



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

煤粉运移与沉积对支撑裂缝渗透率动态影响规律

胡胜勇^{1,2}, 郝勇鑫¹, 陈云波¹, 冯国瑞³, 李国富², 张惜图¹

(1. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 2. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048012; 3. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:煤粉沉积导致的支撑裂缝渗透率的伤害是影响煤层气排采效果的重要因素之一。基于毛细管束模型, 结合 Carman-Kozeny 公式建立了考虑煤粉运移与沉积的支撑裂缝渗透率演化模型, 并利用煤岩导流性能测试系统进行了不同条件下的煤粉侵入支撑裂缝实验, 验证了模型的正确性, 探讨了煤粉沉积特性对支撑裂缝内煤粉分布规律及渗透率时空演化的影响。研究表明: 沿煤粉运移方向, 支撑裂缝内沉积煤粉体积分数逐渐减小, 大量煤粉沉积在裂缝入口端, 导致裂缝入口端孔隙堵塞程度较大, 裂缝内孔隙堵塞程度较小, 支撑裂缝渗透率沿煤粉运移方向减小, 且随着煤粉运移时间增加, 支撑裂缝内悬浮煤粉质量浓度先快速上升到峰值, 随后保持不变, 沉积煤粉体积分数不断增大, 支撑裂缝内孔隙的堵塞程度增大, 支撑裂缝的渗透率不断减小。煤粉沉积系数与弥散系数是影响支撑裂缝内煤粉分布规律及渗透率的重要因素, 且随着煤粉沉积系数增大, 煤粉运移越困难, 支撑裂缝入口端沉积煤粉量增大, 运移至支撑裂缝内的煤粉量减小, 支撑裂缝内悬浮煤粉质量浓度与沉积煤粉体积分数减小, 煤粉占据孔隙体积变小, 支撑裂缝渗透率增大; 而煤粉弥散系数越大, 煤粉越容易运移, 运移至支撑裂缝内的煤粉量越大, 支撑裂缝内悬浮煤粉质量浓度与沉积煤粉体积分数越大, 煤粉占据孔隙体积越大, 支撑裂缝渗透率越小。

关键词:煤粉; 运移; 沉积; 渗透率; 支撑裂缝

中图分类号: P618. 11

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)04-1288-09

Dynamic influence law of coal powder migration and deposition on propped fracture permeability

HU Shengyong^{1,2}, HAO Yongxin¹, CHEN Yunbo¹, FENG Guorui³, LI Guofu², ZHANG Xitu¹

(1. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048012, China; 3. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The permeability damage of propped fracture caused by coal powder deposition is one of the important factors that affect the effect of coalbed methane drainage. Based on capillary tube bundle model and Carman-Kozeny formula, the permeability evolution model of propped fracture considering coal powder migration and deposition is established, and the coal rock conductivity test system is used to test the penetration of coal powder into propped fracture under different conditions, and the model is verified. The influence of coal powder deposition characteristics on the distribution of coal powder and permeability spatio-temporal evolution in the propped fracture are investigated in this

收稿日期: 2020-08-04 修回日期: 2020-10-14 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1306

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1710121)

作者简介: 胡胜勇(1984—), 男, 湖北随州人, 副教授, 博士生导师。E-mail: hsztx@163.com

引用格式: 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.



移动阅读

study. The results show that along the migration direction of coal powder, the concentration of deposited coal powder in the propped fracture gradually decreases, and a large number of coal powder deposited in the entrance end of the fracture, leading to a greater degree of pore plugging at the entrance end of the fracture and a smaller degree of pore plugging in the fracture, and the permeability of the propped fracture decreases along the migration direction of coal powder. And with the increase of coal migration time, the concentration of suspended coal powder in the propped fracture first rises to the peak value, and then remains unchanged, the concentration of deposited coal powder continues to increase, the plugging degree of pores in the propped fracture increases and the permeability of the propped fracture decreases. With the increase of deposition rate coefficient of coal powder, it is more difficult to transport coal powder into the powder fracture, and the amount of deposited coal powder at the entrance of the propped fracture increases, the amount of coal powder entering into the propped fracture decreases, the concentration of suspended coal powder and deposited coal powder in the propped fracture decreases, the pore volume occupied by coal powder becomes smaller, and the permeability of propped fracture increases; as the dispersion coefficient increases, the coal powder is easier to migrate, and the amount of coal powder entering the propped fracture increases, the concentration of suspended coal powder and deposited coal powder in the propped fracture become higher, the pore volume occupied by coal powder becomes larger, and the permeability of propped fracture becomes smaller.

Key words: coal powder; migration; deposition; permeability; propped fracture

水力压裂作为一种煤储层改造的重要技术手段,得到广泛应用,现已成为煤层气开发所采用的关键核心技术之一^[1-5]。采用压裂支撑剂可防止水力裂缝闭合,大幅度提高储层改造效果^[6-7]。然而在压裂及煤层气排采过程中会造成煤层破坏产生大量煤粉^[8-10],煤粉颗粒随流体流动进入支撑裂缝与支撑剂混合,进而伤害支撑裂缝的导流能力,严重影响压裂效果^[11]。

目前国内外学者对煤粉在支撑裂缝中的运移沉积规律开展了大量研究。邹雨时等^[12]研究了煤粉在支撑剂充填层内的运移规律及其对导流能力的伤害机理和影响程度。曹代勇等^[13]开展了单相流驱替状态下煤粉产出物理模拟实验,研究了煤粉产出规律及其影响因素。王长浩等^[14]研究了煤粉粒径以及支撑剂铺砂浓度对煤岩填砂裂缝导流能力的影响。曹立虎等^[15]通过煤粉在支撑裂缝中运移的物模试验,揭示了煤粉在支撑裂缝中的运移和伤害规律。刘岩等^[16]分析了流体在变流速、恒流速和间断流动下煤粉在支撑剂充填层中的运移、沉积及产出规律。张学彦等^[17]研究了煤粉在不同有效应力和水注入速率下对压裂裂缝渗透率的影响。WEI等^[18]研究了粉体粒径和粉体中无机矿物含量对支撑剂中粉体迁移和渗透率变化的影响。ZOU等^[19]研究了煤粉对支撑剂导流能力的影响程度,揭示煤粉的迁移和滞留受支撑剂尺寸、支撑剂类型和煤粉性质的影响。前人主要从宏观层面研究了煤粉运移沉积对支撑裂缝渗透率的影响,但是煤粉对支撑裂缝渗透率

动态变化的影响鲜有研究。笔者从毛细管束模型出发,基于 Carman-Kozeny 公式建立了支撑裂缝渗透率演化模型,研究了煤粉沉积特性对支撑裂缝内煤粉分布规律及其渗透率的影响。

1 支撑裂缝渗透率演化模型

1.1 基本假设

- (1) 裂缝内支撑剂颗粒构成多孔介质骨架;
- (2) 支撑剂饱和、均质、各向同性且不可压缩^[20];
- (3) 煤粉为均质球形颗粒;
- (4) 支撑裂缝中流体流动服从达西定律^[21];
- (5) 不考虑沉积煤粉颗粒的再次运移^[22]。

1.2 煤粉颗粒的运移沉积

在一维稳态条件下,煤粉颗粒在支撑裂缝中运移的微分方程^[23-28]为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - k_d C \quad (1)$$

其中, C 为运移过程中悬浮煤粉颗粒的质量浓度, g/L ; t 为时间, s ; D 为弥散系数, cm^2/s ; x 为悬浮煤粉颗粒的迁移距离, cm ; u 为孔隙间的平均渗流速度, cm/s ; k_d 为沉积系数, s^{-1} 。式(1)所研究尺度范围为微米级孔隙。

在煤粉以恒定浓度持续侵入支撑裂缝的情况下,初始条件、边界条件^[22]为

$$C(x, t) = 0, x > 0 \quad (2)$$

$$C(0, t) = C_0 \quad (3)$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad (4)$$

式中, C_0 为悬浮煤粉的初始质量浓度, g/L 。

由初始条件、边界条件和式(1)可得支撑裂缝中悬浮煤粉质量浓度分布的解析解为

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \exp\left[\frac{ux}{2D} - x\left(\frac{u^2}{4D^2} + \frac{k_d}{D}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \times \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \left(\frac{u^2t}{4D} + k_d t\right)^{\frac{1}{2}}\right] + \frac{C_0}{2} \exp\left[\frac{ux}{2D} + x\left(\frac{u^2}{4D^2} + \frac{k_d}{D}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + \left(\frac{u^2t}{4D} + k_d t\right)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (5)$$

煤粉颗粒的沉积动力方程^[26,29]为

$$\rho_b \frac{\partial S}{\partial t} = k_d \varphi_0 C e^{-\frac{S}{\lambda}} \quad (6)$$

式中, ρ_b 为煤粉颗粒堆积密度, g/cm^3 ; S 为沉积煤粉体积分数(沉积在支撑裂缝多孔介质内煤粉颗粒体积占多孔介质体积的比例); φ_0 为支撑裂缝初始孔隙率; λ 可类比于支撑裂缝内煤粉颗粒容纳量。

煤粉沉积动力方程的初始条件为

$$t = 0, S = 0 \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得到沉积煤粉体积分数为

$$S = \lambda \ln\left(\frac{k_d \varphi_0 C}{\rho_b \lambda} t + 1\right) \quad (8)$$

1.3 支撑裂缝孔隙率

如图1所示,支撑裂缝的物理模型可等效为毛细管束模型。选取一个毛细管束模型单元体, L 为长度, cm ; A 为横截面积, cm^2 。支撑裂缝初始孔隙体积 V_0 为

$$V_0 = AL\varphi_0 \quad (9)$$

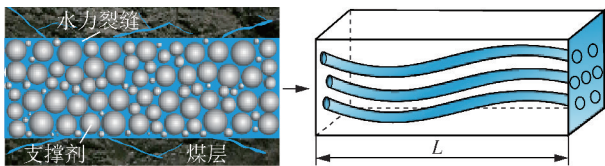


图1 毛细管束模型单元体示意

Fig. 1 Capillary bundle model element

煤粉侵入支撑裂缝后,原孔隙空间由沉积煤粉体积、悬浮煤粉体积及孔隙体积3部分组成^[22]。此时,支撑裂缝内孔隙体积 V 为

$$V = AL\varphi_0 - V_d - V_s \quad (10)$$

式中, V_d 为单元体中沉积的煤粉体积; V_s 为单元体中悬浮的煤粉体积。

$$V_d = ALS \quad (11)$$

$$V_s = (AL\varphi_0 - V_d)C/\rho_s \quad (12)$$

式中, ρ_s 为煤粉的密度, g/cm^3 。

由式(10)~(12)可得孔隙率 φ 为

$$\varphi = (\rho_s - C)(\varphi_0 - S)/\rho_s \quad (13)$$

1.4 支撑裂缝渗透率

根据 Carman-Kozeny 公式得到渗透率 K 与管径 r 的关系^[29-30]为

$$K = \frac{\varphi r^2}{8\tau^2} \quad (14)$$

式中, τ 为毛细管曲度。

由图1等效的毛细管束模型可知,模型的孔隙率为

$$\varphi = \frac{N\pi r^2}{AL} \quad (15)$$

式中, N 为模型单元体内包含的毛细管数。

由式(15)可得到等效毛细管半径 r^2 为

$$r^2 = \frac{AL\varphi}{N\pi} \quad (16)$$

将式(16)代入式(14)中,可得渗透率 K 及初始渗透率 K_0 为

$$K = \frac{AL\varphi^2}{8N\pi\tau^2}, K_0 = \frac{AL\varphi_0^2}{8N\pi\tau^2} \quad (17)$$

由式(17)可得支撑裂缝渗透率 K/K_0 为

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\varphi^2}{\varphi_0^2} \quad (18)$$

将式(13)代入式(18)中,可得

$$\frac{K}{K_0} = \frac{(\rho_s - C)^2(\varphi_0 - S)}{\rho_s^2\varphi_0^2} \quad (19)$$

由式(5),(8),(19)得到了煤粉运移沉积引起的支撑裂缝渗透率演化模型。

2 渗透率演化模型验证

2.1 实验设备

实验设备采用煤岩导流性能测试系统,如图2所示。其核心部件导流室按照 API 标准设计,可模拟地层压力下支撑裂缝的状态。纯净水由恒流泵注入,注入端口连接中间活塞容器,通过活塞推动煤粉悬浮液进入到 API 导流室。导流室出口连接压力容器,可收集排出的流体和煤粉。加压装置可模拟实验所需的地应力条件。

2.2 实验材料及条件

实验材料包括纯净水、煤粉、石英砂、煤板、天平等。实验温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。图3为实验材料实物图。实验使用 $17.78\text{ cm} \times 3.81\text{ cm} \times 2.00\text{ cm}$ 的煤板模拟支撑裂缝壁,所用煤板取自沁水盆地3号煤层,煤层厚度为 5 m ,渗透率为 $0.01 \times 10^{-15} \sim 60 \times 10^{-15}\text{ m}^2$,泊松比一般为 $0.26 \sim 0.35$,平均 0.32 ;抗压强度 $0.33 \sim 21.00\text{ MPa}$,平均 13 MPa ;弹性模量 $3.6 \sim 31.0\text{ GPa}$,

平均 12 GPa; 抗拉强度 0.14 ~ 1.46 MPa, 平均 0.64 MPa。支撑剂选用粒径为 425 ~ 850 μm 的石英砂, 铺砂厚度为 3 mm; 选用粒径为 38 ~ 75 μm 的煤

粉; 实验中配置了质量浓度分别为 20, 40 和 60 g/L 煤粉悬浮液, 所用水的动力黏度为 0.893 7 mPa · s。图 4 为不同质量浓度煤粉悬浮液实物图。

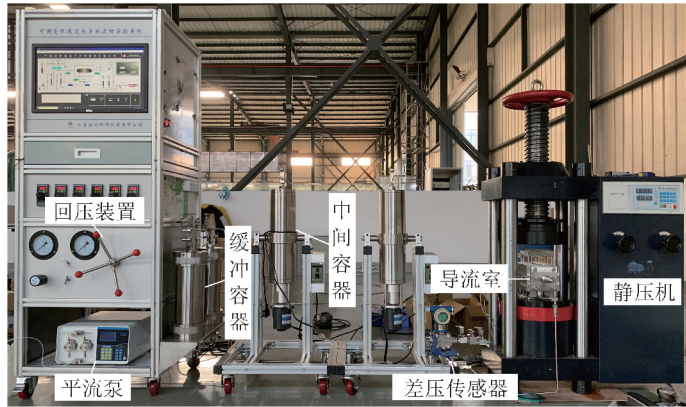
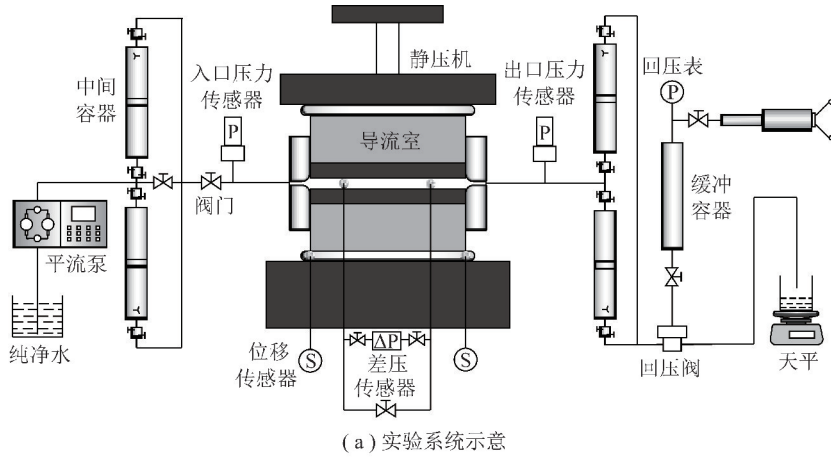


图2 煤岩导流性能测试系统

Fig. 2 Coal and rock conductivity testing system

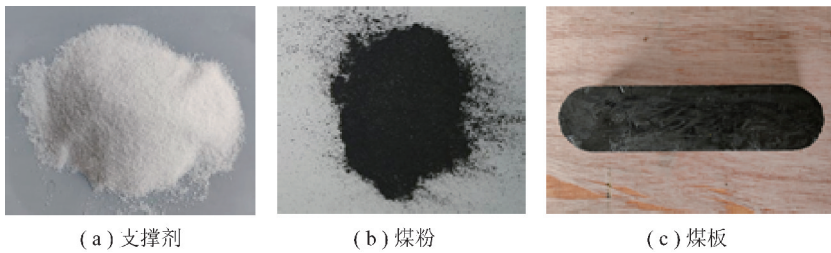


图3 实验材料实物

Fig. 3 Physical photo of experimental materials

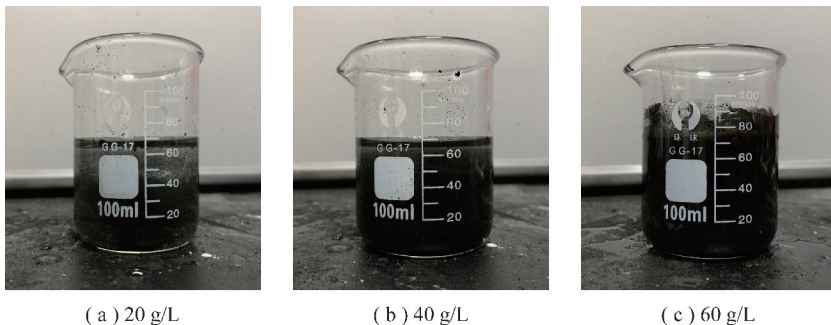


图4 不同质量浓度煤粉悬浮液实物

Fig. 4 Physical photo of coal powder suspension of different concentrations

2.3 实验方法

(1)先将煤板和3 mm石英砂支撑剂均匀铺设放置在API导流室内,然后将导流室置于静压机上,使用静压机进行3 MPa的轴向压实。

(2)启动平流泵,压力设定为0.5 MPa,通过向系统中注入流体检查仪器是否连接完好,当出口处没有液体流出时,关闭上下游的控制阀门,然后开启真空截止阀门,启动真空泵装置排空系统管线中的气体。

(3)采用控制变量法,共进行3组煤粉悬浮液注射实验,每组煤粉悬浮液的浓度分别为20, 40, 60 g/L。3组实验中注入的煤粉悬浮液流速均为15 mL/min,注入时间大约为20 h。导流室的轴向压力维持在3 MPa,背压设置为2 MPa。实验过程中监测并记录API导流室两端的压差,压差稳定后,实验停止。

2.4 实验结果与模型验证

图5为不同初始煤粉质量浓度下支撑裂缝渗透率演化实验值与理论值对比结果,其中支撑裂缝的初始渗透率 K_0 为 $63 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。由图5可知,随着煤粉侵入支撑裂缝的时间增加,裂缝的渗透率逐渐减小,且初始悬浮煤粉质量浓度越大,支撑裂缝渗透率越小,这与通过支撑裂缝渗透率演化模型得到的渗透率变化规律总体吻合较好。

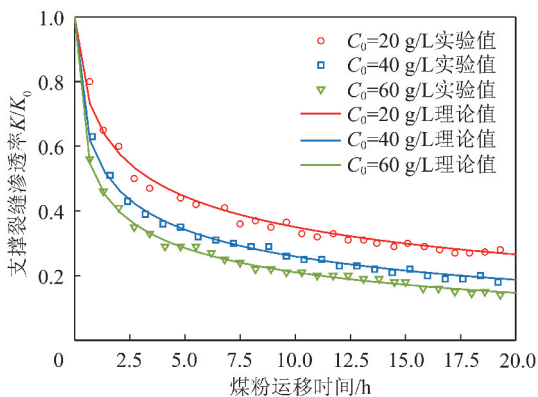


图5 支撑裂缝渗透率演化实验值与理论值对比

Fig. 5 Comparison of experimental and theoretical values of propped fracture permeability evolution

2.5 关于理论模型和实验验证的讨论

实验结果和模型理论结果的对比分析表明,将支撑裂缝渗流通道用毛细管束模型来描述的方法是准确可行的。通过理论模型的计算,可以有效预测支撑裂缝渗透率的演化过程。然而,对比理论曲线和实验数据可以发现,大部分渗透率实验值与理论值略有偏差,这是模型理想化和煤粉侵入裂缝实验方法共同作用的结果。沁水盆地3号煤层水力

压裂选用粒径150~300, 150~900, 800~1 200 μm 的支撑剂,支撑裂缝产出煤粉粒径在10~300 μm ,因此,实验采用相同粒径范围的支撑剂与煤粉,结合煤板模拟了较为真实的裂缝地质环境。但是,实验中API导流室铺置石英砂支撑剂时难以做到均匀分布,孔隙分布并非均一,由于煤粉的疏水性质,煤粉颗粒在流体中无法保证均匀分布,流体在煤板壁面处存在边缘效应,这些都会影响实验中煤粉分布和渗透率的变化规律。

实验模拟裂缝的尺度较小,实验结果和理论模型并没有消除与实际工程中尺度水力裂缝的尺度效应,并且实际裂缝扩展形态较为复杂,裂缝会产生多重分支,这些因素可能导致实际生产状况与实验结果和理论模型产生差异。

3 煤粉沉积特性对支撑裂缝渗透率的影响

假设支撑裂缝的初始孔隙率为0.35,初始煤粉质量浓度为100 g/L,渗流速度为0.22 cm/s。利用式(5),(8),(19)分析煤粉沉积系数、弥散系数对支撑裂缝渗透率的影响。

3.1 煤粉沉积系数对支撑裂缝渗透率的影响

3.1.1 不同沉积系数下支撑裂缝渗透率随空间变化规律

图6为5种不同沉积系数对应的沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率随空间变化的曲线,其对应的煤粉弥散系数 $D=1 \text{ cm}^2/\text{s}$,煤粉运移时间 $t=1 \text{ h}$ 。由图6(a)可知,支撑裂缝内沉积煤粉体积分数沿煤粉运移方向逐渐减小,这是因为煤粉运移时间较短,运移距离较小,煤粉还未随流体运移至较远处。其次,在 $x < 75 \text{ cm}$ 处,即支撑裂缝入口端,由于沉积系数越大,煤粉越难运移,大量煤粉沉积在此处,沉积煤粉体积分数随沉积系数的增大而增大,而在 $x > 75 \text{ cm}$ 处,即支撑裂缝内部,由于沉积系数越大,煤粉在裂缝入口端的沉积量越大,导致进入支撑裂缝内的煤粉量减少,沉积煤粉体积分数随沉积系数的增大而减小。

由图6可知,在 $x < 75 \text{ cm}$ 处,沉积系数越大,煤粉沉积量越大,沉积煤粉体积分数越大,支撑裂缝渗透率越小,在 $x > 75 \text{ cm}$ 处,沉积系数越大,煤粉沉积量越小,支撑裂缝渗透率随沉积系数的增大而增大。

3.1.2 不同沉积系数下支撑裂缝渗透率随时间变化规律

图7为5种不同沉积系数对应的悬浮煤粉质量浓度、沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率随时间变化的曲线,其对应的 $D=1 \text{ cm}^2/\text{s}$, $x=100 \text{ cm}$ 。

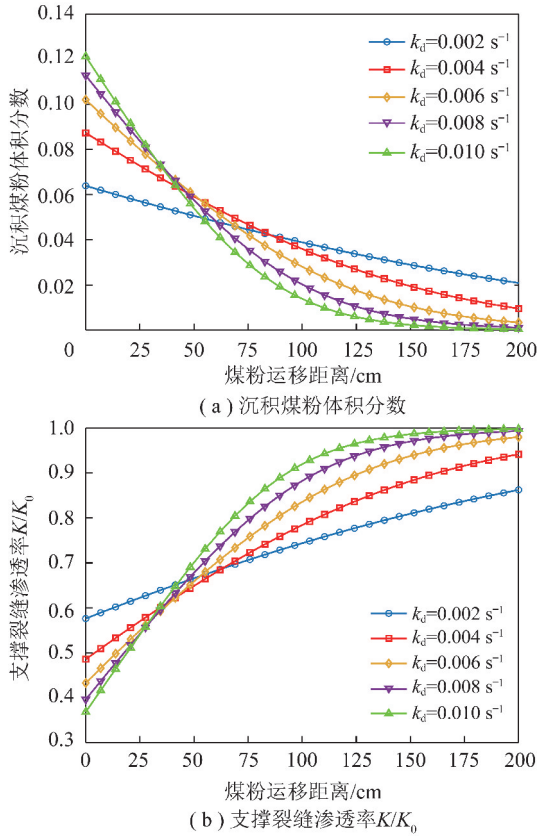


图6 不同沉积系数下沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率 K/K_0 随空间变化规律

Fig. 6 Variation of deposited coal powder concentration and propped fracture permeability K/K_0 with distance corresponding to different deposition rate coefficients

由图 7(a)可知,对于任意沉积系数的悬浮煤粉质量浓度和时间的关系曲线来说,随着煤粉运移时间增大,支撑裂缝中 $x=100 \text{ cm}$ 处的悬浮煤粉质量浓度快速增大,最后达到恒定。其次,不同沉积系数对悬浮煤粉质量浓度的影响程度显著。随着沉积系数的减小,支撑裂缝内 $x=100 \text{ cm}$ 处的悬浮煤粉质量浓度增大,且增加幅度呈递增趋势。即在流速、煤粉初始质量浓度、弥散系数一定的条件下,沉积系数越大,支撑裂缝内悬浮煤粉质量浓度越小。当运移时间为 900 s ,悬浮煤粉质量浓度从沉积系数为 0.010 s^{-1} 时的 2.09 g/L 增加到沉积系数为 0.002 s^{-1} 的 41.65 g/L ,增加了 18.93 倍。

由图 7(b)可知,对于任意煤粉沉积系数,随着煤粉运移时间增大,支撑裂缝中 $x=100 \text{ cm}$ 处的沉积煤粉体积分数逐渐增大。当运移时间为 50 h ,该处的沉积煤粉体积分数从沉积系数为 0.010 s^{-1} 时的 0.12 增加到沉积系数为 0.002 s^{-1} 的 0.18 。随着沉积系数越大,煤粉在支撑裂缝入口端的沉积量越大,进入支撑裂缝内的煤粉量越小,导致在支撑裂缝内沉积煤粉

体积分数越小。

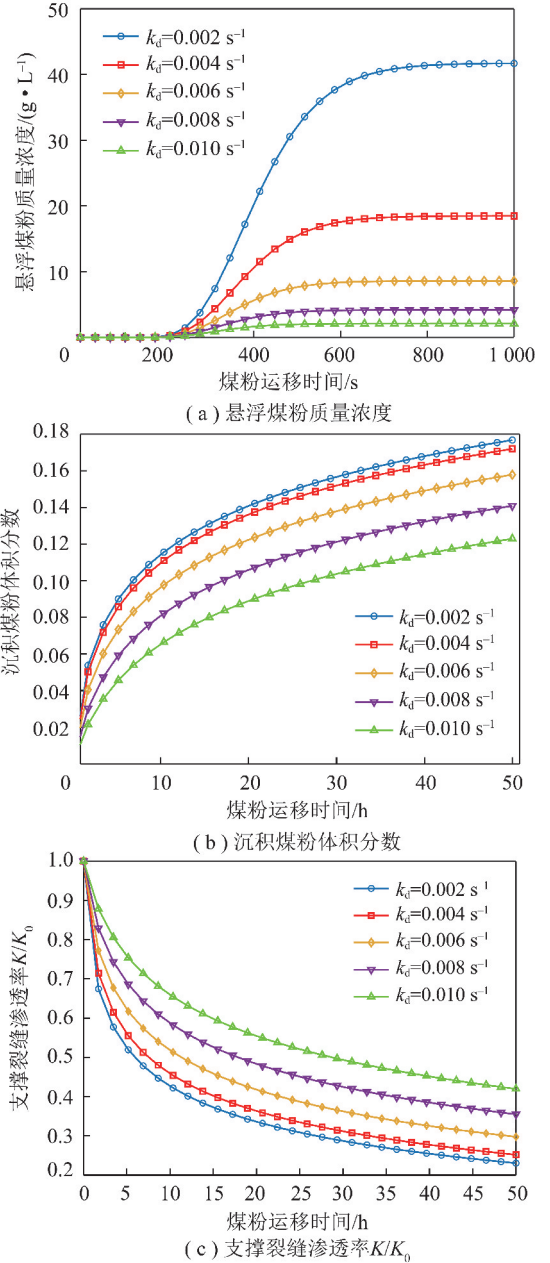


图7 5种不同沉积系数对应的悬浮煤粉质量浓度、沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率 K/K_0 随时间变化的曲线

Fig. 7 Variation of suspended coal powder concentration, deposited coal powder concentration and propped fracture permeability K/K_0 with time corresponding to different deposition rate coefficients

由图 7(c)可知,随着煤粉运移时间的增大,支撑裂缝渗透率逐渐减小,且随着沉积系数的增大,支撑裂缝渗透率衰减幅度减小。由图 7(a), (b)可知,在流速、煤粉初始质量浓度、弥散系数一定的条件下,沉积系数越大,支撑裂缝内的沉积煤粉体积分数及悬浮煤粉质量浓度越小,导致煤粉在该处支撑剂多孔介质中占据的孔隙体积越少,从而渗透率越高。

3.2 煤粉弥散系数对支撑裂缝渗透率的影响

3.2.1 不同弥散系数下支撑裂缝渗透率随空间变化规律

图8为5种不同弥散系数对应的沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率随空间变化的曲线,其对应的煤粉沉积系数为 $k_d = 0.01 \text{ s}^{-1}$,煤粉运移时间 $t = 100 \text{ h}$ 。由图8(a)可知,沉积煤粉体积分数随煤粉运移方向逐渐减小。其次,弥散系数越大,煤粉越容易运移,进入支撑裂缝内的煤粉量越大,支撑裂缝内沉积煤粉体积分数越大。由图8(b)可知,支撑裂缝渗透率沿煤粉运移方向增大,且弥散系数与支撑裂缝渗透率呈正相关关系。

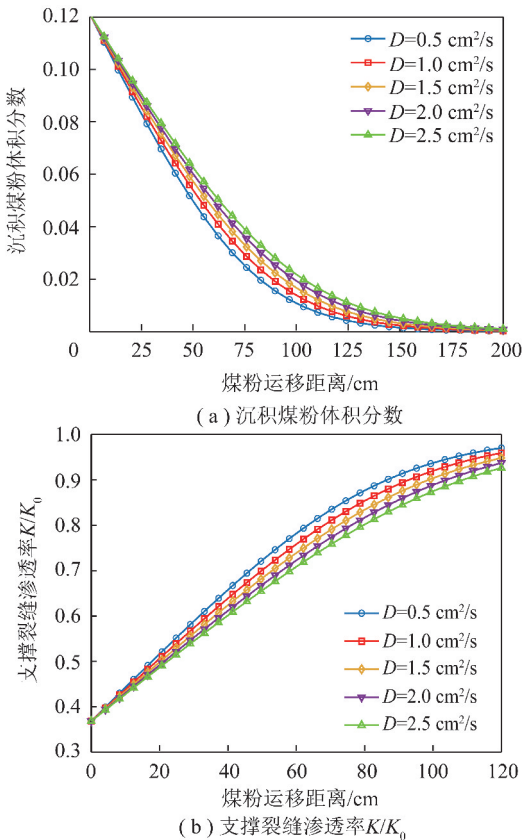


图8 不同弥散系数对应的沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率 K/K_0 随空间变化的曲线

Fig. 8 Variation of deposited coal powder concentration and propped fracture permeability K/K_0 with distance corresponding to different dispersion coefficients

3.2.2 不同沉积系数下支撑裂缝渗透率随时间变化规律

图9为5种不同弥散系数对应的悬浮煤粉质量浓度、沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率随时间变化的曲线,图中其对应的 $k_d = 0.01 \text{ s}^{-1}$, $x = 100 \text{ cm}$ 。由图9(a)可知,随着煤粉运移时间增大,支撑裂缝中 $x = 100 \text{ cm}$ 处的煤粉质量浓度逐渐增大,最后达到恒

定。其次,不同弥散系数对悬浮煤粉质量浓度的影响程度显著。随着弥散系数的增大,支撑裂缝内 $x = 100 \text{ cm}$ 处的煤粉质量浓度增大。即在流速、煤粉初始质量浓度、沉积系数一定的条件下,弥散系数越大,支撑裂缝内悬浮煤粉质量浓度越大。当运移时间为 900 s ,悬浮煤粉质量浓度从弥散系数为 $0.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 时的 1.57 g/L 增加到弥散系数为 $2.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 的 3.67 g/L ,增加幅度达到133%。

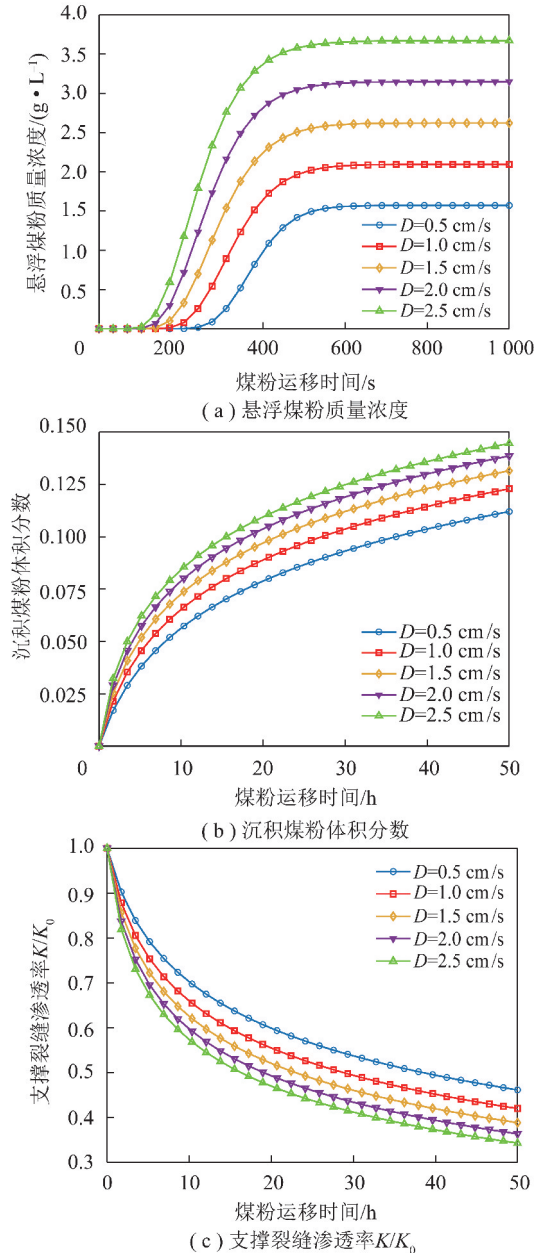


图9 不同弥散系数下悬浮煤粉质量浓度、沉积煤粉体积分数和支撑裂缝渗透率 K/K_0 随时间变化规律

Fig. 9 Variation of suspended coal powder concentration, deposited coal powder concentration and propped fracture permeability K/K_0 with time corresponding to different dispersion coefficients

由图9(b)可知,对于任意煤粉弥散系数,随着煤粉运移时间增大,支撑裂缝中 $x=100\text{ cm}$ 处的沉积煤粉体积分数逐渐增大。分析可知,弥散系数越大,煤粉随流体的弥散作用越明显,进入支撑裂缝的煤粉越多。表现为当运移时间为50 h,该处的沉积煤粉体积分数从弥散系数为 $0.5\text{ cm}^2/\text{s}$ 时的0.11增加到弥散系数为 $2.5\text{ cm}^2/\text{s}$ 的0.14。即在流速、煤粉初始浓度、沉积系数的条件下,弥散系数越大,支撑裂缝内沉积煤粉体积分数越大。

由图9(c)可知,随着煤粉运移时间的增大,支撑裂缝内 $x=100\text{ cm}$ 处的渗透率逐渐减小,且随着弥散系数的增大,支撑裂缝内 $x=100\text{ cm}$ 处的渗透率衰减幅度增大。由图9(a),(b)可知,在流速、煤粉初始质量浓度、弥散系数一定的条件下,弥散系数越大,支撑裂缝内沉积煤粉体积分数及悬浮煤粉质量浓度越大,导致煤粉在该处支撑剂多孔介质中占据的孔隙体积越大,从而渗透率越低。

4 结 论

(1)从毛细管束模型出发,基于K-C公式建立了考虑煤粉运移沉积的支撑裂缝渗透率时空演化模型,将渗透率变化与煤粉颗粒沉积过程相关联,得到了煤粉持续侵入支撑裂缝条件下煤粉分布及渗透率变化规律。

(2)随着煤粉在支撑裂缝内运移,裂缝内悬浮煤粉浓度会在短时间内攀升到峰值,随后保持不变,沉积煤粉体积分数不断增大,煤粉在支撑裂缝内占据的孔隙增大,支撑裂缝渗透率不断减小。

(3)初始煤粉质量浓度、弥散系数及煤粉运移速度一定的条件下,煤粉沉积系数越大,沉积在支撑裂缝入口端的煤粉越多,进入支撑裂缝的煤粉越少,支撑裂缝内悬浮煤粉质量浓度及沉积煤粉体积分数越小,渗透率越大;初始煤粉质量浓度、煤粉沉积系数及煤粉运移速度一定的条件下,弥散系数越大,煤粉运移越容易,进入支撑裂缝的煤粉越多,支撑裂缝内悬浮煤粉质量浓度及沉积煤粉体积分数越大,渗透率越小。

(4)考虑煤粉运移沉积的支撑裂缝渗透率演化模型,为实际生产中采用合理的煤层气排采方法和解决煤粉沉积问题提供了重要的依据。

参考文献 (References):

[1] 徐刚,彭苏萍,邓绪彪.煤层气井水力压裂压力曲线分析模型及应用[J].中国矿业大学学报,2011,40(4):173-178.
XU Gang, PENG Suping, DENG Xubiao. Hydraulic fracturing pres-

sure curve analysis and its application to coalbed methane wells[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 173-178.

- [2] 陶云奇,刘东,许江,等.大尺寸复杂应力水力压裂裂缝扩展模拟试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(2):405-412.
TAO Yunqi, LIU Dong, XU Jiang, et al. Experimental study on hydraulic fracturing propagation in coal/rock with large size and complex stress [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 405-412.
- [3] ANDREI A Osipov. Fluid mechanics of hydraulic fracturing: A review[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2017, 156: 513-535.
- [4] CHEN M, ZHANG S, LIU M, et al. Calculation method of proppant embedment depth in hydraulic fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 149-156.
- [5] 马耕,张帆,刘晓,等.地应力对破裂压力和水力裂缝影响的试验研究[J].岩土力学,2016,37(S2):216-222.
MA Geng, ZHANG Fan, LIU Xiao, et al. Experimental study of impact of crustal stress on fracture pressure and hydraulic fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 216-222.
- [6] 光新军,王敏生,韩福伟,等.压裂支撑剂新进展与发展方向[J].钻井液与完井液,2019,36(5):529-533,541.
GUANG Xinjun, WANG Minsheng, HAN Fuwei, et al. Proppants for fracturing fluids: New progress made and direction of future development[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(5): 529-533, 541.
- [7] 李灿然,李向辉,童永周,等.压裂支撑剂研究进展及发展趋势[J].陶瓷学报,2016,37(6):603-607.
LI Canran, LI Xianghui, TONG Yongzhou, et al. The development progress and trends of fracturing proppant [J]. Journal of Ceramics, 2016, 37(6): 603-607.
- [8] 刘升贵,张新亮,袁文峰,等.煤层气井煤粉产出规律及排采管控实践[J].煤炭学报,2012,37(S2):412-415.
LIU Shenggui, ZHANG Xinliang, YUAN Wenfeng, et al. Regularity of coal powder production and concentration control method during CBM well drainage [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 412-415.
- [9] 张芬娜,李明忠,綦耀光,等.煤层气排采产气通道适度携煤粉理论[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(2):86-92.
ZHANG Fenna, LI Mingzhong, QI Yaoguang. Analysis of pulverized coal migration during CBM production [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 86-92.
- [10] 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.
- [11] 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 Suian. Influencing characteristics and control of coal powder to proppant fracture conductivity [J].

- Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 687-693.
- [12] 邹雨时, 张士诚, 张劲, 等. 煤粉对裂缝导流能力的伤害机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1890-1894.
ZOU Yushi, ZHANG Shicheng, ZHANG Jin, et al. Damage mechanism of coal powder on fracture conductivity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1890-1894.
- [13] 曹代勇, 姚征, 李小明, 等. 单相流驱替物理模拟实验的煤粉产出规律研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 624-628.
CAO Daiyong, YAO Zheng, LI Xiaoming, et al. Rules of coal powder output under physical simulation experiments of single-phase water flow displacement[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 624-628.
- [14] 王长浩, 卢渊, 伊向艺, 等. 煤炭填砂裂缝导流能力实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(35): 10604-10607, 10612.
WANG Changhao, LU Yuan, YI Xiangyi, et al. The experimental study about the conductivity of the sand-pack fracture in the coal[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(35): 10604-10607, 10612.
- [15] 曹立虎, 张遂安, 张亚丽, 等. 煤层气水平井煤粉产出及运移特征[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 31-35.
CAO Lihu, ZHANG Suian, ZHANG Yali, et al. Investigation of coal powder generation and migration characteristics in coalbed methane horizontal well[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(3): 31-35.
- [16] 刘岩, 张遂安, 曹立虎, 等. 煤粉在支撑裂缝中的运移与沉积规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1333-1337.
LIU Yan, ZHANG Suian, CAO Lihu, et al. Rules of coal powder migration and deposition in the proppant fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1333-1337.
- [17] 张学彦, 刘世奇, 桑树勋, 等. 煤粉产出对煤层气井压裂裂缝渗透率的影响[J]. 煤矿安全, 2017, 48(10): 5-8.
ZHANG Xueyan, LIU Shiqi, SANG Shuxun, et al. Influence of coal fines output on permeability of fracturing fractures of CBM Well[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(10): 5-8.
- [18] WEI Y, LI C, CAO D, 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: 106355.
- [19] ZOU Y S, HANG S C, ZHANG J. Experimental method to simulate coal fines migration and coal fines aggregation prevention in the hydraulic fracture[J]. Transport in Porous Media, 2014, 101(1): 17-34.
- [20] 陈星欣. 饱和多孔介质中颗粒迁移和沉积特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
CHEN Xingxin. Study on the particle transport and deposition in saturated porous media[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [21] 刘新福, 綦耀光, 胡爱梅, 等. 单相水流动煤层气井流入动态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 960-966.
LIU Xinfu, QI Yaoguang, HU Aimei, et al. Inflow performance analysis of single-phase water flow in coal bed methane wells[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 960-966.
- [22] 刘泉声, 崔先泽, 张程远. 基于变孔隙率的多孔介质中悬浮颗粒沉积渗透率衰减模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3308-3314.
LIU Quansheng, CUI Xianze, ZHANG Chengyuan. Permeability reduction model of particles deposit in porous medium considering changeable porosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3308-3314.
- [23] CORAPCIOGLU M Y, JIANG S. Colloid-facilitated groundwater contaminant transport[J]. Water Resources Research, 1993, 29(7): 2215-2226.
- [24] GROLIMUND D, ELIMELECH M, BORKOVEC M, et al. Transport of in situ mobilized colloidal particles in packed soil columns[J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32(22): 1129.
- [25] UNICE K M, LOGAN B E. Insignificant role of hydrodynamic dispersion on bacterial transport[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 26(6): 491.
- [26] XU S, GAO B, SAIERS J E. Straining of colloidal particles in saturated porous media[J]. Water Resources Research, 2006, 42(12).
- [27] AHFIR N D, WANG H Q, BENAMAR A, et al. Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media; Hydrodynamic effect[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(4): 659-668.
- [28] BENNACER L, AHFIR N D, BOUANANI A, et al. Suspended particles transport and deposition in saturated granular porous medium; Particle size effects[J]. Transport in Porous Media, 2013, 100(3): 377-392.
- [29] 董丽坤. 微小颗粒在多孔介质界面处沉积特性的实验研究及数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2018.
DONG Likun. Experiments study and numerical simulation of particle migration and deposition at the fluid/porous media interface[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [30] 张芬娜, 綦耀光, 徐春成, 等. 煤粉对煤层气井产气通道的影响分析[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 428-435.
ZHANG Fenna, QI Yaoguang, XU Chuncheng, et al. Analysis of the impact of gas production channel for coalbed methane well by pulverized coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 428-435.