

DOI: 10.11779/CJGE201903013

# 逆断层附近非均匀应力场声发射测试与巷道稳定性数值分析

彭 瑞<sup>1</sup>, 欧阳振华<sup>1</sup>, 孟祥瑞<sup>2</sup>, 赵光明<sup>2</sup>, 赵启峰<sup>1</sup>, 石建军<sup>1</sup>, 冯吉成<sup>1</sup>

(1. 华北科技学院安全工程学院, 北京 101601; 2. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 由于断层带附近应力集中和围岩破碎严重给巷道断面布设和维护带来巨大安全隐患, 需及时掌握断层附近地应力分布和围岩破裂形式及其对周边巷道稳定性影响。选取淮南某矿逆断层上、下盘进行试验, 利用 MTS 试验系统配合声发射测试初始地应力场和岩石破裂方式, 经 ANSYS 对比分析不同应力条件下逆断层附近巷道稳定性。经岩石力学试验发现, 砂岩破坏后尺度较小、AE 事件数较多, 泥岩破坏后尺度较大、AE 事件数较少。由地应力实测可知, 逆断层附近以构造应力为主, 上盘岩层挤压使得下盘总体受力偏大。开挖后巷道周边次生应力在一定范围内出现了应力跌落区, 跌落区范围和围岩裂隙发育范围接近。同时, 伴随着应力跌落的范围扩大、初始应力减小, 岩层开始移动剧烈和围岩破裂范围扩大。由围岩塑性分布和岩层移动可知, 调整后主应力有助于提高巷道稳定性。以上研究结果, 以期复杂埋藏环境下矿山巷道的布设和支护问题, 提供一定的施工技术依据。

**关键词:** 逆断层; 巷道; 声发射; 地应力; 数值模拟

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)03-0509-10

**作者简介:** 彭 瑞(1989-), 男, 讲师, 博士, 主要从事地下空间工程方面的教学和科研工作。E-mail: rockpeng@ncist.edu.cn。

## Acoustic emission testing of nonuniform stress in strata near reverse faults and numerical analysis of stability of roadways

PENG Rui<sup>1</sup>, OUYANG Zhen-hua<sup>1</sup>, MENG Xiang-rui<sup>2</sup>, ZHAO Guang-ming<sup>2</sup>, ZHAO Qi-feng<sup>1</sup>, SHI Jian-jun<sup>1</sup>, FENG Ji-cheng<sup>1</sup>

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science & Technology, Beijing 101601, China; 2. Department of Energy and Security, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The concentrated stress and fractured rock around the fault zone, have great potential safety hazards for the section layout of a roadway and its maintenance, so the distribution of in-situ stress and the failure mode of the surrounding rock near the fault and their influences on the roadway stability should be necessarily grasped. The upper and lower plates of the reverse fault in Huainan Coal Mine are chosen for tests. The in-situ stress fields and rock failure modes are tested by the MTS experimental system and acoustic emission. The stability of roadway near the fault under different in-situ stresses is analyzed by ANSYS. After rock mechanics experiment, it is found that the scale of fractured sandstone is smaller and its AE events number is more, while the size of fractured mudstone is larger and its AE events number is less. According to the measured results of ground stress, it is found that the in-situ stress near the fault is dominated by the tectonic stress. The overall force of the lower plate is large due to the upper plate extrusion. After roadway excavation, the stress drop zone of the secondary stress appears in a certain range around the roadway, and the scope of drop zone is close to the range of fractured surrounding rock. At the same time, with the expanding range of stress drop zone and decrease of the initial stress, the moving of rock strata and expanding of fracture range of the surrounding rock are violent. According to the plastic distribution of the surrounding rock and the movement of rock strata, the adjusted principal stress can improve the stability of roadway. The above research results may provide technical basis for the layout and support of mine roadways in the same complicated burial environment.

**Key words:** reverse fault; roadway; acoustic emission; in-situ stress; numerical simulation

## 0 引 言

地应力是指地层中没受到工程干扰的三维应力, 一般指的是地压。文献[1~3]指出地压是导致地下工

基金项目: 国家自然科学基金项目(51804119, 51804118, 51674119, 51774012); 中央高校基本科研业务费项目(3142017087); 华北科技学院引进人才科研启动基金 A 类(3142017087); 河北省自然科学基金项目(E2016508003)

收稿日期: 2017-08-23

程变形和破坏的主要因素,因此掌握地压分布特征对地下安全性施工具有重要意义。同时,地应力研究<sup>[4-5]</sup>是实现巷道轴向选择、断面形状、支撑设计的必要前提。而目前地下工程中断层带和岩体弱面等结构的存在,增加了地应力测试的难度,也限制了其工程应用。

关于地应力测试的诸多影响因素研究及其在各行业中应用情况,代表性成果有:①文献[6~9]在非均匀应力场中,分析了构造应力对巷道稳定性影响;②文献[10,11]通过试验方法结合理论计算获得某区域地应力场,并利用FLAC<sup>3D</sup>模拟该地应力场下巷道稳定性;③文献[12,13]认为断层扰动下的区域地应力空间分布状态,是岩体地下结构稳定性分析、资源开采中岩爆的预测乃至地震的预报与定量评价的关键环节。

长期以来,国内外学者们开发了许多地应力测试方法,能够快速、准确地获得地应力。例如,文献[14~16]开发了钻孔应力释放获得地应力,文献[17~20]通过水压致裂法测试地应力。然而,这些测量技术是在复杂的现场进行,且每次仅获得有限的测量结果,而且偏差经常出现,影响了测量精度,在一定程度上限制了地应力量测的推广使用。近年来,为了提高获得数据的可靠性,地应力测试已经进行了室内试验,应用了岩石声发射 Kaiser 效应,即根据岩石具有记忆原始应力状态的能力,测算三维坐标系下地应力分布。国外学者在文献[21~24]中,较早基于试验结果进行单轴压缩试验以获得 Kaiser 效应点。同时,国内一些学者也做了大量工作,如文献[10,25,26]中通过声发射测试试验,分析不同地质条件下地应力分布特征。

总之,目前关于断层附近的复杂地应力分布特征及其对周边巷道影响分析鲜有报道。本文以逆断层附近的地压大、围岩破碎严重,会给采区系统、巷道稳定以及井下施工造成一定影响为工程背景,展开如下研究:逆断层附近岩体进行地应力测试和力学试验,在此基础上进行巷道稳定性数值分析,即基于井下岩芯水平标定和室内岩样二次定角度,获得逆断层上、下盘标定空间坐标的岩样,利用 MTS 配合声发射,分析逆断层附近岩体力学性质,测试其地应力分布特征,开发软件计算主应力场,对比分析在原主应力和调整主应力下巷道稳定性的差异。

## 1 工程地质背景及定向取芯试验

### 1.1 工程地质背景

西三 C 组工作面紧邻逆断层,其上限标高为-700 m,下限标高为-750 m,方位角 WWS255°~270°,平均厚度 3.6 m,倾角 9°,采区构造复杂,大中型断层发育,且多为逆断层;地应力测试点选择在西三 C 组煤中部采区的矸石胶带机上山中,位于逆断层上、

下盘附近;在断层上盘布置两个取芯点 I-1 和 I-2,胶带机轴向为  $x$  轴方位角 WWS250°,  $y$  轴方位角 NNW340°;下盘布置取芯点 II-1 和 II-2,胶带机轴向为  $x$  轴方位 EES92°,  $y$  轴方位 SSW182°;同时, I、II 取芯点距逆断层面为 30 m,如图 1(a)所示。

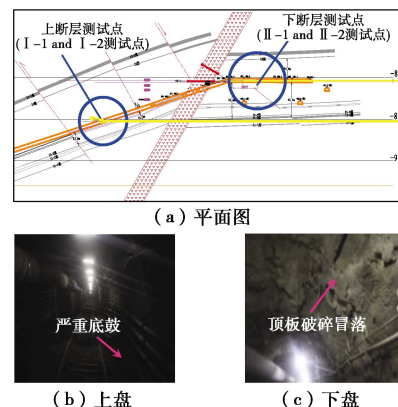


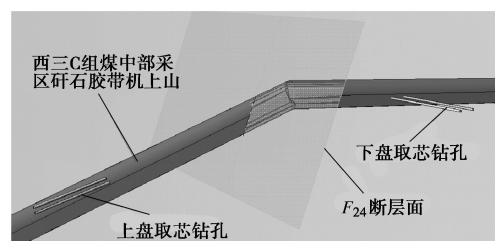
图 1 断层附近取芯点

Fig. 1 Locations of sampling points near fault

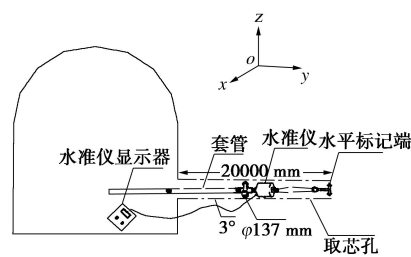
断层上、下盘分别以砂质泥岩、泥岩为主,强度较低,为后续取芯带来不便。由图 1(b)可知,上盘巷道底角严重挤压变形,产生底鼓,导致行人不易通过;由图 1(c)可知,下盘巷道拱肩破碎严重,局部发生冒顶。

### 1.2 井下定向取芯

钻孔尺寸和方位:在各测点布置一近水平测孔,垂直于巷道表面,90 mm≤孔径≤137 mm,水平仰角≤5°。水平定向取芯循环操作:如图 2(a)所示,假定钻孔轴向为  $y$  方向,垂直为  $z$  方向,水平为  $x$  方向,利用“岩芯水平定向系统”,标定水平方向,每钻取 1 m 进行一次标定,如此循环。上述方法有效地解决了在深孔中无法直接标记岩芯水平方向的难题。



(a) 现场取芯地点空间位置



(b) 现场取芯原理

图 2 断层附近定向钻取岩芯

Fig. 2 Cores obtained in designated directions around fault

1.3  试验室二次定角度钻取岩样

利用室内岩芯钻机配合二次定角度取样装置，钻取空间坐标系 6 个方向岩样。

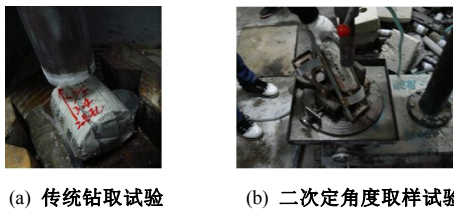


图 3 不同方向取样试验

Fig. 3 Different-angle coring devices

图 3 (a) 是传统取样，将圆柱体岩芯轴向假定为  $y$  轴，断面为  $xoz$  面，可钻取  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向岩样。图 3 (b) 为定角取样装置，主要包括：岩芯套筒、槽孔、支撑架、底座，套筒焊接放置在支撑架上，支撑架与底座焊接在一起成  $45^\circ$ ，槽孔处于套筒内侧，通过改变岩芯位置，钻取出  $x45^\circ y$ 、 $x45^\circ z$ 、 $y45^\circ z$  3 个方向岩样。

2  岩石力学及地应力声发射试验

2.1  单轴声发射岩石力学试验

由 MTS 设定位移加载速度为  $0.005\text{ mm/s}$ ，在岩芯两端加垫块隔噪声减小摩擦，声信号传感器连接放大器、处理器，拾取声发射信号，由计算机处理成声发射参数（事件数、振铃计数、能量累计等）。采集 MTS 轴向力与时间，通过外参信号采集线连接 MTS 信号接收处，并通过转换器传输信号给处理器，由计算机确定 Kaiser 效应点和轴向力，测试原理如图 4 所示。

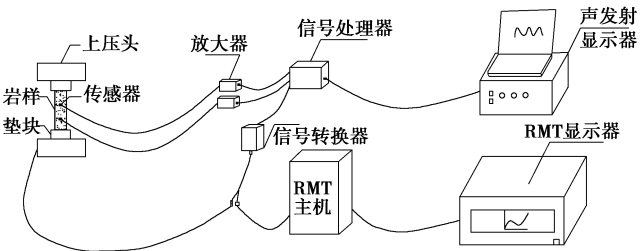


图 4 单轴加载声发射试验原理

Fig. 4 Uniaxial rock compression and AE monitoring system

对断层上、下盘岩样进行单轴压缩试验，将部分破坏岩样列于图 5 中，主要反映岩样宏观破坏特征和细观 AE 事件数。其中，图 5 (a) 为断层上盘部分破坏的砂质泥岩，5 (b) 为断层下盘部分破坏的泥岩。由图 5 可知，上盘砂质泥岩宏观破坏呈压裂，累计 AE 事件数较多，抗压能力较强；下盘泥岩宏观破坏呈脆性断裂，AE 事件数较少。将岩样抗剪强度参数，列在表 1 中。

2.2  单轴加载声发射 Kaiser 效应测试

岩石 Kaiser 效应发生在弹性阶段，结合该阶段的应力 - 应变和声发射曲线，对振铃计数和能量计数进

行处理，即监测曲线中的突变点，并确定该点为 Kaiser 效应点，生成曲线如图 6、7 所示。

表 1 断层附近不同受压方向岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of samples obtained in different directions near fault

岩石埋藏方位		岩石抗剪强度参数			
断层	岩石受力方向	弹性模量/GPa	变形模量/GPa	抗压强度/MPa	泊松比
上盘砂质泥岩	$x$ 方向	18.40	14.20	43.60	0.53
	$y$ 方向	17.25	11.20	42.00	0.52
	$z$ 方向	16.70	10.60	40.50	0.53
泥岩	$x45^\circ y$ 方向	13.30	9.50	22.30	0.63
	$x45^\circ z$ 方向	13.60	10.10	28.10	0.60
	$y45^\circ z$ 方向	14.30	10.70	29.20	0.59
断层下盘泥岩	$x$ 方向	12.50	7.63	35.20	0.34
	$y$ 方向	10.90	6.80	32.00	0.30
	$z$ 方向	9.00	5.20	28.50	0.30
盘砂质泥岩	$x45^\circ y$ 方向	8.10	4.80	22.30	0.08
	$x45^\circ z$ 方向	8.60	4.90	19.10	0.09
	$y45^\circ z$ 方向	9.80	5.20	24.20	0.12

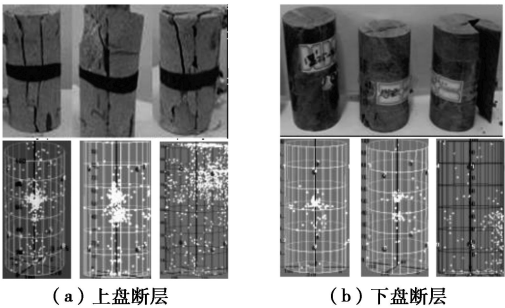
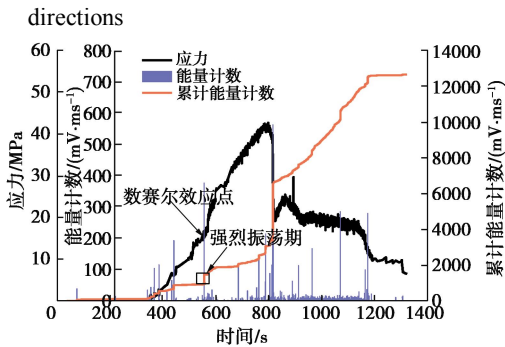
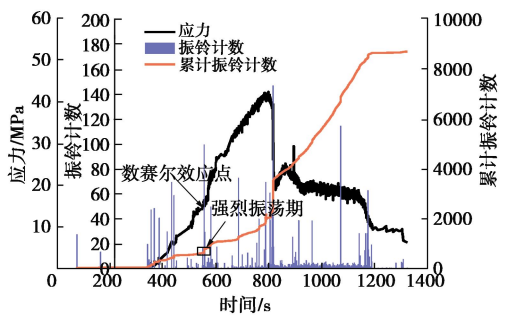


图 5 单轴加载下破裂岩样

Fig. 5 Rocks damaged under uniaxial pressures in different directions



(a) 应力 - 能量 - 事件关系



(b) 应力 - 振铃 - 计数 - 事件关系

图 6 断层上盘  $x$  方向岩样声发射 AE 参数

Fig. 6 AE data of upper stratum in  $x$  direction

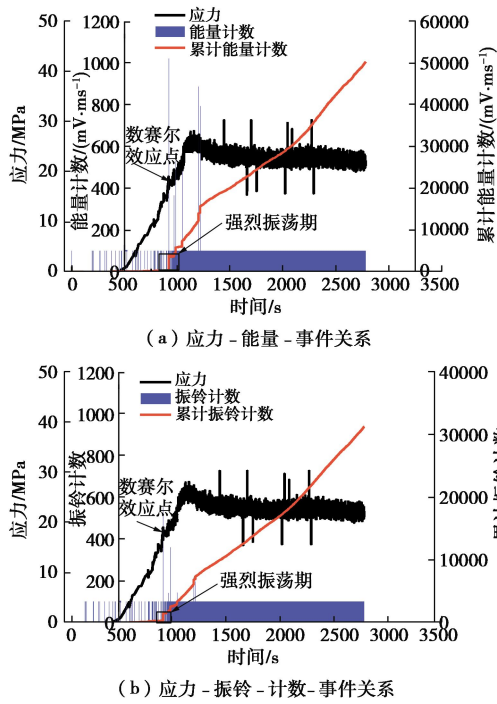


图 7 断层下盘  $x$  方向岩样声发射 AE 参数

Fig. 7 AE data of lower stratum in  $x$  direction

从图 6 (a)、6 (b) 可知, 断层上盘  $x$  方向岩样的弹性加载时间范围是 0~750 s, 当加载时间  $t=580$  s 时, 由图 6 (a) 发现能量计数第一次增大到  $385\text{ mv}\times\text{ms}$ , 由图 6 (b) 发现振铃计数第一次增大到 98 time/s。随后较长时间段内都没有超过该点 AE 参数值, 该震荡期对应的应力点可视为 Kaiser 效应点, 即断层上盘  $x$  方向正应力为 13.95 MPa。

从图 7 (a)、7 (b) 可知, 断层下盘  $x$  方向岩样经受弹性载荷时间范围为 0~1200 s。由图 7 (a) 可知, 当荷载加载到 900 s 时, 监测到累积能量计数激增明显, 即为  $1240\text{ mv}\times\text{ms}$ , 在图 7 (b) 中对应的振铃计数跳到最大值 560/次, 随后没有这样跳跃。将此时震荡阶段的能量计数和振铃计数所对应的应力点, 判断为岩石 Kaiser 效应点, 即断层下盘  $x$  方向正应力为 16.73 MPa。

根据上述地应力判断方法, 可得断层上盘和下盘的各方向岩样正应力, 列在表 2 中。

表 2 声发射测试各方向岩样 Kaiser 效应点

Table 2 Kaiser effect points of rock in all directions by acoustic emission tests						
应力 /MPa	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_{x45^\circ y}$	$\sigma_{x45^\circ z}$	$\sigma_{y45^\circ z}$
上 均	13.95	28.30	22.94	18.25	14.78	23.58
盘 值						
下 均	16.73	30.48	23.31	19.40	16.65	22.85
盘 值						

2.3 声发射地应力计算

取微单元  $OABC$ , 应力状态如下图 8。面力  $T$  在 3 个方向分量为  $T^1, T^2, T^3$ 。而面力  $T$  在平面  $ABC$  上正

应力分量为  $\sigma_N$ , 外法线方向余弦为  $l, m, n$ , 则应力分量  $T^1, T^2, T^3$  可表示为

$$\left. \begin{aligned} T^1 &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n, \\ T^2 &= \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n, \\ T^3 &= \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

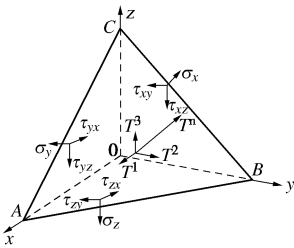


图 8 应力坐标系

Fig. 8 Coordinates of stress

存在剪应力为零的平面, 即为主应力面, 其上正应力为主应力。此时, 对应的  $T^1, T^2, T^3$  为

$$\left. \begin{aligned} T^1 &= \sigma_N l, \\ T^2 &= \sigma_N m, \\ T^3 &= \sigma_N n. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 可知

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_x - \sigma_i)l_i + \tau_{xy}m_i + \tau_{xz}n_i &= 0, \\ \tau_{yx}l_i + (\sigma_y - \sigma_i)m_i + \tau_{yz}n_i &= 0, \\ \tau_{zx}l_i + \tau_{zy}m_i + (\sigma_z - \sigma_i)n_i &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中,  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为主应力。由方程组 (3) 建立行列式并展开可得主应力。为简化计算利用 VB6.0 代码器结合表 2 中应力, 计算主应力  $\sigma_i$ 。

主应力相较于  $y, z$  轴的方向余弦为  $m_i, n_i$ 。于是, 可知主应力  $\sigma_i$  的倾角和方位角计算如下:

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \arcsin n_i, \\ \beta_i &= \arcsin(m_i / \sqrt{1 - n_i^2}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $\theta_i$  为主应力与  $xoy$  平面夹角, 即倾角, 正为仰角, 负为俯角。 $\beta_i$  为主应力在  $xoy$  平面上投影与  $x$  轴夹角, 顺时针为正, 逆时针为负, 计算后根据  $x$  轴方位角换算为主应力方位角。

将计算出的主应力方位角和倾角, 列在表 3 中。

表 3 断层附近主应力空间分布

Table 3 Spatial distribution of principal stress around fault				
断层	主应力参数	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
上盘断层	主应力 /MPa	29.18	24.07	11.94
	倾角	-14.01°	-65.16°	20.07°
	方位角	NNW333°	NNW264°	WWS263°
下盘断层	主应力 /MPa	32.73	24.27	13.52
	倾角	-19.62°	-57.37°	24.95°
	方位角	SSE171°	EEN81°	EES112°



已知 I、II 测点胶带机轴向为  $x$  轴, 水平为  $y$  轴。由表 4 可知, 上盘 I 测点  $\sigma_1$  与  $xoy$  平面夹角为  $14.01^\circ$ , 其方位 NNW333° 与  $y$  轴方位 NNW340° 近似平行;  $\sigma_2$  与  $xoy$  平面夹角为  $65.16^\circ$ , 偏向垂直。下盘 II 测点  $\sigma_1$  与  $xoy$  平面夹角  $19.62^\circ$ , 其方位 SSE171° 与  $y$  轴方位 SSW182° 近似平行;  $\sigma_2$  与  $xoy$  水平面夹角为  $57.37^\circ$ , 偏向垂直。由此可知, 各测点以水平构造应力为主。

### 3 断层附近巷道围岩稳定性数值分析

#### 3.1 断层附近数值模拟方案建立

由表 1 中断层岩样抗剪强度参数, 经 ANSYS 建立正交各向异性结构单元。模型尺寸为: 宽 600 m、长 850 m、高 400 m, 为保证计算精度采用渐变网格, 共计四百多万网格, 模型如图 9 所示。利用表 3 中主应力设置应力边界条件。利用 Drucker-Prager 模型, 计算巷道的受力和变形。将各岩层的强度参数列在表 4 中, 断层参数为: 断层宽度根据经验及其附近巷道掘进中揭露的断层影响范围, 取为 50 m, 弹性模量为 5 GPa, 泊松比为 0.35, 密度为  $2000\text{ kg/m}^3$ 。

表 4 岩层材料力学参数

Table 4 Material mechanics parameters of rock strata			
岩层	弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
第一层	16.73	0.16	2873
第二层	12.00	0.28	2600
第三层	17.59	0.13	2907
第四层	16.73	0.16	2873
第五层	13.00	0.28	2580

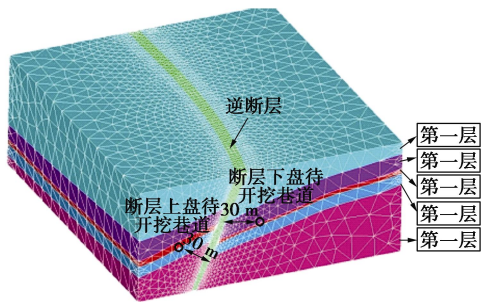


图 9 断层附近数值模型

Fig. 9 Numerical model for strata around fault

非均匀应力场加载: 通过 ANASYS 设置模型表面效应单元, 由变化效应单元的局部坐标, 施加表面效应单元不同方向应力。对比模拟方案为: 施加表 3 中非均匀应力场, 通过命令单元生死来实现巷道开挖, 分析巷道布设合理性; 调整表 3 中主应力方位, 即将最大水平应力作用巷道轴向, 最小主应力作用两帮, 中间主应力垂直加载。最后, 将围岩次生应力和岩层移动数据调出, 生成如图 10~17 所示。

#### 3.2 断层上盘巷道次生应力场和岩层移动

设定两种应力加载, 即表 3 中断层上盘主应力和调整方位主应力。通过 ANSYS 建立正交各向异性结构单元 (砂质泥岩), 并划分四百多万网格, 获得两种应力下, 巷道的顶板、拱肩、帮部和底角处次生应力分布和岩层移动趋势, 将结果列在图 10~13 中。

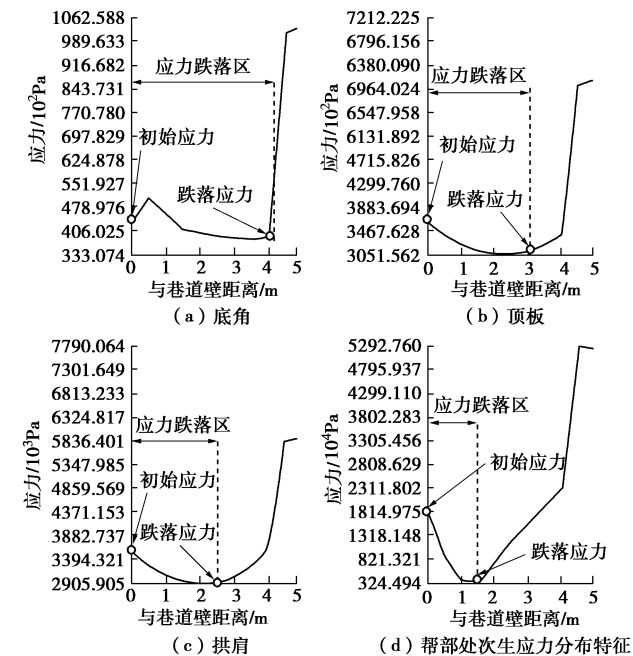


图 10 原岩应力加载下断层上盘巷道不同部位处次生应力分布特征

Fig. 10 Secondary stresses distributed under in-situ stress in different parts of roadway near upper fault

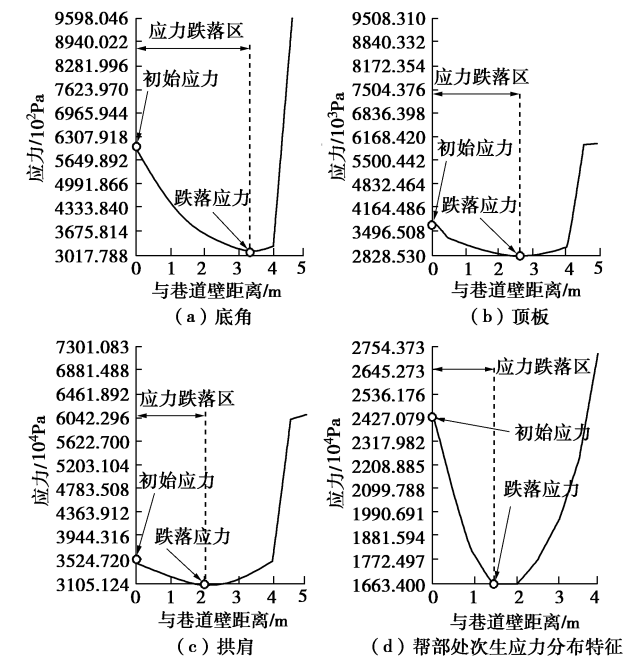


图 11 调整应力状态下断层上盘巷道不同部位处次生应力分布特征

Fig. 11 Secondary stresses distributed under adjusted stress state in different parts of roadway near upper fault

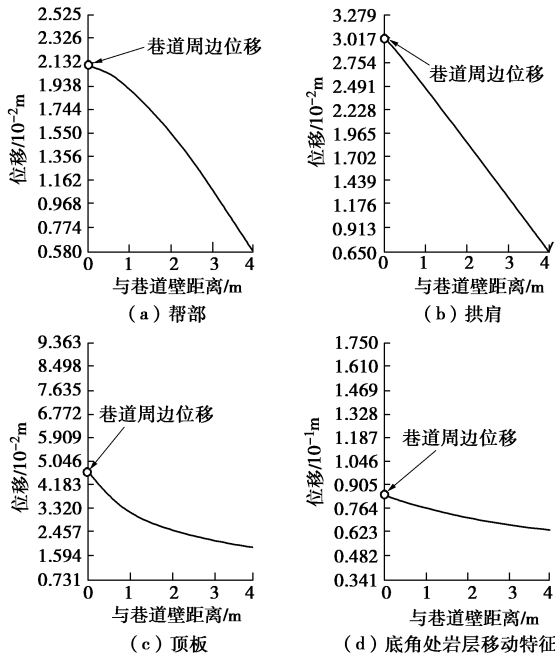


图 12 原岩应力加载下断层上盘巷道不同部位处岩层移动特征  
Fig. 12 Displacement distributed under in-situ stress in different parts of roadway near upper fault

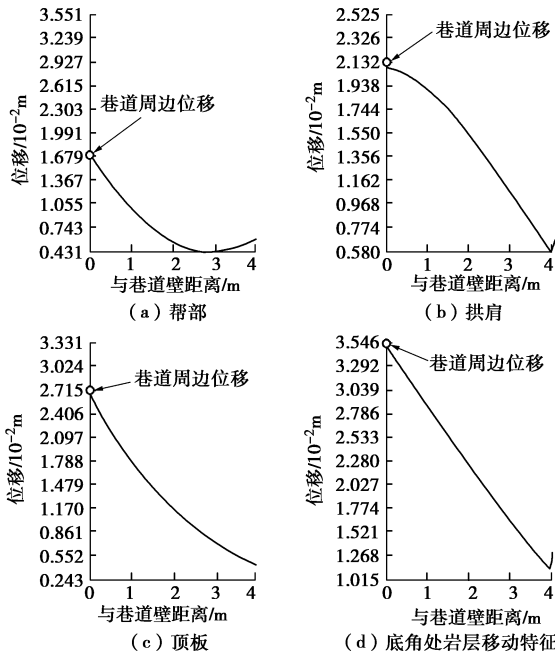


图 13 调整应力状态下断层上盘巷道不同部位处岩层移动特征  
Fig. 13 Displacement distributed under adjusted stress state in different parts of roadway near upper fault

由图 10、11 可知，在原地应力下，开挖后巷道周围的应力发生重新分布，巷道周边区域的次生应力发生跌落，且初始应力沿着巷道的两帮、拱肩和顶板及底角处依次减小，其中最小初始应力为底角处的 0.452 MPa；而应力跌落范围依次增大。调整应力方位后，在相同的巷道位置处，对应的初始应力值均提高，其中帮部达到最大的 24.105 MPa，且跌落区范围减小。

由图 12、13 可知，在次生应力跌落范围内，岩层移动程度在巷道周边处最大，在径向延伸处逐渐稳定，且沿着两帮、拱肩和顶板及底角处岩层移动程度逐渐增大，最大位移发生在底角处的 8.230 cm。经过调整应力加载方位后，岩层移动剧烈程度减小，其中底角处最大减小了 4.685 cm。

在原地应力和调整地应力下，将跌落区的初始应力、跌落范围和岩层移动最值，列于表 5 中。

表 5 断层上盘围岩应力跌落区的次生应力和岩层移动特征  
Table 5 Stress and displacement distributed in stress drop area near upper fault stratum

地应力 加载	巷道断面 位置	应力跌落区		巷道周边岩 层移动/cm
		初始应力/MPa	跌落范围/m	
原地应力	帮部处	18.150	1.5	2.103
	拱肩处	3.521	2.6	3.017
	顶板处	3.489	3.0	4.632
	底角处	0.452	4.0	8.230
调整应力 加载方位	帮部处	24.105	1.2	1.679
	拱肩处	3.525	1.9	2.124
	顶板处	3.702	2.4	2.675
	底角处	0.593	3.2	3.545

3.3 下盘断层巷道次生应力场和岩层移动

在两种应力状态下，即表 3 提供的断层下盘主应力和调整主应力。通过 ANSYS 建立正交各向异性的结构单元（泥岩），并划分四百多万的网格增加运算精度，通过加载不同方向主应力，计算出断层下盘附近巷道次生应力和变形大小，如图 14~17 所示。

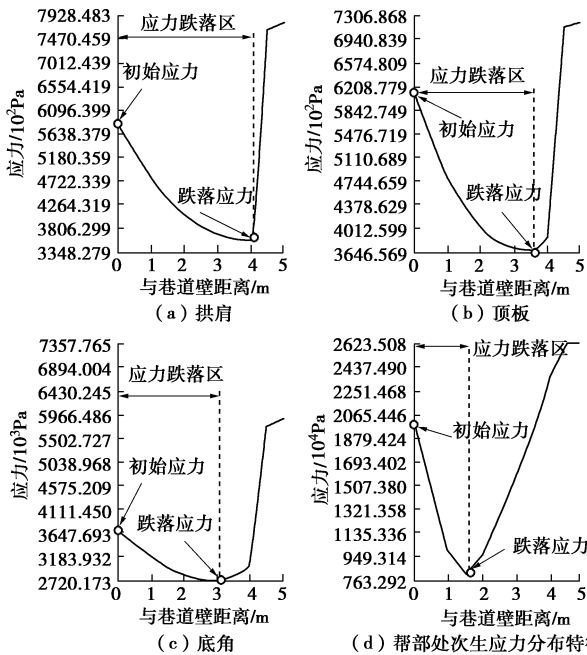


图 14 原岩应力加载下断层下盘巷道不同部位处次生应力分布特征

Fig. 14 Secondary stresses distributed under in-situ stress in different parts of roadway near lower fault

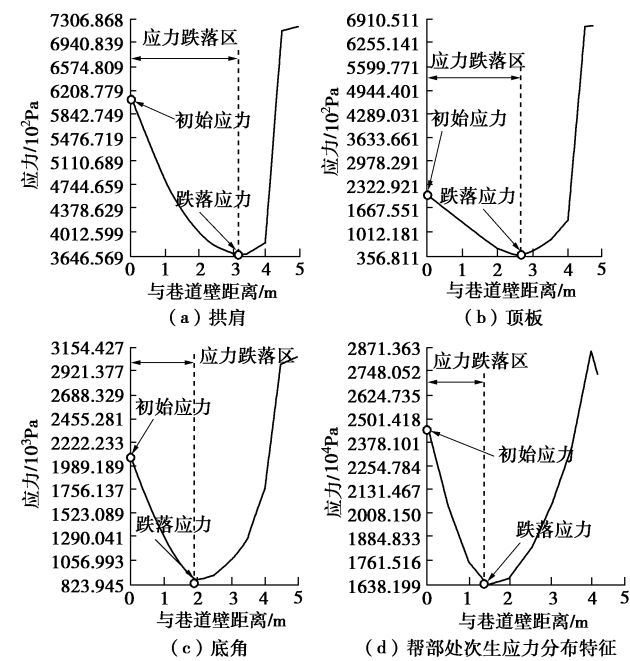


图 15 调整应力状态下断层下盘巷道不同部位处次生应力分布特征

Fig. 15 Secondary stresses distributed under adjusted stress state in different parts of roadway near lower fault

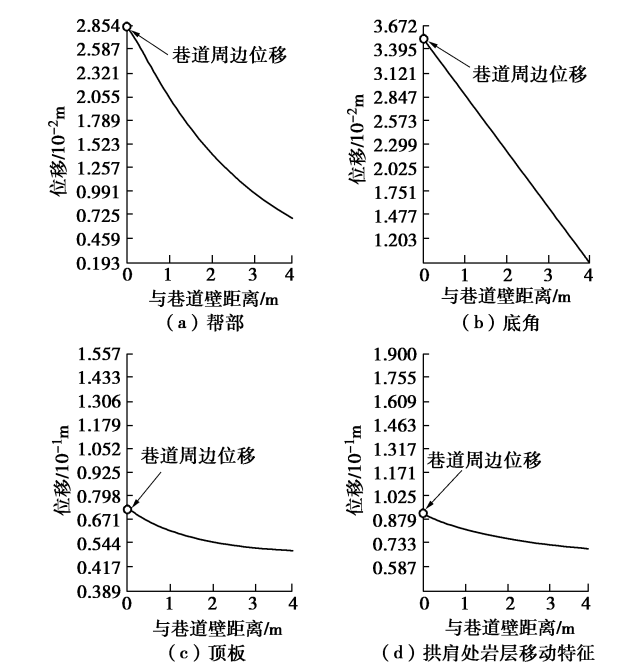


图 16 原岩应力加载下断层下盘巷道不同部位处岩层移动特征

Fig. 16 Displacement distributed under in-situ stress in different parts of roadway near lower fault

由图 14, 15 可知, 在原地应力下, 开挖巷道周边产生了应力跌落区, 沿巷道底角、两帮和顶板及拱肩处初始应力依次降低, 应力跌落范围增大, 其中最小初始应力为拱肩处 0.579 MPa。调整应力后, 相同巷道位置初始应力增大, 帮部达到最大 23.845 MPa, 拱

肩处应力跌落范围减小的幅度最大为 0.9 m。

由图 16, 17 可知, 在次生应力跌落范围内, 岩层最大移动发生在巷道周边, 沿径向延伸逐渐趋稳, 且沿巷道两帮、底角和顶板及拱肩处移动程度逐渐增大, 在拱肩处最大达到 8.812 cm。在应力加载方位调整后, 岩层移动剧烈程度减小, 特别是拱肩处降低为 5.386 cm。

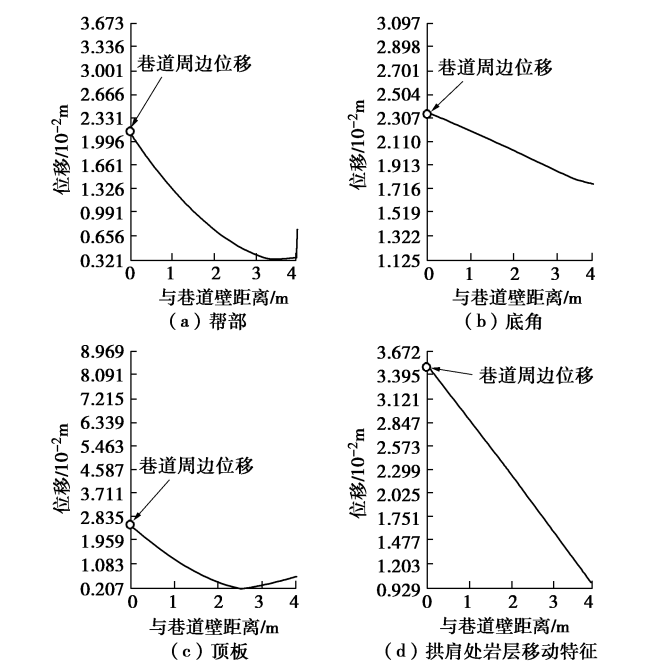


图 17 调整应力状态下断层下盘巷道不同部位处岩层移动特征

Fig. 17 Displacement distributed under adjusted stress state in different parts of roadway near lower fault

将应力跌落区的初始应力、跌落范围和岩层移动的最值, 列在表 6 中。

表 6 断层下盘围岩应力跌落区次生应力和岩层移动特征

Table 6 Stress and displacement distributed in stress drop area near upper fault stratum

地应力 加载	巷道断 面位置	应力跌落区		巷道周边岩 层移动/cm
		初始应力/MPa	跌落范围/m	
原地应力	帮部处	19.721	1.6	2.854
	底角处	3.648	3.0	3.459
	顶板处	0.619	3.6	6.753
	拱肩处	0.579	4.0	8.812
调整应力 加载方位	帮部处	23.845	1.3	1.998
	底角处	20.136	1.9	2.310
	顶板处	1.874	2.7	2.765
	拱肩处	0.621	3.1	3.426

3.4 断层附近巷道围岩裂隙发育模拟分析

采用两种应力加载, 即原岩应力和调整主应力, 研究不同应力下围岩裂隙发育, 如下图 18, 19 所示。

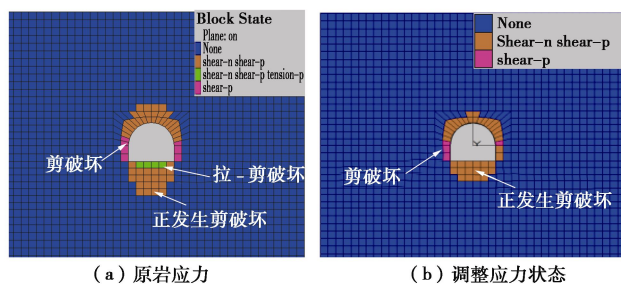


图 18 断层上盘附近巷道裂隙发育模拟

Fig. 18 Development of simulated fissures of roadway near upper fault

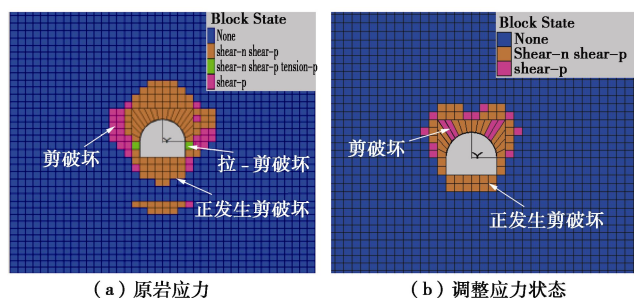


图 19 断层下盘附近巷道裂隙发育模拟

Fig. 19 Development of simulated fissures of roadway near lower fault

在原岩应力下, 断层上盘沿巷道的底拱脚、顶板和拱肩以及帮部处裂隙发育范围逐渐减小, 分别为 5.0, 3.0, 1.5, 1.0 m, 相应的应力跌落范围分别减小为 4.0, 3.0, 2.6, 1.5 m; 调整应力后围岩裂隙发育区分别减小为 3.0, 2.0, 1.5, 1.0 m, 相应的应力跌落范围分别减小为 3.2, 2.4, 1.9, 1.2 m。

在原岩应力下, 断层下盘沿巷道的拱肩、顶板和底拱脚以及帮部处裂隙范围逐渐减小, 分别为 5.5, 5.0, 3.0, 2.0 m, 相应的应力跌落范围为 4.0, 3.6, 3.0, 1.6 m; 调整应力状态后, 围岩裂隙发育区分别减小为 3.5, 3.0, 2.0, 1.0 m, 相应的应力跌落区减小为 3.1, 2.7, 1.9, 1.3 m。

## 4 结 论

本文在前人研究基础上, 展开断层附近地应力分布特征及对附近巷道稳定性影响研究, 获得以下结论:

(1) 上盘砂质泥岩破坏呈柱状压裂, 累计声发射事件数较多, 抗压能力较强; 下盘泥岩宏观破坏呈脆性剪切, AE 事件数较少, 抗压能力弱; 同时, 岩石 AE 事件空间分布与其宏观破坏形态较吻合。在相同赋存条件下, 以泥岩为主的下盘巷道易发生脆性破裂, 破裂岩体块度较大, 仍能承载一定压力, 随着时间推移易发生蠕变; 以砂质泥岩为主的上盘巷道则发生柱状压裂, 破裂后岩体成颗粒状, 遇水易崩解变形。

(2) 断层附近以构造应力为主, 这是由上、下盘岩层水平挤压所致。上盘挤压使得埋藏较浅的下盘巷道水平应力偏大。由巷道断面优化设计可知, 为防止水平挤压巷道帮部, 引起底脚和拱顶的变形破坏, 需及时加固避免发生次生灾害, 提高初期支护效果。

(3) 开挖巷道次生应力场中存在应力跌落区, 在不同应力加载条件下, 该跌落区的变化趋势与巷道塑形变化趋势较吻合。同时, 塑性发育越明显, 应力跌落区的初始应力越小、跌落范围越大、岩层移动越剧烈。由此可知, 围岩次生应力可表征其承载能力, 即跌落区初始应力越大, 围岩承载能力越强。应力跌落范围变化趋势与围岩裂隙发育相一致, 表明卸荷应力分布可表征围岩裂隙发育情况。

模拟中下盘巷道顶板和拱肩附近初始应力较小、岩层移动剧烈 (易发生冒落), 实测巷道顶板和拱肩处冒落严重, 这是由于下盘巷道为泥岩, 易发生脆性断裂, 且破坏后岩石块度较大易冒落, 应及时挑顶、喷浆加固。模拟上盘巷道底角处初始应力较小且岩层移动较大, 实测上盘巷道底鼓严重, 行人上山难度大, 这是由于上盘巷道为脆性砂质泥岩, 岩体破碎后粒度较小, 遇排水沟渗出的水发生剪胀变形, 需经常卧底。

(4) 在原主应力下, 模拟巷道破碎状态与实测结果接近, 在调整应力下巷道破坏得到改善。在实际工程中优化巷道断面布设, 需在巷道未开挖时掌握地应力分布, 特别是遇到断层带时, 应根据最大水平主应力方位确定巷道轴向, 避免作用在巷道两帮。如果最大主应力不可避免作用在巷道帮部时, 需要及时钻孔卸压, 做好支护和钻孔卸压联合治理措施。

总之, 复杂埋藏条件下巷道失稳特征和治理方法, 还需通过模型实验和工业试验进一步加以研究。

## 参考文献:

- [1] 蔡美峰, 彭 华, 乔 兰, 等. 瓦富煤矿地应力场分布规律及其与地质构造的关系[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1248 - 1252. (CAI Mei-feng, PENG Hua, QIAO Lan, et al. Distribution law of in-situ stress field and its relationship to regional geological structures in Wafu Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11): 1248 - 1252. (in Chinese))
- [2] 孔德森, 蒋金泉, 范振忠, 等. 深部巷道围岩在复杂应力场中的稳定性数值模拟分析[J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2001, 20(1): 68 - 70. (KONG De-sen, JIANG Jin-quan, FAN Zhen-zhong, et al. Numerical simulation analysis of deep roadways stability in compound stress field[J]. Journal of Shandong University of Science and



- Technology (Natural Science), 2001, **20**(1): 68 - 70. (in Chinese))
- [3] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (CAI Mei-feng. Principles and techniques of geostress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [4] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (CAI Mei-feng. Mining design optimization and ground pressure control in metal mines-theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [5] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒. 地下工程围岩稳定性分析[M]. 北京: 中国煤炭工业出版社, 1983: 42 - 48. (YU Xue-fu, ZHENG Yi-ren, LIU Huai-heng. Stability analysis of surrounding rock of underground engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1983: 42 - 48. (in Chinese))
- [6] 孙玉福. 水平应力对巷道围岩稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(6): 891 - 895. (SUN Yu-fu. Affects of in-situ horizontal stress on stability of surrounding rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(6): 891 - 895. (in Chinese))
- [7] 潘 阳, 赵光明, 孟祥瑞. 非均匀应力场下巷道围岩弹塑性分析[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(增刊 1): 53 - 57. (PAN Yang, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Elasto-plastic analysis of surrounding rock mass under non-uniform stress field[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(S1): 53 - 57. (in Chinese))
- [8] 张小波, 赵光明, 孟祥瑞. 基于岩石非线性统一强度准则的非均匀应力场中圆形巷道围岩塑性区分析[J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(3): 202 - 206. (ZHANG Xiao-bo, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Plastic zone analysis of the surrounding rock mass in circular tunnel under non-uniform stress field based on nonlinear unified strength criterion[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, **13**(3): 202 - 206. (in Chinese))
- [9] 彭 瑞, 赵光明, 孟祥瑞. 基于 D-P 准则的非均匀应力场受扰动轴对称巷道安全性分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, **24**(1): 103 - 108. (PENG Rui, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Analysis of disturbed axisymmetric roadway safety under non-uniform stress field on D-P criterion[J]. China Safety Science Journal, 2014, **24**(1): 103 - 108. (in Chinese))
- [10] 彭 瑞, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 不同岩性岩石声发射地应力测试及其应用[J]. 中南大学学报, 2015, **46**(9): 3377 - 3384. (PENG Rui, MENG Xiang-rui, ZHAO Guang-ming, et al. The acoustic emission in-situ stress testing of different lithology rock and its application[J]. Journal of Central South University, 2015, **46**(9): 3377 - 3384. (in Chinese))
- [11] 张百红, 韩立军, 韩贵雷, 等. 深部三维地应力实测与巷道稳定性研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(9): 2547 - 2555. (ZHANG Bai-hong, HAN Li-jun, HAN Gui-lei, et al. Study of 3D in-situ stress measurement and stability of roadways in depth[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(9): 2547 - 2555. (in Chinese))
- [12] 云 龙, 郭彦双, 马 瑾. 5° 拐折断层在黏滑过程中物理场演化与交替活动的实验研究[J]. 地震地质, 2011, **33**(2): 356 - 368. (YUN Long, GUO Yan-shuang, MA Jin. An experimental study of evolution of physical field and the alternative during stick-slip of 5° bend fault[J]. Seismology and Geology, 2011, **33**(2): 356 - 368. (in Chinese))
- [13] 郭彦双, 马 瑾, 云 龙. 拐折断层黏滑过程的实验研究[J]. 地震地质, 2011, **33**(1): 26 - 35. (GUO Yan-shuang, MA Jin, YUN Long. Experimental study on the process of viscous slip of the fracture[J]. Seismology and Geology, 2011, **33**(2): 356 - 368. (in Chinese))
- [14] 侯守信, 田国荣. 古地磁岩心定向及其在地应力测量上的应用[J]. 地质力学学报, 1999, **5**(1): 90 - 96. (HOU Shou-xin, TIAN Guo-rong. Paleomagnetic core orientation and its application in in-situ stress measurement[J]. Journal of Geomechanics, 1999, **5**(1): 90 - 96. (in Chinese))
- [15] 吴满路, 廖椿庭, 张春山, 等. 红透山铜矿地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(23): 3943 - 3947. (WU Man-lu, LIAO Chun-ting, ZHANG Chun-shan, et al. Red through in-situ stress measurement and its distribution of mountain copper mine study[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(23): 3943 - 3947. (in Chinese))
- [16] 黄明清, 吴爱祥, 王贻明, 等. 套孔应力解除法测量断层区域地应力[J]. 中国有色金属学报, 2014(11): 3660 - 3665. (HONG Ming-qing, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming, et al. Measurement of stress in fault area by stress relief method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014(11): 3660 - 3665. (in Chinese))
- [17] 康红普, 林 健, 张 晓. 深部矿井地应力测量方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(5): 929 - 933. (KANG Hong-pu, LIN Jian, ZHANG Xiao. Research and application of in-situ stress measurement in deep mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(5): 929 - 933. (in Chinese))

- [18] 康红普, 林 健, 张 晓, 等. 潞安矿区井下地应力测量及分布规律研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 827 - 844. (KANG Hong-pu, LIN Jian, ZHANG Xiao, et al. In-situ stress measurements and distribution laws in Lu'an underground coal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 827 - 844. (in Chinese))
- [19] 张延新, 宋常胜, 蔡美峰, 等. 深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(4): 778 - 786. (ZHANG Yan-xin, SONG Chang-sheng, CAI Mei-feng, et al. Geostress measurements by hydraulic fracturing method at great depth of boreholes and numerical modelling predictions of stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(4): 778 - 786. (in Chinese))
- [20] 景 锋. 原生裂隙水压致裂法三维地应力测量研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(11): 1692 - 1696. (JING Feng. Determination of three-dimensional geostress by hydraulic tests on preexisting fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(11): 1692 - 1696. (in Chinese))
- [21] HOLCOMB D J. General theory of the Kaiser effect[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, **30**(7): 929 - 935.
- [22] LAVROV A V. Three-dimensional simulation of memory effects in rock samples[M. Rock Stress Proceedings of the International Symposium on Rock Stress, Rotterdam: A A Balkema, 1997: 197 - 202.
- [23] SETO M, NAG D K, VUTUKURI V S. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999, **17**(3): 241 - 266.
- [24] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(2): 151 - 171.
- [25] 祝方才, 谢学斌. 岩石声发射技术及在地应力测量中的应用探讨[J]. 国外金属矿山, 2000, **24**(2): 13 - 15. (ZHU Fang-cai, XIE Xue-bin. Rock acoustic emission technology and application in the in-situ stress measurement study[J]. Metal Mines Abroad, 2000, **24**(2): 13 - 15. (in Chinese))
- [26] WANG H T, XIAN X F, YIN G Z, et al. A new method of determining geostresses by the acoustic emission Kaiser effect[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, **37**(3): 543 - 547.