2019年 8月



于秋鸽 涨华兴 涨玉军 ,等.采动影响下断层活化机理及影响因素分析 [J].煤炭学报 ,2019 ,44(S1): 18-30. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1694

YU Qiuge ,ZHANG Huaxing ,ZHANG Yujun ,et al. Analysis of fault activation mechanism and influencing factors caused by mining [J].Journal of China Coal Society 2019 44(S1): 18-30.doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1694

采动影响下断层活化机理及影响因素分析

于秋鸽¹² 张华兴¹² 张玉军¹² 邓伟男¹² 张刚艳¹²

(1.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013; 2.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

摘 要:为了研究断层活化机理及影响因素 考虑断层水的作用 根据断裂力学建立了断层带岩体 原始裂隙损伤发育力学模型及断层带岩体滑移力学模型 根据此模型分析了断层活化的机理 并得 到影响断层活化的因素主要有断层带岩体水平应力和垂直应力的比值 λ 、断层带岩体是否含水、断 层带岩体弹性模量 E_x 断层带泊松比 μ_x 断层倾角 θ_1 、断层带岩体内摩擦角 φ_x 断层带岩体黏聚力 c等。同时,以断层露头处台阶下沉值的大小为断层活化程度判别标准,利用 FLAC^{3D}内置 FISH 语言 进行编程验证了以上因素对断层活化的影响。研究结果表明: ① 当 $\lambda < 1$ 时,随着 λ 的增加,断层 带岩体原始裂隙越不容易扩展 断层活化的可能性降低; 当 $\lambda>1$ 时 ,随着 λ 的增加 ,断层带岩体原 始裂隙越容易扩展 断层活化的可能性增加。② 当断层带岩体含有水时 ,水压的存在不仅导致断 层带岩体原始裂隙容易扩展,同时水还对断层带岩体滑移具有润滑作用,增加了断层活化的可能 性。③ 随着 Ε 的增加,断层带岩体原始裂隙越不容易扩展,断层活化的可能性降低;随着μ的增 加 断层带岩体原始裂隙越容易扩展 断层活化的可能性增加。④ 断层露头处的台阶下沉值取决 于断层带岩体滑移量和采动影响下断层露头处的正常下沉值,随着heta,的增加,断层带岩体滑移量 可能减小,但是采动影响下断层露头处的正常下沉值急剧增加导致断层露头处的台阶下沉值增大, 断层活化的可能性增加。 ⑤ 随着 arphi ϵ 的增加 ,断层带岩体原始裂隙越不容易扩展 ,断层带岩体越 不容易滑移 断层活化的可能性降低。研究结果为分析断层活化机理及断层露头处建筑物和构筑 物的保护提供借鉴。

关键词: 断层活化; 影响因素; 裂隙损伤发育; 断层带岩体滑移; 断层带岩体性质; 开采沉陷 中图分类号: TD325 ______文献标志码: A _____文章编号: 0253–9993(2019) S1–0018–13

Analysis of fault activation mechanism and influencing factors caused by mining

YU Qiuge^{1,2} ZHANG Huaxing^{1,2} ZHANG Yujun^{1,2} DENG Weinan^{1,2} ZHANG Gangyan^{1,2}

(1. Coal Mining and Design Branch , China Coal Research Institute Beijing 100013 , China; 2. Coal Mining and Design Department , Tiandi Science and Technology Co. Ltd. Beijing 100013 , China)

Abstract: To study the mechanism of fault damage activation the mechanical models for fracture damage development and rock mass slipping under water pressure were established based on fracture mechanics. From the two mechanism models the main influencing factors including the ratio of horizontal stress to vertical stress λ ,whether there was water or not in fault zone elastic modulus *E*. Poisson's ratio μ fault angle θ_1 , internal friction angle φ and cohesion *c* and so on were obtained. At the same time the results were verified by numerical simulation using FLAC^{3D} built-in FISH language according to the criterion of fault activation degree based on the value of step subsidence at fault outcrop. The re-

收稿日期: 2018-12-26 修回日期: 2019-02-22 责任编辑: 常 琛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604151); 天地科技开采设计事业部青年基金资助项目(KJ-2018-TDKCZL-10)

作者简介: 于秋鸽(1989—), 男, 河南信阳人, 博士研究生。E-mail: 418909128@ qq.com

sults show that the possibility of fault activation would increase with λ when it is smaller than 1 ,while the possibility would decrease when λ increases and is larger than 1 for the reason that the fault zone fracture is easier to expand when λ is smaller than 1 and increasing while it's adverse when λ is larger than 1. When there is water existing in fault zone ,water would promote possibility of fault activation for water pressure wouldn't only expand the fracture ,but also lubricate the rock mass sliding. With the increase of *E* , the original fracture of the rock mass in the fault zone is not easy to expand ,and the possibility of fault activation is reduced ,while it's reverse according to μ . The step subsidence value at the fault outcrop depends on normal subsidence value at fault outcrop without fault existing and rock mass slipping value influenced by mining ,the rock mass slipping value would decrease at fault outcrop when θ_1 increases , but the normal subsidence would increase sharply. As the result ,the step subsidence value at fault outcrop increases as well as the possibility of fault activation. At the same time ,when internal friction angle φ and cohesion *c* increase ,the fault zone fracture is harder to expand and the possibility of fault activation decreases.

Key words: fault activation; influencing factors; fracture damage development; slip of fault zone rock mass; rock mass properties; mining subsidence

断层是矿山开采活动中经常遇到的地质构造之 一 断层的存在破坏了岩层的连续性和完整性 ,一直 以来都是影响煤矿安全开采的重要因素。目前 关于 断层活化机理的研究主要集中在冲击地压、断层突水 方面^[1-2]。当工作面上覆岩层中含有断层,开采造成 断层活化时 地表沉降规律与普通地质条件下的地表 沉降规律具有显著不同并引起国内外学者的普遍关 注。早在 20 世纪 80 年代初期 美国学者 NELSON 发 现当工作面上覆岩层中含有断层时 开采将引起断层 活化造成断层露头处产生台阶性裂缝^[3];煤炭科学 研究北京开采研究所根据国内外 25 个断层影响下移 动台阶位置的实测资料进行回归分析得到断层露头 处的台阶落差的大小^[4];郭文兵等根据云盖山煤矿 地表沉陷实测资料,研究了断层对开采沉陷的影响, 发现地表沉陷范围与断层倾角密切相关,并得到用相 应的概率积分法预计参数与角值参数^[5-6];郭迅和戴 君武通过在抚顺矿区实地调研发现多断层影响下 断 层间岩体运动呈现"多米诺骨牌"形式,导致地表出 现反陡坎^[7]。断层存在条件下地表沉降规律为何与 普通地质条件下存在差异 涨玉卓等认为岩层移动角 与断层倾角之间的大小关系对地表沉陷范围起控制 作用,当断层倾角大于岩层移动角时,地表沉降范围 将缩小^[8-9]; 戴华阳利用数值模拟研究发现断层作为 岩体内部弱面存在 对力和能量的传递具有阻断作用 而导致地表非连续变形的发生^[10];张华兴和仲惟林 认为断层在开采影响下产生了离层体 离层体的存在 是影响地表移动变形规律与普通地质条件下存在差 异的主要原因^[11]; 吴侃等也认为开采会造成离层空 间并将断层离层空间视为等效采空区 根据概率积分 法计算了断层影响下的地表移动变形规律^[12]。但以 往关于采动造成断层活化的研究通常将断层简单地

视为弱面而忽略了地应力类型、断层带岩体性质、断 层带岩体是否含水对断层活化的影响,现场实际中断 层通常具有一定的宽度,断层带内岩体裂隙比较发 育^[13]。WILDE和CROOK通过在断层区域安装测斜 仪和气压计发现孔隙水压力对断层活化具有促进作 用^[14]。笔者以断层带岩体内单个原始小裂隙为研究 对象,考虑断层水的影响,通过建立断层带岩体裂隙 损伤发育扩展和断层带岩体滑移力学模型,分析了采 动作用下断层损伤活化机理及其影响因素。

断层带岩体裂隙损伤扩展力学模型及影响 因素分析

断层带岩体裂隙是随机分布的 本文以图 1 所示 的断层带岩体长度为 2a 的单个原始微裂隙为研究对 象 对裂隙面进行应力状态分析可知 ,裂隙面所受正 应力 σ_α和剪应力 τ_α^[15]分别为

$$\begin{cases} \sigma_{\alpha} = -\left(\frac{\sigma_{x} + \sigma_{y}}{2} + \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2}\cos 2\alpha\right) \\ \tau_{\alpha} = \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2}\sin 2\alpha \end{cases}$$
(1)

其中 σ_x 为断层带岩体的水平应力 ,MPa; σ_y 为断层带 岩体的垂直应力 ,MPa; α 为裂隙与垂直方向的夹 角 (°)。由于断裂力学中规定正压为负 ,而岩石力 学中规定正相反 ,故式(1)前面冠以负号。

当断层带岩体中含水时,断层水在重力作用下将 产生一定的孔隙压力,假设断层水孔隙压力为 p,断 层面正应力和剪应力为

$$\begin{cases} \sigma = -\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\alpha - p\right) \\ \tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\sin 2\alpha \end{cases}$$
(2)



图1 断层带岩体单裂隙力学模型

Fig. 1 Mechanic model of single fracture in fault zone

由式(2)可知,裂隙面上既受正应力作用,又受 剪应力作用,裂隙扩展规律应属于Ⅰ-Ⅱ型。针对于 裂隙Ⅰ-Ⅱ型复合扩展,裂隙尖端应力强度因子¹¹⁰为

$$\begin{cases} K_{1} = \sigma \sqrt{\pi a} = -\left(\frac{\sigma_{x} + \sigma_{y}}{2} + \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2}\cos 2\alpha - p\right) \sqrt{\pi a} \\ p \right) \sqrt{\pi a} \\ K_{11} = \tau \sqrt{\pi a} = \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2}\cos 2\alpha \sqrt{\pi a} \end{cases}$$

(3)

式中 K_{I} 为 I 型裂隙扩展时裂隙尖端应力强度因子 ,MPa・m^{1/2}; K_{II} 为 II 型裂隙扩展时裂隙尖端应力强度因子 ,MPa・m^{1/2}。

在断层带岩体水平应力 σ_x 、垂直应力 σ_y 和孔隙水 压力 p 的作用下,当满足一定条件 断层带岩体裂隙扩 展。目前,应用最广泛的岩石起裂准则有:最大周向应 力准则、应变能密度准则、能量释放率准则、最大周向 拉应变断裂准则等^[17] 但最大周向应力准则和能量释 放率准则并未考虑断层带岩体性质对裂隙扩展的影 响 应变能密度准则对受压作用下的断裂预测还需要 实验的进一步验证,最大拉应变断裂准则在压剪I-II复 合型断裂问题中给出的结果与岩石及类岩石材料的实 验结果最为接近^[18]。因此,本文采用最大周向拉应变 断裂准则对断层带岩体进行起裂分析。

以裂纹端点为原点建立极坐标系,如图2所示。 断层带岩体裂隙受到压剪作用时,裂纹尖端应力^[16] 在极坐标系中的表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \left[K_{\rm I} \left(3 - \cos \theta \right) \cos \frac{\theta}{2} + K_{\rm II} \left(3\cos \theta - 1 \right) \sin \frac{\theta}{2} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_{\rm I} \left(1 + \cos \theta \right) - 3K_{\rm II} \sin \theta \right] \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_{\rm I} \sin \theta + K_{\rm II} \left(3\cos \theta - 1 \right) \right] \end{aligned} \right.$$

$$(4)$$

式中 *θ* 为采动作用下断层带岩体裂隙开始扩展时的 开裂角 其范围为-90°~90°。



图 2 裂隙极坐标系

Fig. 2 Polar coordinates of fracture

根据 Hooke 定律可知,在平面应变中,应力和应变^[19]应满足:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_{\theta}) \\ \varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta} - \mu \sigma_r) \\ \gamma_{r\theta} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{r\theta} \end{cases}$$
(5)

式中 E 为断层带岩体的弹性模量 ,MPa; μ 为断层带 岩体的泊松比。

将式(3) (4) 代入式(5) 得到周向应变
$$\varepsilon_{\theta}$$
为

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi rE}} \left[K_{1} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta - 3\mu + \mu \cos \theta) - K_{II} \left(3\cos \frac{\theta}{2} \sin \theta + 3\mu \sin \frac{\theta}{2} \cos \theta - \mu \sin \frac{\theta}{2} \right) \right] = \frac{\sqrt{a}}{2\sqrt{2rE}} \left[\left(\frac{\sigma_{x} + \sigma_{y}}{2} + \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2} \cos 2\alpha - \mu \right) \cos \frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta - 3\mu + \mu \cos \theta) - \frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2} \times \sin 2\alpha \left(3\cos \frac{\theta}{2} \sin \theta + 3\mu \sin \frac{\theta}{2} \cos \theta - \mu \sin \frac{\theta}{2} \right) \right]$$
(6)

根据最大周向拉应变断裂准则可知,当裂隙最大周向拉应变 *ε_{max}达到断层带岩体极限周向应变时*, 断层带岩体裂隙将扩展,即

$$\varepsilon_{\theta \max} \ge \varepsilon_{c}$$
 (7)

式中 ε_{c} 为断层带岩体允许极限周向拉应变。

由式(6) 可知 影响断层带岩体裂隙损伤扩展的 因素主要有断层带岩体水平应力 σ_x 、断层带岩体垂 直应力 σ_y 、断层带岩体弹性模量 E、断层带岩体泊松 比 μ 。

将断层带岩体水平应力 σ_x 与垂直应力 σ_x 的比值

定义为 λ 。当 λ <1 时,假设a=0.01 m,r=0.01 m,r=0.01 m, α =45° E=15 MPa μ =0.25 σ_y =15 MPa $\lambda = \sigma_x/\sigma_y$ = 0.2~1.0 孔隙水压力p=0.5 MPa ,根据式(3) (6) 得到不同 λ 值对应的断层带岩体裂隙的周向应变 ε_{θ} 与裂隙扩展角 θ 的关系 如图 3(a) 所示; 当 λ >1 时, 假设a=0.01 m,r=0.01 m, α =45°,E=15 MPa μ = 0.25 σ_y =15 MPa $\lambda = \sigma_x/\sigma_y$ =1.2~2.0 孔隙水压力 p=0.5 MPa 根据式(3) (6) 得到断层带岩体裂隙的 周向应变 ε_{θ} 与裂隙扩展角 θ 的关系 如图 3(b) 所示。 其中 ε_{θ} >0 表示拉应变 ε_{θ} <0 表示压应变。





由图 3 可知,当断层带岩体水平应力和垂直应力 的比值 λ<1 时,随着 λ 的增加,断层带岩体裂隙最大 周向拉应变越来越小,断层活化的可能性降低;当断 层带岩体水平应力和垂直应力的比值 λ>1 时,随着 λ 的增加,断层带岩体裂隙最大周向拉应变越来越 大,断层活化的可能性增加。

当断层带岩体水平应力和垂直应力的比值 $\lambda < 1$ 时 取 $\lambda = 0.4$,假设 a = 0.01 m ,r = 0.01 m , $\alpha = 45^{\circ}$, E = 15 MPa $\mu = 0.25$ $\sigma_y = 15$ MPa ,孔隙水压力 $p = 0 \sim$ 4 MPa 根据式(3) (6) 得到不同孔隙水压力 p 对应 的断层带岩体裂隙的周向应变 ε_{θ} 与裂隙扩展角 θ 的 关系 ,如图 4(a) 所示; 当断层带岩体水平应力和垂直 应力的比值 $\lambda > 1$ 时 ,取 $\lambda = 1.2$,假设 a = 0.01 m r = 0.01 m α =45° *E*=15 MPa μ =0.25 σ_y =15 MPa 孔 隙水压力 *p*=0~4 MPa 根据式(3) (6) 得到不同孔 隙水压力 *p* 对应的断层带岩体裂隙的周向应变 ε_{θ} 与 裂隙扩展角 θ 的关系 如图 4(b) 所示。



图 4 不同孔隙水压力 p 时裂隙周向应变与扩展角的关系

Fig. 4 Relationship between crack circumferential strain and propagation angle according to different *p* value

由图 4 可知 不论断层带岩体水平应力和垂直应 力的比值 $\lambda < 1$ 还是 $\lambda > 1$,断层带岩体孔隙水压 p 的 增加使断层带岩体裂隙最大周向拉应变增加 ,也就是 说断层水的存在对断层活化具有促进作用。

当断层带岩体水平应力和垂直应力的比值 $\lambda < 1$ 时,取 $\lambda = 0.4$,假设 a = 0.01 m,r = 0.01 m, $\alpha = 45^{\circ}$ $\mu = 0.25$, $\sigma_y = 15$ MPa, 孔隙水压力 p = 0.5 MPa, 断层带岩体弹性模量 $E = 10 \sim 40$ MPa, 根据式 (3) (6)得到断层带岩体不同弹性模量 E 对应的断 层带岩体裂隙的周向应变 ε_{θ} 与裂隙扩展角 θ 的关 系 如图 5(a)所示; 当断层带岩体水平应力和垂直应 力的比值 $\lambda > 1$ 时,取 $\lambda = 1.2$,假设 a = 0.01 m,r = 0.01 m, $\alpha = 45^{\circ}$, $\mu = 0.25$, $\sigma_y = 15$ MPa, 孔隙水压力 p = 0.5 MPa, 断层带岩体弹性模量 $E = 10 \sim 40$ MPa, 根







据式(3) (6) 得到断层带岩体不同弹性模量 E 对应 的断层带岩体裂隙的周向应变 ε_{θ} 与裂隙扩展角 θ 的 关系 如图 5(b) 所示。

由图 5 可知,当断层带岩体水平应力和垂直应力 的比值 $\lambda < 1$ 时,断层带岩体裂隙周向拉应变在 $\theta =$ 90°时取最大值,随着弹性模量 E 的增加,断层带岩 体裂隙最大周向拉应变逐渐减小; 当断层带岩体水平 应力和垂直应力的比值 λ >1 时,断层带岩体裂隙周 向拉应变在 $\theta = -90^{\circ}$ 时取最大值 随着弹性模量 E 的 增加 断层带岩体裂隙最大周向拉应变逐渐减小。也 就是说随着断层带岩体弹性模量的增加 断层活化的 可能性降低。

当断层带岩体水平应力和垂直应力的比值 $\lambda < 1$ 时,取 $\lambda = 0.4$,假设a = 0.01 m,r = 0.01 m, $\alpha = 45^{\circ}$, E=15 MPa $\sigma_x=15$ MPa 孔隙水压力 p=0.5 MPa 断 层带岩体泊松比μ=0.10~0.45,根据式(3),(6)得 到断层带岩体不同泊松比μ对应的断层带岩体裂隙 的周向应变 ε_{θ} 与裂隙扩展角 θ 的关系,如图 6(a) 所

示;当断层带岩体水平应力和垂直应力的比值 $\lambda > 1$ 时 $\mu \lambda = 1.2$,假设 a = 0.01 m,r = 0.01 m, $\alpha = 45^{\circ}$, E=15 MPa σ_v=15 MPa 孔隙水压力 p=0.5 MPa 断 层带岩体泊松比μ=0.1~0.45 根据式(3) (6) 得到 断层带岩体不同泊松比μ对应的断层带岩体裂隙的 周向应变 ε_{θ} 与裂隙扩展角 θ 的关系 如图 6(b) 所示。





Fig. 6 Relationship between crack circumferential strain and propagation angle according to different μ value

由图 6 可知 $\beta \lambda < 1$ 时 断层带岩体裂隙周向拉 应变在 $\theta = 90^{\circ}$ 时取最大值 随着泊松比 μ 的增加 断 层带岩体裂隙最大周向拉应变逐渐增大; $\exists \lambda > 1$ 时, 断层带岩体裂隙最大周向拉应变在 $\theta = -90^{\circ}$ 时取最 大值 随着泊松比 µ 的增加 ,断层带岩体裂隙最大周 向拉应变逐渐增大。也就是说随着断层带岩体泊松 比的增加 断层活化的可能性增加。

2 断层带岩体滑移力学模型及影响因素分析

由于断层带岩体强度小于上下盘岩体 在采动作 用下断层带岩体原始微裂隙在断层带中损伤扩展 断 层带岩体原始微裂隙扩展贯通后将形成一条近似平 行于断层面的裂隙面 在采动影响下断层带岩体将沿 着裂隙面向下滑移引起断层露头处地表产生台阶落

23

差。垂直于断层走向作剖面,以位于断层带岩体裂隙 面一侧具有单位厚度的三角形微元体为研究对象,建 立断层带岩体滑移力学模型,如图7所示。



图 7 断层带岩体滑移力学模型

Fig. 7 Mechanical model of fault slipping

在采动造成断层带岩体滑移前,微元体静止,对 微元体沿 x y 方向受力分析可知

$$\begin{cases} F_x = \sigma_x ds \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \tau ds - \sigma_y ds \cos \theta_1 \sin \theta_1 = 0\\ F_y = \sigma ds - \sigma_y ds \cos \theta_1 \cos \theta_1 - \sigma_x ds \sin \theta_1 \sin \theta_1 = 0 \end{cases}$$
(8)

式中 ds 为微元体与裂隙面的接触面积; θ_1 为断层倾 角 $(\circ); \sigma \pi$ 为裂隙面另一侧岩体对微元体的正应 力和剪应力 MPa_o

由式(8) 可得裂隙面正应力
$$\sigma$$
 和剪应力 τ 为
$$\begin{cases} \tau = (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \sigma = \sigma_x \sin^2 \theta_1 + \sigma_y \cos^2 \theta_1 \end{cases}$$
(9)

工作面开采对煤岩体原始应力平衡有扰动作用, 当工作面临近断层地质构造时,采掘活动引起的应力 平衡状态改变将在断层带岩体裂隙面产生库仑应力 $f(\sigma, \pi)$,当裂隙面上库仑应力达到断层带岩体极限 抗剪强度 τ_c 时,断层带岩体将发生相对摩擦错动导 致断层带岩体滑移^[20]。即断层带岩体发生相对摩擦 错动时,裂隙面库仑应力 $f(\sigma, \pi)$ 需满足:

$$\begin{cases} f(\sigma \ \pi) = |\tau| - \nu \sigma > \tau_c \\ \tau_c = \sigma \tan \varphi + c \end{cases}$$
(10)

式中 ν 为裂隙面摩擦因数; τ_c 为断层带岩体极限抗 剪强度 ,MPa; φ 为断层带岩体内摩擦角 (°); c 为断 层带岩体黏聚力 ,MPa。

将式(9) 代入式(10) 得到

$$f(\sigma \pi) = |(\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta_1 \cos \theta_1| - \nu(\sin^2 \theta_1 \sigma_x + \cos^2 \theta_1 \sigma_y) =$$

 $\left[(\sin \theta_1 \cos \theta_1 - \nu \sin^2 \theta_1) \sigma_x - (\sin \theta_1 \cos \theta_1 + \right]$

$$\begin{cases} \nu \cos^2 \theta_1 \right) \sigma_y & \sigma_x \ge \sigma_y \\ (\sin \theta_1 \cos \theta_1 - \nu \cos^2 \theta_1) \sigma_y - (\sin \theta_1 \cos \theta_1 + (11)) \\ \nu \sin^2 \theta_1 \right) \sigma_x & \sigma_x < \sigma_y \end{cases}$$

将式(11) 看成 θ_1 的函数 对其求导 ,当 df/d θ_1 =0

时 得到裂隙面库伦应力 $f(\sigma, r)$ 最大 即

$$\tan 2\theta_1 = \begin{cases} \frac{1}{\nu} & \sigma_x \ge \sigma_y \\ -\frac{1}{\nu} & \sigma_x < \sigma_y \end{cases}$$
(12)

当 $\sigma_x < \sigma_y$ 时 ,令 $\sigma_x = 15$ MPa $\sigma_y = 30$ MPa ,取 ν 分 别为 0.1 ρ .2 ρ .3 ρ .4 根据式(11) 得到不同裂隙面 摩擦因数对应的裂隙面库伦应力 $f(\sigma, \pi)$ 与断层倾角 θ_1 之间的关系 如图 8(a) 所示。当 $\sigma_x > \sigma_y$ 时 ,令 $\sigma_x =$ 30 MPa $\sigma_y = 15$ MPa ,取 ν 分别为 0.1 ρ .2 ρ .3 ρ .4 , 根据式(11) 得到不同裂隙面摩擦因数对应的裂隙面 库伦应力 $f(\sigma, \pi)$ 与断层倾角 θ_1 之间的关系 ,如图 8(b) 所示。



图 8 不同 ν 时采动造成的裂隙面库伦应力 ƒ(σ π) 与 断层倾角 θ₁之间关系

Fig. 8 Relationship between coulomb stress $f(\sigma, \pi)$ and fault angle according different ν value

由图 8 可知,随着裂隙面摩擦因数 ν 的增加,采 动造成的裂隙面库伦应力 f(σπ)越小,断层带岩体 越不容易沿裂隙面滑移,断层活化的可能性越小;当 断层带岩体含水时,水具有润滑作用,水的存在将降 低断层带岩体裂隙面之间的摩擦因数,对断层滑移具 有促进作用,增加了断层活化的可能性。 当 $\sigma_x \leq \sigma_y$ 时,令 $\sigma_y = 15$ MPa $\nu = 0.2$,取 $\lambda = \sigma_x / \sigma_y = 0.2$ 0.4 0.6 0.8 ,1.0 ,根据式(11) 得到不同 λ 值对应的裂隙面库伦应力 $f(\sigma, \pi)$ 与断层倾角 θ_1 之间 的关系,如图 9(a)所示。当 $\sigma_x > \sigma_y$ 时,令 $\sigma_y = 15$ MPa $\nu = 0.2$,取 $\lambda = \sigma_x / \sigma_y = 1.2$,1.4,1.6,1.8,根 据式(11) 得到不同 λ 值对应的裂隙面库伦应力 $f(\sigma, \tau)$ 与断层倾角 θ_1 之间的关系,如图 9(b)所示。



图 9 不同 λ 值时采动造成的裂隙面库伦应力 f(σ π) 与 断层倾角 θ₁之间关系

Fig. 9 Relationship between coulomb stress $f(\sigma \tau)$ and fault angle according different λ value

由图 9 可知 ,当 $\lambda \leq 1$ 时 ,随着 λ 的增加 ,采动造 成的裂隙面库伦应力 $f(\sigma, \pi)$ 逐渐减小 ,断层带岩体 越不容易沿着裂隙面滑移 ,断层活化的可能性越小; 当 $\lambda > 1$ 时 ,随着 λ 的增加 ,采动造成的裂隙面库伦应 力 $f(\sigma, \pi)$ 逐渐增加 ,断层带岩体越容易沿着裂隙面 滑移 ,断层越容易活化;随着断层带岩体内摩擦角 φ 和黏聚力 c 的增加 ,断层带岩体极限抗剪强度 τ_c 增 加 ,断层带岩体越不容易沿裂隙面滑移 ,断层活化的 可能性越小。

由图 8 9 可知 随着断层倾角 θ₁的增加,采动造 成的裂隙面库伦应力 f(σ, π) 先增加后降低,断层带 岩体沿着裂隙面的滑移量先增加后减小,但科瓦尔锲 克指出地表在断层露头的台阶落差为不含断层时该 处位移与岩块滑动位移之和^[21],以断层露头处台阶 落差的大小为断层活化程度判别标准,当断层倾角增 加时,断层露头处越靠近工作面,不含断层时开采造 成的该处位移急剧增加,断层露头处的地表台阶落差 也将更大,也就是说随着断层倾角的增加,断层活化 的可能性增加。

综上分析可知 影响断层活化的主要因素有断层 带岩体水平应力和垂直应力的比值 $\lambda = \sigma_x / \sigma_x$ 、断层 带岩体内部孔隙水压力 p、断层带岩体弹性模量 E、断 层带岩体泊松比 μ 、裂隙面摩擦因数 ν 、断层倾角 θ_1 、 断层带岩体内摩擦角 φ 、断层带岩体黏聚力 c 等。断 层带岩体水平应力和垂直应力的比值 $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ 对断 层活化的影响: 当 $\lambda < 1$ 时 随着 λ 的增加 ,不仅断层 带岩体裂隙发育扩展的难度增加 而且断层带岩体沿 着裂隙面滑移的可能性也降低 断层活化的可能性也 降低; $\exists \lambda > 1$ 时 随着 λ 的增加 断层带岩体裂隙发 育扩展的难度降低 断层带岩体沿着裂隙面滑移的可 能性增加 断层活化的可能性增加。断层带岩体内部 孔隙水压力 p 对断层活化的影响: 随着断层带岩体内 部孔隙水压力 p 的增加 ,断层活化的可能性增加 ,同 时水的存在降低了断层带岩体裂隙面之间的摩擦因 数 对断层活化具有促进作用;断层带岩体弹性模量 E 和泊松比μ对断层活化的影响: 随着断层带岩体弹 性模量的增加 断层活化的可能性降低 随着断层带 岩体泊松比的增加,断层活化的可能性增加;断层带 岩体裂隙面摩擦因数 ν 对断层活化的影响为: 随着断 层带岩体裂隙面摩擦因数的增加 断层活化的可能性 降低; 断层倾角 θ_1 对断层活化的影响: 随着断层倾角 的增加 断层活化的可能性增加; 断层带岩体内摩擦 角 φ、黏聚力 c 对断层活化的影响: 随着断层带岩体 内摩擦角和黏聚力的增加 断层活化的可能性降低。

其中 $p E \mu \nu \theta_1 \varphi c$ 为断层带岩体自身性质, 而断层带岩体水平应力和垂直应力的比值 $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ 主要受原始地应力和断层带岩体采动应力综合影响。 原始地应力包括覆岩重力和构造应力 构造应力的大 小又与断层落差和断层带宽度密切相关^[22-23]; 断层 带岩体采动应力主要受断层与工作面的相对位置关 系、开采煤层厚度、煤层埋藏深度、上覆岩层岩性、采 矿方法以及采空区处理方式等因素影响。鉴于实际 生产中,断层带岩体水平应力 σ_x 和垂直应力 σ_y 不易 测量,而 FLAC^{3D}可以通过内置 FISH 语言编程求取模 型单元中任意点的水平应力和垂直应力,满足研究需 求。现通过 FLAC^{3D}数值模拟来验证以上因素对断层 活化的影响。

3 采动影响下断层活化数值模拟

3.1 数值模型建立

本文数值模型是根据峰峰矿区某矿采矿地质条件而建立的,工作面走向长 600 m,倾斜长 100 m,煤 层平均厚度 5.32 m,平均埋深 770 m,煤层倾角 0° 松 散层厚度 20 m,全部垮落法处理采空区。在工作面 西北部揭露正断层,断层落差 15 m,倾角 70°,断层带 宽度 5.6 m。断层走向近似与工作面倾向平行,留设 断层保护煤柱 50 m,工作面近似垂直于断层走向推 进。断层与工作面的相对位置关系如图 10 所示。

根据工作面附近钻孔资料 工作面上覆岩层及实



图 10 断层与工作面相对位置关系

Fig. 10 Relative position between fault and working face

表 1 工作面上覆岩层及其岩性其参数 Table 1 Parameters of the overburden strata above working face

岩性	厚度/m	内摩擦角/(°)	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
松散层	20	15	0.003 8	0.008 3	0.30	0.002
粉砂岩	250	43	4.30	4.58	6.82	2.35
砂质泥岩	200	42	3.50	3. 56	1.70	2.00
泥岩	150	43	6.61	8.89	11. 23	4.53
粉砂岩	100	43	4.30	4. 58	6.82	2.35
中细砂岩	50	44	0.86	0.81	2.60	1.20
煤层	5.32	20	0.13	0.26	0.70	0.90
底板细砂岩	88	39	6.55	8.39	7.59	1.90
断层带	5.60	15	0.003 8	0.008 3	0.30	0.002

建立模型为 1 328.98 m×300 m×863.32 m(长× 宽×高),考虑到沉陷影响范围,模型四周各留设一定 宽度的保护煤柱 模型除了上边界外全部采用固定约 束 岩体破坏选择 Mohr-coulomb 准则,建立三维地质 模型如图 11 所示。



图 11 工作面三维地质模型

Fig. 11 Three-dimensional geological model of working face

由于断层的存在将产生构造应力场,根据文献 [24]的研究结果,在给模型施加重力场的基础上,在 模型四周施加梯形水平应力场 S_{xx} , S_{yy} 模型内部施加 垂直应力场 S_{z} 代表构造应力场。在模型边界,距离 地表深度为h的某一点的垂直应力 $S_{zz} = \gamma h \gamma$ 为模型 中岩层的平均容重, MN/m³;水平应力 $S_{xx} = S_{yy} =$ $\lambda_1 S_2$ 。整个模型施加的构造应力场如图 12 所示 ,其 中模型前后 2 个面的水平应力场 S_1 未显示。





3.2 λ 对断层活化影响模拟分析

综上分析可知 影响断层带岩体水平应力和垂直 应力的主要有地应力场和断层带岩体采动应力 ,采动 应力又受断层与工作面的相对位置关系、煤层厚度、 煤层埋深、采矿方法、采空区处理方式多因素影响。 鉴于篇幅有限 ,在研究 λ 对断层活化影响时 ,模型完 全按照峰峰矿区某矿采矿地质条件而建 ,断层与工作 面的相对位置关系、煤层厚度、煤层埋深、采矿方法、 采空区处理方式都是固定的 ,只研究构造应力场改变 对断层活化的影响。按照图 12 对模型施加构造应力

场 在工作面开采后,利用 FLAC^{3D}内置 FISH 语言编 制求取距断层露头不同垂直深度处的断层带岩体水 平应力 $\sigma_x \sigma_y$ 程序求得 $\lambda_1 = 0.6$, 1.2 时距离断层露头 垂直深度为 0 50, 100, 150, 250, 300 m 处的断层带岩 体水平应力 $\sigma_x \sigma_y$ 见表 2。

- 表 2 λ₁=0.6 ,1.2 时工作面开采后距离断层露头不同 垂直深度处断层带岩体水平、垂直应力
- Table 2Horizontal and vertical stress at different vertical
depths from fault outcrop caused by mining when

 $\lambda_1 = 0.6$ and 1.2

	1				
距离断层露头	$\lambda_1 = 0.6$		$\lambda_1 = 1.2$		
的垂直深度/m	σ_x /MPa	σ_y/MPa	σ_x /MPa	σ_y/MPa	
0	-0.247	-0. 581	-0. 628	-0. 591	
50	-1.027	-1.833	-2.141	-1.848	
100	-1.783	-3.072	-3.626	-3.091	
150	-2.600	-4. 427	-5.243	-4.448	
200	-3.261	-5.532	-6.560	-5.557	
250	-3.983	-6.767	-8.026	-6. 798	
300	-4.753	-8.033	-9.543	-8.064	

根据表 2 绘制工作面开采后 $\lambda_1 = 0.6$ 或 1.2 时 断层带岩体水平应力 σ_x 、垂直应力 σ_y 与距断层露头 垂直深度之间的关系 加图 13 所示。



图 13 λ₁=0.6 或 1.2 时断层带岩体水平和垂直应力与距离 断层露头垂直深度之间关系

Fig. 13 Relationship between horizontal and vertical stress and depth from fault outcrop when $\lambda_1 = 0.6$ and $\lambda_1 = 1.2$

由图 13 可知 ,无论施加的构造应力场 $S_{xx}/S_{x} = \lambda_{1} > 1$ 还是 $\lambda_{1} < 1$,工作面开采后断层带岩体水平应力 σ_{x} 和垂直应力 σ_{y} 随距离断层露头垂直深度的增加而 线性增加 ,这与文献 [25]通过水压致裂法测得的断 层带岩体水平应力和垂直应力随深度增加而线性增 加的结果一致。同时 ,由图 13 可以计算出当施加的 构造应力场 $S_{xx}/S_{yy} = \lambda_{1} = 0.6$ 时 ,工作面开采后断层 带岩体水平应力 σ_{x} 与垂直应力 σ_{y} 的比值 λ 约为 0.6; 当施加的构造应力场 $S_{xx}/S_{yy} = \lambda_{1} = 1.2$ 时 ,工作 面开采后断层带岩体水平应力 σ_x 与垂直应力 σ_y 的比值 λ 约为 1.2。



图 14 不同 λ 值时断层影响下的地表下沉曲线 Fig. 14 Earth surface subsidence curve influenced by

fault according to different λ value

由图 14 可知,当 λ <1 时,随着 λ 的增加,地表在 断层露头处的台阶落差越来越小,这说明当 λ <1 时, 随着 λ 的增加,断层越不容易活化,验证了理论的正 确性; 当 λ >1 时,随着 λ 的增加,地表在断层露头处 的台阶落差无明显变化,但地表最大下沉值越来越偏 向断层。根据文献[26]的研究结果可知,当断层影 响下的地表偏态下沉越明显,断层活化程度越高,这 也说明当 λ >1 时,随着 λ 的增加,断层越容易活化, 验证了理论的正确性。

3.3 p 对断层活化影响分析

为了研究断层带岩体含水情况对断层活化的影响 在图 11 所示的断层带岩体中注水 ,分别取断层带

岩体和其余层状岩体的渗透率为 1.02×10^{-10} m², 1.02×10⁻¹² m²;水的密度为 1 000 kg/m³;水的体积模 量为 0.1 GPa^[27]。采用固液耦合模式分析断层带岩 体含水情况对断层带岩体损伤活化的影响。根据模 拟结果得到断层带岩体水平应力 σ_x 与垂直应力 σ_y 的 比值 λ = 0.6, 1.2 时,断层带岩体不同含水情况下的 地表下沉曲线如图 15 所示。



图 15 断层带岩体不同含水情况下的地表下沉曲线

Fig. 15 Earth surface subsidence curves influenced by fault when there is water or not

由图(15)可知,无论 λ>1 还是 λ<1,当断层带岩 体含水时,地表在断层露头处的台阶下沉将更明显, 这说明断层带岩体含水对断层活化具有促进作用。 因为水的存在不仅降低了断层带岩体之间的摩擦阻 力、断层带岩体抗剪强度和断层带岩体的体积模量和 剪切模量,同时水在重力的作用下还会产生一定的压 力,对断层带岩体微裂隙具有扩容作用^[28],验证了理 论的正确性。

3.4 E µ 对断层活化影响分析

为了研究断层带岩体弹性模量变化对断层活化 的影响,对图 11 中的断层带岩体弹性模量分别取值 为 10 ,15 20 25 ,30 ,35 ,40 MPa ,当 λ = 0.6 或 1.2 时 , 断层影响下的地表下沉曲线如图 16 所示; 对图 11 中 的断层带岩体泊松比分别取值为 0.1 ρ .2 ρ .3 ρ .4 , 当 λ = 0.6 或 1.2 时 ,断层影响下的地表下沉曲线如 图 17 所示。



由图 16 可知 ,无论 λ > 1 还是 λ < 1 ,随着断层带 岩体弹性模量的增加 ,地表在断层露头处的台阶下沉 减小 ,说明随着断层带岩体弹性模量的增加 ,断层活 化的可能性降低 ,验证了理论的正确性; 由图 17 可 知 ,无论 λ > 1 还是 λ < 1 随着断层带岩体泊松比的增 加 地表在断层露头处的台阶下沉值逐渐增大 ,说明 随着断层带岩体泊松比的增加 ,断层活化的可能性增 加 ,验证了理论的正确性。

3.5 *θ*₁对断层活化影响分析

为了研究断层倾角对断层活化的影响,对图 11 中模型施加构造应力场 λ₁=1.2 ,断层倾角分别采用 50° ,60° ,70° ,80° ,断层影响下的地表下沉曲线如图 18 所示。

由图 18 可知 随着断层倾角的增加 ,地表在断层 露头处的台阶落差越大 ,断层活化的可能性增加 ,验 证了理论的正确性。

3.6 $c \varphi$ 对断层活化影响

为了研究断层带岩体黏聚力和内摩擦角变化对 断层活化的影响,对图 11 中的断层带岩体黏聚力分 别取值为 0.3 MPa ,30 Pa ,当 λ = 0.6 或 1.2 时,断层 影响下的地表下沉曲线如图 19 所示; 对图 11 中的断





Fig. 18 Surface subsidence curves of different fault angle 层带岩体内摩擦角分别取值为 15° 5° , 当 $\lambda = 0.6$ 或 1.2 时 断层影响下的地表下沉曲线如图 20 所示。

由图 19 可知 ,无论 λ > 1 还是 λ < 1 ,随着断层带 岩体黏聚力的增加 ,地表在断层露头处的台阶下沉减 小 ,说明随着断层带岩体黏聚力的增加 ,断层活化的 可能性降低 ,验证了理论的正确性; 由图 20 可知 ,无 论 λ > 1 还是 λ < 1 ,随着断层带岩体内摩擦角的增加 , 地表在断层露头处的台阶下沉值逐渐减小 ,说明随着 断层带岩体内摩擦角的增加 ,断层活化的可能性降 低 ,验证了理论的正确性。



图 19 断层带岩体不同黏聚力下的地表下沉曲线





图 20 断层带岩体不同内摩擦角下的地表下沉曲线

Fig. 20 Earth surface subsidence curves influenced by fault according to different φ value

4 结 论

(1)断层活化是采动造成断层带岩体裂隙损伤 发育后 断层带岩体沿着裂隙面滑移的结果 将断层 带岩体性质考虑在内 通过理论推导建立了断层带岩 体裂隙损伤发育力学模型和断层带岩体滑移力学模 型。

(2)根据建立的断层带岩体裂隙损伤发育力学 模型和断层带岩体滑移力学模型得到影响断层活化 的主要因素有断层带岩体水平应力和垂直应力的比 值λ、断层带岩体是否含水、断层带岩体弹性模量 E、 断层带岩体泊松比μ、断层倾角θ₁、断层带岩体内摩 擦角φ、断层带岩体黏聚力 c 等。

(3) 主要因素对断层活化的影响: 当 $\lambda < 1$ 时,随 着 λ 的增加断层活化的可能性降低, 当 $\lambda > 1$ 时,随着 λ 的增加断层活化的可能性增加; 当断层带岩体含水 时,水的存在对断层活化具有促进作用; 随着断层带 岩体弹性模量 *E* 的增加,断层活化的可能性降低; 随 着断层带岩体泊松比 μ 的增加,断层活化的可能性增 加; 随着断层倾角 θ_1 的增加,断层活化的可能性增 加; 随着断层带岩体内摩擦角 φ 的增加,断层活化的 可能性降低; 随着断层带岩体粘聚力 *c* 的增加,断层 活化的可能性降低。

参考文献(References):

- [1] 李志华, 窦林名 陈国祥, 等.采动影响下断层冲击矿压危险性研究[J].中国矿业大学学报 2010 39(4):490-495 545.
 LI Zhihua DOU Linming CHEN Guoxiang et al. The risk of fault induced rockburst during mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2010 39(4):490-495 545.
- [2] 朱光丽 涨文泉,涨贵彬,等.采动诱发断层活化导水试验研究
 [J].岩土力学 2017 38(11): 3163-3172.
 ZHU Guangli ZHANG Wenquan ZHANG Guibin et al. Experimental study on fault activation conducting water inrush [J]. Rock and Soil Mechanics 2017 38(11): 3163-3172.
- [3] NELSON W J.Faults and their effect on coal mining in Illinois [J]. Champaign ILL Illinois State Geological Survey ,1981 523: 1-48.
- [4] 煤炭科学研究院北京开采研究所.煤矿地表移动与覆岩破坏规 律及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1981.
- [5] 郭文兵,邓喀中,白云峰.受断层影响地表移动规律的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版) 2002 21(6):713-715. GUO Wenbing, DENG Kazhong, BAI Yunfeng. Study on laws of ground surface movements influenced by fault[J].Journal of Liaoning Technology and University(Natural Science), 2002,21(6): 713-715.
- [6] 郭文兵.断层影响下地表裂缝发育范围及特征分析[J].矿业安 全与环保 2000 27(2):25-27.

GUO Wenbing.Surface creature scope and characteristics influenced by fault [J]. Mining Safety & Environmental Protection , 2000 ,

27(2):25-27.

[7] 郭迅 戴君武.采煤沉陷与断层相互作用引起地表建筑破坏特点 分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2006,25(6): 851-854.

GUO Xun ,DAI Junwu.Analysis of building damage caused by interaction between faults and coal mining subsidence [J].Journal of Liaoning Technology and University 2006 25(6):851-854.

- [8] 张玉卓,仲惟林,姚建国.断层影响下地表移动规律的统计和数 值模拟研究[J].煤炭学报,1989,13(1):23-31. ZHANG Yuzhuo,ZHONG Weilin,YAO Jianguo. Study on surface movement influenced by faults using methods of statistics and numerical simulation[J].Journal of China Coal Society,1989, 13(1):23-31.
- [9] 张玉卓,仲惟林,姚建国.岩层移动的位错理论解及边界元法计 算[J].煤炭学报,1987,11(2):21-31.

ZHANG Yuzhuo ZHONG Weilin ,YAO Jianguo. Theoretical solution of dislocation and boundary element method for studying strata movement[J].Journal of China Coal Society ,1987 ,11(2):21-31.

[10] 戴华阳.地表非连续变形机理与计算方法研究[J].煤炭学报, 1995 20(6):614-618.

DAI Huayang. Mechanism and calculation of surface discontinuous deformation [J]. Journal of China Coal Society ,1995 ,20(6): 614–618.

[11] 张华兴 仲惟林.受断层影响的地表移动计算[J].煤炭学报, 1995 20(2):163-166.

> ZHANG Huaxing ZHONG Weilin.Calculation of surface movement induced by fault[J].Journal of China Coal Society ,1995 ,20(2) : 163-166.

- [12] 吴侃 蔡来良 陈冉丽.断层影响下开采沉陷预计研究[J].湖南 科技大学学报(自然科学版) 2008 23(4):10-13.
 WU Kan ,CAI Lailiang ,CHEN Ranli.Study of mining subsidence pr ediction with the influence of fault[J].Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition) 2008 23(4): 10-13.
- [13] 孟召平 彭苏萍 黎洪.正断层附近煤的物理力学性质变化及其 对矿压分布的影响[J].煤炭学报 2001 26(6):561-566. MENG Zhaoping PENG Suping LI Hong.Influence of normal faults on the physical and mechanical properties of coal and the distribution of underground pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2001 26(6):561-566.
- [14] WILDE P ,M ,CROOK J ,M. The significance of abnormal ground movements due to deep coal mining and their effects on large scale surface developments at Warrington New Town [A]. In Proc. Conf.Ground movements and structures [C].Cardiff: UWIST ,1984: 240-247.
- [15] 刘鸿文.材料力学[M].北京: 高等教育出版社 2010.
- [16] 郦正能.应用断裂力学[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2012.
- [17] 邓华锋,李建林,刘杰,等.考虑裂隙水压力的岩体压剪裂纹扩展规律研究[J].岩土力学 2011 32(S1):297-302. DENG Huafeng,LI Jianlin,LIU Jie,et al.Research on propagation of compression shear fracture in rocks considering fissure water pressure[J].Rock and Soil Mechanics 2011,32(S1):297-302.

- [18] 冯彦军 康红普·受压脆性岩石 I II 型复合裂纹水力压裂研究
 [J].煤炭学报 2013 38(2): 226-232.
 FENG Yanjun, KANG Hongpu. The initiation of I II mixed mode crack subjected to hydraulic pressure in brittle rock under compression [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(2): 226-232.
- [19] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社 2016.
- [20] 赵毅鑫,王浩,卢志国,等.开采扰动下断层面库仑应力及诱发 矿震时空演化特征[J].煤炭学报 2018 A3(2): 340-347. ZHAO Yixin, WANG Hao,LU Zhiguo et al.Characteristics of tremor time-space evolution and Coulomb stress distribution along the fault during workface excavation [J].Journal of China Coal Society, 2018 A3(2): 340-347.
- [21] 吴侃,葛家新,王丁玲,等.开采沉陷预计一体化方法[M].徐 州:中国矿业大学出版社,1998.
- [22] 戴俊生,王霞田,季宗镇,等.高邮凹陷南断阶东部阜宁期构造 应力场及其对断层的控制作用[J].中国石油大学学报(自然 科学版) 2011,35(2):1-5,19.

DAI Junsheng ,WANG Xiatian JI Zhongzhen ,et al.Structural stress field of Funing sedimentary period and its control on faults in the east south fault terrace in Gaoyou sag[J].Journal of China University of Petroleum(Natural Science) 2011 ,35(2): 1–5 ,19.

[23] 孙宗颀 涨景和.地应力在地质断层构造发生前后的变化[J]. 岩石力学与工程学报 2004 23(23): 3964-3969.

SUN Zhongxin ZHANG Jinghe. Variation of in-situ stresses before and after occurrence of geologic fault structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004 23(23): 3964-3969.

- [24] 焦建康, 冯友良, 王志鹏.断层构造区应力对煤与瓦斯突出的影响[J].煤矿开采 2015 20(4):5-8 A2.
 JIAO Jiankang, FENG Youliang, WANG Zhipeng. Influence of fault tectonic stress on coal and methane Bursting[J].Coal Mining Technology 2015 20(4):5-8 A2.
- [25] 郭喜峰 宴鄂川,尹建民.断层影响带地应力特征及稳定性验证
 [J].现代隧道技术 2013 50(3):46-58.
 GUO Xifeng,YAN Echuan,YIN Jianmin.Characteristics of stress in fault influenced zone and vertified by projects [J].Modern Tunne-ling Technology 2013 50(3):46-58.
- [26] 于秋鸽,张华兴,邓伟男,等.采动影响下断层面离层空间产生 及其对开采空间传递增大效应研究[J].煤炭学报,2018, 43(12):3286-3292.

YU Qiuge ZHANG Huaxing ,DENG Weinan ,et al. Analysis of fault separation generation and its effect on mining zone transfering [J]. Journal of China Coal Society 2018 A3(12): 3286-3292.

- [27] 陈育民.FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:水利水电 出版社 2009.
- [28] 蒋建平,章杨松,阎长虹,等.地下工程中岩移的断层效应探讨 [J].岩石力学与工程学报 2002 21(8):1257-1262. JIANG Jianping ,ZHANG Yangsong ,YAN Changhong ,et al. Study on strata displacement under fault effect in underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002 ,21(8):1257-1262.