

# 某矿深部开采对地表及竖井稳定性影响研究

Study on the impact of deep mining on the stability of the surface and vertical shafts of a mine

逢铭璋, 张爱民, 任鹏召, 陈庆刚(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:**随着国内矿山开采的进行,开采深度越来越深。对于改扩建矿山,面临着生产接续问题,在进行深部接续开采时,往往地表主要构筑物会位于岩移监测范围内。本文采用FLAC<sup>3D</sup>软件对矿体的开采进行了数值模拟,得到了有关地表沉降及主要竖井变形数据。模拟结果表明,深部矿体开采充填后,对地表以及主要竖井稳定性基本无影响,深部开采能够保证矿山生产安全,为矿山接续工程提供了有力的科学依据。

**关键词:**深部开采;地表稳定性;数值模拟;竖井

**中图分类号:** TD262      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0016-05

**Abstract:**The mining depth of mines in China has gone deeper and deeper. The renovation and expansion of mines are faced with the problem of production continuity. As deep mining continues, the main structures on the surface are often located in the monitoring range of rock displacement. In this paper, the FLAC<sup>3D</sup> software is used for numerical simulation on the mining of the ore body, and the surface subsidence data and deformation data of main vertical shafts are obtained. The simulation results show that after the mined deep ore body is filled, there is little influence on the stability of surface and main vertical shafts. Deep mining can ensure the safety of mine production, which provides a solid scientific evidence for continuous mine engineering works.

**Key words:**deep mining; surface stability; numerical simulation; vertical shaft

## 1 前言

某矿当前生产浅部矿体,开采范围为-900 m标高以上的矿体。为充分利用采矿权范围内的矿产资源,实现矿山长时间稳定可持续性发展,该矿正在进行深部(-900~1300 m)开采设计,深部开拓采用竖井接力开拓系统。由于深部开采会使浅部生产系统及地表主要构筑物位于岩移监测范围内,深部矿体的开采问题更加突出。因此,在采用开采充填的条件下,深部开采能否保证地表设施及浅部生产系统的安全至关重要<sup>[1-4]</sup>。本文将对此进行研究,通过数值模拟手段分析深部矿体开采对地表及竖井工程的影响并进行安全性分析评价。

## 2 矿区工程地质概况

### 2.1 矿岩性质

在矿区的井下废石堆中选取具有代表性的块石样,主要岩石类型为以下几种。

上盘:绢英岩化花岗质碎裂岩(S<sub>Y</sub>J);

矿体:黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩(S<sub>Y</sub>JH);  
下盘:花岗岩( $\eta$ r)。

### 2.2 围岩稳定性评价

矿体顶板的岩石属半坚硬~坚硬岩,稳固性较好,在顶板的主断裂附近,岩石受主断裂影响,强度有所降低,特别是断层泥及其上下的部分岩石强度较低,稳固性较差。矿体岩石为软弱~坚硬岩石,且裂隙不发育,稳固性良好。矿体底板岩石强度高,属坚硬岩石,岩石中小结构面和裂隙均不发育,稳定性良好。

从早期矿山施工的坑道情况看,核实区的工程地质条件较好,只有上盘的石门中,由于巷道的跨度较大,施工中采用了水泥喷浆支护,主裂面附近岩石有坍塌、掉块现象,其余绝大多数施工在断裂带下盘中的巷道均不需任何支护,稳固性良好。

深部岩石力学特征,BQ岩体基本质量多数在Ⅱ~Ⅲ级,总体上岩石较完整,局部破碎,矿岩稳固性,岩石力学性质与浅部差异不大,岩石力学参数在深度趋势和岩性上并没有明显的变化趋势。

### 2.3 矿区原岩应力

根据矿区深部钻孔的地球物理测井资料,利用声波测井所获取的纵、横波信息结合密度以及泥质含量等曲线,对地应力参数进行了估算,其估算成果见表1。

[作者简介] 逢铭璋(1979-),男,山东青岛人,研究生,高级工程师,从事矿山工程咨询设计工作。

[引用格式] 逢铭璋,张爱民,任鹏召,等.某矿深部开采对地表及竖井稳定性影响研究[J].中国矿山工程,2021,50(6):16-20.

表1 地应力参数分析结果

深度/m	体积 模量/GPa	剪切 模量/GPa	杨氏 模量/GPa	泊松比	最大水平主 应力/MPa	最小水平主 应力/MPa	垂向 应力/MPa	抗压 强度/MPa	抗张 强度/MPa
500	45.9	24.1	61.6	0.3	12.2	10.3	13.7	158.9	17.6
600	48.4	25.9	65.9	0.3	14.6	12.3	16.5	165.8	18.4
700	56.8	27.6	71.2	0.3	17.5	14.9	19.2	174.5	19.4
800	57.5	28.3	73.0	0.3	19.9	16.9	21.9	177.5	19.7
900	57.6	28.5	73.5	0.3	22.3	19.0	24.6	178.2	19.8
1 000	60.0	29.7	76.6	0.3	24.8	21.1	27.3	183.3	20.4
1 100	55.4	27.0	69.7	0.3	27.3	23.3	30.0	172.1	19.1
1 200	56.0	27.0	69.7	0.3	29.9	25.6	32.7	172.1	19.1
1 300	41.2	21.1	54.1	0.3	31.8	27.2	35.4	146.7	16.3
1 400	55.2	26.9	69.4	0.3	34.7	29.7	38.1	171.7	19.1
1 500	52.6	24.7	64.2	0.3	37.5	32.2	40.8	163.1	18.1
1 600	58.3	27.9	72.3	0.3	39.8	34.1	43.5	176.3	19.6
1 700	55.4	25.9	67.2	0.3	42.5	36.5	46.2	168.0	18.7
1 800	61.5	29.7	76.8	0.3	44.6	38.3	48.9	183.6	20.4
1 900	53.8	25.8	66.7	0.3	47.2	40.5	51.5	167.2	18.6
2 000	55.1	26.1	67.6	0.3	49.4	43.4	53.2	168.7	18.7
2 100	58.4	28.2	75.2	0.3	51.7	45.4	55.8	177.3	19.7
2 200	57.5	27.2	70.5	0.3	54.4	47.8	58.5	173.4	19.3
2 300	56.4	28.1	72.4	0.3	56.2	49.3	61.1	176.4	19.6
2 400	57.0	28.0	72.2	0.3	58.8	51.7	63.8	176.2	19.6
2 500	65.2	29.1	76.1	0.3	62.5	51.2	68.4	184.4	20.5
2 600	67.7	30.0	78.4	0.3	65.0	53.4	71.0	192.1	21.3
2 700	66.1	29.6	77.2	0.3	67.2	55.2	73.6	188.2	20.9
2 800	65.6	29.8	77.6	0.3	69.3	56.9	76.2	189.6	21.1
2 900	61.0	27.6	72.0	0.3	71.8	59.0	78.8	170.6	19.0
3 000	61.8	27.1	71.0	0.3	74.8	61.6	81.4	167	18.6
3 100	68.7	30.3	79.4	0.3	77.1	63.4	84.0	195.5	21.7
3 200	66.4	29.8	77.9	0.3	79.0	64.9	86.6	190.5	21.2
3 300	67.9	31.5	81.8	0.3	80.6	66.2	89.2	203.8	22.6
3 400	67.1	29.9	78.2	0.3	84.0	69.1	91.8	191.5	21.3
3 500	65.7	29.0	75.7	0.3	86.7	71.4	94.4	183.2	20.4
3 600	68.3	32.4	84.0	0.3	87.1	71.4	97.0	211.3	23.5
3 700	62.4	28.7	74.6	0.3	90.3	74.2	99.6	179.4	19.9
3 800	59.1	26.3	68.7	0.3	93.7	77.5	102.2	159.2	17.7
3 900	63.9	28.0	73.4	0.3	96.5	79.6	104.9	175.2	19.5

从表1可以看出,水平方向最小主应力梯度基本稳定在0.02 MPa/m,水平方向最大主应力梯度主要稳定在0.024~0.03 MPa/m,垂向地应力梯度基本稳定在0.027 MPa/m。三个地应力关系是垂向应力>最大水平主应力>最小水平主应力,地应力状态类型为正断型。

### 3 计算模拟方案

#### 3.1 模型的建立

采用FLAC<sup>3D</sup>软件对矿体的开采进行数值模拟。

矿体核心部分建模是将矿床地质模型实体导入,实体建模时将岩层分为三类,分别为上盘岩体、下盘岩体、矿体。

数值模拟模型几何参数为走向长9 800 m,垂直走向8 100 m,高度2 100 m,节点数2 012 647,单元数1 935 395。数值模型底部及四周采取固定约束,垂直方向施加重力载荷,水平方向按照实测结果施加水平应力。模型如图1所示。模型中未考虑断层,主要是认为断层主要影响其附近工程的局部稳定性,对全矿区大范围的地表变形影响较小。

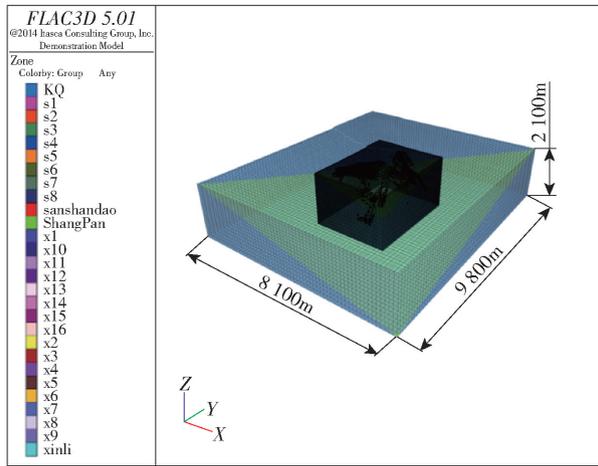


图1 模型尺寸示意图

### 3.2 计算参数选取

岩体物理力学参数取值以矿区岩块的岩石力学试验结果为主要依据。计算中采用的矿、岩物理力学参数见表2。

### 3.3 原岩应力

为了模拟矿区的真实应力状态,数值模型底部及四周采取固定约束,垂直方向施加重力载荷。研究区内地应力场随深度的变化规律,使用线性回归分析的方法,对地质资料勘测点的应力值进行回归分析,得出了最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力随深度变化的回归曲线和回归方程。在三个主应力的回归过程中,均增加了测点埋深  $H=0$  m 时,主应力值等于 0 MPa 的一个点。回归结果如下:

表2 计算岩体物理力学参数

岩石名称	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量/ GPa	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏结力/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	抗拉强度/ MPa
上盘岩体	2 706.00	6.72	3.73	2.80	11.40	30.60	4.37
矿体	2 709.00	2.51	1.35	1.05	21.50	32.60	3.44
下盘岩体	2 635.00	8.55	5.48	3.45	42.84	36.94	5.98
充填体	1 600.00	0.90	0.75	3.46	0.80	20.00	0.08

最大水平主应力的回归方程为

$$\sigma_{h, \max} = 0.81 + 0.0449H \quad (1)$$

式中: $H$ ——测点埋深, m, 以下同。

最小水平主应力的回归方程为

$$\sigma_{h, \min} = 0.87 + 0.0231H \quad (2)$$

垂直主应力值的回归方程为

$$\sigma_v = 0.28 + 0.0255H \quad (3)$$

按照上述线性回归方程(1)、(2)、(3)对模型施加初始应力。

### 3.4 本构模型

本构模型是对岩土材料力学特性的经验性描述,表达的是在外载荷作用条件下岩土体的应力应变关系。因此,合理地选择本构模型是完成数值模拟的一个关键步骤。只有选择的本构模型与工程材料力学特性契合度较高时,其选择的本构模型才是合理的。根据 FLAC<sup>3D</sup> 提供的本构模型以及实验中的材料特性,本次数值模拟共使用了两种本构模型:空模型和摩尔-库伦模型。

#### 1) 空模型

空模型通常用来表示被移除或开挖的材料。在数值模拟的后续阶段,空模型材料也可以转化成其他的材料模型。应用空模型可以进行开挖、回填之

类的模拟。

#### 2) 摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)模型

一般而言,模型评估准则要从连续介质力学观点的严格要求和实验室试验观察岩体性能实际显示要求,以及计算机应用简单要求的观点来考虑它们之间的平衡。Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型的计算方法简单,适当地选择材料参数,该模型能够和 Mohr-Coulomb 屈服准则相匹配。鉴于 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型的上述优点以及许多工程师的工程经验,选用该模型的计算结果比较符合实际情况,故本模拟方案的本构模型选用 Mohr-Coulomb 模型。摩尔-库伦屈服准则为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}$$

式中: $f_s$ ——屈服函数;

$\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ ——最大和最小主应力, Pa;

$c$ ——黏结力, Pa;

$\varphi$ ——内摩擦角,  $^{\circ}$ ;

当  $f_s > 0$  时,材料将发生剪切破坏。在通常应力状态下,岩土体的抗拉强度很低,因此可根据抗拉强度准则( $\sigma_1 \geq \sigma_T$ ) ( $\sigma_T$ 为抗拉强度)判断岩土体是否产生拉破坏。

## 4 深部开采对地表稳定性的影响

### 4.1 地表位移

为了分析开采对地表沉降的影响,重点关注矿体周边岩层的位移及地表岩层的位移数据。开采该范围矿体后矿区地表的总体沉降如图2所示,地表水平位移如图3所示,地表最大沉降值为-16.08 mm,地表最大值水平位移为11.35 mm。

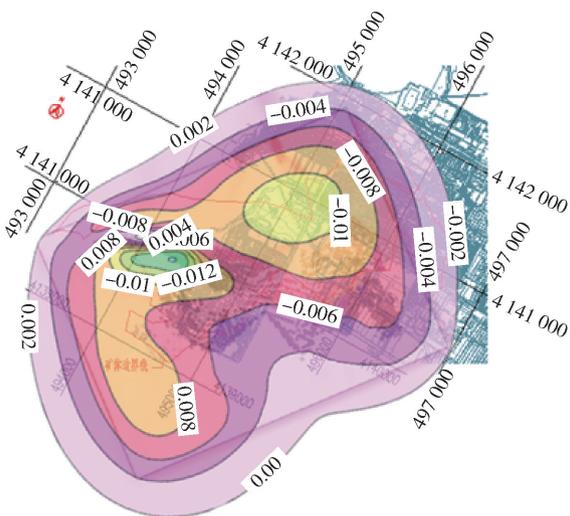


图2 矿区地表沉降等值线平面图

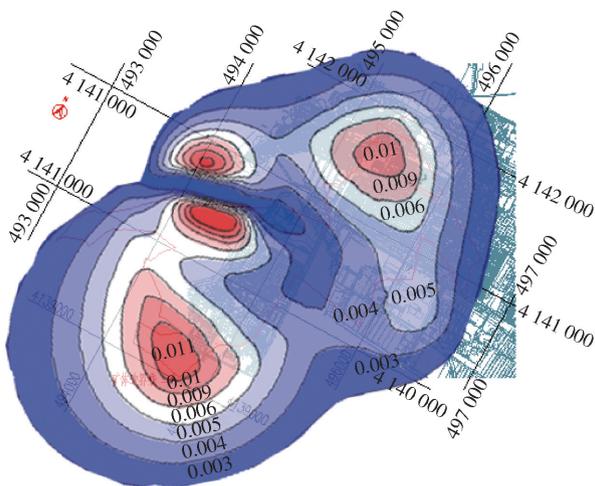


图3 矿区地表水平位移图

### 4.2 地表斜率与曲率的数值微分计算

地表的破坏与地裂缝的产生主要决定于地表变形值的大小和地表岩土体抵抗变形的能力。一般情况下,当地表均匀下沉时,建(构)筑物不会产生附加应力,因此不会带来损害。地面建筑物损坏的主要原因是地面的不均匀下沉和水平变形。地表不均匀下沉会引起地表发生倾斜变形,地表倾斜变形对高耸建筑物的损害较大,地表曲率变形将原来建筑的平面基础变为曲面形状,建筑物的荷载与基础土

壤间的初始平衡状态遭到了破坏,当变形值超过一定值时,房屋就会出现裂缝。地表水平变形对房屋的破坏作用很大,特别是拉伸变形,由于房屋的抵抗拉伸能力远小于抗压缩的能力,较小的地表拉伸变形就能使建筑物产生开裂性裂缝;当压缩变形较大时,可使房屋墙壁、地基压碎,地板鼓起产生剪切和挤压裂缝,可使门窗洞口挤成菱形,纵墙或围墙产生褶皱或屋顶鼓起。

由于有限差分是按照一定网度划分出网格,即FLAC<sup>3D</sup>得出的数值解是一些离散的点的数值,而地表移动引起的对地面构筑物的破坏主要表现在地表倾斜变形的影响、地表弯曲变形的影响、地表水平拉伸或压缩变形的影响。这就需要求出地表相应点位移变化的一阶导数或二阶导数。选取采矿区对应的地表位置2个方向的2条线段计算曲率、倾斜和水平变形,分别用AB、CD表示,如图4所示。

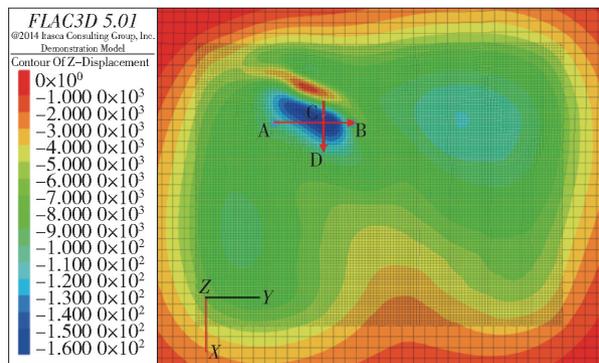


图4 AB、CD水平及竖向位移值数据点

由图4可知,深部矿体开采后在地表产生的累积最大沉降值-16.1624 mm、最大值水平位移11.35 mm、最大倾斜-0.05909 mm/m、最大曲率 $0.000735 \times 10^{-3}/m$ 、最大水平变形0.05201 mm/m均在I级建筑物保护的允许范围内。深部矿体开采后产生的地表累积变形不会给地表建(构)筑物的安全造成较大危害。

## 5 深部开采对竖井稳定性的影响

采用数值模拟的方法分析矿山深部开采后对矿区各条竖井稳定性的影响。在矿区内分布的主要竖井有多条,本文以混合井为例进行介绍。

### 5.1 混合井

矿区开采后对混合井影响的最大主应力场、垂直位移场和水平位移场分别如图5、图6、图7所示。从图5可以看出,最大主应力场基本上呈层状分布,

开采后,在新立混合井附近的应力场基本没有变化。从图6中可以看出,开采后,在该剖面上,矿体上盘的垂直位移约为10 mm。从图7中可以看出,开采后,在该剖面上,矿体上盘的水平位移约为5 mm,混合井井底的水平位移约为16 mm。

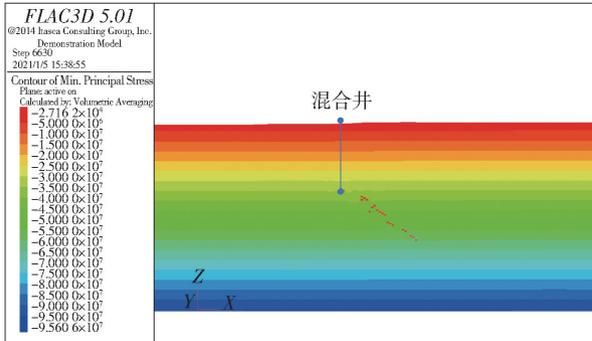


图5 开采对混合井影响的最大主应力场

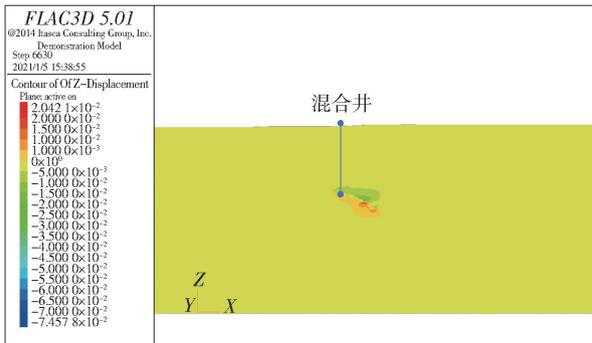


图6 开采对混合井影响的垂直位移场

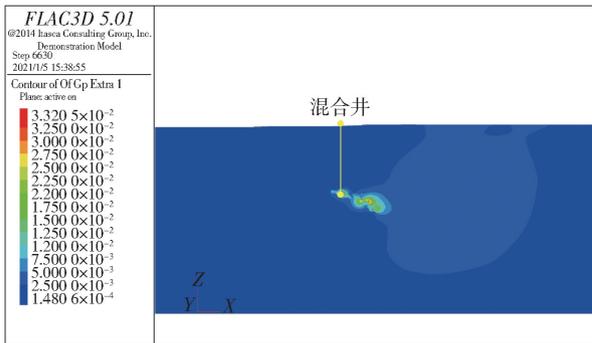


图7 开采对混合井影响水平位移场

## 5.2 各井筒井底变形

经模拟后,各井筒井底变形值见表3。

I级保护对象允许的倾斜变形 $<3\text{ mm/m}$ 、曲率 $<0.2 \times 10^{-3}/\text{m}$ 、水平变形 $<2\text{ mm/m}$ 。根据表3可知,矿区各主要井的井底变形值未达到《有色金属采矿设计规范》规定的变形临界值,因此,地下开采对矿区各主要井筒基本无影响。

表3 矿区开采各井底变形值

井名称	倾斜 $i/$ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	曲率 $k/$ $10^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$	水平变形 $\varepsilon/$ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$
混合井	-0.426 5	0.071 8	-0.070 9
主井	-0.067 17	0.092 14	-0.085 71
副井	-0.039 15	-0.035 31	0.035 87
措施井	-0.004 325	0.000 106 2	-0.000 361 1
盲混合井	0.000 040 06	0.000 037 25	-0.000 093 20
进风井	-0.000 351 4	-0.000 053 61	0.000 865 4
回风井	-0.000 659 2	-0.000 070 7	-0.002 073

## 6 结论

通过建立模型,对深部矿体开采进行了数值模拟,分析评价了深部开采活动对地表及竖井工程的稳定性影响,得到以下结论:

(1)深部矿体开采后,在地表产生的累积最大沉降值为 $-16.1624\text{ mm}$ 、最大值水平位移为 $11.35\text{ mm}$ 、最大倾斜为 $-0.05909\text{ mm/m}$ 、最大曲率为 $0.000735 \times 10^{-3}/\text{m}$ 、最大水平变形为 $0.05201\text{ mm/m}$ 。根据《有色金属采矿设计规范》,I级保护对象允许的地表倾斜变形 $<3\text{ mm/m}$ 、曲率 $<0.2 \times 10^{-3}/\text{m}$ 、水平变形 $<2\text{ mm/m}$ ,上述地表变形模拟计算结果均小于规范中I级保护对象允许变形值。

(2)深部开采设计范围内的矿体开采在地表产生的最大沉降值为 $-4.50\text{ mm}$ 、最大值水平位移为 $3.3\text{ mm}$ 。深部开采对地表的影响很小。

(3)由于矿体深部延伸位置的变化,深部开采在地表产生的增量最大沉降及最大水平位移的位置与矿区开采总体最大位移的位置不重叠。

(4)数值模拟结果表明,各个主要竖井井底变形值未达到《有色金属采矿设计规范》规定的变形临界值,地下开采对矿区内的各个井筒基本无影响。

### [参考文献]

- [1] 于润沧. 采矿工程师手册(下册)[M]. 北京:北京冶金工业出版社,2009.
- [2] 谢和平,彭苏萍,何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [3] 中华人民共和国煤炭工业部. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京:煤炭工业出版社,2000.
- [4] 原野,王贺,解联库,等. 深部充填开采覆岩移动规律及其对地表构筑物影响性研究[J]. 中国矿业,2016,25(S2):240-245.