



移动扫码阅读

霍丙杰, 黄宇轩, 靳京爵, 等. 沿空掘巷小煤柱渗透率演化规律试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 278-286.

HUO Bingjie, HUANG Yuxuan, JIN Jingjue, *et al.* Experimental study on permeability evolution of slender coal pillar of entry driven along goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 278-286.

沿空掘巷小煤柱渗透率演化规律试验研究

霍丙杰, 黄宇轩, 靳京爵, 宋子奇, 李天航, 白迎旭

(辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 沿空掘巷条件下小区段煤柱受多重采动影响, 受采动影响的煤岩体渗透率会因为采动裂隙、原生裂隙的发育与压实而发生改变, 确定不同采动阶段小区段煤柱渗透率演化规律是同层位邻近采空区气-水灾害防控的理论基础。以大同矿区石炭系特厚煤层沿空掘巷小区段煤柱开采为工程背景, 通过地应力测试、数值模拟的方法, 综合确定不同采动阶段小区段煤层所处应力场的分布特征, 为试验研究应力路径的确定提供依据, 应用 DJG-II 型三轴加载煤岩渗流测试装备进行不同采动阶段煤柱渗透率演化试验研究。研究表明: 建立了沿空掘巷小区段煤柱不同采动阶段渗透率与应力的定量影响关系, 总体表现为渗透率随着轴向应力的增大而减小, 卸载阶段渗透率随着轴压的减小而增大; 揭示不同采动阶段小区段煤柱应力-应变-渗透率的演化规律, 在第一、第二阶段加卸载时, 煤样变形还处于弹性变形阶段, 渗透率变化幅度与速率都较为平缓。在第三次采动影响阶段, 试件出现不可逆的塑性破坏使得渗透率急剧增加, 增幅速率也明显大于前 2 个采动阶段, 小煤柱渗透率较初始渗透率增大最多为 324.389 倍, 该阶段小煤柱发生破坏失去了气-水阻隔性能, 明确了特厚煤层沿空掘巷工程前 2 个采动阶段宽 6 m 小煤柱没有破坏的特征。研究成果可为坚硬顶板特厚煤层沿空掘巷开采条件下, 小区段煤柱在不同采动阶段渗透率演化特征研究、邻近采空区气-水灾害防控等提供参考或理论支撑。

关键词: 沿空掘巷; 小区段煤柱; 循环加卸载; 渗透率; 裂隙

中图分类号: TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)07-0278-09

Experimental study on permeability evolution of slender coal pillar of entry driven along goaf

HUO Bingjie, HUANG Yuxuan, JIN Jingjue, SONG Ziqi, LI Tianhang, BAI Yingxu

(School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Under the condition of roadway driving along goaf, slender coal pillar is affected by multiple mining-induced disturbances, and the permeability of coal and rock mass affected by mining will change due to the development and compaction of mining fractures and primary fractures. Determining the evolution of slender coal pillar permeability at different mining stages is the theoretical basis for the prevention and control of gas water disasters in adjacent goaf at the same layer. Taking the mining with slender coal gate pillar of the Carboniferous extra thick coal seam in Datong Mining Area as the engineering background, the distribution characteristics of the stress field for the slender coal gate pillar of the coal seam in different mining stages are comprehensively determined by the methods of geostress testing and numerical simulation, which provides a basis for the determination of the stress path for experimental research. The DJG - II triaxial loading coal rock seepage testing equipment was used to conduct experimental research on the evolution of coal pillar permeability in different mining stages. The research results are as follows: The quantitative influence relationship between permeability and stress of slender coal gate pillar in different mining stages is established. The overall performance is that the permeability decreases with the increase of axial stress, and the permeability increases with the decrease of axial pressure in unloading stage; It reveals the evolution of stress

收稿日期: 2022-08-15 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0873

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174185); 山西省科技计划揭榜招标资助项目(20191101015)

作者简介: 霍丙杰(1980—), 男, 山西朔州人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: huobingjie@163.com

strain permeability of the coal pillar in different mining stages. When loading and unloading in the first and second stages, the deformation of coal sample is still in the elastic deformation stage, and the change amplitude and rate of permeability are relatively gentle. In the third mining-impacted stage, the irreversible plastic failure of the specimen made the permeability increase sharply, and the rate of increase was also significantly greater than the first two mining stages. The permeability of slender coal pillar increased by 324.389 times compared with the initial permeability. In this stage, the slender coal pillar was damaged and lost its gas water barrier performance. It was clear that the 6 m small coal pillar was not damaged in the first two mining stages of the super thick coal seam gob side entry project. The research results can provide reference or theoretical support for the study of permeability evolution characteristics of slender coal pillar in different mining stages, and the prevention and control of gas water disasters in adjacent goaf under the condition of gob side entry mining in hard roof extra thick coal seams.

Key words: gob-side entry driven in a new panel; slender coal gate pillar; cyclic loading and unloading; permeability; fractures

0 引 言

留设煤柱保护巷道是我国许多煤矿采取的主要护巷方法,但同时也损失了大量的煤炭资源,沿空掘巷留设小区段煤柱有效地缓解了这一问题^[1]。小煤柱护巷的特征是基于回采工作面侧向支承压力的分布规律,科学布置回采巷道,将回采巷道布置在内应力场影响范围内;缩小区段煤柱尺寸,提高特厚煤层资源采出率。特厚煤层开采条件下小区段煤柱留设,不仅要考虑巷道稳定性与资源采出率,还要考虑其隔离邻近采空区气-水灾害的性能。小煤柱对邻近采空区灾害的隔离性能较弱,且受多重采动影响小煤柱裂隙发育、甚至破坏,其渗透率大幅增加,其隔离邻近采空区灾害的能力更弱。区段煤柱渗透率对同层位邻近采空区气-水灾害能否进入采掘工作空间具有控制作用。所以,研究采动条件下特厚煤层沿空掘巷小煤柱渗透率演化规律有重要的理论意义与现实意义。

加卸载作用下煤样渗透性试验研究方面,刘永茜^[2]指出多次载荷作用下的煤体孔隙结构会发生复杂变化,渗透率也随之改变。文献[3-6]研究了循环加载过程试件裂隙演化规律、不同高度煤样渗透率变化规律及试件的声发射参数特征等。尹光志等^[7]研究了真三轴加卸载应力路径对原煤力学特性及渗透率影响。李铭辉^[8]研究了真三轴应力条件下储层岩石的多物理场耦合响应特性。孙光中等^[9]进行了轴向应力循环加卸载作用下含瓦斯煤渗透性研究。彭苏萍等^[10]根据煤岩样在应力-应变全程曲线中的弹性、弹塑性和塑性阶段的差异形成不同的渗透率轨迹曲线的特点,建立了应力-应变与渗透率的定量关系。彭永伟等^[11]研究认为不同尺寸煤样渗透率对围压敏感性存在明显差异。ZHANG等^[12]研究了不同颗粒煤样在循环加卸载作用下渗透率的变化特征。王向宇等^[13]分析煤矿开采过程中煤体损伤的能量演化规律和渗透特性。余伊河^[14]建立了采动剪切与拉

伸复合损伤岩石渗透率演化模型。刘正东^[15]利用自主研制的高应力煤体扩散特性测试装置分析了煤体孔隙扩散和裂隙渗流系统。文献[16-20]研究了层理裂隙、含水率、温度、瓦斯等因素对煤样渗透率的影响与演化模型。袁梅等^[21]进行了不同煤层深度情况下煤岩变形渗透率试验。孙维吉^[22]系统开展了吸附作用、加载方向、时间尺度和尺寸效应等因素作用下的煤样渗透性试验。这些研究对认识煤岩样(体)渗透率影响因素及各因素对渗透率影响机制具有重要指导意义。但这些成果侧重于理论研究,主要针对应力、孔隙结构演化、试件尺寸、含水率、温度、瓦斯、等幅循环加卸载等对渗透率的影响或者与其定量关系,很少涉及特厚煤层沿空掘巷条件下小区段煤柱在不同采动阶段渗透率演化特征的研究。

在借鉴前人研究成果的基础上,以大同矿区石炭系特厚煤层小煤柱开采为工程背景,利用现场实测、数值模拟等方法综合确定沿空掘巷条件下不同采动阶段小煤柱应力场分布特征,为试验研究加卸载力学路径的确定提供依据;通过试验与理论研究,确定特厚煤层沿空掘巷在不同采动阶段小煤柱渗透率演化规律,为特厚煤层综放工作面沿空掘巷开采条件下邻近采空区气-水灾害的防控提供理论支撑。

1 沿空掘巷小煤柱采动特征分析

近年来,大同矿区为提高资源采出率,开始推行沿空掘巷小区段煤柱护巷技术。以大同矿区同忻矿3~5号煤层8207工作面与8208工作面之间小区段煤柱为研究对象,主要研究沿空掘巷条件下6m小区段煤柱渗透率动态演化规律。8208工作面平均煤层厚度为20m,工作面埋深约450m,采用综合机械化放顶煤回采工艺。采动损伤对煤柱渗透率有重要的影响,在8207工作面回采时,区段煤柱受到第一次采动影响。5208巷道为8208工作面的回风巷道,5208巷道掘进对区段煤柱造成第二次采动影响。8208工作面回采时,区段煤柱受到第三次采动影响,

如图1所示。区段煤柱总共经历3次采动影响,经历3次采动应力循环加卸载作用,此过程必然导致小煤柱的原生裂隙、采动裂隙经历多次发育与压实,直接影响煤柱的渗透率。

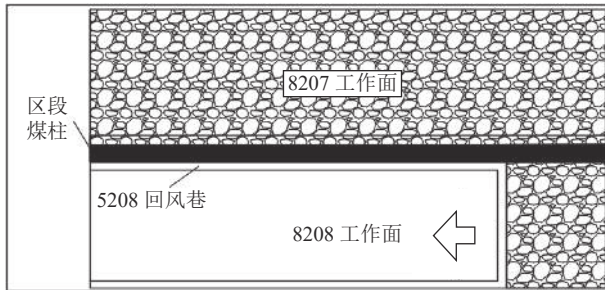


图1 区段煤柱受多重采动影响示意

Fig.1 Sketch of section coal pillar influenced by multiple mining

2 沿空掘巷小煤柱采动应力分布与试验路径确定

2.1 数值建模与边界条件

应用数值模拟方法,模拟分析沿空掘巷小煤柱不同采动阶段采动应力场演化特征,为试验研究不

同采动阶段小煤柱渗透性的应力加载路径的确定提供依据。

根据同忻煤矿8208工作面开采特征,应用FLAC^{3D}有限差分程序建立沿 x 轴方向长200 m、 y 轴方向长200 m、 z 轴方向高188 m的数值计算模型,分析沿空掘巷开采条件下6 m小区段煤柱不同采动阶段应力场分布特征。

1)模型边界条件:①模型前后和左右边界施加水平约束,即边界水平位移为0。②模型底部边界固定,即底部边界水平、垂直位移均为0。③模型顶部为自由边界。④根据大同矿区同忻煤矿地应力实测结果确定模型初始应力状态,模型 z 方向施加轴向应力为14 MPa、水平 x 、 y 方向施加水平应力为21 MPa。

2)数值模型中主要岩层物理力学参数取值根据实验室测定报告及矿井地质报告确定。煤与顶底板的物理力学参数由实验室测定,其他层位岩层的参数参考矿井地质报告确定,取值见表1。模拟中岩体采用理想弹塑性本构模型,其变形破坏特征符合莫尔-库仑屈服准则。

表1 8208工作面覆岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of overburden in No. 8208 working face

| 岩性 | 密度/(kg·m ⁻³) | 体积模量/GPa | 弹性模量/GPa | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) | 抗拉强度/MPa |
|------|--------------------------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 煤 | 1 851 | 1.05 | 2.20 | 1.88 | 42 | 1.77 |
| 泥岩 | 2 545 | 5.88 | 8.11 | 12.1 | 36 | 2.20 |
| 砂质泥岩 | 2 607 | 2.91 | 3.84 | 7.80 | 32 | 3.65 |
| 细粒砂岩 | 2 586 | 17.96 | 33.40 | 3.80 | 43 | 5.13 |
| 粗粒砂岩 | 2 560 | 4.21 | 7.07 | 5.00 | 34 | 1.50 |
| 中粒砂岩 | 2 630 | 25.93 | 36.10 | 12.1 | 36 | 2.20 |
| 砂砾岩 | 2 714 | 7.28 | 15.29 | 3.04 | 40 | 4.34 |
| 粉砂岩 | 2 550 | 10.83 | 19.50 | 2.75 | 38 | 1.84 |

2.2 第一阶段采动应力分布特征

为消除煤柱两侧受力发生塑性变形破坏,选择煤柱中心位置作为煤柱应力状态代表。根据数值模拟研究结果,选取8207工作面正常回采期间周期来压位置处采动应力特征,确定区段煤柱受到的最大轴向应力为27 MPa,水平应力为6 MPa,如图2所示。

为了使研究过程更加符合工程实践,考虑8207工作面开采后覆岩下沉稳定后,煤柱区域垂直方向采动应力分布接近原岩应力特征;煤柱区域水平方向约束主要体现为巷道支护和垮落矸石不充分挤压,水平方向应力卸载明显。所以,第一阶段采动应力卸载后,取煤柱垂直应力为原岩应力的110%,即垂直应力15 MPa;水平应力根据数值模拟确定,即水平

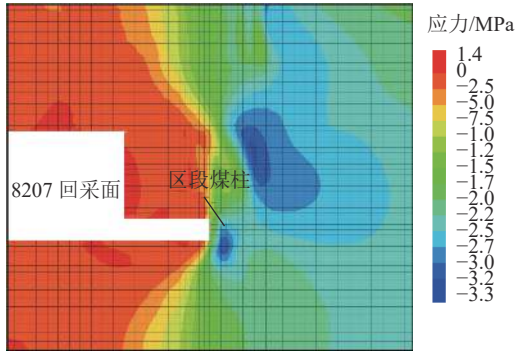
应力为6 MPa。

2.3 第二阶段采动应力分布特征

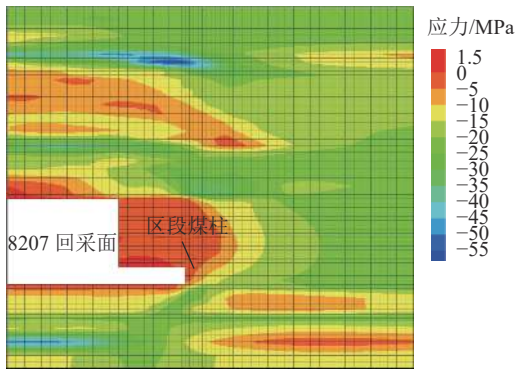
5208运输巷道掘进阶段,参数设定原理与第一阶段类似,根据数值模拟结果得知,煤柱受到最大轴向应力为32 MPa,水平应力为7 MPa,如图3所示。8208工作面应力平衡后,煤柱垂直应力恢复至原岩应力的120%,垂直应力为16.5 MPa,水平应力维持7 MPa。

2.4 第三阶段采动应力分布特征

8208工作面回采阶段,参数设定原理与第一阶段类似,根据数值模拟结果得知,煤柱受到的最大轴向应力为40 MPa,水平应力为8 MPa,如图4所示。8208工作面应力平衡之后,煤柱垂直应力恢复至原岩应力的100%,为14 MPa。考虑到回采之后,煤柱

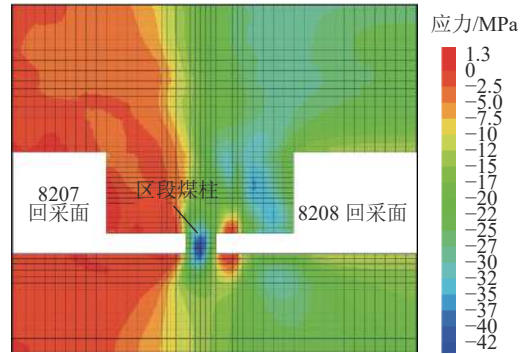


(a) 垂直应力

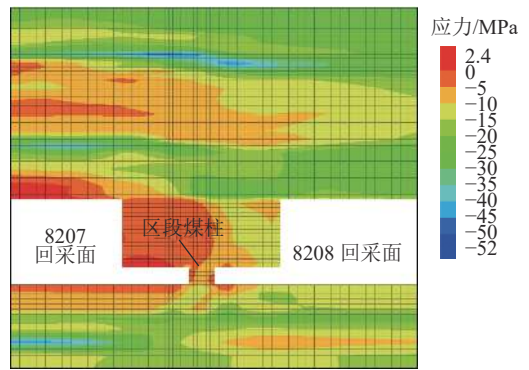


(b) 水平应力

图 2 8207 回采工作面前方峰值区应力
Fig.2 Stress nephogram of peak area in front of No.8207 working face

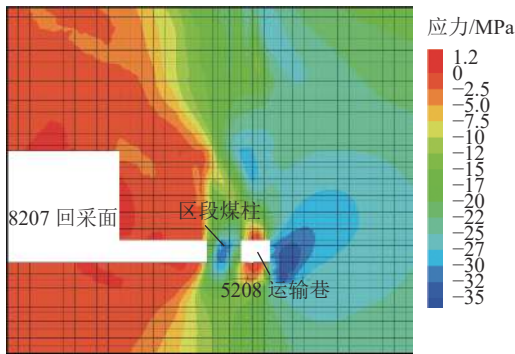


(a) 垂直应力

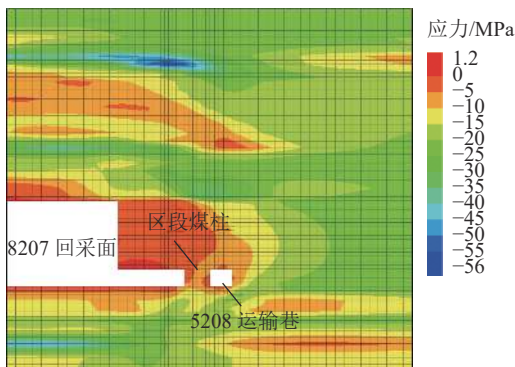


(b) 水平应力

图 4 8208 回采工作面前方峰值区应力
Fig.4 Stress nephogram of peak area in front of No.8208 mining



(a) 垂直应力



(b) 水平应力

图 3 5208 运输巷道掘进前方峰值区应力
Fig.3 Stress nephogram of peak area in front of No.5208 roadway excavation

受到采动损伤影响,水平支撑力受到破坏,则水平应力降至 4 MPa。

2.5 试验路径确定

基于不同开采阶段小煤柱应力场分布特征数值模拟结果,确定试验测试的力学路径。考虑试验设备实际情况与查阅相关文献^[21],选择驱替压力为 3 MPa。为避免试验应力加载速度过快对试验试件裂隙发育产生影响,采用 0.05 MPa/s 的应力加载卸载速度进行试验^[23]。具体加卸载路径及时间如图 5 所示。

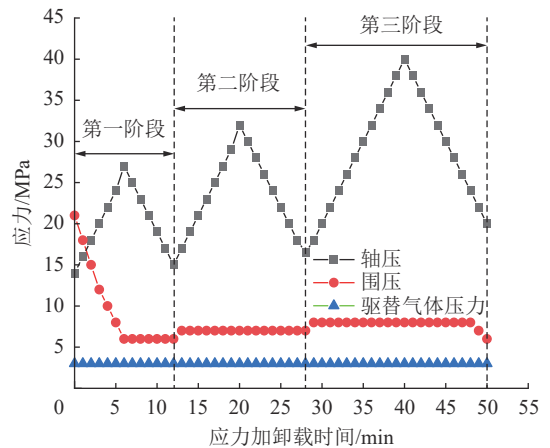
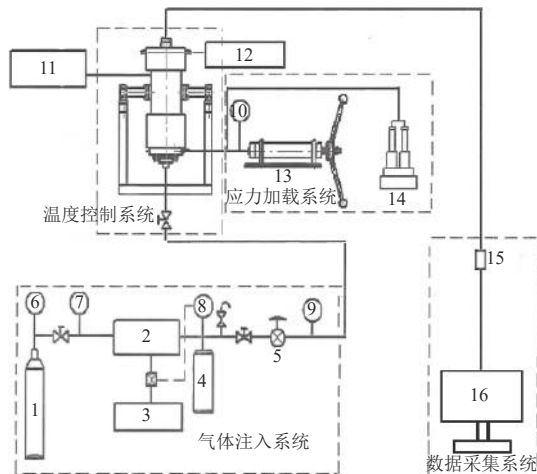


图 5 不同采动阶段应力加卸载路径
Fig.5 Loading and unloading paths of stress in different mining stages

3 渗透率演化试验

3.1 试验设备与试件

本试验采用 DJG-II 型三轴加载煤岩渗流装置, 该设备可以进行不同轴压、围压及不同驱替气体压力条件下煤岩渗流试验。试验装置主要由气体注入系统、应力加载系统、温度控制系统、数据采集处理系统 4 个部分组成, 如图 6 所示。



1—气瓶; 2—气体增压泵; 3—空气压缩机; 4—储罐; 5—调压阀; 6—减压阀; 7—压力表; 8—稳压阀; 9、10—压力表; 11—环压跟踪阀; 12—光纤检测仪; 13—轴压泵; 14—环压泵; 15—流量监测器; 16—计算机

图 6 试验原理示意

Fig.6 Diagram of experimental principle

试验煤样选自大同矿区同忻矿 8207 工作面, 井下取样时选择原生裂隙不明显、完整的煤块, 井下取样时采用保鲜膜、胶带进行密封包装, 再使用柔性编织袋进行包裹, 运输时避免产生碰撞, 运回实验室后尽快进行试验。沿煤样垂直层理方向进行加工切割, 制取 50 mm×100 mm 标准型圆柱煤样试件准备试验, 如图 7 所示。

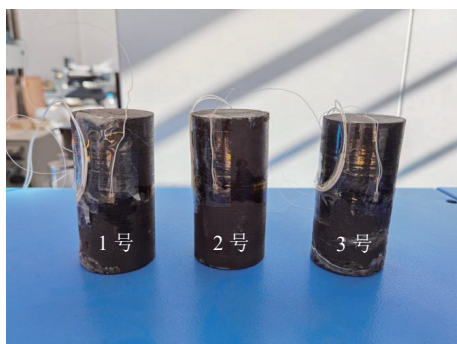


图 7 试验煤样试件

Fig.7 Experimental coal sample

3.2 试验原理

对于煤层渗流, 基于煤介质连续性和不可压缩

的假设, 采用 Darcy 定律稳态测量法来计算煤岩体的渗透率。

$$K = \frac{2P_0 Q_0 \mu L}{(P_1^2 - P_2^2) A} \quad (1)$$

式中: K 为渗透率, 10^{-15} m^2 ; Q_0 为大气压力 P_0 时试验气体流量, cm^3/s ; P_0 为大气压力, Pa ; μ 为试验气体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; L 为煤样试件长度, cm ; A 为煤试件渗透截面面积, cm^2 ; P_1, P_2 为夹持器入口、出口流体压力, Pa 。

3.3 试验参数设置

考虑试验设备与人员安全, 采用无毒无腐蚀性的氮气作为试验气体; 样品夹持器内放置直径为 50 mm, 长度为 100 mm 的煤样; 为减少温度对渗透率的影响, 温度控制为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[24]; 进口端气体压力设定为 3.0 MPa。

应力加载方式, 以 0.05 MPa/s 缓慢加载, 轴压、围压均手动设置, 逐步加载。初始: 轴压加载至 14 MPa, 围压加载至 21 MPa。以后每个采动阶段应力加卸载方式与初始应力状态加卸载方式相同。不同采动阶段应力场加卸载特征如图 5 所示。待测试气体流量稳定, 可以有效记录渗透率特征后进行卸载。卸载阶段以相同的速率卸载。

3.4 试验结果分析

1) 不同采动阶段小煤柱渗透率演化特征。沿空掘巷条件下小区段煤柱分阶段渗透率演化对比分析如图 8 所示。图 8a 为不同试件在第一采动阶段加卸载后渗透率演化特征, 1 号试件初始渗透率为 $0.004 51 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 采动后渗透率达到 $0.021 96 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 渗透率增大 4.869 倍; 2 号试件初始渗透率 $0.000 221 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 采动后渗透率达到 $0.001 84 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 渗透率增大 8.326 倍; 3 号试件初始渗透率 $0.001 09 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 采动后渗透率达到 $0.011 05 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 渗透率增大 10.138 倍。

图 8b 为不同试件在第二采动阶段加卸载后渗透率演化特征, 1 号试件加卸载后渗透率达到 $0.018 43 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 较初始渗透率增大 4.086 倍; 2 号试件加卸载后渗透率达到 $0.001 9 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 较初始渗透率增大 8.597 倍; 3 号试件加卸载后渗透率达到 $0.010 029 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 较初始渗透率增大 9.44 倍。

图 8c 为不同试件在第三采动阶段加卸载后渗透率演化特征, 1 号试件加卸载后渗透率达到 $0.034 82 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 较初始渗透率增大 7.721 倍; 2 号试件加卸载

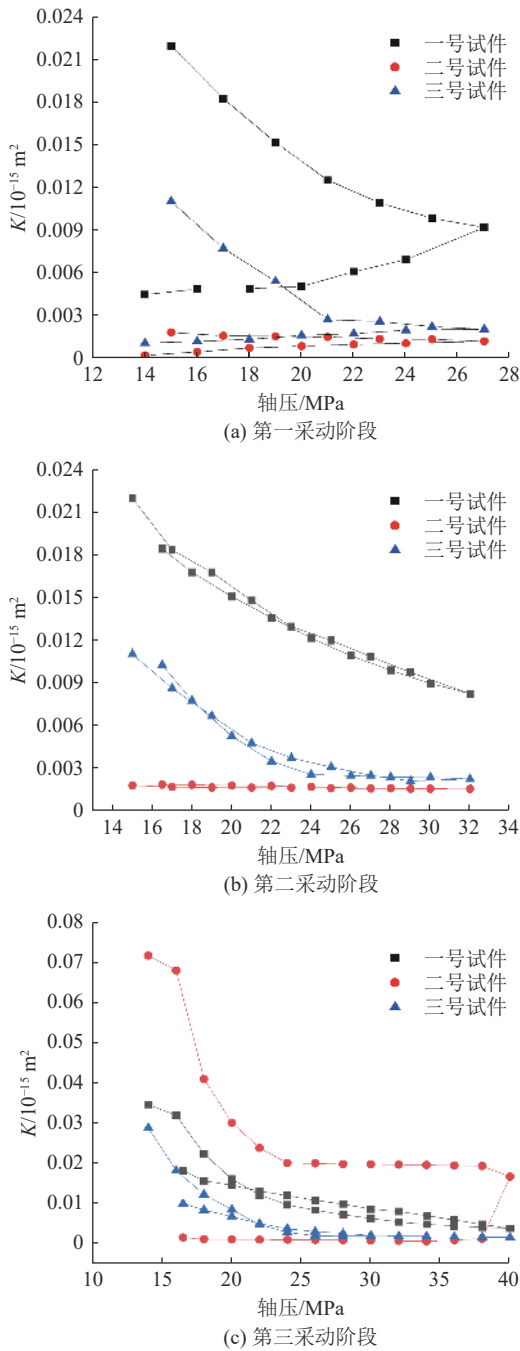


图 8 不同采动阶段煤样渗透率演化规律

Fig.8 Step-by-step permeability law of coal sample

后渗透率达到 $0.07169 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 较初始渗透率增大 324.389 倍; 3 号试件加卸载后渗透率达到 $0.02902 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 较初始渗透率增大 26.624 倍。3 组试件第三阶段的渗透率数量级是一致的, 2 号试件第三阶段渗透率增加的倍数大, 主要是由于初始渗透率不同且 2 号初始渗透率较低。

煤体具有非均质性、各向异性, 其裂隙(孔隙)之间结构存在差异时, 煤体渗透率对于试验应力敏感性也存在差异, 导致不同试件渗透率增大幅度存在

差异。但是, 3 组试件渗透率变化的数量级一致、变化的趋势一致, 表明试验结果具有科学性。同时, 不同试件初始渗透率差异大也符合原始试件的选取规律, 对于研究必然规律影响较小。

第 1 阶段主要是 8207 工作面回采的影响阶段, 小煤柱采动应力场的演化特征为: 垂直应力逐渐升高, 水平应力逐渐降低至巷道支护所给的约束。试件在加载阶段导致裂隙开始发育, 渗透率在此阶段有缓慢上升趋势; 在轴压卸载阶段(围压稳定在 6 MPa 不变), 试件因轴压的减小而裂隙逐渐张开, 渗透率上升趋势加快。

第 2 阶段主要是沿空巷道掘进的扰动阶段, 对小煤柱的采动影响较小。该阶段水平应力与第一阶段卸载后的水平应力几乎一样, 垂直应力的增幅也不大。所以, 第二阶段加卸载过程中煤样渗透率在数值上与第一阶段相近。

第 3 阶段主要是 8208 工作面回采阶段, 采动应力对小煤柱的影响大, 该阶段煤样裂隙损伤大幅增加。在轴压加载时渗透率减小, 轴压卸载时渗透率增幅大, 增幅速率也明显大于前 2 个采动阶段。

总体表明, 渗透率随轴压的变化表现出明显的规律性, 渗透率随着轴向应力的增大而减小, 卸载阶段渗透率随着轴压的减小而增大。不同开采阶段试件渗透率变化规律趋势相同、数据可靠。

2) 渗透率与应力-应变的定量关系。为了揭示不同采动阶段小煤柱渗透率演化规律, 对 3 组试验结果的应变与渗透率数据采取平均值处理, 进行应力-应变-K 相关性分析, 如图 9 所示。

第 1 采动阶段(图 9a): 加载阶段应变随着应力的增大而线性增大, 渗透率随着应变的增大缓慢增加; 卸载阶段应变随应力的减小而减小, 渗透率随着应变的减小而增大, 体现出了采动对煤体的损伤的影响。

第 2 采动阶段(图 9b): 加载阶段应变随着应力的增大而增大, 渗透率随着应变的减小而缓慢增加; 卸载阶段应变随应力的减小而减小, 渗透率随着应变的减小而增大; 加卸载阶段渗透率增加的幅度和趋势基本一致。

第 3 采动阶段(图 9c): 加载阶段应变随着应力的增大而增大, 渗透率随着应变的减小缓慢增加; 卸载阶段应变先随应力的减小而线性减小、后期应力减小而应变几乎不变, 表明煤样发生不可逆的塑性破坏; 卸载阶段渗透率随着应变的减小先缓慢增大

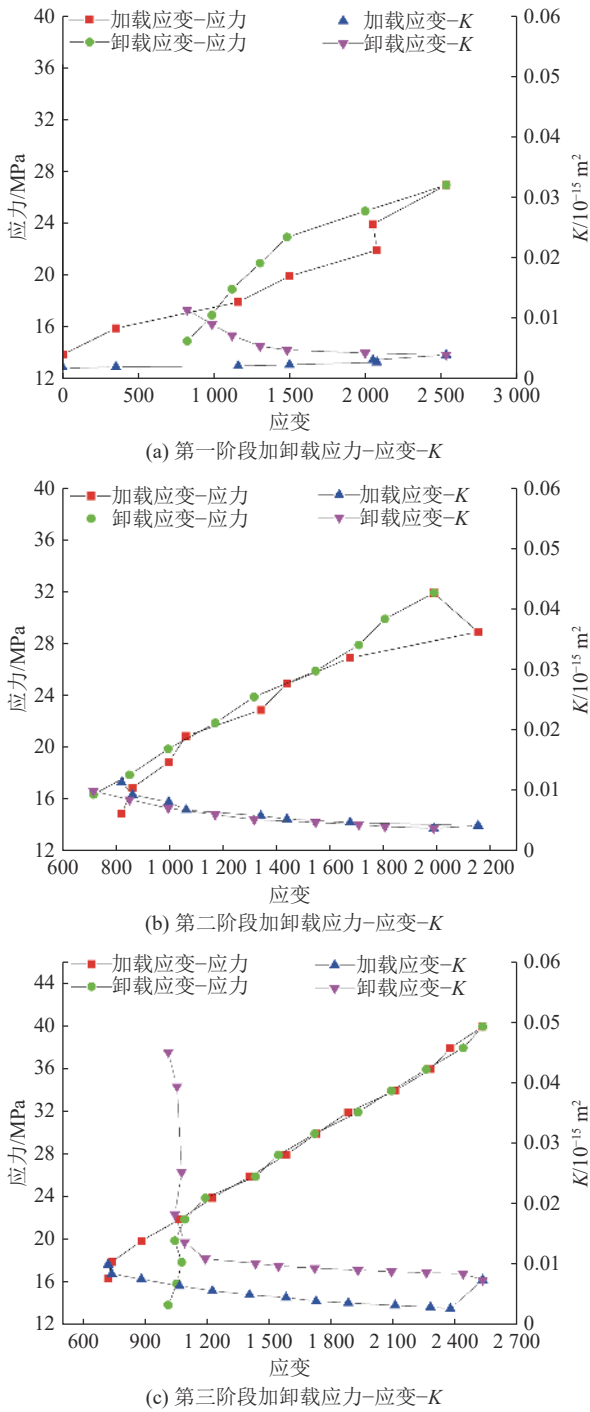


图9 三阶段应力-应变-K曲线

Fig.9 Three-stage Stress-strain-K diagram

后突然大幅增加,发生突变,进一步表明试件在该加载阶段发生塑性破坏。

总体分析,第三次卸载后渗透率增幅最大,第二阶段加卸载对渗透率影响较小;下一阶段加卸载渗透率总体高于上一阶段渗透率;在试件塑性破坏之前,渗透率增幅速率较低,第三阶段试件出现屈服破坏后,渗透率急剧上升。

煤样变形监测表明,在第一、第二阶段加卸载时,

煤样变形还处于弹性变形阶段,在第三次采动影响后,煤样发生不可逆的塑性破坏,导致渗透率变化加剧,此时小区段煤柱的气-水阻隔性能几乎丧失。所以,工程实践中,在8207工作面的回采和5208巷道掘进完成后,此时小煤柱的渗透率并未因为这2个采动阶段而发生大幅变化,其气-水阻隔性能与煤层初始状态差别不大。8208工作面开采前,正好处于第二阶段结束与第三阶段开始的节点上。因此,在沿空掘巷条件下进行8208工作面回采时,需要提前对8207工作面采空区气-水灾害进行治理,防止8207工作面采空区有害气体与积水对8208工作面安全生产造成影响。

应用Origin软件中的多元变量函数line3对分阶段K与轴压、围压的关系进行拟合,得出轴压-围压-K拟合曲线,见图10, R^2 依次达到0.9929、0.99999、0.99641、0.99999、0.99795、0.97035。

拟合后得到3个采动阶段煤柱渗透率随轴压、围压变化的定量关系,见式(2)~式(7):

$$\begin{cases} X - 16.004 = -1.002 t \\ Y - 17.72527 = 1.17856 t \\ K - 0.00209 = -0.00017 t \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X - 17 = -t \\ Y - 6 = 0 \\ K - 0.00922 = 62 t \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} X - 17.00801 = -1.004 t \\ Y - 6.69619 = -0.0317 t \\ K - 0.00951 = 0.00043 t \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X - 18.00501 = -0.51201 t \\ Y - 7 = 0 \\ K - 0.00854 = 0.00019 t \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} X - 18.00551 = -0.51752 t \\ Y - 7.76145 = -0.00814 t \\ K - 0.00787 = -0.00011 t \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} X - 16.004 = -1.01502 t \\ Y - 5.28414 = 0.15839 t \\ K - 0.002915 = 0.0012 t \end{cases} \quad (7)$$

式中, X 为轴压, MPa; Y 为围压, MPa; K 为渗透率, m^2 ; t 为拟合方程组的一个参量, 无物理意义。

式(2)和式(3)、式(4)和式(5)、式(6)和式(7)分别为小煤柱处于第一次、第二次、第三次采动影响过程中,其渗透率与应力的定量关系。该定量关系可为特厚煤层沿空掘巷条件下小煤柱渗透率演化特征、小煤柱气-水阻隔性能分析等提供理论基础。

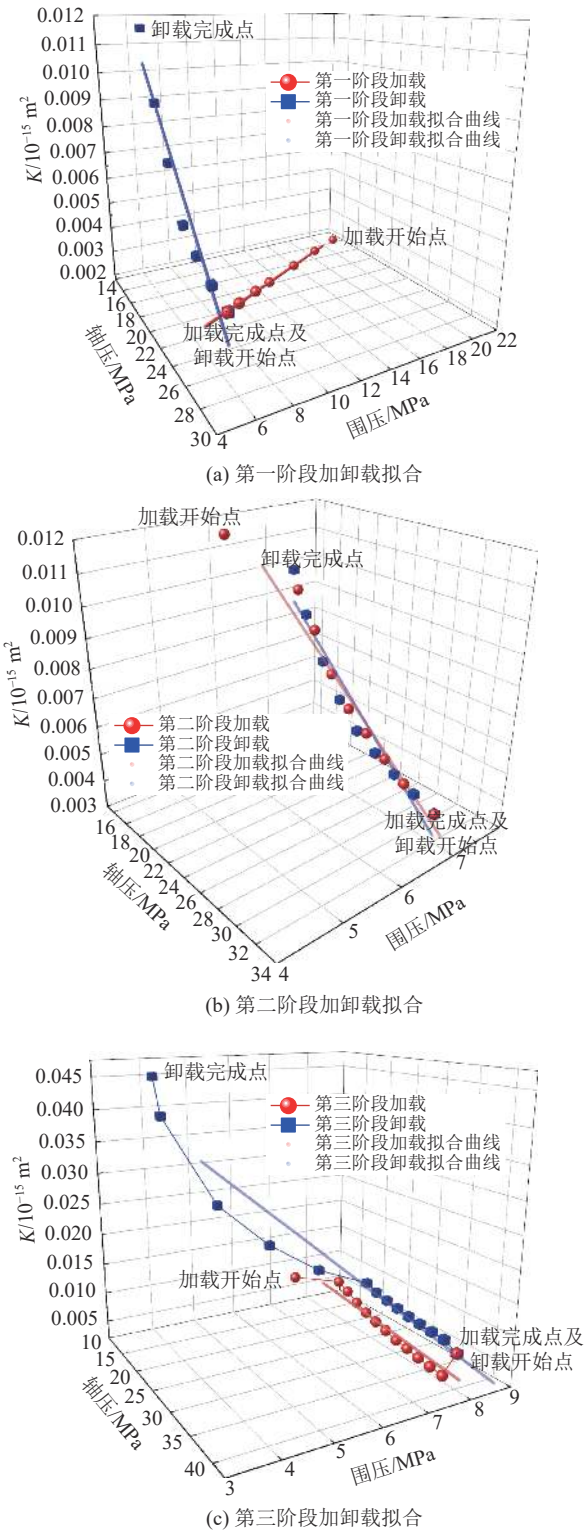


图 10 多重采动条件下渗透率演化规律拟合
Fig.10 Permeability evolution law under multiple mining conditions

4 结 论

1)根据沿空掘巷开采特征,设计了小区段煤柱循环加卸载渗透率测试试验的研究方案。基于数值

模拟结果与地应力实测数据,确定了试验研究沿空掘巷条件下小区段煤柱不同采动阶段应力场加卸载特征值。

2)试验揭示了不同采动阶段小区段煤柱应力-应变-K的变化规律,在第三采动阶段渗透率最多增大324.389倍。拟合了沿空掘巷条件下小区段煤柱不同采动阶段渗透率演化的趋势关系式。

3)试验研究发现,在第三次采动影响阶段试件出现不可逆的塑性破坏,渗透率急剧增加,此阶段小区段煤柱失去气-水阻隔性能。该发现明确了特厚煤层沿空掘巷工程中前2个采动阶段宽6m小煤柱没有破坏的特征,为开采实践中不同采动阶段邻近采空区灾害的防控指明了思路。

4)确定的特厚煤层沿空掘巷条件下小区段煤柱渗透率演化特征的研究思路、研究结果具有普适性,可为类似工程问题的研究和解决策略提供参考和理论支撑。

参考文献(References):

[1] 康红普,张 晓,王东攀,等.无煤柱开采围岩控制技术及应用[J].煤炭学报,2022,47(1):16-44.
KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, et al. Strata control technology and applications of non-pillar coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 16-44.

[2] 刘永茜.循环载荷作用下煤体渗透率演化的试验分析[J].煤炭学报,2019,44(8):2579-2588.
LIU Yongqian. Experimental analysis of coal permeability evolution under cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2579-2588.

[3] 左建平,陈 岩.卸载条件下煤岩组合体的裂纹张开效应研究[J].煤炭学报,2017,42(12):3142-3148.
ZUO Jianping, CHEN Yan. Investigation on crack recovery effect of coal-rock combined body under the influence of unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3142-3148.

[4] 王辰霖,张小东,李贵中,等.循环加卸载作用下不同高度煤样渗透性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(10):2299-2308.
WANG Chenlin, ZHANG Xiaodong, LI Guanzhong, et al. Experimental study on the permeability of coal samples with different heights under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2299-2308.

[5] 刘 超,黄 滚,赵宏刚,等.复杂应力路径下原煤力学与渗透特性试验[J].岩土力学,2018,39(1):191-198.
LIU Chao, HUANG Gun, ZHAO Honggang, et al. Tests on mechanical and permeability characteristics of raw coal under complex stress paths. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 191-198.

[6] 郭军杰,邹友平,程晓阳.循环载荷下煤样声发射特征及渗透率变化规律研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):105-109.
GUO Junjie, ZOU Youping, CHENG Xiaoyang. Study on acoustic

- emission characteristics and permeability change law of coal samples under cyclic loading[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10): 105–109.
- [7] 尹光志, 刘玉冰, 李铭辉, 等. 真三轴加卸载应力路径对原煤力学特性及渗透率影响[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 131–136.
YIN Guangzhi, LIU Yubing, LI Minghui, *et al.* Influence of true triaxial loading-unloading stress paths on mechanical property and permeability of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 131–136.
- [8] 李铭辉. 真三轴应力条件下储层岩石的多物理场耦合响应特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
LI Minghui. Research on multi-physics coupling behaviors of reservoir rocks under true triaxial stress conditions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [9] 孙光中, 荆永滨, 张瑞林, 等. 轴向应力循环加卸载作用下含瓦斯煤渗透性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(5): 928–938.
SUN Guangzhong, JING Yongbin, ZHANG Ruilin, *et al.* Permeability of coal samples containing methane under cyclic loading-unloading of axial stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 928–938.
- [10] 彭苏萍, 孟召平, 王虎, 等. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 742–746.
PENG Suping, MENG Zhaoping, WANG Hu, *et al.* Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 742–746.
- [11] 彭永伟, 齐庆新, 邓志刚, 等. 考虑尺度效应的煤样渗透率对围压敏感性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(5): 509–513.
PENG Yongwei, QI Qingxin, DENG Zhigang, *et al.* Experiment research on sensibility of permeability of coal samples under confining pressure status based on scale effect[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(5): 509–513.
- [12] ZHANG C, TU S H, ZHANG L. Analysis of broken coal permeability evolution under cyclic loading and unloading conditions by the model based on the hertz contact deformation principal[J]. *Transport in Porous Media*, 2017, 119: 739–754.
- [13] 王向宇, 周宏伟, 钟江城, 等. 三轴循环加卸载下深部煤体损伤的能量演化和渗透特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2676–2684.
WANG Xiangyu, ZHOU Hongwei, ZHONG Jiangcheng, *et al.* Study on energy evolution and permeability characteristics of deep coal damage under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(12): 2676–2684.
- [14] 余伊河. 采场边界覆岩损伤破坏特征及渗透性演化规律[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
YU Yihe. Deformation characteristics and permeability evolution laws of strata on stope boundary[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [15] 刘正东. 高应力煤体物理结构演化特性对瓦斯运移影响机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LIU Zhengdong. Research on physical structure evolution characteristic of coal mass under high stress condition and its influence on gas migration[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [16] 潘荣崧, 程远平, 董骏, 等. 不同加卸载下层理裂隙煤体的渗透特性研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(3): 473–477.
PAN Rongkun, CHENG Yuanping, DONG Jun, *et al.* Research on permeability characteristics of layered natural coal under different loading and unloading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(3): 473–477.
- [17] 魏建平, 秦恒洁, 王登科. 基于水分影响的加-卸载围压条件下含瓦斯煤渗流特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(6): 987–994.
WEI Jianping, QIN Hengjie, WANG Dengke. Seepage characteristics of coal mass containing gas considering moisture effect in loading-unloading confining pressure test[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering* 2014, 31(6): 987–994.
- [18] 邓博知. 流固耦合下温度对原煤渗透特性影响的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
DENG Bozhi. Experiment study on effect of temperature on permeability of coal under fluid-solid coupling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [19] 谢建林, 赵阳升. 随温度升高煤岩体渗透率减小或波动变化的微观机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 543–551.
XIE Jianlin, ZHAO Yangsheng. Meso-mechanism of permeability decrease or fluctuation of coal and rock with the temperature increase[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 543–551.
- [20] 贾恒义, 王凯, 王益博, 等. 围压循环加卸载作用下含瓦斯煤样渗透特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1710–1718.
JIA Hengyi, WANG Kai, WANG Yibo, *et al.* Permeability characteristics of gas-bearing coal specimens under cyclic loading-unloading of confining pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1710–1718.
- [21] 袁梅, 许江, 李波波, 等. 气体压力加卸载过程中无烟煤变形及渗透特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(10): 2138–2146.
YUAN Mei, XU Jiang, LI Bobo, *et al.* Experimental study of permeability and deformation of anthracite during process of gaseous loading-unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 2138–2146.
- [22] 孙维吉. 煤渗透和吸附变形规律试验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
SUN Weiji. Experimental study on permeability changes and adsorption-induced deformation in coal [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.
- [23] 陈春涛, 赵耀江, 张红鹤, 等. 不同加载速率下原煤与型煤的力学渗流特性对比研究[J]. *矿业安全与环保*, 2019, 46(1): 23–27.
CHEN Chunjian, ZHAO Yaojiang, ZHANG Hongge, *et al.* Comparative study on mechanical and permeability characteristics of raw coal and briquettes under different loading rates[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2019, 46(1): 23–27.
- [24] 王司建. 不同温度、蠕变条件下的含瓦斯煤渗流规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
WANG Sijian. Study on the seepage law of gas containing coal under different temperature and creep condition[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016.