



顺层双防钻孔密封段煤体渗透特性

王宁 李团结 刘文岗 纪翔 潘红宇 尚宏波

引用本文：

王宁, 李团结, 刘文岗, 等. 顺层双防钻孔密封段煤体渗透特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 138–153.
WANG Ning, LI Tuanjie, LIU Wengang. Permeability characteristics of coal body around sealing section of double-prevention bedding boreholes[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 138–153.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0816>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响

Effect of effective stress on the evolution of permeability patterns in perforated fractured coal bodies
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 122–131 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1349>

含双孔煤体破坏过程中裂隙扩展及钻孔协同变形特征

Characteristics of crack expansion and borehole co-deformation of coal containing double boreholes during failure
煤炭科学技术. 2025, 53(9): 362–378 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0889>

松软煤层瓦斯抽采钻孔“同心环”加固密封技术研究与应用

Research and application of “concentric ring” reinforcement and sealing technology for gas drainage boreholes in soft coal seams
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b3da092a-f8e4-4d14-9535-9547fef5a184>

基于排采动态过程的煤岩渗透率有效应力敏感性实验研究

Experimental study on effective stress sensitivity of coal permeability based on dynamic drainage process
煤炭科学技术. 2025, 53(7): 197–206 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0639>

顺层钻孔瓦斯抽采叠加效应影响研究

Study on influence of superimposed effect of gas extraction in downhole drilling
煤炭科学技术. 2024, 52(S2): 38–46 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1459>

钻孔密封段异质结构变形破坏特征试验研究

Experimental study on deformation and failure characteristics of heterostructure in borehole sealing section
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c58277e8-0736-459b-9a05-b92068e15470>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

安全科学与工程



移动扫码阅读

王 宁, 李团结, 刘文岗, 等. 顺层双防钻孔密封段煤体渗透特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 138–153.
WANG Ning, LI Tuanjie, LIU Wengang, et al. Permeability characteristics of coal body around sealing section of double-prevention bedding boreholes[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 138–153.

顺层双防钻孔密封段煤体渗透特性

王 宁^{1,2,3}, 李团结¹, 刘文岗³, 纪 翔⁴, 潘红宇⁴, 尚宏波⁵

(1. 黄陵矿业集团有限责任公司, 陕西 延安 727307; 2. 陕西煤业股份有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013;
4. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 5. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 顺层双防钻孔密封段煤体分布着大量的孔隙、裂隙结构, 形成了巷道空气进入抽采钻孔的渗流通道, 影响钻孔瓦斯抽采效果。根据双防钻孔密封段煤体结构特征, 通过自主研制的煤体三轴渗透试验平台, 设计并开展了孔隙-裂隙组合煤样渗透试验, 测试并计算了渗透过程中煤体孔隙率、气体渗流速度、压力梯度、渗透率、有效应力等参数, 分析有效应力对煤体渗透率的影响, 探讨双防钻孔密封段煤体渗透规律。结果表明: 应力致使破碎煤体试样内部骨架结构变形, 颗粒发生错动和再次破碎, 气体渗流通道数量减少, 渗透率降低。载荷增加至煤体压实后, 渗透率对孔隙率变化的敏感程度较低, 逐渐趋于稳定。渗流速度与压力梯度关系呈现阶段性特征, 低流速符合 Darcy 定律, 高流速遵循 Forchheimer 关系, 表现为非线性变化。气体在双防钻孔密封段裂隙区和破碎区煤体中分区流动。单一孔径煤体中气体沿着煤体颗粒表面爬流, 渗透通道结构的改变对阻力影响较小; 双重孔径组合煤体过渡面因孔隙结构突变, 气体流速重新分布, 惯性阻力增加, 非线性层流波动较大。有效应力能较好地表征渗流速度的抑制效应。随着有效应力的增大, 骨架结构压实使得孔隙渗流通道闭合, 气体的渗流速度呈线性减小。建立孔喉突扩模型, 理论分析有效应力与渗流速度的关系, 试验结果与理论结果基本吻合。有效应力是导致煤体渗透率变化的关键因素。渗透率 k 随有效应力 σ_e 的增加呈指数下降。双重孔径组合煤样因交界面孔隙结构差异较大, 渗透率随有效应力的波动也较大。可见, 气体运移过程中, 煤体的破碎程度可表征煤层的渗透特性, 可作为量化描述双防钻孔密封段煤体结构参数的依据, 进而为顺层双防钻孔布孔参数和注浆参数的优化设计提供重要的理论指导。

关键词: 双防钻孔; 瓦斯抽采; 密封段; 渗透特性; 有效应力

中图分类号: TD712.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)10-0138-16

Permeability characteristics of coal body around sealing section of double-prevention bedding boreholes

WANG Ning^{1,2,3}, LI Tuanjie¹, LIU Wengang³, JI Xiang⁴, PAN Hongyu⁴, SHANG Hongbo⁵

(1. Huangling Mining Group Company Limited, Yan'an 727307, China; 2. Shaanxi Coal Industry Company Limited, Xi'an 710077, China; 3. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 4. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 5. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In the sealing section of double-prevention boreholes along the coal seam, the coal mass is characterized by a significant presence of pores and fracture structures, forming seepage channels through which air from the roadway infiltrates the extraction boreholes, thereby affecting the gas extraction efficiency. Based on the structural characteristics of the coal mass in the sealing section of double-prevention boreholes, a self-developed triaxial permeability testing platform for coal was utilized to design and conduct permeability experi-

收稿日期: 2025-06-07 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2025-0816

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52504249, 52204262)

作者简介: 王 宁(1988—), 男, 陕西榆林人, 高级工程师, 博士。E-mail: wangningxust@163.com

通讯作者: 纪 翔(1994—), 男, 陕西咸阳人, 讲师, 博士。E-mail: jx006270@xust.edu.cn

ments on coal samples with combined pore-fracture structures. The experiments measured and calculated parameters such as porosity, gas seepage velocity, pressure gradient, permeability, and effective stress during the permeability process. The influence of effective stress on coal permeability was analyzed, and the permeability behavior of coal in the sealing section of double-prevention boreholes was explored. The results indicate that: Under the action of stress, the skeletal structure within the fractured coal sample undergoes deformation, with internal particles experiencing dislocation and further fracturing. This reduces the number of gas seepage channels, leading to a decrease in permeability. As the load continues to increase, the coal structure becomes relatively compacted and densified, and the sensitivity of permeability to changes in porosity diminishes, gradually stabilizing. The pressure gradient shows a significant decreasing trend with increasing seepage velocity. At low seepage velocities, the relationship between the two exhibits a clear Darcy phenomenon. At higher velocities, the seepage velocity-pressure gradient curve gradually deviates from linearity, conforming to the Forchheimer relationship. Gas flow in the sealing section of double-prevention boreholes is partitioned between the fractured zone and the broken zone of the coal mass. When gas flows through coal with a single pore size, it creeps along the surface of the coal particles, and changes in the structure of the seepage channels have a relatively small impact on resistance. However, at the transition interface of coal with dual-combination pore sizes, abrupt changes occur in the pore structure of the coal mass. During the gas permeation process, the flow velocity is redistributed, generating additional inertial resistance and causing significant fluctuations in nonlinear laminar flow. Effective stress can effectively characterize the inhibitory effect on seepage velocity. As effective stress increases, sliding between fractured coal particles and deformation or breakage of the particles themselves may occur, resulting in continuous compaction and densification of the skeletal structure. This leads to the closure of pore seepage channels and a linear decrease in gas seepage velocity. A pore-throat expansion-contraction model was developed to theoretically analyze the relationship between effective stress and seepage velocity, with experimental results aligning well with theoretical predictions. Effective stress is the key factor causing changes in coal permeability. The permeability k of the sample decreases with increasing effective stress σ_e . At the interface of dual-pore-size combined coal media, significant differences in pore structure result in pronounced nonlinear fluctuations in gas flow. These fluctuations also lead to greater variations in coal permeability with changes in effective stress. The above research indicates that the degree of coal fragmentation during gas migration can characterize the permeability properties of the coal seam, serving as a basis for quantifying the structural parameters of the coal in the sealing section of double-prevention boreholes. This provides important theoretical guidance for optimizing borehole arrangement and grouting parameters in the sealing section of double-prevention boreholes along the coal seam.

Key words: double-prevention borehole; gas extraction; sealing section; permeability characteristics; effective stress

0 引言

随着我国煤炭开采以 10~25 m/a 的速度向深部进军^[1], 煤矿开采深度与强度不断增加, 深部矿井煤层在“三高一低”的赋存环境中, 高地应力、高瓦斯以及低渗透特性越来越显著, 矿井出现一种兼具高瓦斯和冲击倾向性特征的复合灾害^[2-3]。对于此类复合灾害矿井, 在煤层同时布置瓦斯抽采钻孔和防冲卸压钻孔成为协同防治瓦斯和冲击地压的主要措施之一^[4-5]。该措施中, 顺层瓦斯抽采钻孔和防冲卸压钻孔构成了典型的顺层双防钻孔^[6]。由于顺层双防钻孔相距较近, 大量且密集的双防钻孔导致密封段煤体应力重新分布, 单孔周围初始“三区”(破碎区、裂隙区和弹性区)进一步扩展, 在双孔间形成大量破碎-裂隙的煤体, 构成气体进入抽采钻孔的主要流通路径^[7-8]。在实践中, 通常采用渗透率描述煤层孔隙-裂隙的连通性和渗流能力, 其直接影响钻孔漏气性和煤层瓦斯的抽采效果^[9-10]。对于此类钻孔间破碎-裂隙煤体渗透特性, 众多学者开展了相关研究工作。黄先伍等^[11]、孙明贵等^[12]认为破碎煤体渗透特性受载荷与粒径的影响, 并揭示了不同孔隙率下破碎煤

体的渗透特性。CHAO 等^[13]研究了不同粒径配比的煤样在温度、含水率、孔隙压力条件下渗透率的演化规律。在此基础上, 尚宏波等^[14]自主设计破碎煤体三轴渗流试验系统, 分析破碎煤体渗透特性随围压和孔隙率的演化规律。张天军等^[15]、PANG 等^[16-17]对该试验系统进行改进, 并结合经典的 Ergun 方程和 Kozney-Carman 方程, 分析瓦斯抽采钻孔孔周煤体的渗流特性, 给出一种钻孔孔周孔隙、裂隙煤体内气体流态判定方法。此外, 对于裂隙煤体的渗透特性研究也取得了突破性的进展。胡耀青等^[18]、冯增朝^[19]揭示了裂隙发育程度与分形维数的关系, 并给出了渗透率与煤体裂隙分形维数之间的数学表达式。在此基础上, 张磊等^[20]、LIU 等^[21]采用试验手段分析了裂隙煤体渗流演化规律。岑培山等^[22]研究了煤体平行层理及垂直层理裂隙对煤体渗流规律的影响。

密封段指顺层双防钻孔中注浆封孔材料覆盖的孔段。由于双防钻孔与巷道交叉的几何结构导致其密封段煤体应力分布特殊, 钻孔密封段破碎-裂隙煤体的渗透性受到应力的影响较大。为阐明应力对煤体渗透特性的影响, MA 等^[23]通过分析受压条件下

裂隙煤体的渗透性特征,提出了轴向压力与渗透系数的对数方程,认为渗流速度主要受颗粒与裂隙壁碰撞作用控制。林海飞等^[24]、龙航等^[25]通过建立不同应力下煤体分段渗透率动态演化模型,分析了应力对煤体渗透率的影响,揭示了渗透率与有效应力呈负指数关系,且存在阶段性响应。HATAMBEIGI等^[26]采用实验室试验和数值模拟计算的方法,分析并定义了考虑围岩应力和孔隙压力同时影响的裂缝渗透率有效应力规律,研究证实了引入应力依赖渗透率可显著提高钻孔漏气预测的准确性。在此基础上,张磊等^[27]开展不同级配结构煤体三轴渗透试验,分析了有效应力对煤体孔隙结构和渗透特性的影响,探究了渗透率随着 Talbot 幂指数增大依次表现为缓慢一线性—指数 3 阶段增长规律。王伟等^[28]通过分析有效应力引起的应变和吸附应变的变化规律,确定了我国主要矿井 CH₄ 和 CO₂ 渗透率极值压力。张村等^[29]分析了有效应力恢复条件下煤层气分区渗流特征,构建了有效应力影响下的煤体串并联渗透率模型,得到气体总流量随有效应力恢复呈负指数衰减。以上研究均证实应力对煤体渗透特性具有显著影响,有效应力能够更为准确表征煤体内部真实受力情况,从而反映渗透特性的变化。上述对于钻孔孔周破碎煤体的渗透特性进行了多方面的研究,探究了破碎煤体的渗透参数与渗透特性。然而顺层双防钻孔密封段内煤体结构复杂,气体在该区域内流动需要经历 2 种不同破碎程度的渗透介质,介质间孔径的突变会极大地影响气体渗流能力^[30],以上研究在解释双防钻孔密封段内孔隙-裂隙煤体的渗透特性有待进一步深入。

因此,在上述研究基础上,同时考虑双防钻孔密封段煤体的孔隙结构和裂隙结构特征,以预制孔隙-裂隙组合煤样为研究对象,通过自主研制的煤体三轴渗透试验平台,开展双防钻孔密封段孔隙-裂隙组合煤体渗透试验。测试并计算渗透过程中煤体孔隙率、气体渗流速度、压力梯度、渗透率、有效应力等参数,运用有效应力定律对双防钻孔密封段煤体渗透特性展开分析,以期揭示煤体结构特征和应力条件对双防钻孔密封段煤体渗透特性的影响。研究结果可为顺层双防钻孔布孔参数和注浆参数的优化设计提供重要的理论指导。

1 试验

1.1 试验设计

受顺层双防钻孔布置结构影响,相邻钻孔间产生应力叠加,同时,巷道-双防钻孔双重卸压导致双

防钻孔密封段内形成破碎区、裂隙区结构,区域内煤体发生破坏,表现为煤体原生裂隙扩大、新的裂隙产生,直接影响双防钻孔密封段煤体的渗透率。具体表现为以下 3 方面:① 钻孔成孔后,受环向应力的影响,钻孔密封段两帮、顶部和底部均易发生显著的变形,导致钻孔破坏。② 在非均匀应力场环境中,钻孔密封段煤体发生塑性变形,破坏钻孔结构的稳定性,进一步扩大孔周破碎区,导致钻孔破碎区重叠、气体渗流通道增加等。③ 受煤层回采、钻孔施工等应力扰动的影响,钻孔密封段煤体的破坏被进一步放大,导致煤体裂隙的数量和宽度增加,进而造成钻孔失稳破坏。

在抽采负压的作用下,巷道空气由双防钻孔密封段裂隙区流经破碎区进入抽采钻孔,造成钻孔漏气。双防钻孔密封段结构及 2 种介质区域中气体流动如图 1 所示。

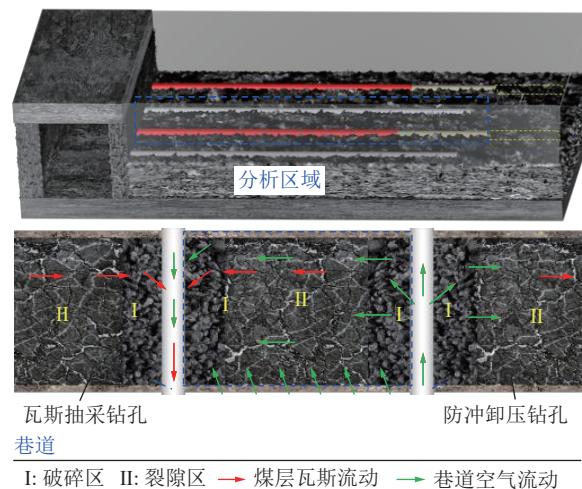


图 1 顺层双防钻孔密封段结构及气体流动示意
Fig.1 Structure and gas flow around sealing section of double-prevention bedding boreholes

由图 1 可以看出,受应力扰动的影响,顺层双防钻孔密封段煤体形成局部的“环状”损伤破坏区,不同破坏区域内煤体破碎程度不同,且气体在不同破碎程度的介质中表现出不同的流动形态。密封段煤体中的气体流动过程会经历多种不同结构的介质,可将其流动过程分为 2 部分:① 在孔隙压力下,瓦斯在不饱和与饱和煤体的界面上解析,并在浓度梯度的作用下扩散到煤体的孔隙中,最终进入钻孔,这一过程符合菲克定律。② 在抽采负压作用下,巷道空气进入煤体的过程基本符合 Darcy 定律。

根据双防钻孔间气体运移流动特征,在图 1 中取孔间分析区域对煤体结构进行简化,以分析钻孔密封段煤体的渗透特征,如图 2 所示。

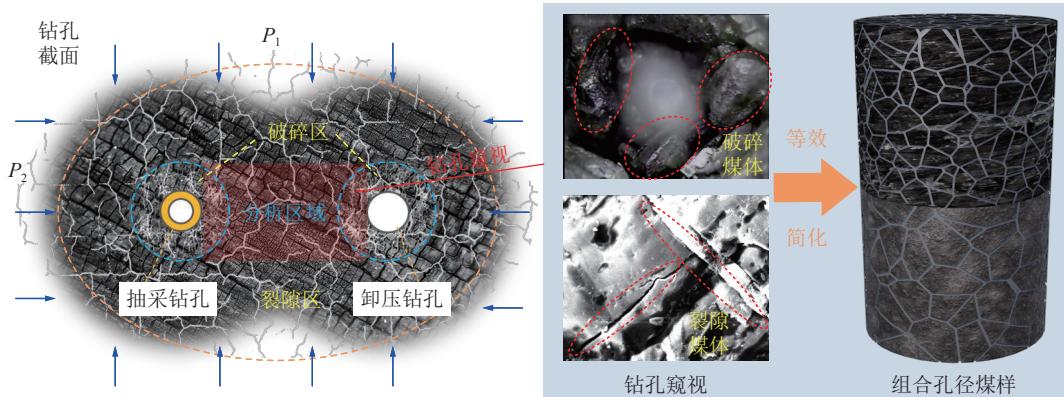


图2 双防钻孔破坏分区内地质结构等效过程

Fig.2 Equivalent process of coal structure in failure zone of double-prevention boreholes

图2为钻孔孔周“环状”区域的截面、钻孔窥视以及破碎结构等效示意。较强的应力扰动导致钻孔周围破碎区的煤体破碎程度较高,表现出的碎胀、压实等力学性质与完整煤体存在明显差异,可将其等效为破碎单元^[31]。同时,裂隙区内煤体的原生裂隙逐渐扩展延伸,并伴随产生次生裂隙,最终形成复杂裂隙网络^[32]。

根据上述试验设计以及煤层内气体流动理论^[33],钻孔周围破碎区(I)和裂隙区(II)是巷道空气流入钻孔的主要优势通道。因此,根据模拟理论和等效原则,制作不同级配的破碎煤样以模拟孔周破碎区煤体和裂隙区煤体^[34]。

1.2 试样制备

试验所用煤样均取自陕西某煤矿1012102工作面,该矿井2号煤层原始瓦斯含量为 $2.71\sim5.44\text{ m}^3/\text{t}$,矿井最大相对瓦斯涌出量为 $4.67\text{ m}^3/\text{min}$,最大绝对瓦斯涌出量为 $39.05\text{ m}^3/\text{min}$,1012102工作面的绝对瓦斯涌出量为 $33.75\text{ m}^3/\text{min}$ (远大于 $5\text{ m}^3/\text{min}$),为典型的高瓦斯矿井。1012102工作面采用顺层平行钻孔,孔径为113 mm,孔口段扩孔至153 mm,扩孔长度为18 m,封孔长度为16 m,现场钻孔设计布置如图3a所示。根据地质因素、开采技术条件因素影响的冲击危险综合指数,综合评定1012102工作面回采期间冲击危险性综合指数为0.43,具有弱冲击危险性。1012102工作面回采期间设计局部防冲,在巷道两帮煤壁每隔3 m施工卸压钻孔,孔深25 m,钻孔孔径不小于150 mm,如图3b所示。最终,工作面布置的瓦斯抽采钻孔和防冲卸压钻孔,在巷道煤壁形成双防钻孔结构,如图3c所示。

采用破碎机对现场块煤进行破碎,并采用振动筛选机对破碎后煤颗粒进行筛分。根据试验要求,由于所制煤样为标准样,其直径D为50 mm,高度h

为100 mm。因此,筛选的破碎煤颗粒最大颗粒直径d与试样直径D的比值应小于1/5,即试验筛选的最大颗粒粒径不应超过10.0 mm。选取4种不同粒径制备破碎煤体试样,粒径分别为 $0\sim<2.5$ 、 $2.5\sim<5.0$ 、 $5.0\sim<7.5$ 、 $7.5\sim10.0$ mm。根据密封段裂隙煤体渗

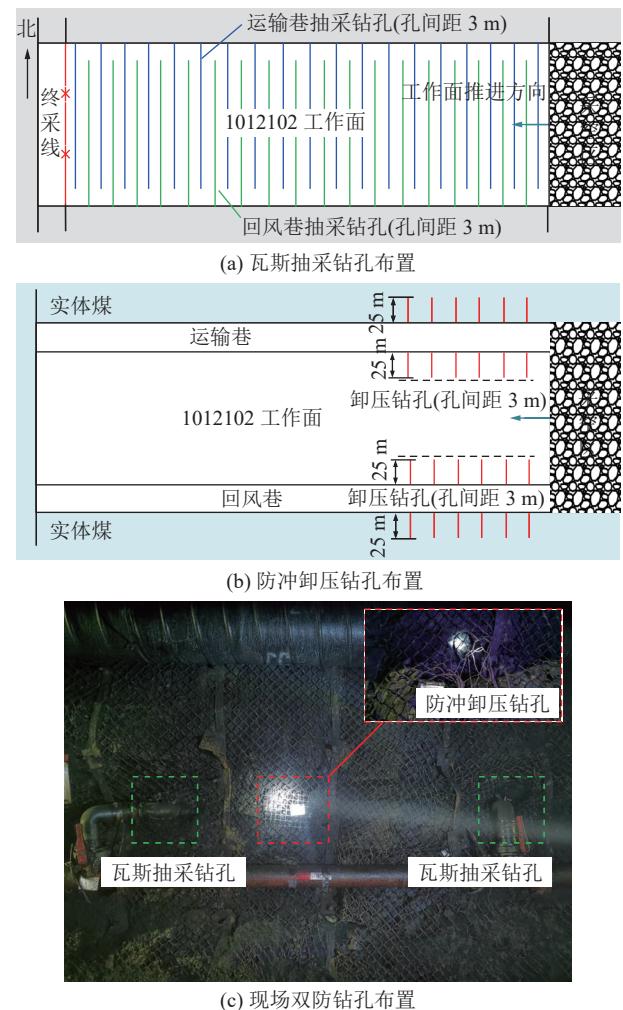


图3 1012102工作面双防钻孔布置

Fig.3 Schematic diagram of double-prevention boreholes layout in 1012102 working face

透试验设计和 Talbol 连续级配理论^[35], 对不同粒径的煤颗粒进行配比, Talbol 幂指数 n 选取 0.1、0.3、0.5、0.7。考虑到破碎煤样的分形特征, 试验将上述 4 种不同粒径的煤颗粒混合制样, 其质量分布服从 Talbol 连续级配公式, 如式(1)所示:

$$P_i = \frac{M_d}{M_t} = \left(\frac{d_i}{D} \right)^n \times 100\% \quad (1)$$

式中: P_i 为粒径不大于 d_i 的碎煤颗粒质量分数, %; M_d 为粒径不大于 d_i 的碎煤颗粒的质量, kg; M_t 为试样总质量, kg; d_i 为碎煤颗粒粒径, mm。

通过计算, 可得各 Talbol 幂指数下各粒径区间

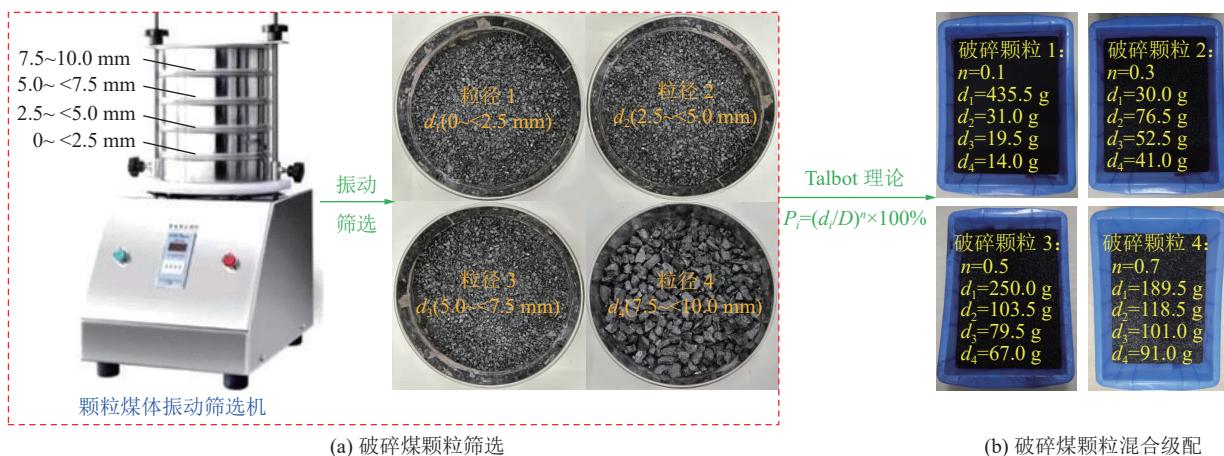


图 4 不同级配颗粒准备过程

Fig.4 Equivalent process of coal structure in failure zone of double-prevention boreholes

在破碎煤颗粒筛选完成后, 将各级配下煤颗粒单独加水搅拌均匀并填充进高度为 100 mm、直径为 50 mm 的标准圆柱形钢模具中。之后, 在 YAW-300B 压力机上将所有试样夯实成型。为避免制样过程中水对试验结果准确性的影响, 将所制试样放入恒温恒湿箱中烘干。双重孔径试样的制备严格遵循与单一孔径试样相同的筛选、搅拌、填充、夯实及烘干流程, 其核心区别在于填充阶段采用分层策略: 依次将 2 种不同孔径(粒径)的破碎煤颗粒与水混合, 并按预设顺序(如下层为较小孔径颗粒, 上层为较大

破碎煤颗粒质量, 见表 1。不同级配颗粒的准备过程如图 4 所示。

表 1 各粒径区间破碎煤颗粒质量

Table 1 Mass ratio of broken coal particles in each size range

粒径区间/mm	不同Talbot下的颗粒质量/g			
	0.1	0.3	0.5	0.7
[0,2.5)	435.5	330.0	250.0	189.5
[2.5,5.0)	31.0	76.5	103.5	118.5
[5.0,7.5)	19.5	52.5	79.5	101.0
[7.5,10.0]	14.0	41.0	67.0	91.0



(b) 破碎煤颗粒混合级配

孔径颗粒, 或反之)填充至同一标准圆柱形钢模具($\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$)中, 经整体夯实成型并烘干后, 刻意在 2 种粒径颗粒接触面处形成孔隙结构显著差异的突变交界面, 以模拟煤体中破碎区与裂隙区的组合结构及其界面过渡特征。

最终, 试验共制取 10 组试样, 并按 Talbol 级数以 M_1 、 M_3 、 M_5 、 M_7 命名单一孔径试样, 用于模拟破碎区或裂隙区单一区域煤体; 以 M_{1-3} 、 M_{1-5} 、 M_{1-7} 、 M_{3-5} 、 M_{3-7} 、 M_{5-7} 命名双重孔径试样, 用于模拟破碎区和裂隙区组合煤体。试样的具体制作过程如图 5 所示。



图 5 试样制作过程

Fig.5 Production process of specimens

1.3 试验系统

采用实验室自主研发的 LFTD1812-3 型煤体三轴渗透试验平台,开展双防钻孔密封段煤体气体渗

流特性测试试验。试验平台主要包括轴压加载系统、围压控制系统、渗透压控制系统、渗透缸筒和数据采集系统。具体布置方式如图 6 所示。

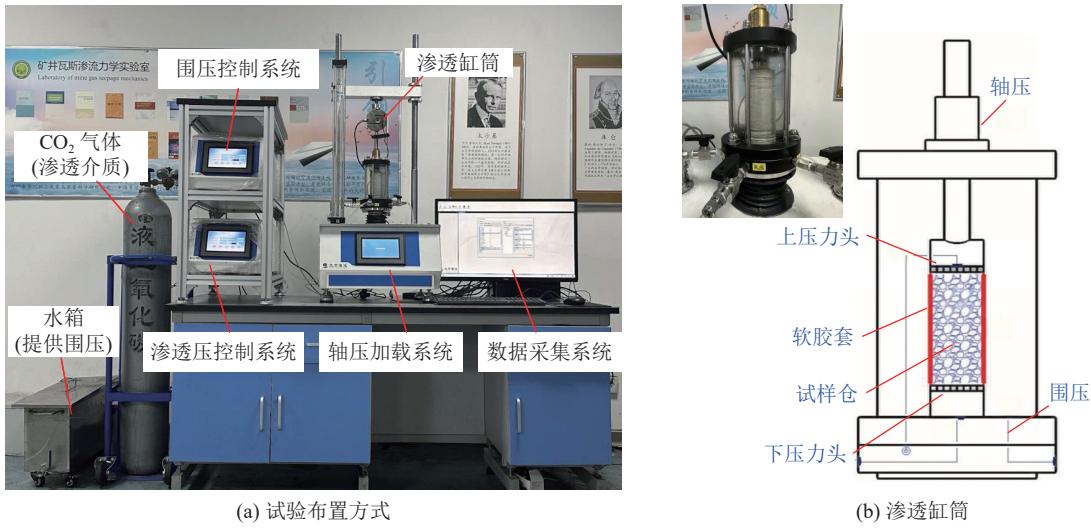


Fig.6 Triaxial permeability test platform for coal body

轴向压力由上压力头提供,可提供最大加载力为 30 kN, 轴向加载力精度为 0.3%。渗透压和围压分别通过二氧化碳 (CO_2) 高压气瓶和水箱提供, 并各自通过一台独立的加压泵进行控制, 渗透压和围压的压力量程为 2 MPa, 压力精度为 0.3%。最终, 所有数据可通过数据采集系统记录并读取。

需要说明的是, 试验选取 CO_2 气体代替空气作为渗透介质。同时, 为避免渗透试验过程中煤样对 CO_2 气体产生的吸附解吸现象影响试验结果, 在试验开始之前通过真空泵对煤样进行不小于 2 h 的脱气, 之后通入规定压力的气体, 维持气体压力不小于 24 h, 保证气体充分进入煤样内部^[36]。

在室温 25 °C 下, CO_2 气体密度 $\rho=1.816 \text{ kg/m}^3$, 动力黏度 $\mu=1.47 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。在不干涉体积改变过程中, 不同气体介质在具有自由表面的同一空间内流动时, 其特性差异较小。定量分析 CO_2 气体渗透系数 k 与空气渗透系数 k_n 的关系, 如式(2)所示:

$$k_n = k \frac{\mu \rho_n}{\mu_n \rho} \quad (2)$$

式中: ρ 为 CO_2 气体密度, kg/m^3 ; μ 为 CO_2 气体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ_n 为空气密度, kg/m^3 ; μ_n 为空气动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在室温 25 °C 时, 空气的密度 $\rho_n=1.29 \text{ kg/m}^3$, 动力黏度 $\mu_n=1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。可计算得出 $k_n=0.58k$, 空气的渗透系数和 CO_2 气体渗透系数处于一个数量级。因此, 采用 CO_2 作为渗透介质开展渗透试验, 其

结果可转化为空气在破碎煤体中的渗透特性。

2 试验原理及方法

2.1 试验步骤

根据双防钻孔密封段裂隙煤体渗透试验设计, 考虑煤样粒径配比对渗透率的影响, 采用稳态渗透法开展煤体渗透试验。具体的测试步骤如图 7 所示。

在试验过程中, 设定单一孔径试样和双重孔径试样所受轴向加载力为 0.5、1.0、1.5、2.0 kN, 恒定围压为 0.2 MPa; 根据煤矿瓦斯抽采负压, 为分析巷道空气进入煤体的渗透规律, 在每个轴压加载力下, 设定渗透压为 10、15、20、25 kPa。整个渗透试验在围压、轴压和渗透压同时加载下进行, 由 LFTD1812-3 型试验机自动完成该过程并记录数据。待试验结束后卸载压力, 计算得到渗流速度、压力梯度和渗透率等特征参数。

还需特别注意以下 3 点: ① 为确保试验过程中对试样施加的渗透压均匀, 在缸筒上下放置 2 块透水板; ② 为防止试验过程中煤样小颗粒流失, 还需在试样和透水板之间放置 2 片毛毡; ③ 在每次试验开始之前, 采用泡沫检测法对试验系统的气密性进行检测, 以保证试验结果的准确性。

2.2 试验原理

双防钻孔密封段煤体的实质是多孔介质, 在瓦斯抽采过程中, 影响巷道空气渗流程度的主要因素

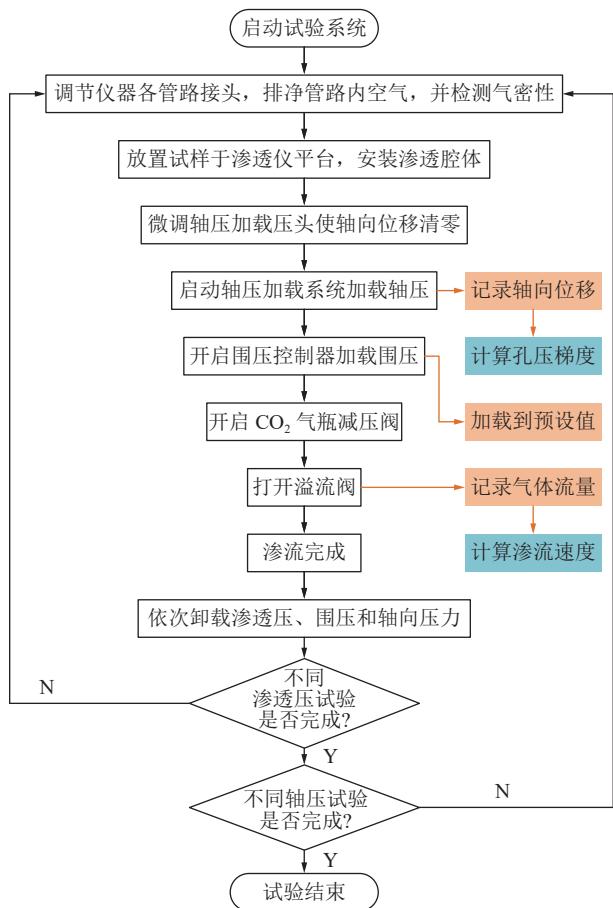


图7 试验流程

Fig.7 Flow chart of test

包括煤体孔隙率、渗透率以及抽采负压^[37]。其中,孔隙率是瓦斯抽采过程中煤体裂隙结构的具体表征参数,直接影响巷道空气的漏气程度;渗透率是决定瓦斯抽采过程中气体在裂隙结构中流动能力的重要指标;巷道空气在抽采负压的作用下,进入密封段煤体裂隙,并在压力差的驱动下,由煤体向抽采钻孔内运移,因此,压力梯度是影响煤体中气体流动能力的重要参数。

1) 密封段煤体的孔隙率。在分析密封段煤体渗透特性时,孔隙率变化规律至关重要。根据定义,破碎煤颗粒的孔隙率 φ 表征其内部孔隙体积所占比例^[38]。其中,初始孔隙率 φ_0 指渗透试验前,渗透仪内填充标准圆柱试样中破碎煤颗粒的孔隙率。首先,根据破碎煤颗粒的质量 M 和颗粒密度 ρ_0 计算出破碎煤颗粒的初始体积 V_0 ,即 $V_0=M/\rho_0$ 。再将破碎煤颗粒制成圆柱形标准试样后装入渗透缸筒内,测试试样在缸筒内的初始高度 h_0 和初始直径 D_0 ,进而计算出试样的初始体积 V_0' ,如式(3)所示:

$$V_0' = \pi r^2 h_0 = \frac{\pi D_0^2 h_0}{4} \quad (3)$$

式中: r 为渗透缸筒半径,即试样半径,mm。

根据初始孔隙率 φ_0 计算公式,可得:

$$\varphi_0 = \frac{V_0' - V_0}{V_0'} \quad (4)$$

在稳态渗透法中,渗透试验开展过程中,保持轴向位移 Δh 不变的情况下,逐步实现多级渗透压力的渗透试验。在每一级轴向压力下,试样的孔隙率 φ 的计算如式(5)所示:

$$\varphi = 1 - \frac{4M}{\rho \pi D^2 (h_0 - \Delta h)} \quad (5)$$

式中: Δh 为试验过程中实时轴向位移,m。

2) 渗流速度。在上述试验中,各级渗透压下 CO_2 气体渗流速度 v 可通过单位时间内流过破碎煤体的平均体积流量 Q 计算,如式(6)所示:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (6)$$

式中: S 为破碎煤样的渗流截面积, m^2 。

3) 压力梯度。根据土力学理论,流经煤体的流体会对煤体颗粒和煤体骨架施加渗透作用力^[39]。对于双防钻孔孔周破碎煤体的渗流试验,气体压力梯度是以渗透力的形式作用于煤体,并为整个渗流过程提供了动力。根据破碎煤体试样两端的气体渗透压力,可计算得出试验的压力梯度,如式(7)所示:

$$G_p = -\frac{p_1 - p_2}{h_0 - \Delta h} \quad (7)$$

式中: p_1 为流入煤体时的渗透压力,MPa; p_2 为流出煤体时的渗透压力,MPa,根据试验条件,渗流出口端压力为标准大气压。

传统的Darcy定律^[40]认为,在多孔介质的渗流运动中,渗流速度与压力梯度呈线性关系,即在研究孔周破碎煤体组成的渗透试验系统中,在考虑整个渗透速度范围内,压力梯度会随流体平均速度的增加而增加。当气体在钻孔孔周裂隙区煤体运移过程中,由于裂隙区煤体孔隙率较小,一般流速较小,渗流阻力主要为黏滞阻力。因此,压力梯度与流速满足线性Darcy定律,如式(8)所示:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} v_D \quad (8)$$

式中: p 为渗透压力,MPa; x 为试样高度,m; k 为渗透系数, m^2 ; v_D 为Darcy渗流状态下的流速,m/s。

在双防钻孔孔周破碎煤体渗透试验中,所制破碎煤体试样属于小孔隙率煤颗粒和大孔隙率煤颗粒组合试样。在应用Darcy定律时,还需考虑2个问题:①气体滑移现象是由低平均流动压力引起的,这种现象被称为Klinkenberg效应^[41];②渗流阻力是由

黏滞阻力和惯性阻力交替引起的。

基于此, FORCHHEIMER^[42] 提出了著名的 Forchheimer 方程, 描述了考虑惯性效应的流体流动。压力梯度与气体渗流速度的关系如式(9)所示:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K} v + \rho \beta v^2 \quad (9)$$

式中: v 为渗流速度, m/s ; β 为孔周破碎煤体试样的非 Darcy 流因子, m^{-1} 。

4) 有效应力。WALSH^[43] 研究表明, 煤岩孔隙渗透率随围岩应力的增加而降低。这种现象是由于压缩条件下孔径减小导致的流通面积减小, 同时增加了煤体颗粒表面的接触点数量, 导致流通路径更加曲折。相反, 由于孔隙压力使得孔径张开, 减小 2 个煤体颗粒之间的接触面积, 则渗透率随孔隙压力增加而增加。ROBIN^[44] 定义了 1 个单一变量表示孔隙渗透率, 即渗透率遵循有效应力规律, 如式(10)所示:

$$k(\sigma, p) = k(\sigma_e) \quad (10)$$

式中: $k(\sigma, p)$ 为破碎煤体渗透率与应力 σ 和孔隙压力 p 之间函数关系; $k(\sigma_e)$ 为有效应力相关渗透率。

有效应力是描述多孔介质力学性能的最基本参数, 可以准确反映渗流过程中的受力情况^[27]。其概念最早由 TERZAGHI^[45] 提出, 并给出一维压实有效应力方程, 即总应力与孔隙压力之差, 用于描述土体的强度和变形行为, 如式(11)所示:

$$\sigma_e = \sigma - P_p \quad (11)$$

式中: σ 为作用在整个多孔介质上的应力, 称为总应力, MPa ; σ_e 为作用在固体颗粒上的应力, 称为有效应力, MPa ; P_p 为流体在孔隙空间中的压力, 称为孔隙压力, MPa 。

在上述方程的基础上, BERNABE^[46] 对渗透率的有效应力规律开展试验研究, 发现渗透率不一定是多孔介质中 Terzaghi 的有效应力函数。由式(11)可知, 在应力 σ 和孔隙压力 P_p 保持有效应力 σ_e 不变的情况下, 渗透率 k 不变。这表明控制渗透率变化的有效应力表达式可以通过等渗透率曲线得到, 则渗透率的变化可用微分形式定义, 如式(12)所示:

$$\begin{aligned} dk &= \frac{\partial k}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial k}{\partial p} dp \\ &= \frac{\partial k}{\partial \sigma} \left[d\sigma - \left(-\frac{\partial k / \partial p}{\partial k / \partial \sigma} \right) dp \right] \\ &= \frac{\partial k}{\partial \sigma} d\sigma_e \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $d\sigma_e = d\sigma - \lambda dp$; λ 为煤体的侧压系数。

结合式(10)、式(11), HANDIN 等^[47] 对式(12)进行了修正, 认为上述方程忽略了层间多孔介质结构。通过对式(12)进行积分, 并引入修正因子, 得到改进的有效应力表达式, 如式(13)所示:

$$\sigma_e = \alpha \sigma + (1 - \alpha) P_p \quad (13)$$

式中: α 为有效应力系数。

式(13)被认为是多孔介质中最常用的有效应力表达式。在破碎煤体有效应力研究过程中, 从煤体骨架压缩率和结构压缩率 2 个角度分析, 有效应力系数 α 的表达式为

$$\alpha = 1 - C_s / C_v \quad (14)$$

式中: C_s 为骨架压缩率, %; C_v 为容积压缩率, %。

在 Terzaghi 的定义中, 若 α 非常小, 则 $1 - \alpha$ 近似于 1, 即应力对孔隙压力和有效应力的贡献相反。根据式(13)、式(14), 考虑破碎煤体试样在压实过程中, 煤体颗粒之间发生相互滑动和变形导致的孔隙率的改变, BRINK 等^[48] 引入孔隙率的概念, 从孔隙结构角度分析孔隙介质对各应力的力学响应, 如图 8 所示, 并给出有效应力的具体表达式, 如式(15)所示:

$$\sigma_e = (1 - \varphi) \sigma + \varphi P_p \quad (15)$$

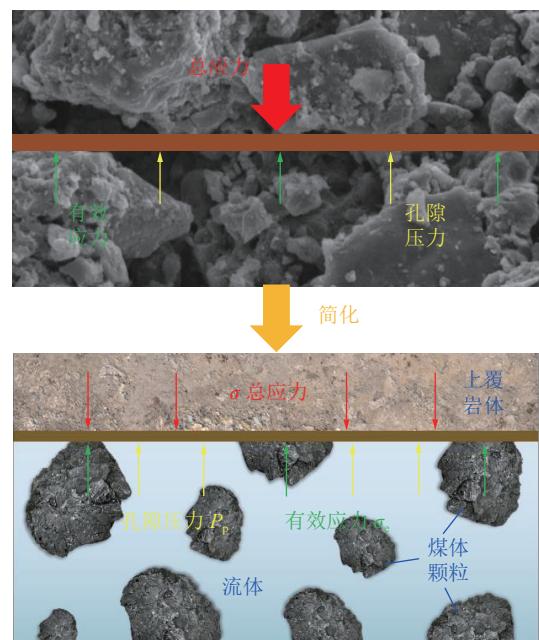


图 8 气体渗流过程中各应力示意

Fig.8 Schematic diagram of each stress during gas seepage

3 试验结果分析

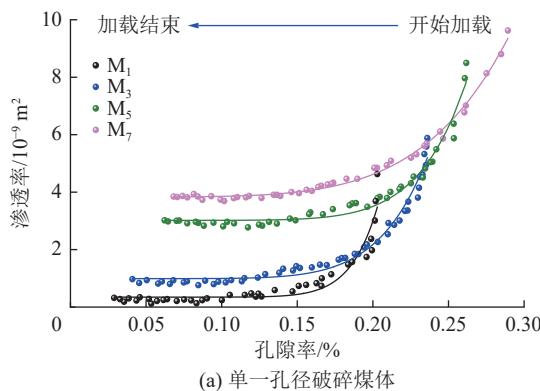
3.1 不同孔隙结构煤体渗透率演化特征

为定量分析煤体的渗透率, KOZENY^[49] 和 CARMAN^[50] 对 Darcy 定律进行改进, 提出了描述渗透率与孔隙率之间关系的 Kozeny-Carman 方程 (简

称KC方程),如式(16)所示:

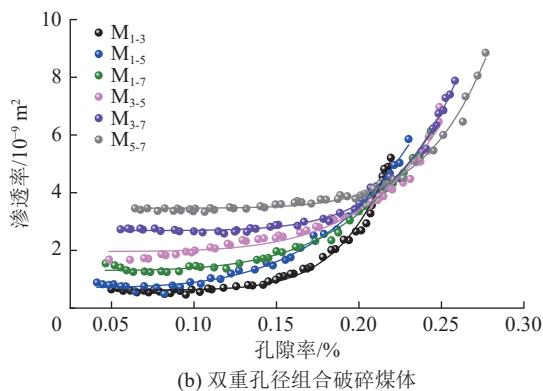
$$k = k_0 \frac{\varphi^3}{1-\varphi^2} \frac{1-\varphi_0^2}{\varphi_0^3} \quad (16)$$

式中: k_0 为破碎煤体试样的初始渗透率, m^2 ; φ_0 为破碎煤体试样的初始孔隙率,%; φ 为破碎煤体试样在渗透过程中的孔隙率,%。



(a) 单一孔径破碎煤体

一般情况下,在破碎煤体试样加载后,多孔介质的骨架结构发生变形,孔隙结构可能增大或呈现轻微增大的过程,这些现象与多孔介质内部颗粒的错位、破碎和位移密切相关,并取决于内部有效渗流通道的数量。根据孔周煤体渗透特征参数测试结果,绘制试样孔隙率 φ 与渗透率 k 的关系曲线,如图9所示。



(b) 双重孔径组合破碎煤体

图9 煤体孔隙率与渗透率之间关系

Fig.9 Relationship between porosity and permeability of coal body

由图9可以看出,在轴压作用下,具有不同初始孔隙率的试样($M_1 \sim M_{5-7}$),其孔隙率遵循相似的变化规律,即随着孔隙率逐渐减小,渗透率呈减小趋势。通过函数拟合可以看出,试样的孔隙率与渗透率之间满足幂函数关系,即

$$k = b\varphi^a + c \quad (17)$$

式中: a, b, c 分别为常数。

煤体的初始孔隙率越大,其渗透性越好。但随着孔隙率的减小,由曲线中压实后的部分可以看出,双重孔径组合煤体试样比单一孔径煤体试样的渗透率波动较大,这是因为单一孔径试样是由不同平均粒径的煤颗粒堆积而成,孔隙率几乎相同,在加载过程中孔径随载荷的增大均匀减小,流体与孔隙介质骨架的接触面积较为均匀。而对于双重孔径组合试样,气体流经粒径大小不同的煤颗粒,分层界面上孔径改变更明显,在加载过程中,不仅上、下2部分试样的孔隙结构发生变化,介质接触面积的突然改变也会影响到煤体渗透率。同时,上下颗粒粒径差越大,渗透率的波动也越大。

综合对比分析孔周煤体孔隙率-渗透率之间的关系可以得出,在应力作用下,破碎煤体试样内部骨架结构发生变形,孔隙结构可能出现不同程度的变化。在加载初始阶段,由于试样结构松散,孔隙率急剧下降,试样内部颗粒发生错动、破碎,渗流通道数量大幅减小,渗透率也急剧减小。随着加载载荷增

大,煤体结构相对紧实和压密,此时渗透率对孔隙率变化的敏感程度较低。在该过程中可能出现2种情况并存的情况:①随着试样的进一步压实,大粒径煤体的颗粒破碎严重,进一步充填孔隙结构,造成孔周煤体试样内部部分孔隙通道被封堵,渗透率降低;②试样内部的煤体颗粒结构、分布重新调整,从而产生新的渗透通道,但受高应力的影响,渗透通道仍比较小,渗透率较低。其本质原因是应力造成孔周煤体孔隙结构的变形,决定了其渗透性变化。由式(5)可得,在压实过程中,轴向位移的变化必然引起孔隙率的变化,从而引起渗透率的降低。随着加载应力的增加,已经致密的破碎煤体内部颗粒进一步发生破裂,形成新的孔隙结构。在高孔隙压力作用下,当煤体骨架极不稳定时,可能引起多孔介质内部大颗粒的运动,甚至一些小颗粒的磨碎,进而造成试样内部的孔隙通道关闭,渗透率降低。

3.2 不同压力梯度下气体渗流速度变化特征

试验过程中,压力梯度的变化可以最为直观反映气体流动过程中的能量损失情况。根据计算机控制系统记录的数据,绘制出单一孔径煤样和双重孔径组合煤样压力梯度 G_p 随渗流速度 v 变化关系曲线,如图10所示。

由图10a可知:①在孔周煤体渗透过程中,压力梯度随渗流速度的增加整体呈显著降低趋势。可以看出,当渗流速度较低时,压力梯度与渗流速度存在较好的线性关系,表现出明显的达西现象;随着渗流

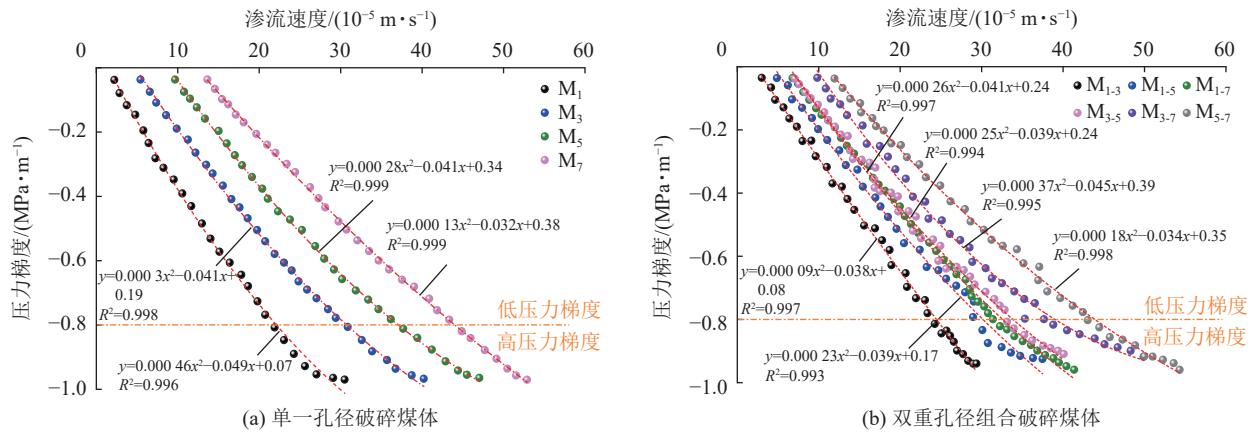


图 10 煤体渗流速度与压力梯度关系曲线

Fig.10 Relationship between seepage velocity and pressure gradient of coal body

速度增加, 渗流速度-压力梯度曲线逐渐偏离线性规律, 表现出非达西现象。对试验数据进行拟合, 可以看出渗流速度-压力梯度曲线满足 Forchheimer 公式, 即 $G_p = av^2 + bv + c$, 其中, a, b, c 均为常数。以 Talbol 幂指数 $n=0.3$ 为例, 当压力梯度 G_p 低于 0.8 MPa/m 时, 由破碎煤体颗粒堆积而成的多孔介质为线性层, 压力梯度随渗流速度线性增加; 当压力梯度高于 0.8 MPa/m 后, 孔压梯度的增加速率越来越慢, 渗流状态转变为非线性流动, 气体由层流状态转变紊流状态。这是因为在渗流过程中, 随着应力的增加, 煤体中小颗粒增加, 对破碎煤体颗粒间的孔隙被充填, 气体的渗流阻力增大, 导致气体的渗流特征不断偏离线性流动。②在渗流速度一定时, 随着 Talbol 幂指数的增加, 压力梯度不断减小。这是因为在 Talbol 幂指数较大的煤体内部, 存在更为广阔的气体渗透通道, 在相同渗流速度下, 所需的压力梯度较小。以渗流速度 $v=20 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 为例, 试样 M_1 所需压力梯度 $G_p=-0.73 \text{ MPa/m}$, M_3 所需压力梯度 $G_p=0.50 \text{ MPa/m}$, M_5 所需压力梯度 $G_p=0.37 \text{ MPa/m}$, M_7 所需压力梯度 $G_p=0.21 \text{ MPa/m}$ 。这是因为相同的气体流动速度下, Talbol 幂指数越小, 破碎煤体颗粒粒径越小, 气体流通路径越复杂, 渗流阻力越大。

由图 10b 可得, 双重孔径组合试样渗流速度随压力梯度变化与单一孔径试样的整体变化特征较为一致。当双重孔径组合破碎煤体试样的下部、上部煤体颗粒 Talbol 幂指数一致时 ($M_{1,3}$ 、 $M_{1,5}$ 和 $M_{1,7}$, $M_{3,5}$ 和 $M_{3,7}$, $M_{1,5}$ 和 $M_{3,5}$, $M_{1,7}$ 、 $M_{3,7}$ 和 $M_{5,7}$), 随着上部、下部煤体颗粒 Talbol 幂指数的增加, 在低压力梯度下, 相同渗流速度的渗透过程中所需孔压梯度减小。在高压力梯度下, 对于煤体上、下部分 Talbol 幂指数相差较大的试样, 非线性层流波动较大。这是因为在煤体渗透过程中, 双重孔径组合煤体上、下 2

层之间的孔隙结构存在较大的区别, 随着煤体渗透通道的几何结构发生变化的程度越严重, 气体渗流的阻力越大, 非线性层流波动越大。

单一孔径煤体试样和双重孔径组合煤体试样压力梯度-渗流速度对比如图 11 所示。可以看出, 双重孔径组合煤样的压力梯度-渗流速度曲线位于 2 个单一孔径煤样之间。

以 M_5 、 M_7 组为例, 如图 11c 所示, 在低压力梯度下为线性层流区, 双重孔径组合煤样 $M_{5,7}$ 与单一孔径试样 M_5 、 M_7 之间差距较小。而在高压力梯度下, 试样进入非线性流动, 双重孔径组合煤样与单一孔径试样相差逐渐增大, 且出现组合孔径试样超过单一孔径试样 M_7 的现象, 该现象可以得出, 双重孔径组合煤样下部煤体颗粒的大小是决定煤体渗透性的主要因素。

综合图 10、图 11 可以看出: ①气体在双防钻孔孔周裂隙区和破碎区煤体中是分区流动的。由于孔周裂隙区和破碎区内煤体的孔隙结构不同, 造成煤体间渗透通道的大小不同, 在气体从裂隙区到破碎区迁移过程中产生的渗流阻力也不同。在加载初期, 其渗流状态稳定; 随着加载的持续进行, 流速的量变引起渗流状态发生质的改变, 从线性层流逐渐过渡到非线性紊流。②在孔周煤体裂隙区和破碎区的过渡面上, 由于煤体的孔隙结构发生突变, 在气体渗透过程中会产生更多的惯性阻力, 且随着气体流速的增大, 阻力增大, 压力梯度也随之增大。这是在线性层流区中, 气体沿着煤体颗粒表面爬流, 渗透通道结构的改变对阻力影响较小; 而随着流速的增加, 结构的改变会导致流速的重新分布, 进而产生更多的惯性阻力。

3.3 有效应力作用下气体渗流速度变化特征

通过计算渗透试验过程中有效应力, 建立有效

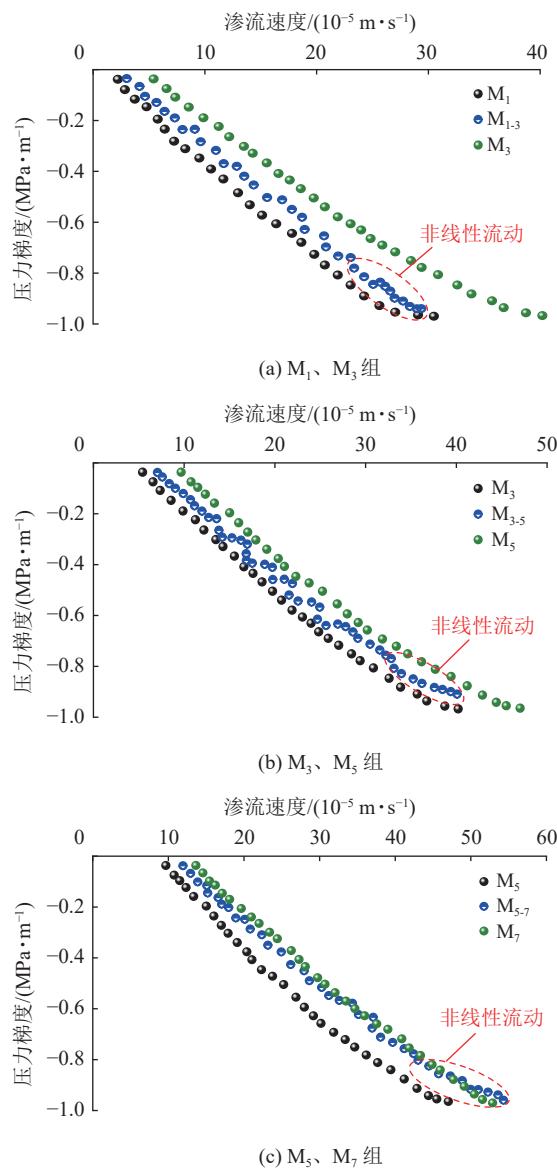


图 11 单一孔径和组合孔径煤体渗流速度与压力梯度对比
Fig.11 Comparison of seepage velocity and pressure gradient of coal body with single aperture and combined aperture

应力与渗流速度关系曲线,如图 12 所示。由图 12 可知,单一孔径和组合孔径煤体的渗流速度随有效应力的增加呈线性降低趋势。这是由于在有效应力增大的过程中,破碎煤颗粒之间滑动和颗粒本身可能发生破碎变形,骨架结构不断被压实变密,使得孔隙渗流通道发生闭合,进而导致气体的渗流速度减小。

进一步分析有效应力与渗流速度之间线性关系的原因,试验采用的渗透介质为 CO_2 气体,气体在低速流动过程中属于牛顿流体。当渗流稳定时,单一孔径煤体的渗透过程,可采用单个毛细管模型,如图 13a 所示,即假设渗透缸筒内破碎煤体的孔隙由 N 个长度为 H 、半径为 R 的毛细管组成。双重孔径组合煤体可等效视为 2 种不同长度、不同半径毛细

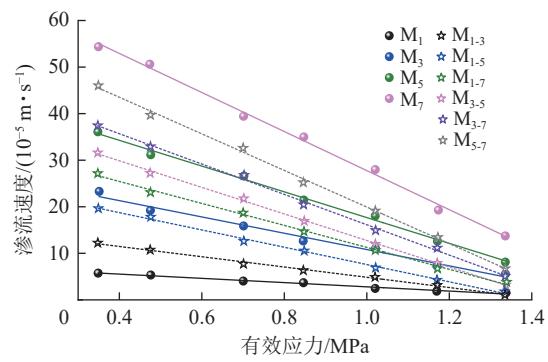


图 12 双重孔径组合破碎煤体试样
Fig.12 Injection water system of hydraulic extrusion measure
管组成,即孔喉突扩模型,如图 13b 所示。

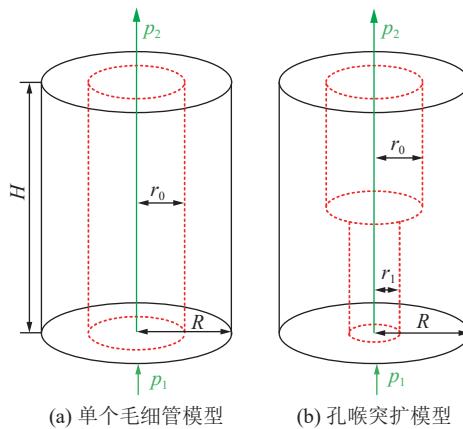


图 13 单一孔径煤体和双重孔径组合煤体渗透示意
Fig.13 Injection water system of hydraulic extrusion measure

在图 13b 中,取长度为 H ,半径为 r_0 的圆柱形小单元体,在双重孔径组合煤体中,假设大尺寸单元体半径为 r_0 ,小尺寸单元体半径为 r_1 ,且 $r_1=r_0/n$ 。当 $p_2=0$ 时,气体通过双重孔径组合的破碎煤体时,作用在圆柱形小单元体上的黏滞力 F_v 和气体驱动力 F_d 的计算如式(18)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_v = 2\pi \frac{H}{2} \tau r_0 + 2\pi \frac{H}{2} \tau r_1 = \pi H \tau (r_0 + r_1) \\ F_d = \pi(p_1 - p') r_1^2 + \pi(p' - p_2) r_0^2 = \\ \quad \pi p_1 r_1^2 + \pi p' (r_0^2 - r_1^2) \end{array} \right. \quad (18)$$

式中: τ 为渗透过程中煤体所受的切应力, MPa; p' 为 2 个不同孔径煤体交界面处的渗透压力, MPa。

当渗流状态稳定时,可得 $F_v=F_d$,即 $\pi H \tau (r_0 + r_1) = \pi p_1 r_1^2 + \pi p' (r_0^2 - r_1^2)$,联立牛顿内摩擦定律,可得:

$$\frac{r_0 p_1 + n^2 r_0 p' - r_0 p'}{n(n+1)H} = -\mu \frac{dv}{dr_0} \quad (19)$$

将式(19)积分可得:

$$v(r_0) = -\frac{(p_1 + n^2 p' - p') r_0^2}{2\mu n(n+1)H} + c \quad (20)$$

根据边界条件可知,当毛细管内小单元体半径与毛细管半径一致时,毛细管壁处的渗流速度为0,则 $c = [(p_1 + n^2 p' - p') r_0^2] / [2\mu n(n+1)H]$ 。

根据式(20),任一半径为 r_0 的小单元体中的气体流速分布为

$$v(r_0) = \frac{(p_1 + n^2 p' - p')(R^2 - r_0^2)}{2\mu n(n+1)H} \quad (21)$$

则毛细管内气体总流量为

$$Q = 2\pi \int_0^R v(r_0) r_0 dr_0 = \frac{\pi(p_1 + n^2 p' - p') R^4}{4\mu n(n+1)H} \quad (22)$$

则孔周破碎煤体的平均渗流速度为

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{(p_1 + n^2 p' - p') R^2}{4\mu n(n+1)H} \quad (23)$$

结合有效应力计算公式,可得:

$$V = -M\sigma_e + N \quad (24)$$

式中: M 、 N 为系数,在相同轴压和围压下, M 和 N 为定值。

由式(24)可以看出,孔周破碎的有效应力与渗流速度呈线性负相关,这与试验结果基本吻合。

3.4 有效应力对煤体渗透率演化的影响

在双防钻孔密封段煤体渗透过程中,有效应力对煤体渗透率具有抑制的作用。分析有效应力与煤体渗透率之间的关系,如图14所示。

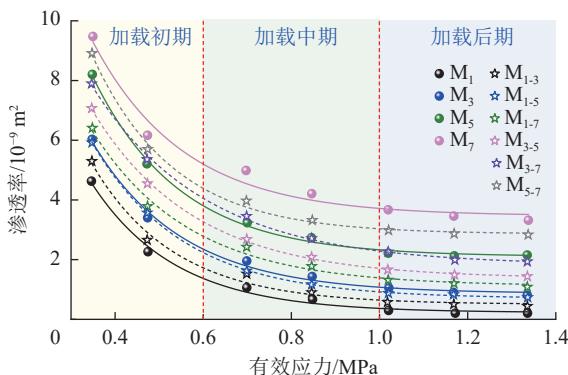


图 14 煤体有效应力与渗透率之间关系

Fig.14 Relationship between effective stress and permeability of coal body

由图14可得,有效应力是导致煤体渗透率变化的主要因素之一。在煤体渗透过程中,有效应力直接决定了破碎煤样的真实受力情况,能较好地反映煤样的力学特征,表征应力对煤体渗透率的抑制效应。在不同Talbot幂指数下,不同级配结构煤体渗透率随着有效应力的增加呈指数下降。通过函数拟合可得有效应力与渗透率存在明显的指数关系,具体的曲线拟合系数见表2。

表 2 有效应力与渗透率曲线拟合公式

Table 2 Effective stress and permeability curves fitting equations

试样	拟合公式	R^2
M_1	$k = 39.47e^{-5.42\sigma_e} + 2.86$	0.996
M_3	$k = 35.04e^{-5.26\sigma_e} + 2.10$	0.997
M_5	$k = 27.77e^{-5.04\sigma_e} + 0.86$	0.992
M_7	$k = 26.89e^{-4.88\sigma_e} + 0.23$	0.994
M_{1-3}	$k = 31.72e^{-4.84\sigma_e} + 3.46$	0.980
M_{1-5}	$k = 25.35e^{-4.32\sigma_e} + 1.37$	0.999
M_{1-7}	$k = 23.37e^{-3.91\sigma_e} + 1.82$	0.998
M_{3-5}	$k = 28.22e^{-4.85\sigma_e} + 0.70$	0.988
M_{3-7}	$k = 25.03e^{-4.51\sigma_e} + 1.11$	0.999
M_{5-7}	$k = 30.07e^{-5.33\sigma_e} + 0.50$	0.985

结合表2,进一步分析图14可知:①在有效应力保持恒定时,Talbol幂指数对煤体渗透率有较强的促进作用,煤体的渗透率随Talbol幂指数的增大而增大。但随着有效应力的增加,Talbol幂指数对煤体渗透率的影响逐渐减弱并趋于稳定。②随着有效应力增加,孔周煤体的渗透率显著降低。在加载初期,有效应力处于较低水平,破碎煤体试样内的孔隙体积较大,煤体的渗透率也较高。随着加载的进行,在加载中期,破碎煤体试样逐渐被压实,煤体骨架收缩变形,颗粒间的孔隙结构闭合,进而减小了气体渗流通道,降低了煤体渗透率。直至加载末期,煤体间孔隙和渗流通道被破碎颗粒填充,破碎煤体试样几乎被完全压实,试样的变形程度降低,导致煤体渗透率减小速率逐渐趋于0,渗透率逐渐稳定。

根据表2可知,煤体渗透率和有效应力满足式(25):

$$k = ae^{b\sigma_e} + c \quad (25)$$

其中,系数 a 决定了指数函数的曲线位置和大小;幂指数 b 决定了函数的曲线形状, b 为负值反映了煤体渗透率随有效应力的波动程度。绘制式(24)中孔周煤体渗透过程拟合系数 a 、 b 的变化关系,如图15所示。

由图15可知:①对于单一孔径结构煤样,随着Talbot幂指数的增大,系数 a 呈减小趋势,而幂指数 b 增加。这是因为在渗透试验过程中,随着有效应力的增加,孔隙结构较大的煤体内渗透通道的几何结构发生变化的程度越严重,气体流经煤体的渗透率波动越大,进而导致幂指数 b 增加。②对于双重孔径组合煤样,Talbot幂指数不是完全决定系数 a 和 b

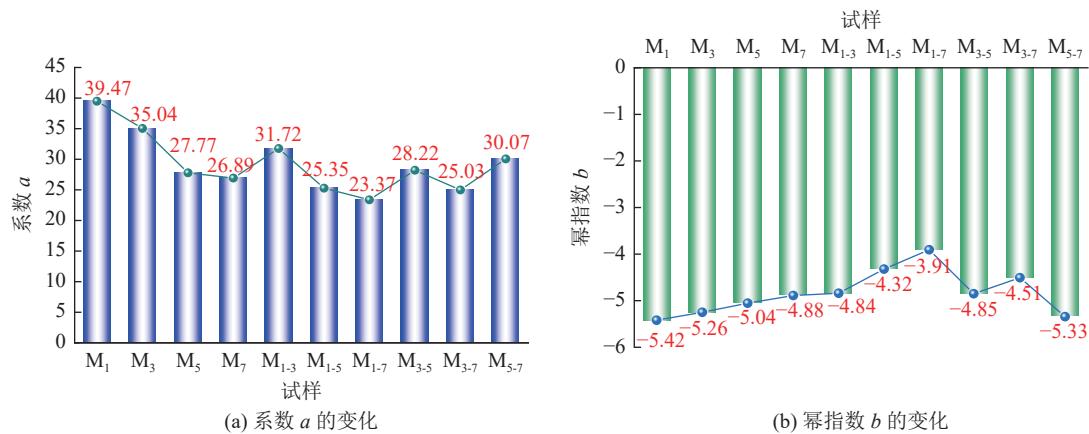


图 15 密封段煤体渗透过程中有效应力拟合系数的变化

Fig.15 Variation of effective stress fitting coefficient of coal body in sealing section during seepage

的关键因素。当下部煤体颗粒 Talbol 幂指数一致时 (M_{1-3} 、 M_{1-5} 和 M_{1-7} , M_{3-5} 和 M_{3-7}), 随着上部煤体颗粒 Talbol 幂指数的增加, 系数 a 和 b 的变化趋势与单一孔径煤样一致, 但变化速率较单一孔径的煤样较大。而上部煤体颗粒 Talbol 幂指数一致的煤样 (M_{1-5} 和 M_{3-5} , M_{1-7} 、 M_{3-7} 和 M_{5-7}), 随着下部煤体颗粒 Talbol 幂指数的增加, 系数 a 和 b 的变化趋势与单一孔径煤样相反。这是因为在煤体渗透过程中, 双重孔径组合煤样在介质结构变化的交界面上, 其孔隙结构存在较大的区别, 气体流经交界面会产生较大的非线性波动。以 M_{1-7} 、 M_{3-7} 和 M_{5-7} 煤样为例, 虽然下部煤体颗粒 Talbol 幂指数呈增加现象, 但上、下 2 层煤体交界面的差距越来越小, 气体流经交界面处的波动较小。综上可得, 在双防钻孔密封段煤体渗透过程中, 介质结构的变化对煤体渗透率的影响较大, 造成煤体渗透率随有效应力的波动较大。

基于 1012102 工作面密封段原注浆方案 (压力 2.0 MPa) 存在的漏气率较高等问题 (38%), 其核心问题在于破碎-裂隙交界区渗透率高达 $8.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 依据试验模型可以对现场注浆展开一系列优化。首先, 提升注浆压力。依据渗透率-有效应力定量模型 (式 (25)), 反演目标渗透率 $k \leq 5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 需将注浆压力增至 3.2 MPa(较原方案提升 60%), 通过增大有效应力压制孔隙突变界面。其次, 改良注浆材料。添加粒径小于 0.1 μm 的纳米 SiO_2 , 优先渗透填充粒径大于 10 μm 的大裂隙 (占破碎区孔隙 72%), 降低交界区流动通道连通性。最后, 保障封孔深度冗余。维持 16 m 封孔长度 (超卸压孔破碎区外延 0.96 m 的 16.7 倍), 确保完全覆盖主漏气路径。优化方案实施后成效显著, 交界区渗透率骤降至 $3.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (降幅 62%), 瓦斯体积分数由 22% 跃升至 41% (提升

86%), 月均漏气事故从 3.2 次减至 0.7 次 (降幅 78%)。该成果验证了试验模型对密封段渗流主控机制的解析, 为顺层双防钻孔参数和注浆参数的优化设计提供重要的理论指导。

4 结 论

1) 在应力作用下破碎煤体试样内部骨架结构发生变形, 孔隙结构出现不同程度的变化。在加载初始阶段, 由于试样结构松散, 孔隙率急剧下降, 试样内部颗粒发生错动、破碎, 渗流通道数量大量减小, 从而渗透率也急剧减小。随着载荷的持续增加, 煤体结构相对紧实和压密, 此时渗透率对孔隙率变化的敏感程度较低, 渗透率呈较低的稳定发展。

2) 在煤体渗透过程中, 压力梯度随渗流速度的增加整体呈显著降低趋势。在渗流速度较低时, 两者表现出明显的达西现象; 随着渗流速度增加, 渗流速度-压力梯度曲线逐渐偏离线性规律, 符合 Forchheimer 关系, 满足 $G_p = av^2 + bv + c$ 。

3) 气体在双防钻孔密封段裂隙区和破碎区煤体中分区流动。对于双重孔径组合煤体, 在线性层流区中, 气体沿着煤体颗粒表面爬流, 渗透通道结构的改变对阻力影响较小; 在密封段裂隙区和破碎区的过渡面上, 煤体的孔隙结构发生突变, 在气体渗透过程中流速重新分布, 会产生更多的惯性阻力, 非线性层流波动较大。

4) 根据孔喉突扩模型分析双防钻孔密封段煤体渗流速度与有效应力的关系, 与试验结果基本吻合。随着有效应力的增大, 破碎煤颗粒之间滑动和颗粒本身可能发生破碎变形, 骨架结构不断被压实变密, 使得孔隙渗流通道发生闭合, 气体的渗流速度呈线性减小。

5) 有效应力是导致煤体渗透率变化的关键因素。试样的渗透率 k 随着有效应力 σ_e 的增加而减小, 且符合指数关系 $k = ae^{b\sigma_e}$ 。在双重孔径组合煤样介质结构变化的界面上, 其孔隙结构存在较大的区别, 气体流经交界面上会产生较大的非线性波动, 煤体渗透率随有效应力的波动也较大。

参考文献(References):

- [1] 李伟, 邓东, 郭敬杰, 等. 基于应力松弛效应的黏弹性煤层地应力分布模型及在突出煤层中的应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1447–1462.
LI Wei, DENG Dong, GUO Jingjie, et al. In-situ stress distribution model in viscoelastic coal seams based on the stress relaxation effects and its application in outburst-prone coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1447–1462.
- [2] 齐庆新, 潘一山, 舒龙勇, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1801–1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, et al. Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801–1810.
- [3] 潘俊峰, 刘少虹, 马文涛, 等. 陕西煤矿冲击地压发生规律与分类防治[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 95–105.
PAN Junfeng, LIU Shaohong, MA Wentao, et al. Occurrence law and classification prevention of rock burst in coal mines of Shaanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 95–105.
- [4] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 105–112.
PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 105–112.
- [5] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716–725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716–725.
- [6] 沈建廷, 王飞, 黄鹤. 亭南煤矿工作面定向长钻孔“区域预抽+卸压防冲”可行性分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 184–190.
SHEN Jianting, WANG Fei, HUANG He. Feasibility analysis of “regional pre-pumping and pressure relief and anti-impact” of directional long borehole in Tingnan Coal Mine working face[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(11): 184–190.
- [7] LIU T, LIN B Q, FU X H, et al. Modeling air leakage around gas extraction boreholes in mining-disturbed coal seams[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 141: 202–214.
- [8] 马智会, 潘荣锟, 马智勇, 等. 顺层钻孔瓦斯抽采漏气规律及封孔技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 90–96.
MA Zhihui, PAN Rongkun, MA Zhiyong, et al. Study on gas leakage law and hole sealing technology of gas drainage in layered drilling[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 90–96.
- [9] 林海飞, 季鹏飞, 孔祥国, 等. 顺层钻孔预抽煤层瓦斯精准布孔模式及工程实践[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1220–1234.
LIN Haifei, JI Pengfei, KONG Xiangguo, et al. Precise borehole placement model and engineering practice for pre-draining coal seam gas by drilling along seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1220–1234.
- [10] LIU S B, LIN H F, LI S G, et al. Experimental study on the effect of unloading rate on the damage of coal with boreholes[J]. *Fuel*, 2024, 357: 129965.
- [11] 黄先伍, 唐平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1385–1388.
HUANG Xianwu, TANG Ping, MIAO Xiexing, et al. Testing study on seepage properties of broken sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1385–1388.
- [12] 孙明贵, 李天珍, 黄先伍, 等. 破碎岩石非 Darcy 流的渗透特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2003, 23(2): 11–13.
SUN Minggui, LI Tianzhen, HUANG Xianwu, et al. Penetrating properties of non-Darcy flow in fragmentized rocks[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2003, 23(2): 11–13.
- [13] CHAO J K, YU M G, CHU T X, et al. Evolution of broken coal permeability under the condition of stress, temperature, moisture content, and pore pressure[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8): 2803–2814.
- [14] 尚宏波, 靳德武, 张天军, 等. 三轴应力作用下破碎煤体渗透特性演化规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1066–1075.
SHANG Hongbo, JIN Dewu, ZHANG Tianjun, et al. Permeability evolution of broken coal under triaxial stress[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1066–1075.
- [15] 张天军, 孟锰凯, 庞明坤, 等. 有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 122–131.
ZHANG Tianjun, MENG Yukai, PANG Mingkun, et al. Effect of effective stress on permeability evolution of fractured coal around holes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 122–131.
- [16] PANG M K, ZHANG T J, JI X, et al. Measurement of the coefficient of seepage characteristics in pore-crushed coal bodies around gas extraction boreholes[J]. *Energy*, 2022, 254: 124276.
- [17] PANG M K, PAN H Y, JI B N, et al. Experimental investigation of flow regime transition characteristics of fractured coal bodies around gas extraction boreholes[J]. *Energy*, 2023, 270: 126758.
- [18] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋, 等. 煤体的渗透性与裂隙分维的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1452–1456.
HU Yaoqing, ZHAO Yangsheng, YANG Dong, et al. Relationship between permeability and fractal dimension of coal mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1452–1456.
- [19] 冯增朝. 低渗透煤层瓦斯强化抽采理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [20] 张磊, 阙梓豪, 薛俊华, 等. 循环加卸载作用下完整和裂隙煤体渗透性演变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2487–2499.

- ZHANG Lei, KAN Zihao, XUE Junhua, et al. Study on permeability law of intact and fractured coals under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2487–2499.
- [21] LIU Y B, ZHAO D, LI Y T, et al. Permeability evolution of intact and fractured coal during progressive deformation subjected to true triaxial stresses[J]. *Processes*, 2023, 11(10): 2826.
- [22] 岑培山,田坤云,魏二剑,等.多级加卸载下层理裂隙煤体瓦斯渗流轴向效应及应用[J].煤矿安全,2021,52(12):9–14.
- CEN Peishan, TIAN Kunyun, WEI Erjian, et al. Axial effect of gas seepage in bedding fractured coal under multistage loading and unloading and its application[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(12): 9–14.
- [23] MA D, DUAN H Y, LIU W T, et al. Water-sediment two-phase flow inrush hazard in rock fractures of overburden strata during coal mining[J]. *Mine Water and the Environment*, 2020, 39(2): 308–319.
- [24] 林海飞,龙航,李树刚,等.煤体瓦斯吸附解吸与压裂渗流全过程真三轴试验系统研发与应用[J].岩石力学与工程学报,2022,41(S2):3294–3305.
- LIN Haifei, LONG Hang, LI Shugang, et al. Development and application of true triaxial test system for the whole process of coal gas adsorption and desorption and fracturing seepage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3294–3305.
- [25] 龙航,林海飞,马东民,等.基于弹-塑性变形的含瓦斯煤体渗透率动态演化模型[J].煤炭学报,2024,49(9):3859–3871.
- LONG Hang, LIN Haifei, MA Dongmin, et al. Modeling of dynamic permeability evolution in CH₄-containing coal based on elastic-plastic deformation[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3859–3871.
- [26] HATAMBEIGI M, ANWAR I, LORD D L, et al. Wellbore cement fracture permeability as a function of confining stress and pore pressure[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 33: 100428.
- [27] 张磊,杨世华,武晋宇,等.有效应力下连续级配煤体的渗透特性试验[J].煤炭学报,2024,49(9):3872–3883.
- ZHANG Lei, YANG Shihua, WU Jinyu, et al. Permeability characterization tests of continuous graded coal bodies under effective stresses[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3872–3883.
- [28] 王伟,余金昊,方志明,等.基于体积应变的煤体渗透率模型及影响参数分析[J].煤炭学报,2024,49(6):2741–2756.
- WANG Wei, YU Jinhao, FANG Zhiming, et al. Analysis of coal permeability model and influencing parameters based on volume strain[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2741–2756.
- [29] 张村,刘晨熙,王永乐,等.有效应力恢复条件下水力压裂后煤层气分区渗流特征[J].天然气工业,2024,44(3):152–163.
- ZHANG Cun, LIU Chenxi, WANG Yongle, et al. CBM flow behaviors in fracture zones induced by hydraulic fracturing under effective stress recovery conditions[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 152–163.
- [30] 张天军,武晋宇,庞明坤,等.抽采钻孔孔周煤体渗流阻力分布特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):645–654.
- ZHANG Tianjun, WU Jinyu, PANG Mingkun, et al. Distribution of coal seepage resistance around extraction boreholes: An experimental study[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 645–654.
- [31] 李树刚,王瑞哲,林海飞,等.超声波功率对煤体孔隙结构损伤及渗流特性影响实验研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(2):396–404.
- LI Shugang, WANG Ruizhe, LIN Haifei, et al. Experimental study on the influence of ultrasonic power on coal pore structure damage and seepage characteristics[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 396–404.
- [32] 张天军,庞明坤,彭文清,等.不同产状裂隙煤样三轴承压下非Darcy 渗流特性[J].煤炭学报,2019,44(1):246–253.
- ZHANG Tianjun, PANG Mingkun, PENG Wenqing, et al. Non-Darcy percolation characteristics of cracked coal samples with different occurrences under three-bearing compression[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 246–253.
- [33] 周世宁.瓦斯在煤层中流动的机理[J].煤炭学报,1990,15(1):15–24.
- ZHOU Shining. Mechanism of gas flow in coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 15–24.
- [34] ZHANG T J, WU J Y, PANG M K, et al. Experimental study on the negative pressure loss generated by the gas influx process around a long borehole[J]. *Energy*, 2024, 296: 131082.
- [35] ZHANG J X, LIU Y W, REN P L, et al. A fully multifield coupling model of gas extraction and air leakage for in-seam borehole[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 1293–1305.
- [36] 祝捷,王琪,唐俊,等.加卸载条件下煤样应变与渗透性的演化特征[J].煤炭学报,2021,46(4):1203–1210.
- ZHU Jie, WANG Qi, TANG Jun, et al. Evolution characteristics of strain and permeability of coal samples under loading and unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1203–1210.
- [37] 肖鹏,吴铭川,双海清,等.煤系正断层带影响下的煤层瓦斯赋存规律[J].煤田地质与勘探,2022,50(10):16–25.
- XIAO Peng, WU Mingchuan, SHUANG Haiqing, et al. Occurrence law of coal seam gas under influence of normal fault zone in coal measures[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 16–25.
- [38] 张天军,刘楠,庞明坤,等.级配破碎煤岩体压实过程中再破碎特征研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):380–387.
- ZHANG Tianjun, LIU Nan, PANG Mingkun, et al. Re-crushing characteristics in the compaction process of graded crushed coal rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 380–387.
- [39] 张超林,王恩元,许江,等.煤层瓦斯压力对瓦斯抽采效果的影响[J].采矿与安全工程学报,2022,39(3):634–642.
- ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, XU Jiang, et al. The influence of gas pressure on drainage effect in coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 634–642.

- [40] 宋鑫, 舒龙勇, 王斌, 等. 低瓦斯赋存高强度开采煤层驱替促抽技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 847–856.
SONG Xin, SHU Longyong, WANG Bin, et al. Replacement and pumping technology for coal seams with low gas content and high intensity mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 847–856.
- [41] SHELL D D C, KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. "Proceedings of OilGasScientificResearchProjects" Institute, SOCAR, 2012(2): 57-73.
- [42] FORCHHEIMER, P. Wasserbewegung durch Boden[J]. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1901, 45(50): 1782–1788.
- [43] WALSH J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5): 429–435.
- [44] ROBIN P Y F. Note on effective pressure[J]. Journal of Geophysical Research, 1973, 78(14): 2434–2437.
- [45] TERZAGHI K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear[C]/First international conference on soil Mechanics, 1936.
- [46] BERNABE Y. The effective pressure law for permeability in Chelmsford granite and Barre granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1986, 23(3): 267–275.
- [47] HANDIN J, HAGER J R V, FRIEDMAN M, et al. Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: Pore pressure tests[J]. AAPG Bulletin, 1963, 47(5): 717–755.
- [48] BRINK G, HEYMANN G. Soil collapse from an effective stress perspective[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2014, 56(3): 30–33.
- [49] KOZENY J. Das wasser im boden. Grundwasserbewegung[M]/Hydraulik: Ihre Grundlagen und praktische Anwendung. Vienna: Springer Vienna, 1953: 380–445.
- [50] CARMAN P C. Permeability of saturated sands, soils and clays[J]. The Journal of Agricultural Science, 1939, 29(2): 262–273.