

# 西石门铁矿北区缓倾斜矿体地压成因及其控制

宋德林<sup>1</sup>, 任凤玉<sup>1</sup>, 何荣兴<sup>1</sup>, 常 帅<sup>2</sup>  
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘 要:** 为了制定西石门铁矿北区缓倾斜矿体开采时的地压控制措施, 首先根据现场调查总结了地压活动规律; 地压主要表现为巷道两帮破碎、拱腿收敛呈“Ω”形, 发生在采空区上盘侧约 35 m 的范围内, 严重程度随至空区上盘距离的增加而减弱。上述规律与模拟得出的楔形体地压作用规律吻合, 揭示出地压主要由采空区上盘楔形体作用引起。因此研究了地压控制措施: 处于楔形体地压作用下的矿体开采时, 开采顺序以从空区边界向上盘退采为宜, 进路垂直矿体走向布置更佳, 以拱架支护为主并对两帮加强支护可有效控制变形。  
**关 键 词:** 缓倾斜矿体; 高应力; 巷道变形; 楔形体; 地压控制  
**中图分类号:** TD 322      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)02-0267-06

## Formation and Control Technology of Ground Pressure of Gently Inclined Orebody in North Mining Area of Xishimen Iron Mine

SONG De-lin<sup>1</sup>, REN Feng-yu<sup>1</sup>, HE Rong-xing<sup>1</sup>, CHANG Shuai<sup>2</sup>  
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China. Corresponding author: CHANG Shuai, E-mail: chang1009@163.com)

**Abstract:** In order to formulate the ground pressure control measures for gently inclined orebody mining in north mining area of Xishimen Iron Mine, the ground pressure activity characteristic is summarized according to the field investigation. The ground pressure behavior of two sidewalls crashing and arch leg bending occurs mainly around 35 m in the hanging side of the mined-out area. The severity of ground pressure behavior decreases gradually with the increase of distance away from the upper goaf. The ground pressure behavior is consistent with the simulated ground pressure of the wedge body, which reveals that the ground pressure is caused mainly by the action of wedge body in the hanging side. The control measures are as follows: for ore body mining under the action of wedge pressure, the most suitable mining sequence is from the boundary of the mined-out area to the hanging side; the roadway should be perpendicular to ore body strike; arch supports with auxiliary sidewalls supports can control deformation effectively.  
**Key words:** gently inclined orebody; highstress; roadway deformation; wedge; ground pressure control

地压广泛存在于岩体当中, 它的显现造成了岩体的变形和各种不同形式的破坏。研究采场地压就是要弄清采场围岩的应力状态、变形、移动和破坏规律, 从而能够正确地选择回采顺序和采矿方法, 合理确定采场结构参数和巷道支护方式, 以达到保证采场稳定及作业安全的目的。

本文结合西石门铁矿北区西翼-6~-10 勘探线之间的矿体条件及开采现状, 通过调查分析

采场地压显现现象、模拟开采过程, 揭示地压成因及作用规律, 最终制定适合的矿体开采方式及巷道变形控制措施。

### 1 矿体条件及现状

西石门铁矿北区西翼-6~-10 勘探线之间的矿体, 几经勘探, 最终形态如图 1 所示: 矿体赋

存标高在 +120 m ~ -30 m 之间(地表标高 +270 m),上部倾角较陡,约 50°~55°,在 0 m 水平附近急剧变缓,倾角约 10°。上盘围岩为灰岩,中等稳定到不稳定;矿体为矽卡岩型磁铁矿,不稳定;下盘围岩主要为闪长岩,中等稳定;在矿体与闪长岩间常含有薄层蚀变闪长岩与矽卡岩,遇水严重泥化,不稳定。0 m 水平之上的矿体被民采严重破坏,所形成的采空区已冒透地表,在 -9 勘探线处的地表形成直径约 20 m 的塌陷坑,坑内被冒落散体充填。矿山自 0 m 水平开始对缓倾斜部分矿体(又称新探矿体)用无底柱分段崩落法进行回采,共布置 0 m, -13 m, -26 m 三个分段。目前 0 m 分段已回采完毕,转入 -13 m 水平的开采。在 -13 m 水平进路沿矿体走向布置,断面尺寸 3 200 mm×3 100 mm(宽×高),采用 U 型钢拱架支护,特别破碎部位进行超前锚杆预支。开采进入 -13 m 水平后,拱架变形、顶板冒落等地压显现事件明显增多,变形破坏程度也比 0 m 水平严重,

已严重影响矿山开采的正常进行。因此,需对地压成因及规律进行研究,并据此制定有效的控制措施。

## 2 采场地压显现调查

为了掌握地压作用情况,对西石门北区新探矿体 -13 m 水平的巷道变形、破坏情况进行调查,调查范围为 -13 m 水平现存巷道(包括 5 条沿脉进路、2 条垂直走向联巷、1 条沿脉联巷)。经调查,共发现地压显现部位 5 处(图 1b),形式主要为拱架变形(4 处)、掘进顶板冒落(1 处),具体情况见表 1。

表 1 巷道调查情况统计表  
Table 1 Roadway survey statistics

观测点	位置	支护情况	巷道情况
1	3#采场一联巷	拱架	拱架腿部向巷道收敛,巷道呈“Ω”型。
2	3#采场 8#进路	超前锚杆 + 拱架	拱架变形严重,拱腿及拱顶均变形,整体呈“Ω”型。
3	3#采场 8#进路	超前锚杆 + 拱架	拱架变形严重,拱腿及拱顶均变形,整体呈“Ω”型。
4	3#采场 6#进路	超前锚杆 + 拱架	左侧(矿体下盘方向)上部拱角压弯。
5	3#采场二联巷	超前锚杆 + 拱架	支护不及时,掘进后 24 h 冒落。

地压显现具有如下特点:

1) 地压显现迅速,持续发生。拱架支护时,一周左右拱架即发生变形,变形持续进行,拱架修复频率可达一个月一次,主要表现为巷道两帮破碎、拱腿向巷道内移近收敛,拱顶受压下沉,拱架断面形状最终由“倒 U”型变为“Ω”型(图 2a)。巷道在没有支护的情况下,在掘进爆破 24 h 内即发生冒落(图 2b),初始冒落高度达到 2~3 m,宽度 3~4 m,并随出渣的进行持续冒落。

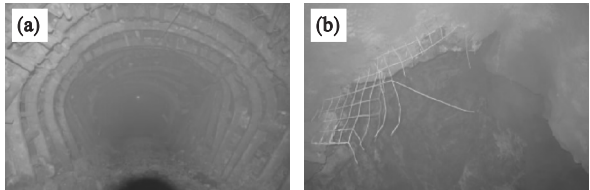


图 2 现场地压显现形式

Fig. 2 Appearance of ground pressure

(a)—拱架变形;(b)—顶板冒落。

图 1 矿体形态及地压显现部位  
Fig. 1 Ore body shape and ground pressure position  
(a)—剖面图(-9 线);(b)—平面图(-13 m 水平)。

2) 地压显现区域性明显。根据地压显现位

置,圈定了受地压影响的主要区域,主要集中在6#和8#进路.将地压显现区域标示于-9剖面线(图1a),可见地压显现主要处于矿体变缓处,采空区的上盘侧,显现范围在空区上盘侧约35 m的范围以内.下盘运输巷布置于采空区下盘侧的闪长岩内,无地压显现,稳定性好.

3) 地压大小随着与空区上盘距离的增大而逐渐减小.8#进路最严重,6#次之,其他进路则不明显,垂直布置的联巷地压显现也在8#进路附近最严重,随着远离空区向上盘方向逐渐减弱.

4) 沿脉巷道地压显现比垂直布置的巷道严重.8#进路拱架变形程度比1#和2#联巷中靠近8#进路的部位严重.

### 3 采场地压成因及作用规律研究

#### 3.1 地压成因分析

矿体上倾下缓,当上部倾斜矿体开采完且采空区冒透地表时,进入缓倾斜矿体开采,此时矿体上部会呈现出一个楔形体形态(见图1a),在自重作用下,楔形体会在一定范围的矿体内产生附加应力<sup>[1]</sup>,使其呈现高应力状态.该应力由重力引起,主应力方向为竖直方向.

#### 3.2 楔形体地压作用规律模拟研究

采用Flac<sup>3D</sup>数值模拟软件,对楔形体形成过程进行模拟,获得最终应力分布,揭示地压作用规律<sup>[2-4]</sup>.

矿体沿走向长度较大,研究时暂不考虑矿体两端约束影响,只取矿体中部某一剖面进行研究.-9线剖面较为典型,因此取-9线剖面线建立模拟模型,在长度方向上取100 m,则模型尺寸600 m×100 m×470 m(*x*×*y*×*z*),网格划分41 792个节点,224 491个单元.采用弹塑性本构模型,Mohr-Coulom屈服准则,限制底部及侧向位移,初始应力为自重,岩体力学参数如表2所示.

表 2 岩体力学参数					
Table 2 Mechanical parameters of rocks mass					
岩性	弹性模量 <i>E</i> /GPa	泊松比 <i>μ</i>	内聚力 <i>C</i> /MPa	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)	抗拉强度 <i>σ<sub>t</sub></i> /MPa
矿体	59.05	0.312	1.79	44.63	7.778
围岩	49.92	0.184	3.34	39.7	10.23

模拟倾斜矿体采完并冒透地表后的最大主应力分布,计算时不考虑冒落散体的充填作用,在-13 m水平缓倾斜矿体处布置监测点监测最大

主应力 $\sigma_1$ 变化.计算最大主应力分布如图3所示.

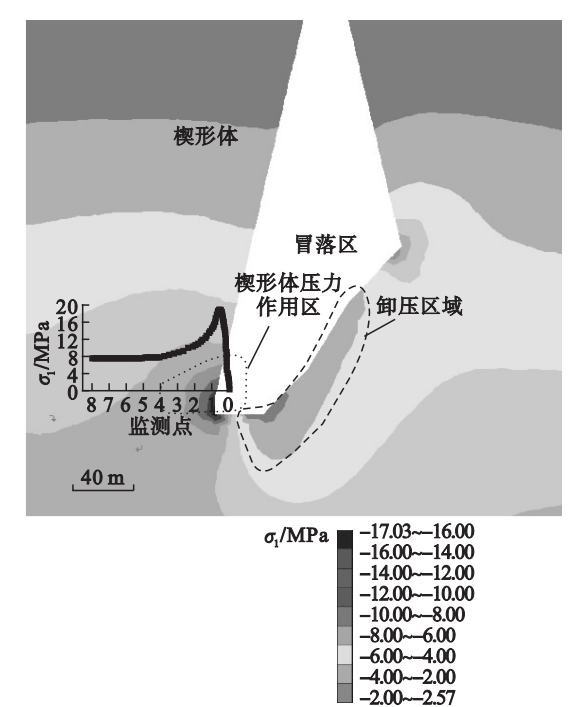


图 3 地压作用位置及变化趋势  
Fig. 3 Influencing position and variation trend of wedge pressure

由图3可见,高应力区出现在空区上盘侧底部脚部位,即楔形体地压主要作用于楔形体下部、靠近采空区上盘一侧的岩体内.从监测点最大主应力变化来看,应力值由空区上盘侧向远离上盘方向先急剧升高,在约7.5 m处达到最大,应力峰值为20.7 MPa,应力集中系数2.7.之后逐渐减小,在监测点4(远离空区上盘35 m处)以后平稳,恢复至原岩应力水平.0~7.5 m范围内的应力变化主要是由于高应力下岩体边缘破裂、变形后卸载引起,因此,楔形体地压从表现出的现象来看是从空区上盘边缘向岩体深部逐渐减弱的.

西石门铁矿北区地压显现位置、作用范围、变化规律与模拟得出的楔形体地压作用规律基本吻合.由于楔形体地压是由其自重引起,其作用方向也为重力方向.国内外多个工程实际和相关研究表明,在围岩性质相近的情况下,水平应力下地压显现主要体现在顶、底板破坏,垂直应力的地压显现主要体现在两帮破坏,即破坏发生部位多与巷道断面上最大主应力方向呈近似垂直关系<sup>[5-11]</sup>.西石门铁矿巷道两帮破坏较顶、底板严重,则其高应力部位的应力方向应为竖直方向,与楔形体压力的作用方向相符.

楔形体向下部施加压力的同时,减小了对空区散体的压力,使空区下盘岩体承受的压力减少,出现卸压现象(图3).调查中,-13 m水平下盘

运输巷处于采空区下盘侧,只需喷浆,稳定性良好,未出现地压显现;另外,0 m 水平回采工程布置在空区下盘,回采时地压显现不明显,而-13 m 水平开采范围进入采空区上盘侧,布置在空区上盘侧的工程地压突然增大,这些都很好地说明了这一情况。

## 4 地压控制措施

可从矿体开采顺序、巷道布置方式和巷道变形控制三方面采取措施,缓解地压影响,以实现高应力作用矿体顺利回采。

### 4.1 高应力区矿体开采顺序

缓倾斜部分的矿体若由上盘向下盘方向开采,即朝向崩落区前进式回采,在回采工作线接近倾斜矿体开采形成的空区时,两者之间矿柱由于应力叠加,应力将远大于楔形体形成的高应力,导致巷道破坏更加严重,甚至无法开掘巷道,进而留下大量矿石不能开采。而锡矿山南矿生产中曾利用免压拱处理类似高应力采场,其实质为,先开采高应力采场两侧矿体,待形成的空区大冒落,支撑压力从原来高应力采场转移到采场两侧空区的外侧,形成一个大的免压拱,高应力矿体处于冒落后形成的免压拱内,压力降低,之后再进行开采。由于西石门铁矿北采区倾斜矿体开采形成的空区已冒透地表,该侧失去支撑条件而无法形成免压拱,因此无法利用高应力区之外的矿体(图 1 中“原岩应力区”矿体)开采后的冒落形成免压拱,对楔形体压力范围内矿体进行卸压。从以上两种情况来看,朝向崩落区前进式回采方式不可取。

而从已采矿体边界进行退采,虽然楔形体产生的应力会随之向上盘转移,使缓倾斜矿体都在较高应力状态下开采。但从现场来看,在该应力状态下巷道仍可掘进,并且拱架支护后可维持一段时间。因此,该高应力矿体应从空区边界向上盘方向进行开采。在开采时还需优化巷道布置方式,使之受楔形体压力影响最小,同时加强支护,延长巷道可用时间。

### 4.2 巷道布置形式选择

对于受楔形体压力作用的部位,在垂直矿体走向方向上压力先增大后减小。当巷道垂直矿体走向布置时,在其截面方向上,巷道顶板可看作受均布载荷作用(图 4a)。当沿矿体走向布置时,在其截面方向上,巷道顶板可认为受不均布力作用(图 4b)。

为考察两种受力方式对巷道稳定性的影响,将巷道顶板简化为两端固支的梁,建立均布和非

均布载荷作用下巷道顶板的受力模型<sup>[12]</sup>,进行受力分析,如图 5 所示。

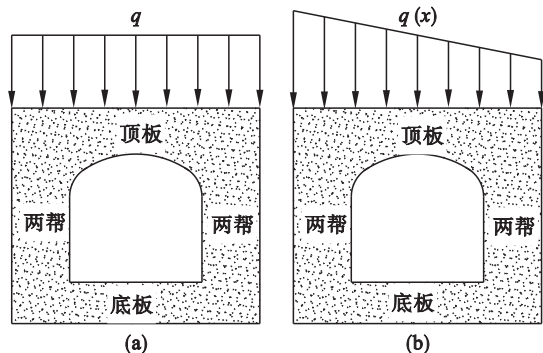


图 4 巷道顶板受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the stressed roadway roof  
(a)—垂直矿体走向布置时; (b)—沿矿体走向布置时。

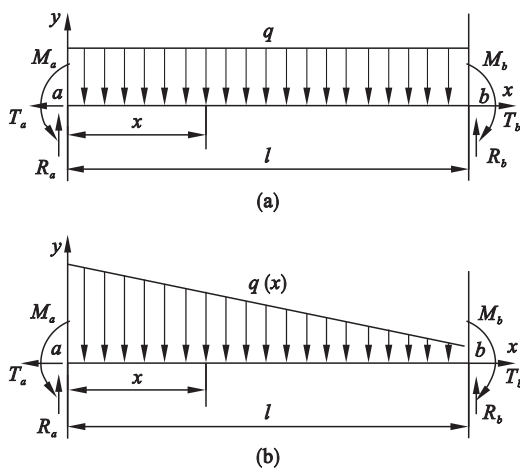


图 5 巷道顶板受力模型

Fig. 5 Mechanical model of roadway roof

(a)—受均布载荷作用; (b)—受非均布载荷作用。

假设均布载荷为  $q$ , 非均布载荷  $q(x) = 3q/2 - qx/l$ 。图 5 中:  $l$  为巷道宽度;  $M_a, M_b$  为弯矩;  $T_a, T_b$  为固定端受到的水平力;  $R_a, R_b$  为梁所受的支反力;  $EI$  为梁的抗弯刚度。根据结构力学中的力法求解超静定问题,可列平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{l}{3EI}M_a - \frac{l}{6EI}M_b + \frac{\omega}{EI} \times \frac{x}{l} &= 0, \\ -\frac{l}{6EI}M_a + \frac{l}{3EI}M_b - \frac{\omega}{EI} \times \frac{l-x}{l} &= 0, \\ \sum F_x &= 0, \\ \sum F_y &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为载荷弯矩图的面积;  $x$  为最大弯矩距离  $a$  点的长度。

对于两端受均布载荷作用的固支梁,可求解得到最大弯矩发生在梁的两端,  $M_{\max} = ql^2/12$ 。梁两端的支反力,  $R_a = R_b = ql/2$ 。对于两端受非均布载荷作用的固支梁,可求得梁两端的弯矩:  $M_a =$

$-11ql^2/120, M_b = 9ql^2/120$ ; 梁两端的支反力:  
 $R_a = 3ql/5, R_b = 2ql/5$ .

在总荷载相同的情况下,巷道顶板在非均布荷载作用下产生的最大弯矩和最大支反力均在载荷大的一端,且大于均布荷载条件下产生的最大弯矩和最大支反力,所以巷道顶板在非均布荷载作用下载荷较大的一端更容易被破坏.这也是在楔形体压力作用下沿脉巷道变形比垂直布置的巷道变形大的原因.因此在楔形体地压作用部位,巷道垂直走向布置更佳.

### 4.3 巷道变形控制

巷道变形控制,可从巷道断面形状及支护措施等方面考虑.

巷道的变形过程应是从不稳定趋于临时稳定的过程,变形后的巷道形状应属于在应力与变形场中趋于稳定态的岩体边界形状,巷道合理断面应适应地压<sup>[13]</sup>,因此可以寻找已变形但尚能起到支撑作用的拱架,此时该支架的形状已适应地压情况.在楔形地压影响区域,巷道最终形状为“Ω”,因此,巷道形状采用“Ω”形.

由于矿山围岩自稳时间短,掘进爆破出渣完成后需立即进行支护,这要求支护措施应具有工序简单,支护用工少、用时短,施工安全,有足够大的支护强度.金属拱架包括拱顶、拱腿、卡挽和螺栓,各部分均为成品,在现场按巷道断面组装即可,施工简便,工作人员容易熟练掌握,因此选用金属拱架作为主要支护措施.为适应巷道形状,可选用承载力大、抗两帮移近能力大的曲腿可缩性拱架支护,并将底板开挖成弧形结构,浇灌混凝土形成反底拱结构,形成封闭支护结构.由于破坏主要发生在两帮和底脚,因此在巷道两帮和底脚等易破坏的关键部位,进行锚杆+金属网支护补强.锚杆可选用螺纹钢高强锚杆,规格为 $\phi 20\text{ mm} \times L2\text{ }000\text{ mm}$ ,左右各三根.巷道形状及支护参数如图 6 所示.

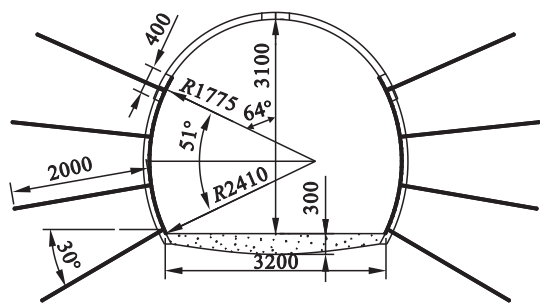


图 6 巷道断面形状及支护参数(单位:mm)  
Fig. 6 Roadway section shape and support parameters( unit:mm)

## 5 现场应用情况

北采区-13 m 水平采场采用从空区边界向上盘方向退采的方式已顺利开采结束,开采过程中对联巷两帮使用混凝土墙加强支护,可保证巷道服务期内的稳定性.-26 m 分层开采时,进路垂直矿体走向布置,联巷沿矿体走向布置.在 1#, 2#采场联巷,原使用直腿拱架支护,后因联巷受楔形体地压影响,拱架腿部变形严重,巷道断面缩小,拟采取所研究的巷道变形控制措施对该部位进行修复.施工时,矿山曲腿拱架暂未到位,因此仍用直腿拱架进行支护,两帮加强支护方式使用混凝土墙,加强部位为拱架腿 1.0 m 以下,厚度为 200 mm.共修复联巷 50 m,修复后半年时间未出现明显变形,如图 7 所示.

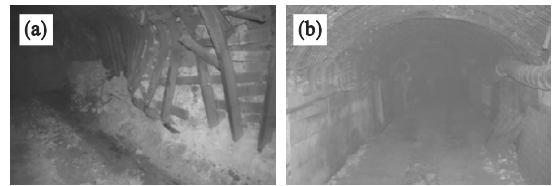


图 7 高应力部位两帮加强支护效果  
Fig. 7 Effect of strengthening support in two high-stressed sides  
(a)—修复前;(b)—修复使用半年后.

## 6 结 论

- 1) 西石门铁矿北区缓倾斜矿体地压显现主要表现为拱腿向巷道空间收敛呈“Ω”形,主要发生在采空区上盘侧约 35 m 范围内,严重程度随远离空区上盘距离的增大逐渐减弱,是由采空区上盘的楔形体引起的.
- 2) 根据研究,西石门铁矿北区处于楔形体地压作用下的缓倾斜矿体开采时,开采顺序以从空区边界向上盘退采为宜,进路垂直矿体走向布置更佳.
- 3) 矿山实际应用说明,在竖向应力引起的两帮变形部位,使用拱架支护并对两帮进行加强支护的方式是可行的,而具体加强方式可按矿山实际情况选择使用.

### 参考文献:

[1] 任凤玉,丁航行,任国义,等.二道沟金矿采场岩爆控制试验[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(6):891-894.  
(Ren Feng-yu, Ding Hang-xing, Ren Guo-yi, et al. Experimental study on stope rockburst control in Erdaogou

gold mine [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33 (6) : 891 – 894. )

[ 2 ] Cai M F, Hao S H, Ji H G. Regularity and prediction of ground pressure in Haigou Gold Mine [ J ]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 15 ( 5 ) : 521 – 527.

[ 3 ] Itasca Consulting Group Inc. FLAC<sup>3D</sup> ( fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions ) ( version 3. 0 ) [ M ]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2005.

[ 4 ] Zhang H L, Wang L G, Gao F, et al. Numerical simulation study on the influence of the ground stress field on the stability of roadways [ J ]. *Mining Science and Technology ( China )*, 2010, 20 ( 5 ) : 707 – 711.

[ 5 ] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34 ( 8 ) : 1165 – 1186.

[ 6 ] Trinh N, Jonsson K. Design considerations for an underground room in a hard rock subjected to a high horizontal stress field at Rana Gruber, Norway [ J ]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38 ( 3 ) : 205 – 212.

[ 7 ] Kent F L, Coggan J S, Altounyan P F R. Investigation into factors affecting roadway deformation in the Selby coalfield [ J ]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1998, 16 ( 4 ) : 273 – 289.

[ 8 ] Hoek E, Kaiser P K, Bawden W F. Support of underground excavations in hard rock [ M ]. London: Taylor & Francis, 1995: 126 – 134.

[ 9 ] Kusui A, Villaescusa E, Funatsu T. Mechanical behavior of scaled-down unsupported tunnel walls in hard rock under high stress [ J ]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 60: 30 – 40.

[ 10 ] 刘国锋,冯夏庭,江权,等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 ( 5 ) : 865 – 878.  
( Liu Guo-feng, Feng Xia-ting, Jiang Quan, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse caverns in Baihetan [ J ]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35 ( 5 ) : 865 – 878. )

[ 11 ] 陈晓祥,王雷超,付东辉. 孤岛工作面动压回采巷道平移变形力学机制及控制技术研究 [ J ]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32 ( 4 ) : 552 – 558.  
( Chen Xiao-xiang, Wang Lei-chao, Fu Dong-hui. A study on inward movement deformation mechanism and control technology of dynamic pressure gateway of island mining face [ J ]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32 ( 4 ) : 552 – 558. )

[ 12 ] 孔德中,王兆会,任志成. 近距离煤层综放回采巷道合理位置确定 [ J ]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31 ( 2 ) : 270 – 276.  
( Kong De-zhong, Wang Zhao-hui, Ren Zhi-cheng. Determining the optimum position of roadways of full-mechanized caving face in the close distance seams [ J ]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31 ( 2 ) : 270 – 276. )

[ 13 ] Lu A Z, Chen H Y, Qin Y, et al. Shape optimization of the support section of a tunnel at great depths [ J ]. *Computers & Geotechnics*, 2014, 61 ( 3 ) : 190 – 197.



( 上接第 260 页 )

[ 13 ] Hagemann S G, Groves D I, Ridley J R. The Wiluna lode-gold deposits, western Australia; an example of a high crustal-level Archaean lode-gold system [ M ]//Current Research in Geology Applied to Ore Deposits. Granada: University of Granada, 1993: 469 – 472.

[ 14 ] Yang S X, Blum N. A fossil hydrothermal system or a source bed in the Madiyi formation near the Xiangxi Au-Sb-W deposit, NW Hunan, PR China? [ J ]. *Chemical Geology*, 1999, 155 ( 1/2 ) : 151 – 169.

[ 15 ] 朱明新,王河锦. 长沙 – 澧陵 – 浏阳一带冷家溪群及板溪群的甚低级变质作用 [ J ]. 岩石学报, 2001, 17 ( 2 ) : 291 – 300.  
( Zhu Ming-xin, Wang He-jin. Very low-grade metamorphism of the Lengjiaxi and Banxi Groups around the area of Changsha-Liling-Liuyang, Hunan Province, China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17 ( 2 ) : 291 – 300. )

[ 16 ] Phillips G N, Powell R. Formation of gold deposits: review and evaluation of the continuum model [ J ]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 94 ( 1/2/3/4 ) : 1 – 21.

[ 17 ] Phillips G N, Powell R. Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28 ( 6 ) : 689 – 718.