

文章编号: 1000-7598 (2014) 05-1421-10

程潮铁矿地下开采引起岩层移动机制初探

程关文^{1,2}, 陈从新¹, 沈 强¹, 付 华¹, 夏开宗¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2.大连理工大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 在对矿区地质条件、采矿情况以及监测资料分析的基础上, 提出了悬臂梁的力学模型。该悬臂梁是由 NWW 向节理切割下盘的花岗岩岩体而产生。地下采矿引起的岩层移动分为两个阶段, 筒状破坏延伸到地表之前为第 1 阶段; 筒状破坏延伸到地表后, 则进入第 2 阶段。筒状破坏延伸到地表使水平构造应力释放, 悬臂梁受力发生变化, 而发生弯曲折裂变形和破坏, 从而形成了深部岩体破坏的 4 个区: 破裂岩体区、破裂过渡带、变形区和未扰动岩体区。通过对矿区地表测点所测数据进行分析, 结合上述岩层移动机制和裂缝产生过程, 将变形区域划分为: 变形累积区、裂缝产生区、裂缝扩展区和裂缝闭合区。随着采矿的进行, 深部岩体 4 区将逐渐向下延伸, 地表 4 区将逐渐向外扩展。

关 键 词: 采矿工程; 地表移动; 岩层移动; 采动裂缝

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Mechanism of rock strata movement caused by underground mining in Chengchao iron mine

CHENG Guan-wen^{1,2}, CHEN Cong-xin¹, SHEN Qiang¹, FU Hua¹, XIA Kai-zong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan 430071, China; 2. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024)

Abstract: Based on the geological conditions, underground mining situations, as well as the status of cracks and ground surface deformation of Chengchao Iron Mine, a cantilever beam mechanical model is proposed. The bottom-up tubular collapse in the deep rock mass causes the horizontal tectonic stress release which favors the bending fracture deformation and destruction of the NWW-trending joints. This model can explain the formation of four zones in the deep rock mass: rupture zone, the transition zone of rupture to deformation, the deformation zone and the undisturbed zone. In such a mode, it inevitably leads to different deformation areas on the ground surface related to the different zones in the deep rock mass. So the mine surface is divided into four related areas: cumulative deformation area, crack-producing area, crack-extending area, and crack-closing area. As mining progresses, four zones of the deep rock mass will gradually extend downward, while four areas of the ground surface deformation will gradually expand outward.

Key words: mining engineering; ground surface movement; rock strata movement; mining cracks

1 引 言

随着国民经济的迅速发展和对矿产资源需求的不断增大, 地下资源开发规模逐渐增大, 开采深度不断延伸。铁矿地下开采引起地表变形规律和岩体移动是一个十分复杂的系统工程问题, 很多学者对此进行了研究。朱家桥^[1]、席人双^[2]和黄平路^[3]等都认为程潮铁矿的地表变形和地质灾害主要受 NWW 向节理控制。朱家桥^[1]认为, 程潮铁矿地表变形破坏形式为倾倒式拉裂破坏。席人双等^[2]认为, 在程

潮铁矿东主井区, 地表主要以向采空区的阶梯变形为主。黄平路^[3]认为, 程潮铁矿的岩体变形的驱动力为塌陷坑的围岩水平构造应力的释放。程潮铁矿下盘的变形开裂的机制为: 地下采空区形成后, 东西向构造应力场的调整引起结构面的张裂和错动。陈从新等^[4-6]通过对深部岩体的观测将深部岩体变形分为破裂岩体区、破裂过渡带、变形区和未扰动岩体区。柏威伟^[7]将岩体变形破坏过程分为 4 个阶段: 地下采空区形成阶段、采空区顶部岩体塌落阶段、岩体卸荷变形阶段和岩体破裂移动阶段。以上

收稿日期: 2012-10-23

第一作者简介: 程关文, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要从事地面沉降及岩土工程方面的研究工作。E-mail: chengguanwen@126.com

文献根据地表和深部岩体观测现象，对深部岩体移动进行了简要的叙述，但NWW向节理怎样控制地表变形及地表灾害的发生、水平地应力释放后地表变形的扩展原因以及深部岩体的4个分区的形成机制，这些问题都没有解决，本文在前人研究的基础上通过对现场条件的简化，建立程潮铁矿地质力学模型，分析程潮铁矿深部岩体变形机制及其引起地表变形规律，从而很好地解释了上述问题。

2 矿区地质条件与采矿概况

2.1 地质条件

程潮矿区位于下扬子凹陷的西端，介于淮阳地盾与江南古陆之间或隶属淮阳山字型构造西翼。南临以幕阜山为主体的东西向构造带，西依新华夏构造的梁子湖凹陷，北靠南淮阳大断裂。在程潮铁矿所属区域，构造形迹的走向主要有两组，一组为NWW向，另一组为NNE向。矿区内构造较为复杂，既有NWW向的淮阳山字形构造成分，又有NNE向的新华夏构造形迹，两者在空间上相互重叠，时间上相互交替，构成了一幅复杂而又有序的构造图案。其中NWW向的山字型构造是矿区的主干构造，它控制着地层的展布，岩体产状以及矽卡岩和铁矿体的分布。

程潮矿区内包含了沉积岩、岩浆岩和变质岩三大类的岩石。沉积岩主要为三叠系蒲圻群第2段的泥质粉砂岩和粉砂质泥岩；变质岩主要有蒲圻群第2段角岩和三迭系大冶群大理岩；岩浆岩主要有燕山期第2期闪长岩、燕山期第4期花岗岩。各类岩石在平面分布图如图1所示。硬石膏矿、铁矿与矽卡岩均呈脉状、透镜体状分布于大理岩与花岗岩接触带、闪长岩与花岗岩接触带、角岩与花岗岩接触带附近。

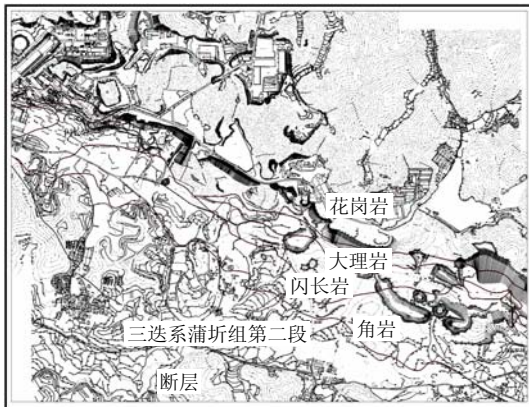


图1 工程地质平面图

Fig.1 Engineering geological plan

矿体下盘花岗岩体的结构面主要有4组，分别为NE向、NWW向、NNW向、NEE向。下盘节理以压剪节理为主，节理面平直光滑，延伸很长。其中，NE向节理最为发育，倾向南东，在地表和地下平巷的出露处均为贯通发育，可见延伸长度最长可达50m(D04点)，节理密度约为10条/m。NWW向节理也是花岗岩中的主要节理，其走向与矿体走向、程潮大断裂走向是一致的，该组节理的发育程度与NE向节理相差无几。在地表，NWW向节理倾向SSW，陡倾角；在地下平巷，NWW向节理倾向NNE，倾角为44°~66°。NWW向节理在地表和地下平巷也均为贯通发育，节理密度约为3~8条/m。NEE向节理主要见于地表的调查点，贯通发育，节理密度约为0.1~1.0条/m，结构面统计分析结果见表1。

表1 结构面统计分析结果
Table 1 Statistical results of discontinuities

调查点 编号	结构面分组			
	NE向	NWW向	NNW向	NEE向
D01	120° ∠87°	200° ∠88°		
D02		200° ∠82°	261° ∠83°	168° ∠80°
D03	100° ∠65°	192° ∠86°		
D04	140° ∠58°		81° ∠83°	340° ∠14° 340° ∠82°

2.2 矿体分布及采矿情况

井区南部的矿体主要有I、II、III号3个矿体。矿体本身主要是由接触交代大理岩变化的矽卡岩而成矿。在平面上，各铁矿体大致均沿NWW方向呈迭瓦状平行展布；在纵剖面上则表现为向北西西方向侧伏(图2)；在横剖面上各主要铁矿体也是呈首尾交错，部分重叠的迭瓦状排列。各矿体大多赋存在斑状花岗岩、浅色闪长岩与白云质大理岩的接触带上或其附近。矿体多呈不规则透镜状向南缓倾斜，部分矿体或矿段常有分枝复合及胀缩现象。

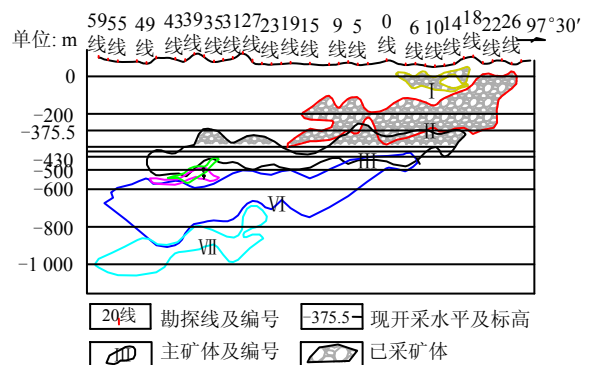


图2 主矿体垂直纵投影图

Fig.2 Projection of main orebody

程潮铁矿矿区分为东西区，两区同时开采。开采情况分别见表 2、3。程潮铁矿已进行 -395.0 m 和 -410.5 m 两个水平的开采，其中开采活动主要集中在 -395.0 m 水平。

表 2 西区开采情况表

开采水平 / m	开采时间/年-月		开采矿体
	起	止	
-290.0	2002-07	2004-07	III号矿体
-307.5	2002-11	2004-07	III号矿体
-325.0	2003-05	2004-12	III号矿体
-342.5	2004-07	2006-12	III号矿体
-358.0	2005-10	2008-09	III号矿体
-375.5	2007-07	2012-06	III号矿体

表 3 东区开采情况表

开采水平/m		开采年限/年		开采矿体界线		
起	止	起	止	I号矿体	II号矿体	III号矿体
-16	-96	1970	1978	4~16线	20~26线	
-106	-150	1979	1984		10~24线	
-160	-206	1984	1990		9~22线	
-218	-260	1990	1997		11~22线	
-260	-302	1998	2002		13~22线	
-302	-358	2002	2007			15~16线
-358	375	2007	2009			39~16线

3 矿区地表与深部岩体变形特征

3.1 地表塌陷

程潮铁矿东区自 1970 年从 -16 m 开始起采，1971 年地表出现塌陷情况，至今随着开采的进行，地表塌陷范围一直都在不断向外扩展。西区自 2006 年起相继出现塌陷坑、地表裂缝和井筒开裂的现象。2006 年 4 月 17 日，程潮大湾东侧一带发生地表沉降。沉降区域位于地表沉降变形区的中心部位（37~39 线之间），形成了一个 4 140 m² 的塌陷坑。4 月 18 日，在该沉降变形区域东侧，再次发生了地表塌陷，塌陷面积约 150 m²。在地表塌陷之后，西区地表变形处于渐变式变形阶段。

3.2 地表裂隙

西区地表裂隙主要分布在粉矿堆场及其附近区域。地表裂隙最大宽度达到 80 cm。主要贯通裂隙大致与地下采矿边界平行，方向为 NE 和 NNW 方向。随着地下采矿的不断进行，地表裂隙范围不断向北扩展，裂隙宽度也不断增加，并且地表裂隙表现出明显的弯曲倾倒破坏现象（见图 3）。

东区地表裂隙主要分布在东主井和西风井及其附近区域。地表裂隙在东主井区大多数是沿 NWW

向展布的，在西风井去大多数是沿 NE 向展布的，倾角均为近直立。在整个东区，NWW 向和 NE 向节理是最为发育的，且均为陡倾发育。



图 3 粉矿堆场区域倾倒破坏现象

Fig.3 Toppling phenomenon of fine ore yard

3.3 地表变形

地表水平位移监测采用 GPS 多边网控制静态测量方法，测点总测点数为 203 个，分布于整个程潮矿区，其测量精度^[8]可达到 3 mm。沉降监测采用国家二等水准测量，变形点的垂直位移测量采用复合路线和闭合环两种方法，测点数为 122 个，主要分布于程潮铁矿矿区下盘。

根据测点所测数据绘制出程潮铁矿矿区水平位移（图 4）和沉降位移等值线图（图 5）以及矿区的移动线和陷落线图。

地表变形的 2 cm 周界线在北部已到达新副井附近，南部周界线已达涂桥村位置，西区的变形周界线已经到达 5 号门门卫室，东部周界线到达水库附近。措施井、运输隧道、粉矿堆场、矿区公路等构筑物已完全处于地表移动区内部。移动线和陷落线大致以采空区为中心向外扩展。运输隧道的东南侧、原杨家境储矿场以及矿区公路的一部分进入陷落区。拦洪坝区域的一部分、东主井大部分区域、措施井的大部分区域、运输隧道的东南侧、公路隧道的南侧入口以及王家洞和涂桥村已有部分进入移动区。

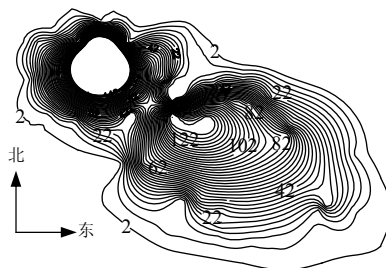


图 4 水平位移等值线图（单位：cm）

Fig.4 Horizontal displacement contour map (unit: cm)

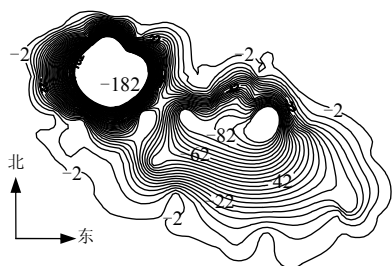


图5 程潮铁矿竖向位移等值线图 (单位: cm)
Fig.5 Vertical displacement contour map (Unit: cm)

3.4 深部岩体变形特征

在东主井北侧 (DZJ1) 及南侧 (DZJ2) 各布置了一个钻孔。在钻进过程中, DZJ1 孔在 25.5 m 时完全不返水, DZJ2 孔在 63 m 时完全不返水。

从钻孔声波成果 (图 6、7), 可以看出, DZJ1 在 46 m 以上纵波波速在 3 000 m/s 左右, 而在 46 m

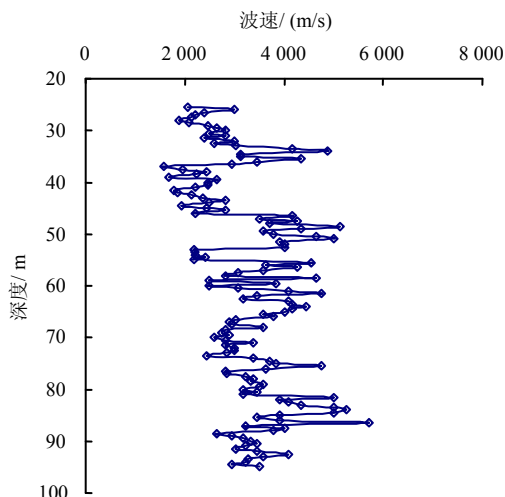


图6 DZJ1 岩体纵波波速与深度关系
Fig.6 Relationship between longitudinal wave velocity and depth in DZJ1

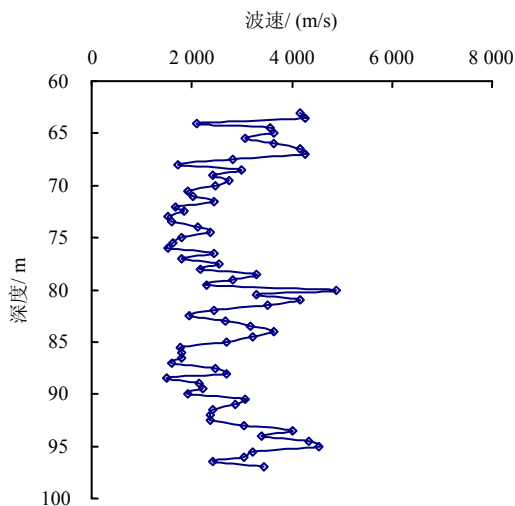


图7 DZJ2 岩体纵波波速与深度关系
Fig.7 Relationship between longitudinal wave velocity and depth in DZJ2

以下纵波波速在 4 000 m/s 左右。而整个 DZJ2 测孔的岩体的纵波波速都在 3 000 m/s 左右。由于 DZJ2 测孔深度只有 100 m, DZJ2 测孔未能到达纵波波速为 4 000 m/s 左右的区域。

4 程潮铁矿岩层移动机制分析

4.1 程潮铁矿地质模型

结合工程地质南北向剖面图, 以及现场调查的节理情况, 可以建立程潮铁矿的地质模型 (见图 8, 其中倾斜的平行线表示 NWW 向节理)。

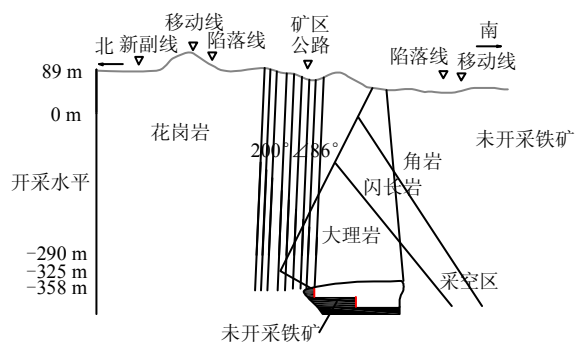


图8 地质力学模型
Fig.8 Geomechanical model

4.2 深部岩体变形破坏力学模型

由于地下采矿是一个随时间推进的过程, 因此在不同阶段, 采矿引起深部岩体变形的机制不同, 本文结合程潮铁矿西对其进行说明。

第 1 阶段为筒状破坏区域产生阶段, 在此阶段内, 随着矿体开采深度和回采垂直高度比值的减小, 深部岩体发生筒状塌陷的岩体逐步向地表延伸如图 9 所示。截止到 2006 年 12 月, 程潮铁矿西区回采累计垂直高度 $H_1=52.5$ m, 矿体平均开采深度 $H_{vc}=412.5$ m, 矿体开采深度与回采累计垂直高度的比值达到 7.9。白义如等^[9]分析程潮铁矿东区地下

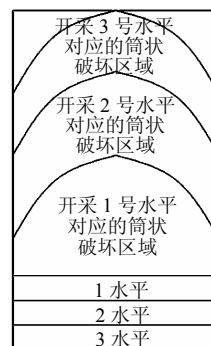


图9 筒状塌陷过程示意图
Fig.9 Illustration of the process of tubular collapse

采矿引起的地表沉降和岩层移动规律得出结论：当矿体开采深度与回采累计垂直高度的比值小于 17 时，岩层移动会波及到地表；反之，则不会波及到地表。根据白义如^[9]的结论，程潮铁矿西区在 2006 年，岩层移动会波及到地表。从实际观测看，程潮铁矿西区 2006 年 4 月发生突然塌陷。

第 2 阶段矿体周边发生塌陷后，引起围岩水平构造应力的释放，这时 NWW 向节理对程潮铁矿西区下盘变形和开裂起主要作用。NWW 节理将下盘切割成悬臂梁的模型，最靠近筒状破坏区域的第 1 个悬臂梁的受力件图 10 所示。

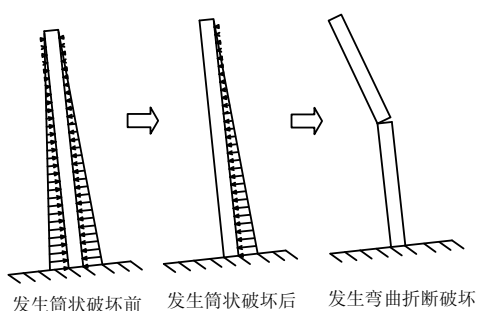


图 10 悬臂梁受力及破坏示意图
Fig.10 Schematic diagram of cantilever force and destruction

Aydan 等^[10]认为，层状悬臂梁弯曲倾倒是由于弯曲引起的拉应力在岩柱最大弯矩点产生拉裂缝造成的。全面系统地计算边坡岩体的弯矩是非常复杂的，因此，他提出运用极限平衡方法分析此类问题。

根据悬臂梁平衡受力图（图 11）以及不同的正应力分布对应的法向力的作用位置示意图（图 12）以及地应力分布情况，取 $\eta = \frac{1}{3}$ ，Aydan^[10]推导出以下公式：

$$P_{(i-1)} = \frac{P_{(i+1)} \left(\eta h_i - \mu_i \frac{t_i}{2} \right) + S_i \frac{\bar{h}_i}{2} - \frac{2I_i}{t_i} \left(\sigma_t + \frac{N_i}{A_i} \right)}{\left(\eta h_{i-1} + \mu_i \frac{t_i}{2} \right)} \quad (1)$$

式中： $I_i = t_i^3 / 12$ ， $N_i = W_i \sin \alpha$ ， $W_i = \gamma t_i \bar{h}_i$ ， $S_i = W_i \cos \alpha$ ， $\bar{h}_i = 0.5(h_i + h_{i-1})$ ， $\mu_i = \tan \varphi_i$ 。 I_i 为悬臂梁的惯性矩，下标 i 为悬臂梁的编号； W_i 为悬臂梁的重力； N_i 为重力沿垂直于悬臂梁方向的分力； S_i 为重力沿平行于悬臂梁方向的分力， h_i 为悬臂梁的高度， μ_i 为摩擦系数； φ_i 为节理摩擦角； α 为悬臂梁倾角； t_i 为岩层层厚； γ 为材料重度； A_i 为悬臂梁的截面积，在单位走向长度的情况下等于 t_i 。

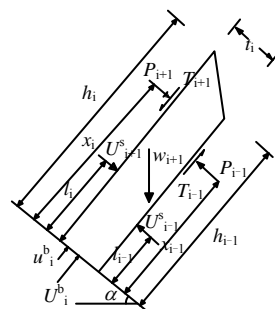


图 11 悬臂梁极限平衡受力图
Fig.11 Force diagram of cantilever beam limit equilibrium model

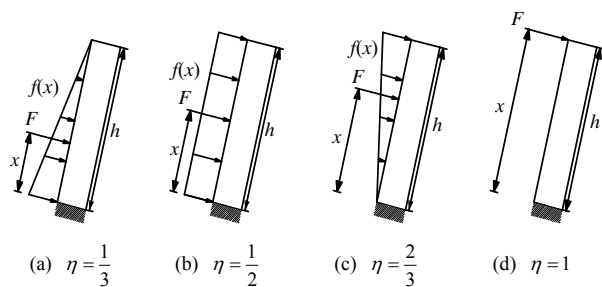


图 12 不同的正应力分布对应的法向力的作用位置示意图
Fig.12 Illustration of the position of action of normal force on a column for various distributions of normal stress

将该模型代入到程潮铁矿最靠近筒状破坏区域的第 1 个悬臂梁，以确定该悬臂梁断裂的深度与悬臂梁的关系。根据程潮铁矿筒状破坏延伸到地表后，最靠近筒状破坏区域的第 1 个悬臂梁的受力情况，

可以确定 $P_{(i+1)} = \frac{K\gamma h^2}{2}$ ， K 为地应力的测压系数， h 为悬臂梁的破坏深度，而 $P_{(i-1)} = 0$ ，并且令 $\bar{h}_i = h_i = h_{i-1} = h$ 。可以将上面的方程进一步简化：

$$\frac{K\gamma h^2}{2} \left(\eta h - \mu \frac{t_i}{2} \right) + \gamma t_i h \sin \alpha \frac{h}{2} - \frac{2I}{t_i} \sigma_t + \frac{\gamma t_i h \cos \alpha}{A_i} = 0 \quad (2)$$

式中： σ_t 为岩体的抗拉强度。

在程潮铁矿区域取 $K = 1.4$ ； $\eta = 1/3$ ；花岗岩的抗拉强度 $\sigma_t = 1\ 600$ MPa，节理摩擦角 $\varphi_i = 45^\circ$ ，悬臂梁倾角 $\alpha = 86^\circ$ 。可以得到一个以 t_i 参数，关于 h 的 3 次方程。通过取不同的 t_i ，解三次方程算式对应的 h ，并以 t_i 为横坐标， h 为纵坐标，得出图 13。

现阶段程潮铁矿开采的水平为 -395 m 水平和 -410 m 水平，如果不考虑悬臂梁的折断，NWW 向节理切割而成的悬臂梁的长度将超过 400 m。要使近 400 m 的悬臂梁不发生弯折破坏，NWW 向节理

切割而成的悬臂梁的宽度将到达 40 m 左右, 而实测 NNW 向节理在地表和地下平巷中的节理密度约为 3~8 条/m。因此, 程潮铁矿筒状破坏区周边已经发生弯折破坏, 并且随着距离筒状破坏区距离的增大, 水平构造应力逐渐增大, 深部岩体从发生弯折破坏到发生弯折变形, 最后不发生变形^[11]。

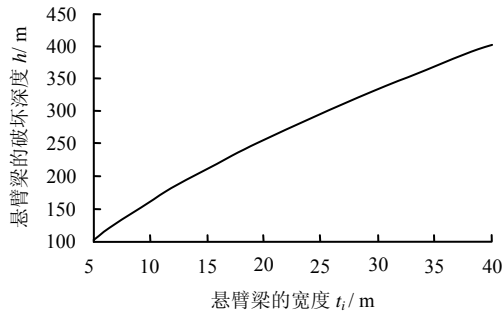


图 13 悬臂梁宽度与悬臂梁破坏深度示意图

Fig.13 Schematic diagram between cantilever beam width and depth of cantilever beam destruction

4.3 对深部岩体分区的解释

深部岩体形成过程如下 (图 14):

(1) 破裂岩体区的岩体主要有两部分构成, 第一部分为由于靠近筒状破坏区域的悬臂梁发生弯曲折断破坏而形成; 另一部分主要是由于悬臂梁发生弯曲变形, 而使岩体发生张裂破坏而形成的。

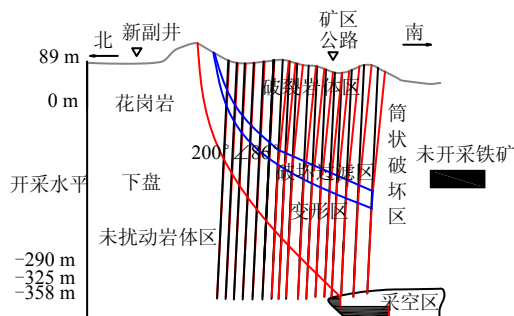


图 14 深部岩体分区示意图

Fig.14 Schematic diagram of deep rock partition

(2) 破裂岩体区的下方为岩体破裂与岩体变形的过渡阶段, 即为破坏过渡区。

(3) 再往下即为变形区, 该区域的悬臂梁主要发生弯曲变形, 但该区域内的变形较小, 不足以引起悬臂梁的弯曲折断和张裂破坏, 因此, 称为变形区。

(4) 变形区以下的岩体, 由于未受到地下采矿的影响或者受地下开采影响较小, 基本可以忽略不计, 因此, 称为未扰动区。

深部岩体的 4 个分区, 随着采矿的进行, 会不断向下和四周扩展。

4.4 地表变形区域分区

结合地表测点的变形特征、深部岩体变形机制以及地表裂缝的产生过程^[12], 将程潮铁矿地表变形区域分为 4 个区域 (见图 15): 变形累积区、裂缝产生区、裂缝闭合区和裂缝扩展区。下面分别对 4 个区域的产生机制、地表变形特征进行描述。

(1) 裂缝扩展区 在竖向筒状破坏区的周围, 由于已经产生了倾倒型弯曲折裂破坏, 又没有侧向地应力限制, 因此, 地表变形和裂缝会一直以较快的速度发展下去, 直到采矿停止, 该区域称为裂缝扩展区。程潮铁矿的粉矿堆场和部分矿区公路属于该区域。该区的地表累计变形先以稳定变形为主, 然后进入一个快速变形阶段, 该区域内的测点的累积变形随时间的变化曲线为折线型, 先缓后陡 (见图 16 和图 17), 其代表测点为 E04、E05 和 LG2。地表裂缝规模较大, 最大裂缝的宽度达到 80 cm (见图 18), 且不断增加, 地表变形出现向采空区倾倒变形的特征 (见图 3), 该区域的变形和裂缝扩展相对于采矿的滞后性较小。该区域测点的累计变形值也很大。

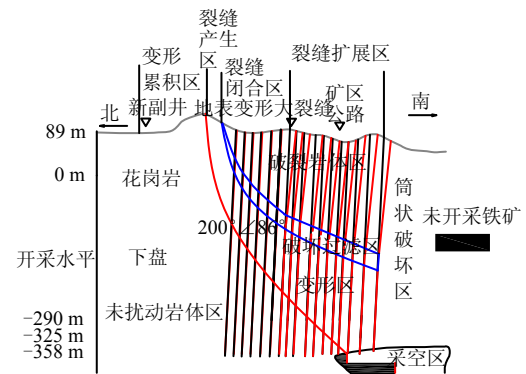


图 15 地表变形规律和岩层移动机制

Fig.15 Surface deformation law and rock movement

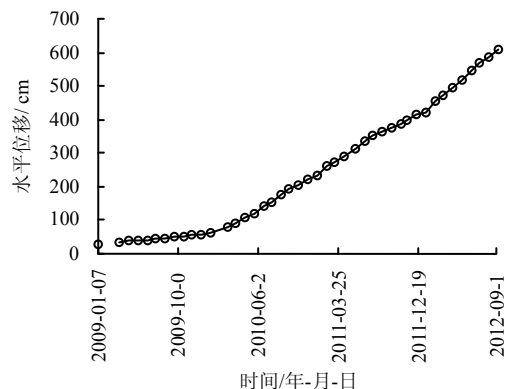


图 16 E05 的水平位移曲线

Fig.16 Horizontal displacement curve of E05

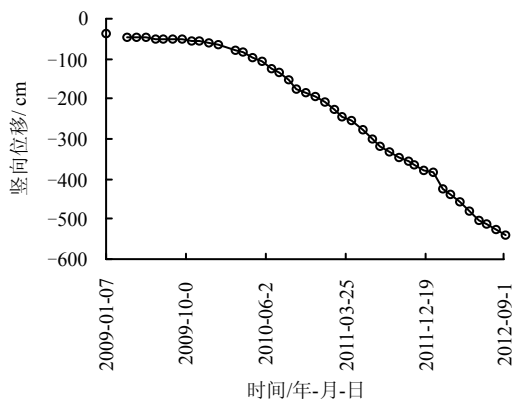


图 17 E05 的竖向位移曲线
Fig.17 Vertical displacement curve of E05



图 18 粉矿堆场附近地表裂缝
Fig.18 Surface cracks of yard of fine ore

(2) 裂缝闭合区 该区包括两部分：随着距离竖向筒状破坏区的距离的增加，侧向地应力增大，深部岩体未发生倾倒型弯曲折裂破坏，而只发生弯曲变形，但弯曲变形引起的水平应变大于节理间最大的抗拉应变，导致深部岩体或者地表发生张裂破坏的这部分地表即为裂缝闭合区。程潮铁矿的运输隧道的东南侧属于裂缝闭合区。该区具体表现为地表累计变形先以稳定变形为主，然后进入一个突变阶段，最后又以稳定变形为主，该区域地表测点的累积变形随时间的变化曲线为 S 型，先缓、后陡、再缓（见图 19 和图 20），其代表测点位 F02、F04 和 F05。地表裂缝规模依然较大，但较裂缝扩展区的裂缝要小得多（见图 21），裂缝扩展速度也较裂缝扩展区的裂缝扩展速度慢。该区域的变形和裂缝扩展相对于采矿的滞后性较裂缝扩展区大。该区域测点的累积变形值也较大，裂缝的宽度在 0.5~3.0 cm 之间。

在这里需要指出，裂缝闭合区中闭合的含义并不是指裂缝闭合，而是指随着采矿的进行，由于深部岩体制发生弯曲变形，使得地表裂缝的宽度基本不发生变化。而裂缝扩展区中扩展的含义是指随着采矿的进行，由于深部岩体制发生弯折破坏，使得

地表裂缝的宽度不断增大，并且在裂缝扩展区和裂缝闭合区之间会形成一条宽度较大的裂缝作为两个区域的分界线。

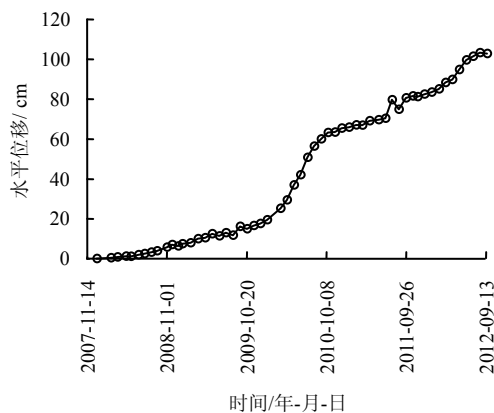


图 19 F05 的水平位移曲线
Fig.19 Horizontal displacement curve of F05

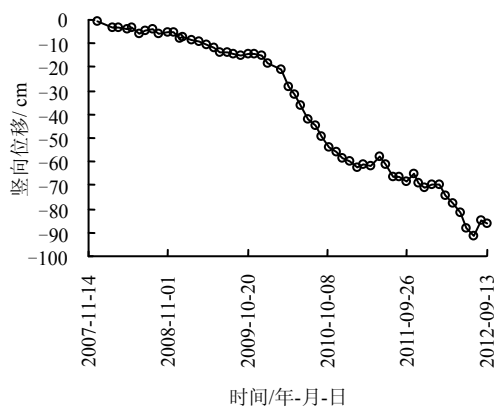


图 20 F05 的竖向位移曲线
Fig.20 Vertical displacement curve of F05

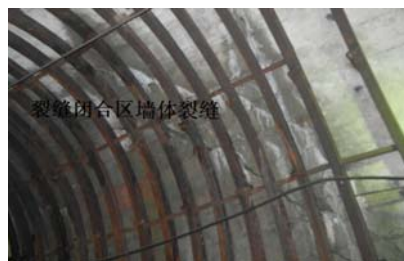


图 21 运输隧道内东南侧裂缝
Fig.21 Cracks of southeast of transportation tunnels

(3) 裂缝产生区 随着距离竖向筒状破坏区的距离的进一步增加，侧向地应力进一步增大，深部岩体只发生倾倒型弯曲变形，并且弯曲变形引起的水平应变小于节理间最大的抗拉应变，深部岩体或者地表未产生张裂破坏的，这部分地表即为裂缝闭合区，因而未产生裂缝，但地表变形引起的应变已达到一定值，是地表一些抗拉强度较小的混凝土水

沟出现裂缝。程潮铁矿的运输隧道的西北侧以及拦洪坝的坝体部分属于裂缝产生区。该区具体表现为地表变形以稳定变形为主，该区域内的测点的累积变形值随时间的变化曲线为直线型(见图 22 和 23)，其代表测点位 D01、D02 和 E01。地表未出现裂缝或者出现少量闭合裂缝，在该区域的抗拉强度较小的混凝土构筑物上出现裂缝(见图 24)。

该区域的变形变化趋势较缓，裂缝扩展速度很慢。该区域的变形和裂缝扩展相对于采矿的滞后性较大。该区域测点的累计变形值较小。

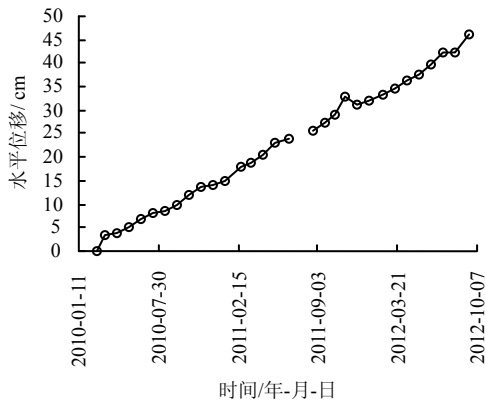


图 22 N23 的水平位移曲线
Fig.22 Horizontal displacement curve of N23

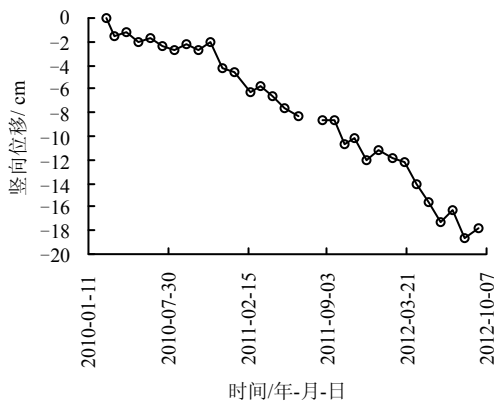


图 23 N23 的竖向位移曲线
Fig.23 Vertical displacement curve of N23



图 24 拦洪坝区域地表裂缝
Fig.24 Surface cracks of Lanhongba

(4) 变形累积区 在整个变形区域中，距离竖向筒状破坏区最远的是变形累积区，该区域的侧向地应力接近原始地应力。程潮铁矿的选矿车间、新副井、石家湾以及拦洪坝的北部属于变形累积区。该区域产生变形的原因由于靠近采空区一端出现了应力释放，相当于轴向应力不变，围压减小所引起的变形。该区域位于采矿引起地表变形的区域的最外沿，其累计变形值很小，测试过程中的误差对累计变形值较大，因此，该区域内测点的累计变形随时间的变化曲线为波动型(见图 25 和图 26)，其典型测点为 N18 和 N22。该区域不出现裂缝。该区域测点的累计变形值最小。

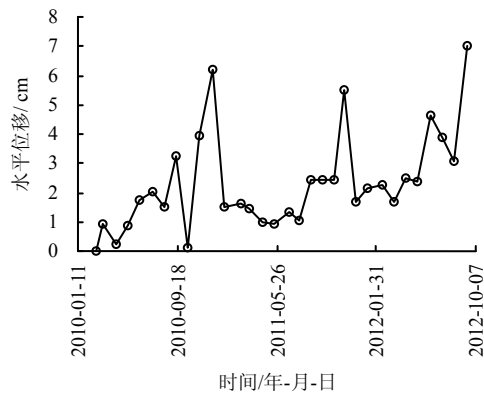


图 25 N18 的水平位移曲线
Fig.25 Horizontal displacement curve of N18

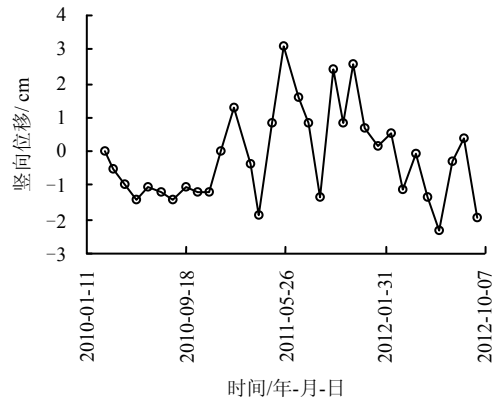


图 26 N18 的竖向位移曲线
Fig.26 Vertical displacement curve of N18

随着采矿的进行，地表变形的 4 个区域，并不是保持不变的，而是不断向外扩展的，这是深部岩体分区向外扩展在地表上的体现。

4.5 地表分区与移动性和陷落线的关系

移动角即移动主断面上临界变形值得点和采空区边界连线和水平线之间在采矿区域外侧的夹角。这里所说的临界变形值是无需维修就能保持建筑物及各种设施正常使用所允许的地表最大变形。

将整个变形区域内，变形等于临界变形值的点连成的曲线即为移动线。其临界变形点的变形值定为： $T = 3 \text{ mm/m}$ ， $\varepsilon = 2 \text{ mm/m}$ ， $k = 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。其中： T 为倾斜度， ε 为水平变形， k 为曲率。

陷落角即采空区上方地表最外侧的裂隙位置和采空区边界的连线与水平线之间在采空区外侧的夹角。采空区上方地表最外侧的裂隙位置连成的曲线即为陷落线。陷落临界变形点的变形值定为： $T = 10 \text{ mm/m}$ ， $\varepsilon = 6 \text{ mm/m}$ ， $k = 0.6 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。变形区域内超过临界变形值的地方会发生地表的塌陷变形。

程潮铁矿中的移动线和陷落线是根据水平应变 ε 得到。根据移动线和陷落线的定义，可以得到程潮地表变形的4个区域与移动线和陷落线的关系为：陷落线以内包括裂隙扩展区和裂隙闭合区，陷落线和移动线之间为裂隙产生区，移动线以外为变形累积区。

5 结 论

(1) 程潮铁矿从起采至今，岩层移动分为两个阶段，初始阶段水平地应力未完全释放，地质构造对于地表变形的影响较小；第2阶段水平地应力完全释放，地质构造对于地表变形和地质灾害其控制作用，这两个阶段以筒状破坏是否延伸到地表作为分界。

(2) 程潮铁矿岩层移动的第2阶段的深部岩体变形机制为采矿引起采空区上方竖向筒型塌陷扩展到地表后，两侧岩体的侧向地应力减小，引起由NWW向节理切割而成的悬臂梁发生倾倒型弯曲折裂变形和破坏，从而形成程潮铁矿深部岩体的4区。

(3) 结合悬臂梁的受力和变形破坏特征，解释了深部岩体破坏的4个区形成——破裂岩体区、破裂过渡带、变形区和未扰动岩体区的形成原因。

(4) 结合地表测点的变形特征、深部岩体变形机制以及地表裂缝的产生过程，将程潮铁矿地表变形区域分为4个区域（图15）：变形累积区、裂缝产生区、裂缝闭合区和裂缝扩展区，分析了地表变形4区的变形特征。

(5) 得出了地表4区与传统移动线和陷落线之间的关系为：移动线以外为变形累积区，移动线和陷落线之间的区域为裂缝产生区，陷落线以内为裂缝闭合区和裂缝扩展区。

(6) 深部岩体4区随着时间会不断向下延伸，地表变形4区随着时间会不断向外扩展，这是深部岩体变形不断向下扩展在地表上的体现。

参 考 文 献

- [1] 朱家桥. 程潮铁矿东区地质灾害浅析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497—502.
ZHU Jia-qiao. Primary analysis of geological hazard in the eastern area of Chengchao iron mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(5): 497—502.
- [2] 席人双, 陈从新. 结构面对程潮铁矿东区地表及岩体移动变形的影响研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 532—537.
XI Ren-shuang, CHEN Cong-xin. Study of influence of discontinuities on rock movement and surface deformation in eastern area of Chengchao iron mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32 (Supp.2): 532—537.
- [3] 黄平路. 构造应力型矿山地下开采引起岩层移动规律研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [4] 陈从新, 肖国锋, 韦立德, 等. 程潮铁矿东区东主井和西风井结构安全及井区岩体稳定性研究报告[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2007.
- [5] 陈从新, 肖国锋, 黄平路, 等. 程潮铁矿采矿引起的地表变形监测与预测研究报告[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2011.
- [6] 陈从新, 肖国锋, 黄平路, 等. 程潮铁矿东主井、西风井延期使用可行性研究报告[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2010.
- [7] 柏威伟. 程潮铁矿东区地表及建筑物变形规律研究[硕士学位论文 D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2010.
- [8] 林健. 基于GPS监测的地下开采矿山地表变形分析与预测研究[硕士学位论文 D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [9] 白义如, 谷志孟, 白世伟. 程潮铁矿东区地下采矿引起地表沉降和岩层移动初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 340—342.
BAI Yi-ru, GU Zhi-meng, BAI Shi-wei. Primary study on ground surface subsidence and rockmass movement in east area of Chengchao iron mine due to underground mining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 340—342.
- [10] AYDAN Ö, KAWAMOTO T. The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilization[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1999, 25(3): 143—165.

- 法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1345—1348.
- LIU Jin-long, LUAN Mao-tian, ZHAO Shao-fei, et al. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on shear strength reduction technique[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1345—1348.
- [12] 马建勋, 赖志生, 蔡庆娥, 等. 基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2690—2693.
- MA Jian-xun, LAI Zhi-sheng, CAI Qing-e, et al. 3D FEM analysis of slope stability based on strength reduction method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2690—2693.
- [13] 陈昌禄, 邵生俊, 郑万坤, 等. 黄土高边坡的三维动力稳定性分析——以固原九龙山边坡为例[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 229—232, 252.
- CHEN Chang-lu, SHAO Sheng-jun, ZHENG Wan-kun, et al. Three dimensional dynamic stability analysis of high loess slope taking the Jiulongshan slope for example[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 229—232, 252.
- [14] 曹云, 肖武. 基于强度折减和重度增加法的三维边坡稳定性分析[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(3): 46—50.
- CAO Yun, XIAO Wu. Application of strength reduction and gravity increase method in three dimensional slope stability analysis[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2010, 38(3): 46—50.
- [15] 马云峰, 师刚. 位移突变判据在两河口水电站庆大河北岸岩质边坡三维分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(1): 117—119.
- MA Yun-feng, SHI Gang. Application of displacement mutation criteria in three-dimensional analysis on rock slope in left bank of Qingda river[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2009, 7(1): 117—119.
- [16] 陈菲, 邓建辉. 岩坡稳定的三维强度折减法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2546—2551.
- CHEN Fei, DENG Jian-hui. Three-dimensional stability analysis of rock slope with strength reduction method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2546—2551.
- [17] 赵尚毅, 郑颖人, 刘明维, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的边坡安全系数定义及其转换[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2730—2734.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, LIU Ming-wei, et al. Definition and transformation of slope safety factor based on Drucker-Prager criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.1): 2730—2734.
- [11] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J, et al. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1997, 30 (2): 75—93.
- [12] 康建荣. 山区采动裂缝对地表移动变形的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 59—64.
- KANG Jian-rong. Analysis of effect of fissures caused by underground mining on ground movement and deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 59—64.
- [13] BRADY B H G, BROWN E T. Rock Mechanics for underground mining[M]. London: George Allen Unwin, 1985.
- [14] 卢海峰, 刘泉声, 陈从新. 反倾岩质边坡悬臂梁极限平衡模型的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 33(2): 577—584.
- LU Hai-feng, LIU Quan-sheng, CHEN Cong-xin. Improvement of cantilever beam limit equilibrium model of counter-tilt rock slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 33(2): 577—584.
- [15] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [16] 黄平路, 陈从新, 肖国峰. 复杂地质条件下矿山地下开采地表变形规律的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3020—3024.
- HUANG Ping-lu, CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng. Study of rock movement caused by underground mining in mines with complicated geological conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3020—3024.

上接第 1429 页