

文章编号: 1673-3363-(2014)04-0564-05

# 采场覆岩裂隙演化分区与渗透性研究

许兴亮, 张农, 田素川

(中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 通过分析开采条件下工作面前方支承压力分布规律和煤体卸压破坏全过程的采动力学行为, 采用实验室实验研究了工作面前方承载应力环境下岩体渗透性的变化; 揭示了采动影响下采场空间裂隙发育与演化规律, 提出工作面前方裂隙发育区形成的主要原因是强度破坏, 并分为原岩裂隙区、应力集中裂隙孕育区、卸压剪切裂隙发育区, 渗透性较强的区域为卸压剪切裂隙发育区, 与塑性区近似重合。

**关键词** 采动岩体; 裂隙演化; 渗透性

**中图分类号** TD 353

**文献标志码** A

## Division of mining-induced fracture and permeability of overlying strata

XU Xingliang, ZHANG Nong, TIAN Suchuan

(School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** With the analysis of front abutment pressure distribution and mining-induced mechanical behavior of surrounding rock under the condition of relief failure, rock permeability changes in the front bearing stress environment are studied in the method of laboratory testing. Fracture development and evolution law of overlying strata under mining condition is revealed. The paper points out that the main cause of fracture development in front of the work face is strength failure, and the zone is divided into three parts: the original rock fissure zone, the stress concentration and fracture inoculation zone, the pressure relief and shear fracture development zone. The zone which has a better permeability accords with the plastic zone.

**Key words** mining-induced overlying strata; evolution of fracture; permeability

工作面采场空间的裂隙场既是煤层卸压瓦斯运移通道又是瓦斯涌出后的聚积空间, 瓦斯涌出量的大小和渗透性的强弱与采场煤岩体裂隙形态变化和分布情况密切相关。采动引起岩层剧烈移动, 并在工作面周边形成支承压力, 工作面围岩裂隙发育和渗透性的变化, 显著受制于采场支承压力分布规律。围绕工作面支承压力的分布情况, 很多学者

采用了理论回归分析<sup>[1]</sup>、数值模拟<sup>[2-6]</sup>、微震监测<sup>[7]</sup>、原位实测<sup>[8-9]</sup>等多种手段与方法进行了广泛的研究, 获得了大量有关支承压力峰值点位置和大小研究结论, 并将支承压力大小直接作为评价煤岩体稳定性指标判据。对于采场支承压力引起的围岩裂隙发育, 以及由此带来的渗透性的变化, 相关研究成果较少。本文依据现场实测与数值模拟得出的支

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201200); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNA11)

作者简介: 许兴亮(1976—), 山东省宁阳县人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事煤矿巷道围岩控制方面的研究。

E-mail: xusmf@163.com

Tel: 13913476100

承压力分布规律, 构建工作面前方煤岩体应力环境, 采用实验室试块实验, 研究支承压力与煤岩体破坏之间的关系, 以及由此带来的采场裂隙分布与渗透性变化特征。这将对于指导我国煤与瓦斯安全共采实践起到重要作用。

## 1 工作面前方煤岩体承载特征

为了分析支承压力与工作面前方煤岩体破坏之间的关系, 以淮南矿业集团朱集矿 1111(1)工作面为研究对象, 采用  $FLAC^{3D}$  对采场空间不同高度层位的支承压力和水平应力进行了数值模拟, 并采用原位实测数据进行了验证。首先建立了三维数值模型, 分别在煤顶板 0, 5, 15, 25 m 不同高度层位布置监测线, 监测支承压力和水平应力变化规律。其结果表明: 工作面前方煤岩体中, 支承压力存在明显的分区特征, 依次为原岩应力区、应力升高区(最高应力集中系数达到 2, 此处标高-878 m, 若原岩应力的垂直分量大小按  $\gamma H$  计算, 为 24.1 MPa)、应力降低区。支承压力峰值随着层位的升高逐渐降低, 应力集中系数逐渐减小; 水平应力没有显著升高现象, 仅仅是小幅升高, 在支承压力峰值点的后方至工作面附近水平应力逐渐降低至 0 MPa(见图 1)。水平应力在支承压力峰值点后的减小, 导致侧压系数迅速降低, 具有明显的卸压效果, 主应力差急剧增大, 从而诱导岩体剪切破坏与裂隙发育。对于松软煤岩体, 大量研究表明<sup>[10-11]</sup>, 煤岩体破裂首先发生在应力差大的区域, 破裂区总是与高应力差相重合, 并与高应力集中区域相接近。

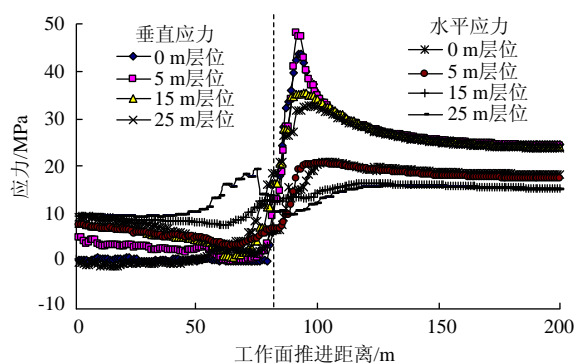


图1 工作面前方煤岩体承载变化情况

Fig.1 Stress curves of coal in the front of working face

为了验证数值模拟结果的合理性, 在朱集矿 1111(1)工作面的轨道平巷开展了原位实测研究, 在其回采侧帮部与非回采侧帮部, 分别布置了深度依次为 6, 8, 18, 以及 6, 9, 12, 15 m 共 7 个钻孔

应力计测点, 测试结果见图 2, 3。

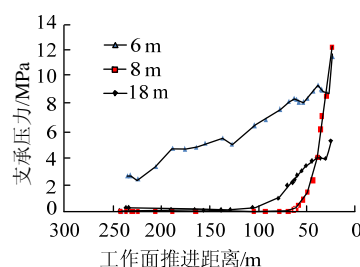


图2 轨道平巷回采帮支承压力与工作面推进关系

Fig.2 Curves of abutment pressure about track crossheading's in mining side

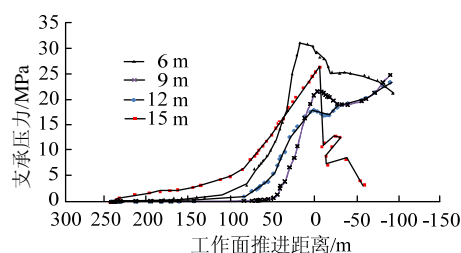


图3 轨道平巷非回采侧支承压力与工作面推进关系

Fig.3 Curves of abutment pressure about track crossheading's in persisting side

可以看出: 轨道平巷回采帮支承压力基本在工作面推进至 70 m 左右时显著产生并迅速增大, 但由于工作面推进, 破坏了安设的钻孔应力计, 没有完整测出支承压力的峰值; 对于非回采帮侧, 随着工作面不断推进, 在工作面推至距该测点 16.39 m 处时, 支承压力达到峰值(31.63 MPa), 之后逐渐降低(由于模拟条件限制, 数值差别较大), 其支承压力的分布规律与数值模拟的结果基本一致。需要指出的是, 由于松软破碎岩体传递载荷的性能较差, 部分应力计读数并不能非常准确地表示支承压力的实际大小, 只能反映出它的变化趋势。

## 2 煤岩体采动损伤过程与渗透性响应实验

借鉴文献[12]的研究方法, 对工作面前方煤岩体构建如图 4 所示的应力环境状态, 即工作面前方煤岩体依次经历了从原岩应力条件下的准静水压力状态, 到轴向应力升高围压升高至峰值应力(应力集中承载状态), 而后伴随煤体的破坏和水平约束的弱化, 进入围压降低岩体卸载破坏的峰后状态。前方煤岩体主要是承载后超出强度极限发生破坏, 其渗透性变化规律可以通过试块承载实验展开研究。依据工作面前方煤体所承载的应力环境条件, 选择了工作面顶板泥岩作为岩样, 在实验室开展了与应力环境相对应承载条件下的渗透性实验

研究。实验中的轴向压力模拟支承压力，而围压变化模拟水平应力，即通过升高轴向应力的同时降低围压的方式来模拟工作面煤壁前方垂直应力升高和水平应力卸载的变化。分别模拟，原岩应力(22.93 MPa，围压 8 MPa)，应力集中(2 倍原岩应力 45.92 MPa，围压 8 MPa)，峰值后残余强度阶段(1.5 倍原岩应力 32.30 MPa，卸围压至 5 MPa)，峰值后残余强度阶段(1.5 倍原岩应力 35.35 MPa，卸围压至 2 MPa)等 4 个典型的承载条件下渗透性变化。由于实验条件限制，施加的围压最高仅能达到 8 MPa，孔隙水压为 3.0 MPa，起始渗透压差为 1.0 MPa。通过实验得到的结果见表 1。

表 1 试块不同承载状态的渗透率变化  
Table 1 Permeability changing under different stress stapes

编号	尺寸/mm		承载状态	应力参数/ MPa	围压/ MPa	孔隙水压/ MPa	渗透压差/ MPa	峰值强度/ MPa	渗透率/ × 10 <sup>-6</sup> μm <sup>2</sup>
	直径 D	高度 H							
TY17	49.89	98.43	原岩应力阶段(高围压)	22.93	8	3	1	84.21	0.056 340
TY12	49.43	101.1	应力集中阶段(高围压)	43.78	8	3	1	86.03	0.079 356
TY11	50.12	94.36	峰后残余强度阶段(卸围压)	35.35	5	3	1	83.50	1.538 000
TY14	49.13	98.41	峰后残余强度阶段(卸围压)	32.30	2	3	1	80.90	2.113 065

由表 1 可看出：原岩应力阶段和应力集中阶段的渗透性较弱且随载荷的变化不明显；岩样受载至峰后阶段同时降低围压时，试块渗透性急剧升高。可见在峰值前应力集中对裂隙的作用主要表现压效应，渗透性随应力的变化并不明显；当在支承压力峰值点后降低水平应力时，由于侧压系数降低，主应力差急剧增大，从而诱导岩体剪切破坏和裂隙发育，渗透性显著升高。根据实验中各试块不同应力状态下渗透变化可以得到图 4 所示的渗透曲线。

由于岩石(煤)是一种脆性材料，在一般低侧向约束条件与应力状态下，以拉剪破坏为主<sup>[13-15]</sup>。当水平应力降低，侧向约束减弱，相当于卸围压时，岩体倾向于剪切破坏，即产生所谓的“卸压剪切破坏”。从数值模拟结果的塑性区分布(见图 5)中也可以看出，塑性区边缘首先发生剪切破坏，从而产生卸压剪切裂隙，增大了岩体的渗透性。可见该处岩体渗透性变化是由岩体载荷条件达到剪切破坏强度决定的，可认为渗透性较大的区域，近似于岩层弧形包络线(与岩层移动影响角不完全一样)所包括塑性破坏区，因此可通过分析煤岩体破坏形成的塑性区形态揭示工作面前方煤岩体破坏规律与渗透性规律。

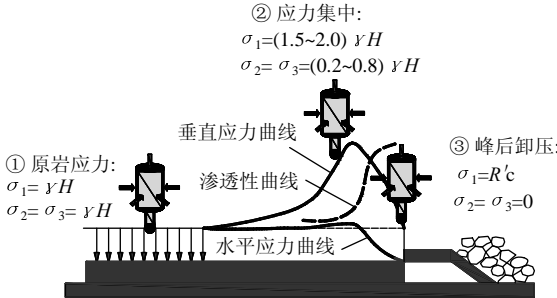


图 4 工作面前方煤岩体应力状态与渗透性变化  
Fig.4 Stress state and permeability of coal in the front of working face

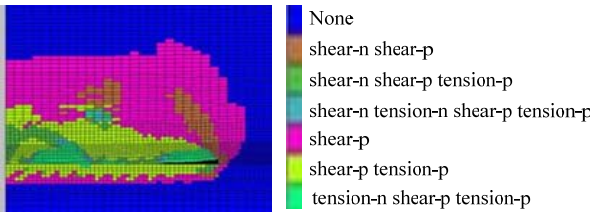


图 5 采场围岩塑性区分布图  
Fig.5 Distribution diagram of plastic zone in surrounding rock

3 超前支撑压力影响区煤岩体裂隙发育的实测研究

为研究采动覆岩不同区域岩体的裂隙发育与分布特征，在桃园煤矿 1001 回采工作面施工了长度分别为 143，151 m 的钻孔，进行远距离穿层钻孔裂隙窥视观测，跟踪记录钻孔内岩层裂隙发育情况。钻孔空间位置如图 6 所示。

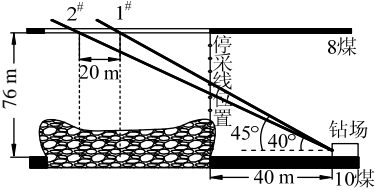


图 6 钻孔布置示意图  
Fig.6 Schematic drawing of drillhole location

以1<sup>#</sup>钻孔为例,在钻孔深度0~6 m范围,岩体破碎,为巷道围岩的松动圈;钻孔深度6~50 m范围内,裂隙由发育较少、围岩完整性好,逐渐转变为裂隙密集分布,但仍处于压实闭合状态,为应力集中带来的裂隙闭合区;钻孔深度50~86 m范围,裂隙由闭合状态逐渐转入剪切、张拉状态,裂隙数量持续增加,裂隙宽度(张开量)急剧增加,相互贯通,完整岩体与裂隙间隔出现,标志着钻孔已进入卸压裂隙发育区,见图7。

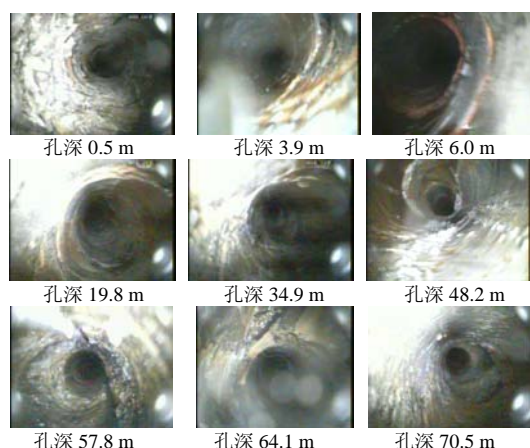


图7 0~80 m范围钻孔裂隙发育情况

Fig.7 The fracture development of borehole in the range of 0~80 m

## 4 结 论

依据承受载荷与裂隙发育情况,可将工作面前方覆岩空间分为原岩裂隙区、应力集中裂隙孕育区、卸压剪切裂隙发育区(图8)。

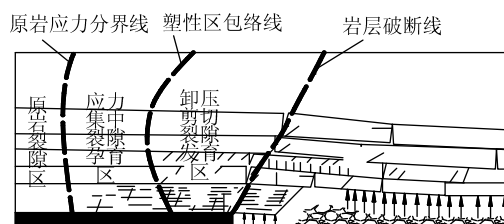


图8 采场覆岩空间裂隙分区

Fig.8 The division of fracture in overlying strata

其中卸压剪切裂隙发育区的渗透性较强,形成的主要原因是岩体卸压剪切破坏,分布区域近似为岩层塑性破坏的弧形包络线所包括的区域。可以通过分析煤岩体破坏形成的塑性区形态揭示工作面前方煤岩体破坏规律与渗透性规律。

## 参考文献:

[1] 张春, 题正义, 李宗翔. 综放支承压力峰值位置的理

论及回归分析[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 88-93.

ZHANG Chun, TI Zhengyi, LI Zongxiang. Theoretical and regressive analysis of the position of peak stress on fully mechanized caving mining[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(9): 88-93.

[2] 浦海, 缪协兴. 综放采场覆岩冒落与围岩支承压力动态分布规律的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1122-1126.

PU Hai, MIAO Xiexing. Numerical simulation of dynamic falling of overlying rocks and abutment pressure in surrounding rocks for fully-mechanized top-coal caving stope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1122-1126.

[3] 赵同彬, 张洪海, 陈云娟, 等. 支承压力分布演化规律及对煤岩体破坏的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29(3): 420-423.

ZHAO Tongbin, ZHANG Honghai, CHEN Yunjuan, et al. Evolution of abutment pressure distribution and impaction coal-rock damage[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2010, 29(3): 420-423.

[4] 司荣军, 王春秋, 谭云亮. 采场支承压力分布规律的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 351-354.

SI Rongjun, WANG Chunqiu, TAN Yunliang. Numerical simulation of abutment pressure distribution laws of working faces[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 351-354.

[5] 唐军华, 白海波, 杜锋. 采场支承压力分区变异特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 293-297.

TANG Junhua, BAI Haibo, DU Feng. Character of the zonal variation of abutment pressure in working faces[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 293-297.

[6] 刘金海, 姜福兴, 冯涛. C型采场支承压力分布特征的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 4011-4015.

LIU Jinhai, JIANG Fuxing, FENG Tao. Numerical simulation of abutment pressure distribution of C-shaped stope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 4011-4015.

[7] 夏永学, 蓝航, 毛德兵, 等. 基于微震监测的超前支承压力分布特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 868-873.

XIA Yongxue, LAN Hang, MAO Debing, et al. Study of the lead abutment pressure distribution base on micro-seismic monitoring[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 868-873.

[8] 陈轶平. 综采工作面超前支护支承压力观测与分析[J]. 山西大同大学学报, 2009, 25(3): 63-65.

CHEN Yiping. Observation and research of bearing stress of advance support of fully mechanized coal mining

- face[J]. Journal of Shanxi Datong University, 2009, 25(3): 63-65.
- [9] 张玉军, 张华兴, 陈佩佩. 覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1216-1219.
- ZHANG Yujun, ZHANG Huaxing, CHEN Peipei. Visual exploration of fissure field of overburden and rock[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11): 1216-1219.
- [10] 钱岳红, 王德荣, 李杰, 等. 掌子面前支撑压力带岩层变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3058-3064.
- QIAN Yuehong, WANG Derong, LI Jie, et al. Study of mechanism of rock mass deformation and failure ahead of working face on supporting zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3058-3064.
- [11] 冯国瑞, 闫永敢, 杨双锁, 等. 长壁开采上覆岩层损伤范围及上行开采的层间距分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1032-1036.
- FENG Guorui, YAN Yonggan, YANG Shuangshuo, et al. Analysis on the damage zone of overlying strata and safety layer distance on the upward mining above the longwall goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1032-1036.
- [12] 谢和平, 周宏伟, 刘建峰, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067-1074.
- XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.
- [13] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 448-455.
- WANG Mingyang, ZHOU Zeping, QIAN Qihu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 448-455.
- [14] 郑宏, 葛修润, 李焯芬. 脆塑性岩体分析原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 8-21.
- ZHENG Hong, GE Xiurun, LEE C F. Analysis principle for rock mass with brittle plasticity and its applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(1): 8-21.
- [15] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136-142.
- YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136-142.

(上接第 563 页)

- YI Maosen, ZHU Weibing, LI Lin, et al. Water-inrush mechanism and prevention for fourth panel roof in Bulianta coalmine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 241-245.
- [15] 李文平, 叶贵钧, 张莱, 等. 陕北榆神府矿区保水采煤工程地质条件研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 449-454.
- LI Wenping, YE Guijun, ZHANG Lai, et al. Study on the engineering geological conditions of protected water resources during coal mining action in Yushenfu mine area in the North Shaanxi province[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 449-454.
- [16] 师本强. 陕北浅埋煤层砂土基型矿区保水开采方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 548-552.
- SHI Benqiang. Research on water-preserved-mining in shallow seam covered with rock soil and sand in Northern Shaanxi[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 548-552.
- [17] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 1-10.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. On scientized mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 1-10.
- [18] 范立民, 蒋泽泉, 许开仓. 榆神矿区强松散含水层下采煤隔水岩组特性的研究[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(4): 25-30.
- FAN Limin, JIANG Zequan, XU Kaicang. Study of coal mining under competent loose aquifer and properties of aquifuge in Yushen mining area[J]. China Coal Geology, 2003, 15(4): 25-30.
- [19] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(8): 67-74.
- YANG Zeyuan, WANG Wenke, HUANG Jinting, et al. Study of buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the northern Shaanxi province[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2006, 34(8): 67-74.
- [20] 常金源, 李文平, 李涛, 等. 神南矿区煤炭开采水资源漏失量评价分区[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 41-45.
- CHANG Jinyuan, LI Wenping, LI Tao, et al. Zonation of water resources leakage due to coal mining in Shennan mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 41-45.