展.煤层气井堵塞型递减原因分析及治理——以延川南煤层气田为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):626-632.
LIU Xiao, CUI Bin, WU Zhan. Cause analysis and treatment of coal-bed gas well plugging decline: A case study of southern Yanchuan CBM Field[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2022, 12(4): 626-632.
- [11] 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.
- [12] TAO S, GAO L J, PAN Z J. Swelling of clay minerals and its effect on coal permeability and gas production: A case study of southern Qinshui Basin, China[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(2): 515-528.
- [13] MASSAROTTO P, IYER R S, Elma M, et al. An experimental study on characterizing coal bed methane(CBM) fines production and migration of mineral matter in coal beds[J]. Energy & fuels, 2014, 28(2): 766-773.
- [14] GUO Z H, HUSSAIN F, CINAR Y. Permeability variation associated with fines production from anthracite coal during water injection[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 147: 46-57.
- [15] 高占胜,杨波,刘己胜.大佛寺井田煤层气储层伤害及其原因分析[J].资源与产业,2018,20(4):47-51.
GAO Zhansheng, YANG Bo, LIU Jisheng. CBM reservoir damage and reasons of Dafosi well field[J]. Resources & Industries, 2018, 20(4): 47-51.
- [16] 刘春花,刘新福,周超.煤层气井排采过程中煤粉运移规律研究[J].煤田地质与勘探,2015,43(5):23-26.
LIU Chunhua, LIU Xinfu, ZHOU Chao. Migration patterns of coal powder in coal reservoirs during the well drainage[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(5): 23-26.
- [17] 张双斌,苏现波,林晓英.煤层气井排采过程中压裂裂缝导流能力的伤害与控制[J].煤炭学报,2014,39(1):124-128.
ZHANG Shuangbin, SU Xianbo, LIN Xiaoying. Controlling the damage of conductivity of hydraulic fractures during the process of drainage in coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 124-128.
- [18] 姚海鹏,于东方,李玲,等.内蒙古地区典型煤储层吸附特征[J].岩性油气藏,2021,33(2):1-8.
YAO Haipeng, YU Dongfang, LI Ling, et al. Adsorption characteristics of typical coal reservoirs in Inner Mongolia[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(2): 1-8.
- [19] 朱志良,高小明.陇东煤田侏罗系煤层气成藏主控因素与模式[J].岩性油气藏,2022,34(1):86-94.
ZHU Zhiliang, GAO Xiaoming. Main controlling factors and models of Jurassic coalbed methane accumulation in Longdong coalfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 86-94.
- [20] 赵帅.微气泡对支撑裂缝中煤粉运移堵塞规律影响实验研究[D].西安:西安石油大学,2021.
ZHAO Shuai. Experimental study on the influence of pore structure on seepage characteristics in tight sandstone[D]. Xi'an:

- Xi'an Shiyou University, 2021.
- [21] 皇凡生,董长银,康毅力,等.移动气泡诱发裂隙内煤粉启动机制与防控措施[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(4):100-107.
HUANG Fansheng, DONG Changyin, KANG Yili, et al. Mechanisms and control measures of incipient motion of coal fines induced by moving gas bubbles in coalbed fractures[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(4): 100-107.
- [22] 高玉巧,郭涛,何希鹏,等.贵州省织金地区煤层气多层合采层位优选[J].石油实验地质,2021,43(2):227-232.
GAO Yuqiao, GUO Tao, HE Xipeng, et al. Optimization of multi-layer commingled coalbed methane production in Zhijin area, Guizhou province[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 227-232.
- [23] 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.
- [24] 周宇.二甲醚掺混低发热量煤层气混合气体的互换性研究[J].石油与天然气化工,2021,50(1):58-65.
Zhou Yu. Study on the interchangeability for mixtures of dimethyl ether and low calorific value coalbed methane[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(1): 58-65.
- [25] 张雷,郝帅,张伟,等.中低煤阶煤层气储量复算及认识——以鄂尔多斯盆地东缘保德煤层气田为例[J].石油实验地质,2020,42(1):147-155.
ZHANG Lei, HAO Shuai, ZHANG Wei, et al. Recalculation and understanding of middle and low rank coalbed methane reserves: a case study of Baode Coalbed Methane Field on the eastern edge of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 147-155.
- [26] 刘岩,苏雪峰,张遂安.煤粉对支撑裂缝导流能力的影响特征及其防控[J].煤炭学报,2017,42(3):687-693.
LIU Yan, SU Xuefeng, ZHANG Sui'an. Influencing characteristics and control of coal powder to proppant fracture conductivity[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 687-693.
- [27] 陈晨,王克.鄂尔多斯盆地东缘煤层气储层物性特征规律研究[J].中外能源,2022,27(4):15-21.
CHEN Chen, WANG Ke. Study on physical characteristics of coalbed methane reservoirs in eastern margin of Ordos Basin[J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(4): 15-21.
- [28] 刘迈杰.保德区块煤储层物性及气体吸附解吸特性研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
LIU Maijie. Study on the physical properties of coal reservoir and its adsorption and desorption characteristics in Baode block [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.
- [29] 于春雷.保德区块中低阶煤煤层气田资源特征及开发实践研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
YU Chunlei. Resource characteristics and development practice research of middle and low rank coalbed methane in Baode block[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [30] 薛培.保德区块煤层气开发过程中储层渗透率动态变化研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2015.
XUE Pei. Study on dynamic changes of coal reservoir permeability in Baode block during coalbed methane recovery [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [31] 温声明,文桂华,李星涛,等.地质工程一体化在保德煤层气田勘探开发中的实践与成效[J].中国石油勘探,2018,23(2):69-75.
WEN Shengming, WEN Guihua, LI Xingtao, et al. Application and effect of geology-engineering integration in the exploration and development of Baode CBM field[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 69-75.
- [32] 田文广,汤达祯,王志丽,等.鄂尔多斯盆地东缘保德地区煤层气成因[J].高校地质学报,2012,18(3):479-484.
TIAN Wenguang, TANG Dazhen, WANG Zhili, et al. Origin of coalbed methane in Baode, northeastern Ordos Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 479-484.
- [33] ZHANG W, HE Y X, ZHANG Q F, et al. Study on the effect of salinity and water content on CBM adsorption/desorption characteristics of coal reservoir in Baode block[J]. Geofluids, 2022, 5055273.
- [34] 赵振宇.滇东黔西煤层气压裂完井缝内煤粉运移规律实验研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
ZHAO Zhenyu. Experimental study of the pulverized coal particle migration in hydraulic fracture in east Yunnan & west Guizhou region[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [35] AWAN F U R, KESHAVARZ A, AKHONDZADEH H, et al. Optimizing the dispersion of coal fines using sodium dodecyl benzene sulfonate[C]// Paper URTEC-198250-MS presented at the Asia Pacific Unconventional Resources Technology Conference, Brisbane, Australia, November 2019.
- [36] GUO Z H, HUSSAIN F, CINAR Y. Physical and analytical modelling of permeability damage in bituminous coal caused by fines migration during water production[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35: 331-346.
- [37] 刘子亮,魏迎春,张琦,等.水化学性质对支撑裂缝中煤粉运移影响的物理模拟实验[J/OL].煤炭学报,2023[2022-11-16].
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2190.TD.20221116.1635.006.html>.
LIU Ziliang, WEI Yingchun, ZHANG Qi, et al. Physical simulation experiment of the effect of hydrochemical properties on the migration of coal fines in propped fractures[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2023[2022-11-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2190.TD.20221116.1635.006.html>.

(编辑 柳超超)