

DOI: 10.11779/CJGE202110010

考虑主应力轴偏转影响的远场拱壳围岩压力拱效应表征

赵雁海^{1,2}, 俞 缙^{*2}, 周晨华¹, 赵 凯¹, 肖怀广³

(1. 东北电力大学建筑工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;

3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 拱效应是开挖区周围岩土体压力迁移及重分布的综合表现, 广泛存在于矿山地下工程自承载区围岩。针对采场覆岩断裂拱外部存在远场拱壳结构的实际特点, 基于 Terzaghi 土拱效应原理解析开采卸荷作用下岩层主应力矢量偏转响应特征, 通过讨论主应力轴偏转影响下采场覆岩竖向压力主动释放状态及垂直应力分布特征, 分析远场围岩压力拱关键部位压应力成拱指标。利用 FLAC^{3D}数值软件对采场覆岩主应力矢量偏转成拱规律进行模拟计算, 结果表明: 远场围岩主应力偏转角由初始最大主应力、侧压系数和采动后剪应力增量及主应力差变化率控制, 同一层位覆岩主应力偏转角沿采空区跨中向边界呈递减分布, 悬露岩层垂直应力随主应力偏转角增大而降低, 压力拱拱顶主应力偏转角、主动压力系数及成拱指标峰值大于拱脚区域, 拱脚及拱腰部位升高的垂直应力表现为支承压力。根据解析得出的岩层竖向压力释放力学判据和压应力成拱指标, 表征了主应力轴偏转影响下远场围岩加卸载状态和拱效应演化特征。

关键词: 采动围岩; 主应力; 压力拱; 承载状态; 力学表征

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)10-1842-09

作者简介: 赵雁海(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事地下工程岩体稳定性分析及控制等方面的教学和科研。E-mail: qingtingnba@163.com。

Characterization of pressure arching effect of arch shell surrounding rock considering deviation of principal stress axis

ZHAO Yan-hai^{1,2}, YU Jin², ZHOU Chen-hua¹, ZHAO Kai¹, XIAO Huai-guang³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The arching effect is the comprehensive performance of pressure transference and redistribution of rock and soil mass around the excavated area, which widely exists in the self-bearing surrounding rock of underground mining projects. Aiming at the actual characteristics of the far-field arch shell structure outside the fractured arch of overlying strata in the mining area, the deviation response characteristics of the principal stress vector of the rock strata under the action of mining unloading are analyzed based on the principle of Terzaghi's soil arching effect, and by discussing the active released state of vertical pressure and the vertical stress distribution characteristics of overlying strata under the influence of deviation of the principal stress axis, the arching index of compressive stress of key part of the pressure arch in far-field surrounding rock is proposed. The numerical software FLAC^{3D} is used to simulate and calculate the arching law of deviated principle stress of overlying strata in the mining area, and the results show that the deviation angle of the principal stress in the far-field surrounding rock is controlled by the initial major principal stress, lateral pressure coefficient, shear stress increment and changing rate of principal stress difference after mining; the deviation angle of the principal stress of rock strata decreases from the midspan to both sides of the goaf boundary at the same horizontal position; the vertical stress of the exposed rock strata decreases with the increasing deviation angle of the principal stress; the deviation angle of the principal stress, active pressure coefficient and peak value of arching index at the arch top are greater than those in the arch foot region; and the rising vertical stress in the arch foot and arch waist behaves as the bearing pressure. According to the derived mechanical criterion for releasing state of the vertical pressure in rock strata and the arching index of compressive stress, the loading and unloading states of the far-field surrounding rock and the evolution characteristics of pressure arching effect under the influence of deviation of the principal stress axis are characterized.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474188, 51774112, 51874144);
东北电力大学博士科研启动基金项目(BSJXM-2019108)

收稿日期: 2020-12-25

*通信作者(E-mail: bugyu0717@163.com)

Key words: mining surrounding rock; principal stress; pressure arch; load bearing state; mechanical characterization

0 引言

采场覆岩空间结构稳定性及采动应力演化规律是控制煤矿灾害的关键理论问题^[1], 近场覆岩断裂拱和远场拱壳围岩构成了采动岩层结构, 矿山压力显现直接受断裂拱内岩层运移影响, 断裂边界外部围岩承担了上覆岩层自重和断裂岩梁传递的压力并具有拱结构特点^[2], 采场覆岩断裂拱和外部拱壳形成的“双拱”现象是岩体自承载特性及压力成拱效应的力学表现。拱效应广泛存在于矿山、隧道及地下洞室工程领域, 作为岩土力学的经典问题一直以来都是研究热点, 并广泛应用于采掘工程围岩承载性能调控及支护结构设计等工程实践。

自普氏塌落拱理论和采场覆岩“压力拱假说”被提出后^[3], 采动岩体破裂区边缘的拱状特征及其力学成因被广泛关注。地下煤层开采后暴露覆岩自承压应力向两侧未开采区岩层转移, 进而在远场高位岩层和两侧围岩内形成高应力集中区域, 称之为采动围岩压力拱^[4]。宋宏伟等^[5]提出煤层开采引起围岩切向应力集中, 形成的围岩压力拱承担了上覆岩层重力。谢广祥^[6]通过数值模拟研究发现采场覆岩压力拱演化是煤层开采过程中围岩高应力的动力平衡过程。史红等^[7]基于采场覆岩空间结构理论观点, 将采场覆岩分为不同拱脚的多层承载拱结构。杨振国等^[8]提出当压力拱扩展至采场覆岩上位关键层时, 会引起压力拱整体形态改变。对于压力拱边界位置及力源存在不同研究观点, Huang 等^[9]认为压力拱内边界为地下工程顶板, 外边界由顶板跨中应力方向发生转变的点来确定。梁晓丹等^[10]认为围岩岩性和水平应力对压力拱范围有很大影响。Wang 等^[11]将零拉应力曲线作为压力拱内边界, 认为压力拱内边界下方为拉伸状态裂隙岩体。目前对压力拱作用位置表征的研究集中于应力量值的变化, 压力拱关键部位形态仍缺少统一的划分依据, 对于拱壳围岩压力拱的表征方法需进一步分析。

Terzaghi 通过活动门试验证明拱效应是土体抵抗不均匀变形过程中的竖向压力转移及重分布的结果, 天然应力状态下土体的竖向剪应力增加造成主应力轴方向产生偏转^[12], 主轴偏转后土层自重及外部荷载在成拱路径内传递。主应力轴旋转理论也被应用于隧道上覆土压力及支护压力计算^[13-14]、不完全土拱效应分析和地基应力修正计算^[15]。采空区远场围岩具有明显的拱壳结构特征, 但采场围岩不同于隧道和洞室等小断面开挖工程, 煤层持续采动使得覆岩主应力轴经历了动态偏转过程^[16], 主应力轴偏转影响下岩层应力

传递路径及承载区随工作面推进而不断移动, 造成采动岩层形成压力释放区及支承压力作用区。对于采动引起的岩层垂直应力重分布现象, Rezaei 等基于应变能平衡原理对暴露覆岩垂直应力降低区高度和支承压力区应力集中系数分布规律进行了解析^[17]。Basarir 等^[18]利用 FLAC^{3D} 数值模拟计算分析了典型厚煤层采场覆岩垂直应力三维分布规律及其随工作面推进产生的变化特征。Xue 等^[19]考虑岩层塑性区支承压力分布的不连续性, 通过室内试验及数值模拟分析了工作面前方弹、塑性区垂直应力分布特征及损伤对非连续支承压力的影响。承载拱的实质是主应力方向偏转后是围岩中高应力区域形成的空间力学结构^[20], 采场覆岩“拱壳”结构力学模型被应用于分析岩层压力拱形成过程中矿压显现特征和压力影响范围^[21-23], 王家臣等研究发现主应力旋转造成围岩承载能力降低并驱动围岩破坏, 进而引起支承压力峰值位置动态迁移^[24]。

考虑主应力轴偏转影响下采动岩层产生拱效应并引起支承压力迁移演化, 本文基于 Terzaghi 土拱效应原理, 结合采掘扰动下岩层主应力轴动态偏转特性, 分析覆岩不同位置主应力矢量方位变化特征, 推导求解主应力差变化率、竖向剪应力与主应力偏转角的力学关系式, 讨论了主应力轴偏转角对采动覆岩竖向压力建立及释放状态的影响。为表征采动区远场拱壳结构围岩压力拱效应, 提出了考虑主应力偏转影响的采动围岩压力成拱表征指标。通过对围岩主应力矢量偏转角及拱效应表征指标的模拟计算, 验证分析了远场围岩压力拱关键部位形态特征及回采距离的影响。

1 近水平煤层采动远场拱壳围岩支承压力分布规律

随着煤层不断地被采出, 原来作用于煤层上的覆岩重力失去载体, 采场暴露顶板岩层承载区发生变化, 根据采动覆岩内、外应力场理论和“双拱结构”力学模型^[1-2], 裂断拱外部缓沉带岩层及地表松散层重力作用于采空区两侧远场围岩, 近场断裂覆岩所受荷载转移至未开采区岩层, 围岩承担载荷增大并造成采场周围煤岩层应力重新分布。覆岩荷载在拱形传递路径内产生应力集中, 各岩层采动应力升高区形成压力拱(见图 1)。

工作面前方煤岩体经历了从原岩应力到轴向应力($\sigma_1 - \sigma_3$)升高且围压 σ_3 递减的力学过程, 支承压力表示了采动煤岩体所处力学环境^[25]。煤岩层上支承压力为拱效应的作用结果, 根据传递岩梁理论中支承压力

演化规律^[26], 相对稳定状态的各层覆岩传递至同一位
置 x 处弹性煤岩上的支承压力 σ_z 可表示

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i + \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i L_i C_i^x , \quad (1)$$

式中, n 为采场覆岩层数, C_i^x 为各岩层传递至该处岩重的比例, h_i , γ_i 及 L_i 分别为各岩层的厚度、重度和悬跨度。

若令原岩应力 $\sigma_z^0 = \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i$, 可利用应力集中系

数 K_v 表示煤层采动后围岩支承压力变化程度, 即

$$\sigma_z = (1 + L_i C_i^x) \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i = K_v \sigma_z^0 , \quad (2)$$

式中, K_v 为应力集中系数, $K_v = 1 + L_i C_i^x$ 。

开采实践表明采场上覆岩层在硬岩层的控制作用下分段逐步垮落形成“拱壳”大结构, 覆岩拱壳结构影响着工作面前、后方支承压力峰值及分布范围, 该结构是远场围岩压力引起岩石材料变形破坏并形成拱状破裂边界的结果, 压力拱的拱脚及拱腰等部位升高的垂直应力表现为各层位覆岩支承压力。

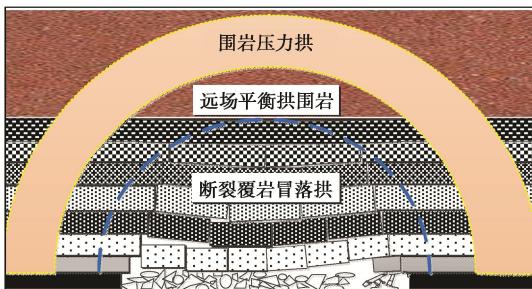


图 1 采场覆岩断裂拱及外部拱壳结构

Fig. 1 Fractured arch and arch shell structure of overlying strata in mining area

2 远场拱壳结构围岩压应力集中成拱机制

2.1 开采扰动下主应力矢量偏转响应特征

Terzaghi 利用活动门试验证明了开挖卸荷区岩土体内存在拱效应^[27], 岩石内部质点的相对运动使原最大、最小主应力作用面上产生剪应力增量, 造成主应力轴方向偏转, 松动岩体压应力转移并重新分布。煤层开采后基本顶岩层直接受到卸荷作用影响, 覆岩压应力释放及转移影响下顶板岩层发生挠曲变形, 使得采场围岩传力路径方向发生改变。

以初始应力状态下地层最大主应力 σ_1^0 和最小主应力 σ_3^0 分别位于垂直方向和水平方向为例, 如图 2 所示, 松动岩体 B 点处垂直应力 $\sigma_v < \sigma_v^0$, 设主应力 σ_1 偏转角为 α , 根据该点应力莫尔圆的几何关系, 当

$\sigma_v > \sigma_h$ 时, $\alpha = \theta$, 岩石竖向剪应力 τ_v 为

$$\tau_v = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta , \quad (3)$$

开挖后围岩最大、最小主应力差值 $\sigma_1 - \sigma_3$ 影响着岩石最大剪应力及弹塑性状态, 主应力差也被用于表征岩体起裂应力阈值^[28]和采动应力扰动程度^[29], 假设原岩应力状态下 $\sigma_1^0 = \sigma_v^0$, $\sigma_3^0 = \sigma_h^0 = K_0 \sigma_v^0$, 令 $\sigma_1 - \sigma_3 = D_r (\sigma_1^0 - \sigma_3^0)$, 可得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = D_r \sigma_v^0 (1 - K_0) , \quad (4)$$

式中, D_r 为开挖后围岩主应力差变化率, K_0 为初始侧压系数。

将主应力差关系式代入式(3)可得

$$\tau_v = D_r (1 - K_0) \sigma_v^0 \sin \theta \cos \theta , \quad (5)$$

则主应力轴偏转角 α 可表示为

$$\alpha = \theta = 0.5 \arcsin \frac{2\tau_v}{D_r (1 - K_0) \sigma_v^0} . \quad (6)$$

原岩垂直应力和侧压系数 K_0 由初始地应力决定, 相同埋深下各点初始垂直应力和侧压系数可视为相等, 则岩体主应力轴偏转角由竖直方向剪应力 τ_v 和主应力差变化率 D_r 控制, 根据图 2 中应力莫尔圆变化关系可知, 原岩主应力作用面因开挖卸荷产生剪应力增量, 进而造成应力圆的位置移动和主应力量值及方向变化。针对采动围岩应力路径的研究表明最大主应力方向由垂直方向逐渐向工作面推进方向偏转, 仅利用主应力差判别采动应力扰动状态存在一定局限性^[29]。因此, 考虑剪应力增量对原岩主应力方向变化的影响, 根据原主应力方向上的剪应力增量和主应力差变化率, 可求得围岩不同位置主应力轴偏转角度。

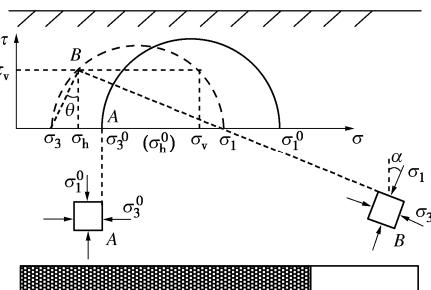


图 2 采场覆岩主应力轴偏转特征

Fig. 2 Deviation characteristics of principal stress axis of overlying strata in mining area

为分析主应力轴不同偏转角度条件下围岩竖向剪应力分布特征, 将主应力差变化率和初始侧压系数假设为固定值, 以采动围岩主应力 σ_1 升高且 σ_3 降低这一典型的变化情况为例, 该情况下应力莫尔圆半径增大且主应力差变大^[29], 所以令主应力差变化率 $D_r=1.5$ 且初始侧压系数 $K_0=0.5$, 如图 3 所示, 根据式(6)计算可得到采空区围岩不同主应力偏转角对应的竖向剪应力 (若主应力轴逆时针偏转, 则偏转角为负值)。

当主应力偏转角 $\alpha < 45^\circ$ 时, 岩层竖向剪应力随着主应力偏转角的增大而增大, 偏转角超过 45° 后竖向剪应力随偏转角增大而降低。已有研究结果表明顶板岩层竖向剪应力由采空区跨中向煤壁位置呈递增变化, 煤壁侧未开采区岩层竖向剪应力逐渐降低, 直至恢复原岩应力^[19]。结合图 3 可知采空区覆岩主应力轴偏转角大于两侧未开采区围岩, 岩层主应力轴偏转角最大值位于跨中位置, 同一层数各点偏转角由跨中向两侧煤壁逐渐降低, 进而造成采动覆岩主应力轴偏转后压应力沿拱状迹线传递。

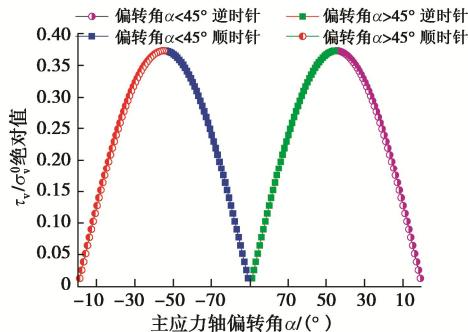


图 3 不同偏转角对应的岩层竖向剪应力分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of vertical shear stress of rock strata corresponding to different deviation angles

2.2 主应力轴偏转影响下岩层垂直应力重分布特征

土拱效应理论提出开挖区上覆土层部分自重传递至周边土体, 产生应力重分布现象^[27], 与抗剪强度较低的砂土材料相比, 悬露岩体在达到临界跨距前存在剪应力低于屈服极限的稳定状态, 不完全拱效应^[15]引发的应力转移和重分布是采动岩体自承载特性发挥的表现, 其结果是采空区顶板岩层垂直应力降低, 而两侧围岩形成应力升高区。根据图 2 中应力莫尔圆的几何关系, 若 $\sigma_v > \sigma_h$, 得到垂直应力 σ_v 表达式如下:

$$\sigma_v = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha, \quad (7)$$

根据式(7)可知, 采动岩层垂直应力由最大、最小主应力及主应力轴偏转角决定, 主应力比 σ_3/σ_1 可从量值上反映工程岩体的应力路径, 并应用于分析洞室围岩及覆土的应力状态^[19], 开挖卸荷作用下悬露覆岩应力为主动释放状态, 土拱效应原理中将应力比 σ_3/σ_1 定义为主动压力系数 K_a ^[13], 将 K_a 代入式(7)换算, 可得

$$\sigma_v = \sigma_1 (\cos^2 \alpha + K_a \sin^2 \alpha), \quad (8)$$

结合式(4)对主应力差变化率 D_r 的定义, 将 $\sigma_3 = K_a \sigma_1$ 代入式(4)整理换算, 则最大主应力 σ_1 可表示为

$$\sigma_1 = \frac{D_r \sigma_v^0 (1 - K_0)}{1 - K_a}, \quad (9)$$

通过对指标主应力差变化率 D_r 和主动压力系数 K_a 的定义及换算, 可建立采动岩层主应力轴偏转角与垂直

应力的力学联系, 将式(9)代入式(8)换算可得垂直应力 σ_v 表达式为

$$\sigma_v = \frac{D_r \sigma_v^0 (1 - K_0)}{1 - K_a} (\cos^2 \alpha + K_a \sin^2 \alpha), \quad (10)$$

上式即为垂直应力 σ_v 与主应力轴偏转角 α 、原岩应力 σ_v^0 的关系式, 则令垂直应力集中系数 K_v 表示为

$$K_v = \frac{D_r (1 - K_0)}{1 - K_a} (\cos^2 \alpha + K_a \sin^2 \alpha). \quad (11)$$

开采卸荷作用下岩层主应力轴向采空区两侧方向产生偏转, 覆岩自承压应力沿新的路径由跨中向两侧传递, 根据式(11)可计算分析不同主应力轴偏转角条件下垂直应力集中系数, 结合采动岩层各位置主应力传递迹线特征, 进一步研究主应力轴偏转及成拱效应影响下覆岩垂直应力二次分布规律。

以主应力差变化率 $D_r=1.5$ 、初始侧压系数 $K_0=0.5$ 且主动压力系数 $K_a=0.3$ 为例, 考虑采空区跨中两侧岩层主应力轴偏转方向不同, 假设主应力轴逆时针偏转为正并取偏转角变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 将各指标参数代入式(11)计算。计算结果如图 4 所示, 随着主应力轴偏转角的增大, 岩层垂直应力集中系数逐渐降低, 该变化特征符合采动岩层主应力轴偏转角及垂直应力分布规律, 采空区跨中位置顶板岩层主应力偏转程度最大且垂直应力最小, 由跨中向两侧煤壁方向主应力偏转角逐渐降低, 而顶板岩层垂直应力逐渐升高, 煤壁侧未采动区岩层垂直应力大于原岩应力, 即应力集中系数 $K_v>1$, 为采空区两侧围岩支承压力集中现象。

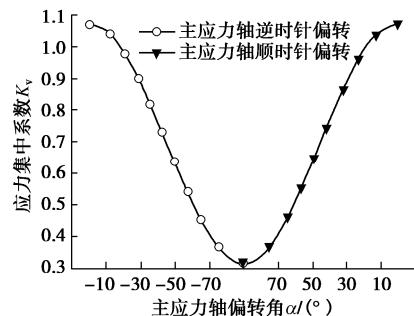


图 4 不同偏转角对应的岩层垂直应力集中系数分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of vertical stress concentration factor of rock strata corresponding to different deviation angles

主应力轴偏转后采动岩层自承压应力沿成拱路径向两侧传递, 进而造成采空区顶板岩层压力释放, 并在未开采区岩层形成支承压力。因此, 主应力轴偏转角及主动压力系数 K_a 可用于判断采动岩层竖向压力释放及支承状态, 如图 5 所示, 采空区覆岩 A 点位置受开采卸荷作用, $\sigma_v < \sigma_v^0$, 该点处应力集中系数 $K_v<1$, 根据式(11)中 K_v 参数和 K_a 的解析关系, 整

理可得利用主动压力系数 K_a 表示的岩层竖向压力释放状态判据如下:

$$K_a < \frac{1 - D_r \cos^2 \alpha (1 - K_0)}{1 + D_r \sin^2 \alpha (1 - K_0)} . \quad (12)$$

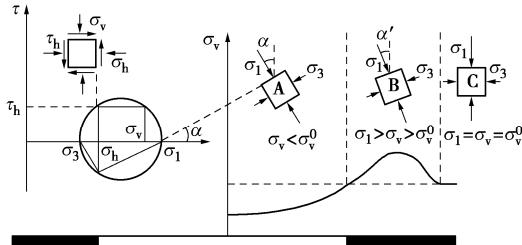


图 5 采动岩层垂直应力重分布特征

Fig. 5 Redistribution of vertical stress of mining strata

2.3 主应力轴偏转后采动围岩应力成拱力学效应

煤层开采后暴露覆岩原主应力作用面产生剪应力增量,造成岩层主应力轴方向发生偏转,不同偏转角度的主应力矢量沿拱迹线传递,进而表现为采动岩层切向应力升高并形成围岩压力拱。若初始地应力状态下最大主应力为垂直应力,煤层开采后采空区覆岩跨中位置主应力轴偏转角 α_1 大于 45° ,拱顶区域最大主应力靠近水平方向,拱肩和拱腰区域岩层最大主应力向垂直方向过渡,主应力轴偏转角逐渐较小,当拱脚位置主应力轴偏转角 α_n 小于 45° 时,最大主应力靠近垂直方向,则表现为煤壁两侧未开采区岩层形成支承压力。

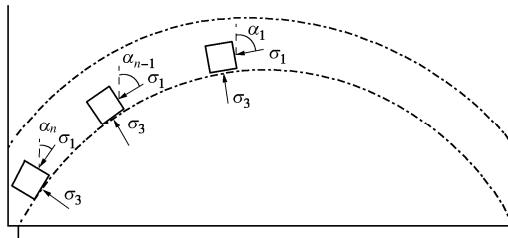


图 6 采动覆岩偏转主应力迹线成拱特征

Fig. 6 Arching characteristics of deviated principal stress trace of overlying strata caused by mining

主应力轴偏转后采动岩层自承压应力沿拱迹线传递,若成拱应力路径内最大主应力 σ_1 超过原岩应力 σ_1^0 ,则认为采动区远场围岩形成压力拱^[5]。对于自承载区采动岩层,可用最大主应力变化程度表征其压力拱分布特征,定义采动岩层压应力成拱指标 A_c ,即

$$A_c = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^0}{\sigma_1^0} , \quad (13)$$

式中, σ_1 为主应力轴偏转后的最大主应力, σ_1^0 为初始应力状态下最大主应力。

根据初始地应力和主应力轴偏转后的二次应力状态,可对成拱指标 A_c 进行变换计算,若岩层初始最大主应力 σ_1^0 为垂直应力,即 $\sigma_1^0 = \sigma_v^0 = K_0 \sigma_h^0$,对于远场

围岩压力拱的拱顶区域,采动后主应力轴偏转角 α 大于 45° 根据图 2 中各向应力的几何关系可得

$$\sigma_1 = \sigma_h + \tau_v \tan \alpha , \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),则拱顶区域的压应力成拱指标 A_c^t 可表示为

$$A_c^t = \frac{K_0(\sigma_h + \tau_v \tan \alpha) - \sigma_h^0}{\sigma_h^0} , \quad (15)$$

式中, σ_h^0 , σ_h 分别为煤层开采前、后覆岩水平应力, τ_v 为采动岩层竖向剪应力, K_0 为初始侧压系数。

非充分采动阶段压力拱的前、后拱脚位于采空区四周未开采区域岩层,拱脚区域主应力轴偏转角 α 小于 45° ,则最大主应力 σ_1 表示为

$$A_c^t = \frac{K_0(\sigma_h + \tau_v \tan \alpha) - \sigma_h^0}{\sigma_h^0} . \quad (16)$$

将式(16)代入式(13),拱脚岩层的压应力成拱指标 A_c^f 可换算为

$$A_c^f = \frac{\sigma_v + \tau_h \tan \alpha - \sigma_v^0}{\sigma_v^0} , \quad (17)$$

式中, σ_v^0 , σ_v 分别为煤层开采前、后覆岩垂直应力, τ_h 为采动岩层水平剪应力。

3 远场围岩主应力自调节成拱规律数值模拟分析

3.1 构建数值计算模型

浅埋采场围岩不能在整个开采过程中均存在稳定的承压拱,拱效应直接影响着覆岩结构演化规律及地表损伤特征^[20, 22]。因此,以神东矿区上湾矿浅部 1²煤层开采为工程背景,选用 FLAC^{3D} 软件建立数值模型,模型尺寸为 $600 \text{ m} \times 352 \text{ m} \times 137 \text{ m}$,煤层厚度为 7 m,粉砂岩底板厚度为 20 m,上覆岩层总厚度为 108 m,以 0.18 MPa 载荷代替松散层重量施加于模型顶部。煤层单元尺寸为 $5 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,底板岩层和上覆岩层模型单元尺寸均相同,岩层单元为 $5 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,整个模型共计 205920 个单元,217800 个节点,模型底部边界及四周边界均为固定边界。

初始最大主应力为垂直应力,忽略不同位置岩层的岩性差异影响,上覆岩层简化设定为硬厚砂岩,一次开采煤层全厚,沿 X 轴方向推进长度 400 m,开切眼距模型左边界 150 m,沿 Y 轴的工作面倾向长度 240 m。沿 X 轴方向距离两侧边界 150 m 的位置各掘进一条宽 6 m、高 5 m 巷道。煤岩层物理力学参数见表 1,采用莫尔-库仑准则判定煤岩层单元弹塑性状态。

3.2 开采扰动下覆岩主应力矢量偏转特征

开采后暴露覆岩压力向两侧未采动岩层传递,进而造成岩层三向主应力矢量方向产生偏转,以煤层回采 50 m 时工作面倾向中点剖切面为例,覆岩主应力

表1 煤岩层材料力学参数

Table 1 Material and mechanical parameters of coal and rock strata

岩性	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
砂岩	25.00	36.50	0.22	2.60	1.50	30
煤	13.10	12.70	0.29	1.20	0.60	27
粉砂岩	24.60	37.90	0.20	4.50	3	40

轴偏转角度如图7所示, 主应力轴偏转角峰值位于跨中位置, 偏转角 α 由覆岩跨中向两侧逐渐降低。覆岩主应力偏转区域范围由下向上逐渐增大, 拱顶最大主应力靠近水平方向, 最大主应力偏转角超过75°。

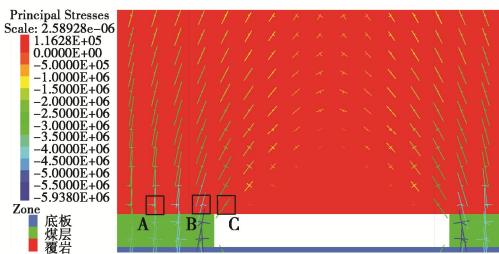


图7 采场覆岩主应力矢量分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of principal stress vector of overlying strata

以图7中基本顶岩层单元A、B和C为研究对象, 根据煤层工作面推进10~120 m过程中各单元主应力及竖向剪应力监测数据, 如图8所示, 随着主应力偏转角增大, 各单元体主应力差变化率 D_r 和竖向剪应力 τ 均呈上升趋势, 靠近煤壁的岩层单元B主应力差变化率相对较大, 主应力偏转角较小的岩层单元A的竖向剪应力明显小于单元B和C。

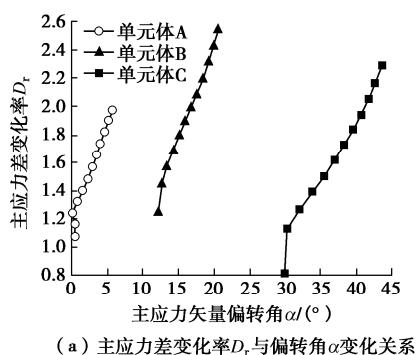
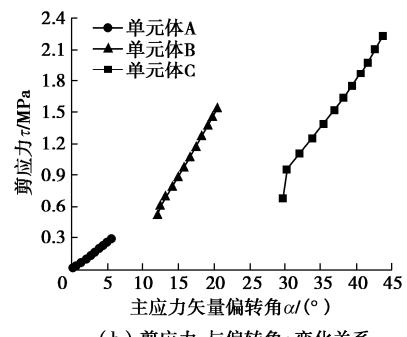
(a) 主应力差变化率 D_r 与偏转角 α 变化关系(b) 剪应力 τ 与偏转角 α 变化关系

图8 主应力轴偏转影响下应力值变化特征

Fig. 8 Characteristics of changing stress under influence of deviation of principal stress axis

以工作面推进50 m时为例, 根据距离煤层28 m处水平测线监测数据, 如图9所示, 覆岩主应力偏转角 α 由采空区跨中位置向两侧边界逐渐降低, 采空区主应力偏转角变化范围为28.2°~68.7°。主应力差变化率 D_r 峰值位于采空区边界位置, 由边界向跨中位置逐渐降低。未开采区岩层主应力差变化率 D_r 和竖向剪应力 τ 均随主应力偏转角增大而递增, 而采空区岩层力学指标 D_r 和 τ 随主应力偏转角增大而呈递减分布。

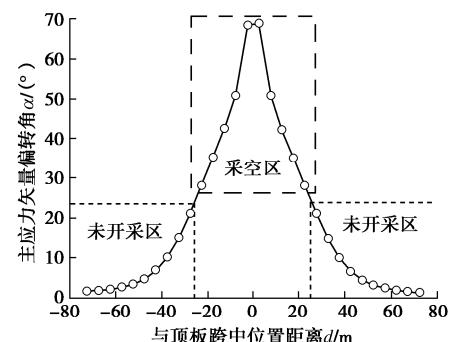
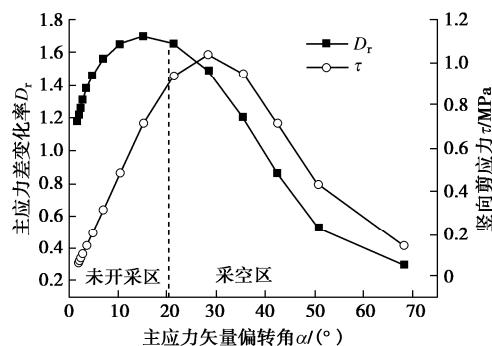
(a) 同一水平线上主动应力偏转角 α 分布特征

图9 采场覆岩主应力及剪应力表征指标变化特征

Fig. 9 Variation characteristics of characterization index for principal stress and shear stress of overlying strata in mining area

3.3 采场覆岩竖向压力释放及转化特征

由于采空区顶板岩层竖向压力主动释放, 拱效影响下岩层主应力比 σ_3/σ_1 产生变化, 以工作面推进50 m时为例, 如图10所示, 根据距离煤层50 m处岩层水平测线上监测数据, 采空区揭露岩层主动压力系数 K_a 由空区边界向跨中位置呈递增分布, 跨中主动压力系数大于原岩初始值。未开采区岩层最大主应力 σ_1 增大且主动压力系数降低, K_a 值由原岩应力区至采空区边界呈递减分布。采空区岩层垂直应力集中系数 K_v 均低于原岩初始值, 未开采区岩层在支承压力作用下

形成驼峰型垂直应力升高区，随着与采空区水平距离增大，压应力集中程度降低并逐渐恢复原岩应力状态。

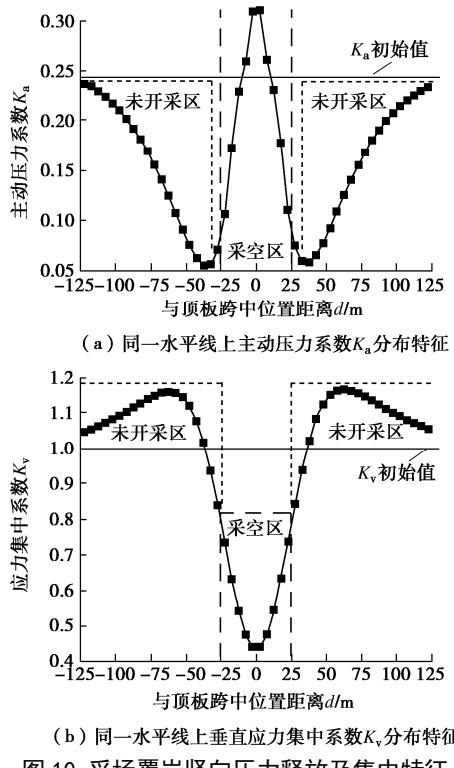


图 10 采场覆岩竖向压力释放及集中特征

Fig. 10 Release and concentration characteristics of vertical pressure of overlying strata in mining area

3.4 采动区远场围岩压力拱效应表征

根据采动围岩压应力成拱指标计算公式，利用 fish 语言编程计算可得压应力成拱指标的分布特征。相比于利用应力云图定性标定压力拱区域的传统方法^[22-23]，本文解析得出的表征指标可更直观地反映压力拱关键部位，图 11 所示为工作面推进过程中成拱指

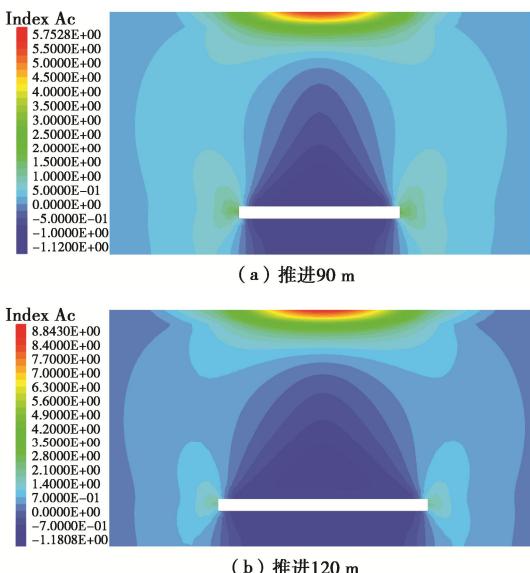


图 11 采动区远场围岩的压力拱效应分布特征

Fig. 11 Distribution characteristics of pressure arching effect of surrounding rock in mining area

标变化特征，远场高位岩层及两侧未开采区岩层成拱指标大于零，表明岩采动围岩压力拱效应形成，支承压力作用下煤层基本顶岩层应力集中明显。

工作面推进 90 m 时，煤壁两侧未开采区岩层承担的采空区揭露岩层传递荷载增大，成拱指标正值区域面积扩大且指标峰值升高，采动区远场围岩形成连续封闭的对称压力拱，拱顶和拱肩区域厚度明显增大。围岩压力拱的前拱脚随工作面推进而动态迁移，拱顶区域沿采场走向的宽度增大且形成明显的高应力集中带，拱脚区域成拱指标高于拱腰及拱肩区域，成拱指标峰值位于远场高位岩层顶部。

4 结 论

针对采场覆岩断裂拱外部的远场围岩拱壳结构特征，基于 Terzaghi 土拱效应原理，解析了采场覆岩主应力矢量偏转特征及主控力学因素，利用数值模拟表征分析了采动过程中岩层压力拱效应演化特征及关键力学指标变化规律。主要得出以下结论：

(1) 煤层开采卸荷后覆岩初始主应力面上产生剪应力增量，造成岩层主应力矢量方向产生偏转，主应力偏转角由初始最大主应力、侧压系数和采动后剪应力增量及主应力差变化率控制。同一层位覆岩主应力偏转角由采空区跨中向两侧边界逐渐降低，采空区岩层主应力差变化率和剪应力增量随主应力偏转角增大而呈递减分布，而未开采区岩层主应力差变化率和剪应力增量随偏转角增大而增大。

(2) 主应力轴偏转角及主动压力系数可用于判断采动岩层竖向压力释放状态，主动压力系数相同的情况下，主应力轴偏转角较大的位置竖向压力释放程度更高，岩层垂直应力随着主应力轴偏转角增大而降低。采空区范围内揭露岩层主动压力系数由边界向跨中位置呈递增分布，由原岩应力区至采空区边界呈递减分布，主动压力系数最小值位于采空区边界位置。

(3) 主应力轴偏转后采动岩层径向路径内压应力为主动释放状态，围岩切向路径内升高的最大主应力表现为远场压力拱，压力拱的拱脚及拱腰等关键部位升高的垂直应力形成各层位覆岩支承压力。围岩压力拱的前拱脚随工作面推进而动态迁移，拱脚区域成拱指标高于拱腰及拱肩区域。

参 考 文 献：

- [1] 宋振骐, 郝 建, 石永奎, 等. "实用矿山压力控制理论" 的内涵及发展综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 5 - 19. (SONG Zhen-qi, HAO Jian, SHI Yong-kui, et al. Summary of connotation and development of

- “practical mine pressure control theory”[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, **38**(1): 5 – 19. (in Chinese))
- [2] 文志杰, 景所林, 宋振骐, 等. 采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, **47**(1): 57 – 66. (WEN Zhi-jie, JING Suo-lin, SONG Zhen-qi, et al. Research on stope spatial structure model and related dynamic disaster control[J]. Coal Science and Technology, 2019, **47**(1): 57 – 66. (in Chinese))
- [3] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010. (QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu, XU Jia-lin. Mine Pressure and Rock Formation Control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010. (in Chinese))
- [4] 杜晓丽, 宋宏伟, 陈杰. 煤矿采矿围岩压力拱的演化特征数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, **46**(6): 863 – 867. (DU Xiao-li, SONG Hong-wei, CHEN Jie. Numerical simulation study on evolution characteristics of pressure arch of surrounding rock in coal mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, **46**(6): 863 – 867. (in Chinese))
- [5] 宋宏伟, 杜晓丽. 岩土空洞周围的压力拱及其特性[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012. (SONG Hong-wei, DU Xiao-li. Pressure Arch Around Rock and Soil Cavity and Its Characteristics[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2012. (in Chinese))
- [6] 谢广祥. 综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J]. 煤炭学报, 2005, **30**(3): 309 – 313. (XIE Guang-xiang. Mechanical characteristics of the macroscopic stress shell of fully mechanized caving face and its surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2005, **30**(3): 309 – 313. (in Chinese))
- [7] 史红, 姜福兴. 充分采动阶段覆岩多层空间结构支承压力建立[J]. 煤炭学报, 2009, **34**(5): 605 – 609. (SHI Hong, JIANG Fu-xing. Research on supporting pressure of overlying strata multilayer spatial structure in full mining stage[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **34**(5): 605 – 609. (in Chinese))
- [8] 杨振国, 李铁. 高位关键层对压力拱演化规律影响的研究[J]. 煤矿安全, 2015, **46**(4): 40 – 43. (YANG Zhen-guo, LI Tie. Research on the influence of high key layer on the evolution law of pressure arch[J]. Safety in Coal Mines, 2015, **46**(4): 40 – 43. (in Chinese))
- [9] HUANG Z P, BROCH E, LU M. Cavern roof stability mechanism of arching and stabilization by rockbolting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, **17**(3): 249 – 261.
- [10] 梁晓丹, 刘刚, 赵坚. 地下工程压力拱拱体的确定与成拱分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, **33**(3): 314 – 317. (LIANG Xiao-dan, LIU Gang, ZHAO Jian. Determination of pressure arch in underground engineering and analysis of arch formation[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2005, **33**(3): 314 – 317. (in Chinese))
- [11] WANG Y C, JING H W, ZHANG Q, LUO N, YIN X. Prediction of collapse scope of deep-buried tunnels using pressure arch theory[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(4): 1 – 10.
- [12] 陈若曦, 朱斌, 陈云敏, 等. 基于主应力轴旋转理论的修正 Terzaghi 松动土压力[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1402 – 1406. (CHEN Ruo-xi, ZHU Bin, CHEN Yun-min, et al. Modified Terzaghi loosening earth pressure based on principal stress axis rotation theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1402 – 1406. (in Chinese))
- [13] 黎春林. 盾构隧道施工松动土压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1714 – 1720. (LI Chun-lin. Method for calculating loosening earth pressure during construction of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1714 – 1720. (in Chinese))
- [14] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 考虑主应力偏转的土体浅埋隧道支护压力研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 804 – 810. (WANG Ding-jian, TANG Hui-ming, LI Chang-dong, et al. Research on support pressure of shallow tunnel in soil considering deflection of principal stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(5): 804 – 810. (in Chinese))
- [15] 赖丰文, 陈福全, 万梁龙. 考虑不完全土拱效应的浅层地基竖向应力计算[J]. 岩土力学, 2018, **39**(7): 2546 – 2554. (LAI Feng-wen, CHEN Fu-quan, WAN Liang-long. Calculation of vertical stress of shallow foundation considering incomplete soil arching effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(7): 2546 – 2554. (in Chinese))
- [16] ZHAO Y H, WANG S R, ZOU Y F, et al. Pressure-arching characteristics of fractured strata structure during shallow horizontal coal mining[J]. Tehnicki Vjesnik, 2018, **25**(5): 1457 – 1466.
- [17] REZAEI M, HASSANI M F, MAIDI A. Determination of longwall mining-induced stress using the strain energy

- method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, **48**(6): 2421 – 2433.
- [18] BASARIR H, OGE I F, AYDIN O. Prediction of the stresses around main and tail gates during top coal caving by 3D numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, **76**: 88 – 97.
- [19] XUE D J, WANG J Q, ZHAO Y W, et al. Quantitative determination of mining-induced discontinuous stress drop in coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, **111**: 1 – 11.
- [20] 任艳芳, 齐庆新. 浅埋煤层长壁开采围岩应力场特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(10): 1612 – 1618. (REN Yan-fang, QI Qing-xin. Research on stress field characteristics of surrounding rock in shallow coal seam longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(10): 1612 – 1618. (in Chinese))
- [21] 霍丙杰, 于斌, 张宏伟, 等. 多层坚硬顶板采场覆岩“拱壳”大结构形成机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, **44**(11): 18 – 23. (HUO Bin-jie, YU Bin, ZHANG Hong-wei, et al. Study on the formation mechanism of the "arch shell" large structure of the overlying strata in the stope with multi-layer hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2016, **44**(11): 18 – 23. (in Chinese))
- [22] XIA B W, FU Y H, ZHANG X, et al. Impact analysis of hard roof on the morphological evolution of stress arch[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2019, **12**(1): 153 – 162.
- [23] 徐祝贺, 李全生, 李晓斌, 等. 浅埋高强度开采覆岩结构演化及地表损伤研究[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(8): 2728 – 2739. (XU Zhu-he, LI Quan-sheng, LI Xiao-bin, et al. Structural evolution of overburden and surface damage caused by high-intensity mining with shallow depth[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(8): 2728 – 2739. (in Chinese))
- [24] 王家臣, 王兆会, 杨杰, 等. 千米深井超长工作面采动应力旋转特征及应用[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(3): 876 – 888. (WANG Jia-chen, WANG Zhao-hui, YANG Jie, et al. Mining-induced stress rotation and its application in longwall facewith large length in kilometer deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(3): 876 – 888. (in Chinese))
- [25] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 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 He-ping, ZHOU Hong-wei, LIU Jian-feng, et al. Research on mining dynamics behavior under different mining conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(7): 1067 – 1074. (in Chinese))
- [26] 宋振骐, 刘义学, 陈孟伯, 等. 岩梁裂断前后的支承压力显现及其应用的探讨[J]. 山东矿业学院学报, 1984(1): 29 – 41. (SONG Zhen-qi, LIU Yi-xue, CHEN Meng-bo, et al. Discussion on the appearance and application of supporting pressure before and after rock beam fracture[J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology, 1984(1): 29 – 41. (in Chinese))
- [27] 陈国舟, 周国庆. 考虑土拱效应的滑移面间竖向应力研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, **43**(3): 374 – 379. (CHEN Guo-zhou, ZHOU Guo-qing. Study on vertical stress between sliding surfaces considering soil arching effect[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, **43**(3): 374 – 379. (in Chinese))
- [28] 李建贺, 盛谦, 朱泽奇, 等. Mine-by 试验洞开挖过程中围岩应力路径与破坏模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(4): 821 – 830. (LI Jian-he, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Analysis of stress path and failure mode of surrounding rock during mine-by test tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(4): 821 – 830. (in Chinese))
- [29] 庞义辉, 王国法, 李冰冰. 深部采场覆岩应力路径效应与失稳过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(4): 682 – 694. (PANG Yi-hui, WANG Guo-fa, LI Bing-bing. Stress path effect and instability process analysis of overlying strata in deep stopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(4): 682 – 694. (in Chinese))