

地下采矿引起地表滑移变形分析

付 华, 陈从新, 夏开宗, 邓洋洋

(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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于概率积分法对地下采矿引起的岩体变形规律的描述, 推导出岩体最大剪切变形和最大拉伸变形的分布曲线, 阐述地表出现滑移破坏的原因。结合程潮铁矿地表变形监测成果, 进一步说明地下采矿引起的地表滑移变形的条件及特征。最后, 采用离散单元法模拟地下开采引起的岩体变形发展过程, 阐述地表滑移后岩体的变形趋势。结果表明: 在地下开采作用下, 岩体中出现的最大剪切变形可使地表发生塌陷, 最大拉伸变形可使岩体出现贯通地表的裂缝, 在这 2 个因素共同作用下, 地表出现滑移现象。滑移产生后, 受影响的地表可分为滑移区和卸荷区, 并出现浅部裂缝、深部裂缝和卸荷裂缝, 其中, 深部裂缝是滑移区和卸荷区的分界线。受地表滑移的影响, 在继续开采时, 地表在滑移区内的变形程度增大, 但地表主要变形范围得到抑制。

关键词: 采矿工程; 地下开采; 地表滑移; 地表变形趋势

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增 2-3991-10

Analysis for landslide caused by underground mining

FU Hua, CHEN Congxin, XIA Kaizong, DENG Yangyang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Based on the description of rock deformation caused by underground mining, the distribution curves of rock maximum shear deformation and maximum tensile deformation were deduced, which can explained the reason of surface landslide. Combine with Chengchao iron monitoring results of surface deformation, the factors and features of landslide caused by underground mining were described detailedly. In order to describe surface deformation trend, finally, UDEC(Universal Distinct Element Code) was used to simulate the development of such rock deformation. It shows that, under the action of underground mining, the maximum shear deformation in rock can lead to the surface subsidence while the maximum tensile deformation can cause cracks through the rock. Under the combined action of above two factors, the landslide appears usually. After that, with Shallow cracks, deep cracks and unloading cracks generating, affected rocks can be divided into slip zone and unloading zone. Among them, deep crack can be seen as the dividing line between slip zone and the unloading zone. Influenced by surface landslide, under the further mining, the surface deformation degree is increased in the slip zone while the main deformation range of the surface is suppressed.

Key words: mining engineering; underground mining; surface landslide; surface deformation trend

收稿日期: 2016-02-01; **修回日期:** 2016-03-14

作者简介: 付 华(1989-), 男, 2011 年毕业于四川大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: 510125890@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0110

1 引言

地下矿山开采会引起地表不同程度的变形，特别是地下金属矿山崩落法开采，地表变形呈现出不同的形态：不仅有连续的变形，还有不连续的变形；不仅有地表塌陷变形，还有岩体滑移变形^[1-2]。

目前，国内外学者对各种采矿引起的地表塌陷机制、塌陷类型的研究较为充分^[3-4]，如柱状下塞、溶洞等，地表裂缝的形成机制也常见于报道^[5-9]。但地下开采引起的地表滑移现象鲜有报道，究其原因，这种滑移变形很多时候被归集到地表塌陷、地表开裂的范围中^[10-13]，没有被单独列出。而岩体的滑移变形使地面产生明显的不连续变形，也是地表连续变形和不连续变形的分界点，此部分的变形特征也和其他区域存在差异。

为此，本文分析了在地下采矿作用下采区周围岩体发生滑移变形的机制，并结合程潮铁矿西区的监测成果，进一步说明此类滑移变形的特征。最后，结合数值模拟，阐述了岩体发生滑移变形后，采矿作用对整个变形盆地的影响。

2 地表滑移机制分析

在地下开采作用下，地表及深部岩体会产生移动和变形。对于煤矿和部分其他自重应力矿山，采用以随机介质理论为基础的概率积分法进行岩体位移、变形分析，其适用性和可靠度不可争议。对于大部分金属矿山，由于地层结构、矿体形态、赋存条件以及采矿方法不同，特别是构造应力的存在，使得其开采引起的岩体移动变形程度和范围与自重应力矿山都有所差别。然而，通过对概率积分法改进，特别是结合现场实测数据对下沉系数和水平移动系数的修正，也可以很好地描述金属矿山岩体的变形规律^[14-15]。所以，在对金属矿山开采引起的岩体移动规律进行分析时，仍可采用概率积分法。

2.1 概率积分法原理

基于概率积分法原理可以得到半无限开采下地表及深部岩体移动变形的表达式^[4]：

(1) 地表及深部岩体任意一点的下沉量为

$$W(x, z) = W_0 \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sqrt{\pi}x}{r_z}} e^{-\lambda^2} d\lambda + \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

式中： W_0 为地表最大下沉值， $W_0 = mq \cos \alpha$ ， m 为矿体开采厚度， q 为沉降系数， α 为矿层倾角； r_z 为

主要影响半径， $r_z = \sqrt{4A\pi} = H / \tan \beta$ ， A 为一个反映理论模型格子尺寸的常数， H 为采深， $\tan \beta$ 为主要影响角正切值； λ 为水平方向积分距离。

(2) 地表及深部岩体任意一点的倾斜为

$$i(x, z) = \frac{dW}{dx} = \frac{W_0}{r_z} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} \quad (2)$$

(3) 地表及深部岩体任意一点的曲率为

$$k(x, z) = \frac{di}{dx} = -\frac{2W_0 \pi x}{r_z^3} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} \quad (3)$$

(4) 地表及深部岩体任意一点的水平位移值为

$$U(x, z) = B_z \frac{dW}{dx} = \frac{B_z W_0}{r_z} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} \quad (4)$$

式中： B_z 为水平移动系数。

(5) 地表及深部岩体任意一点的水平变形为

$$\varepsilon(x, z) = \frac{dU}{dx} = -\frac{2W_0 B_z \pi x}{r_z^3} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} \quad (5)$$

地表移动和变形分布规律如图 1 所示。

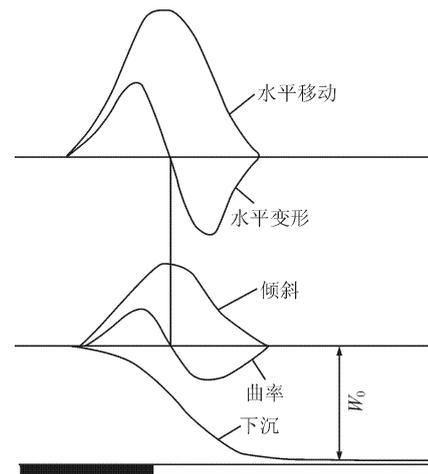


图 1 地表移动和变形分布规律

Fig.1 Distributions of surface movement and deformation

2.2 岩体变形特征

由图 1 可以看出，地表与深部岩体的倾斜值从变形边界点至变形中心先增大后减小，故在此范围内存在倾斜的最大值(倾斜是地表沉降对水平距离 x 的一阶导数，可看作是剪切变形)，由此可以得到不同深度处最大剪切变形的位；地表与深部岩体的水平变形从变形边界点至变形中心先拉伸后压缩，且拉伸与压缩分别存在极值，由此可以得到不同深度处最大拉伸(或压缩)变形的位。

(1) 最大剪切变形发生的位置及变形值：

对式(2)求 x 的一阶导数，即

$$\frac{di(x, z)}{dx} = -\frac{2W_0 \pi x}{r_z^3} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} \quad (6)$$

令式(6)等于 0，可求得最大剪切变形发生的位置，即

$$\frac{d\gamma(x, z)}{dx} = -\frac{2W_0\pi x}{r_z^3} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} = 0 \quad (7)$$

由式(7)可得

$$x = 0 \quad (8)$$

把式(8)代入到式(2)中，可得到不同深度的最大剪切变形：

$$\gamma = \frac{W_0}{r_z} \quad (9)$$

所以，最大剪切变形的位在剖面上呈线性分布，近乎为沿采空区边界铅垂向上直达地表的直线，如式(8)所示，其变形量为式(9)所示。式中， $r_z = \sqrt{4A\pi} = H / \tan \beta$ ，所以当 H 减小(即深度增大)时， r_z 减小，而式(9)中的变形量 γ 会增大，所以剪切变形会随着深度的增加而增大。矿体开采在深部形成空腔后，上覆岩体会发生冒落，在采空区边界铅垂向上直达地表的直线处会发生剪切变形，当剪切变形超过上覆岩体的允许变形值后，岩体会出现剪切裂缝。若该裂缝发展至地表，则会使地表出现塌坑，且塌坑的边界位于采空区边界在地表的投影处附近。

(2) 最大拉伸变形发生的位置及变形值：

对式(5)求 x 的一阶导数，即

$$\frac{d\varepsilon(x, z)}{dx} = -\frac{2W_0B_z\pi}{r_z^3} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} \left(1 - \frac{2\pi x^2}{r_z^2}\right) \quad (10)$$

令式(10)等于 0，可求得最大拉伸和压缩变形发生的位置，即

$$\frac{d\varepsilon(x, z)}{dx} = -\frac{2W_0B_z\pi}{r_z^3} e^{-\frac{\pi x^2}{r_z^2}} \left(1 - \frac{2\pi x^2}{r_z^2}\right) = 0 \quad (11)$$

由式(11)可得

$$x = \pm \frac{r_z}{\sqrt{2\pi}} = \pm \left(\frac{z}{H}\right)^n \sqrt{2Az} \quad (12a)$$

$$z = \left(\frac{x^2 H^{2n}}{2A}\right)^{\frac{1}{2n+1}} \quad (12b)$$

把式(12a)代入到式(5)中，可得到不同深度的最大水平变形为

$$\varepsilon = \left(\frac{H}{z}\right)^{2n} \frac{W_0B_z}{2\sqrt{2\pi}A} e^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{z} \text{(拉)} \quad (13)$$

$$\varepsilon = -\left(\frac{H}{z}\right)^{2n} \frac{W_0B_z}{2\sqrt{2\pi}A} e^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{z} \text{(压)} \quad (14)$$

所以，最大拉伸变形的位在剖面上为一曲线，如式(12b)所示，沿采空区边界为起始点延伸至地

表；其变形量如式(13)所示，故 z 越小(即深度越大)， ε 越大，所以最大拉伸变形会随着深度的增加而增大。最大拉伸变形从深部(采空区边界)开始逐步向上发展，直至地表。当岩体拉伸变形超过岩体的允许变形值后，岩体破坏并出现拉裂缝。

需要说明的是，岩体沿最大剪切变形线崩落后，形成地面塌陷，原水平地应力得到调整，产生类似开挖卸荷的作用，也释放了部分水平位移，提供了滑移空间；另外，岩体沿最大拉伸变形线由深部向地表逐渐发生拉裂，当这种破坏从深部延伸至地表时，就形成贯通的潜在弱面，如图 2 所示。所以，在同时存在类似开挖卸载作用和潜在滑动面的情况下，岩体具备了产生滑移破坏的条件。

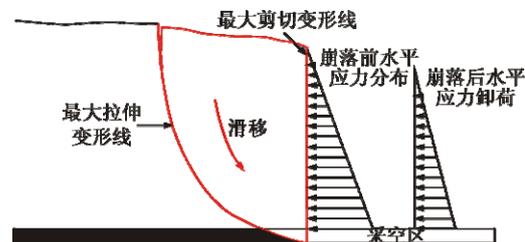


图 2 滑移模型
Fig.2 Slip model

3 工程实例

3.1 工程概况

程潮铁矿位于湖北省鄂州市东南 7.5 km，矿区西北距武汉市直线距离为 66 km，东南距黄石市 21 km。是武钢铁矿主要生产基地，是我国仅次于镜铁山、梅山铁矿的第三个大型地下金属铁矿。

程潮铁矿东起细王冲，西至程潮铁矿机车间，东西长约 2 300 m，南北宽约 800 m，由 161 个磁铁矿矿体和 136 个硬石膏矿体组成，系一个综合性矿床。程潮铁矿以 15 勘探线为界，划分为东西 2 个区，本文主要讨论程潮西区。

3.2 工程地质条件

程潮西区内的岩石包含了沉积岩、岩浆岩和变质岩三大类岩性。沉积岩主要为三迭系蒲圻群第二段的泥质粉砂岩和粉砂质泥岩；变质岩主要有蒲圻群第二段角岩和三迭系大冶群大理岩；岩浆岩主要有燕山期第二期闪长岩、燕山期第四期花岗岩。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^[16-17]。各类岩石的平面分布如图 3 所示，剖面分布如图 4 所示。

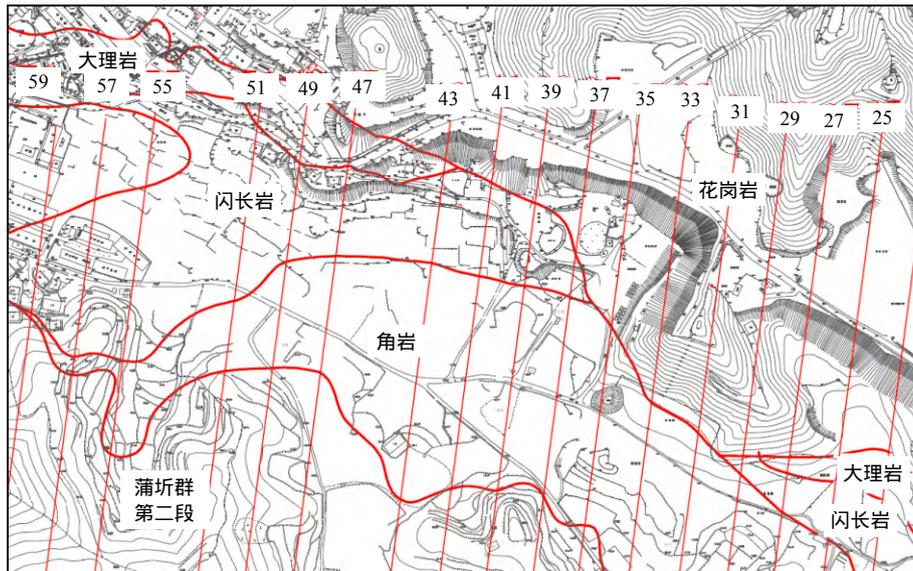


图3 程潮铁矿西区地质平面图

Fig.3 The geological map in western area of Chengchao iron

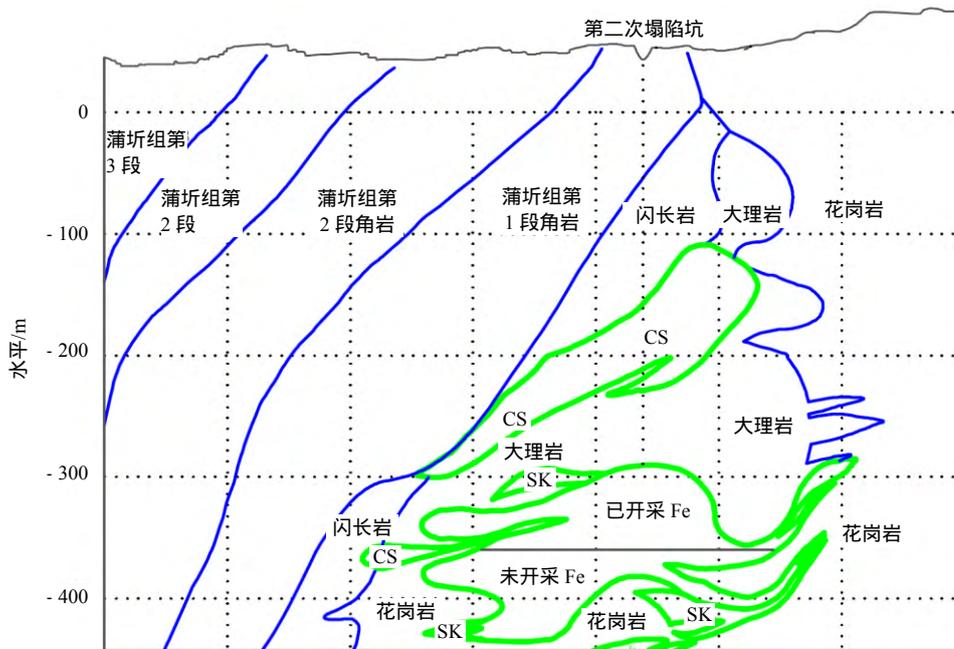


图4 35号勘察线地质剖面简图

Fig.4 Geological section on 35 line

3.3 采矿情况

程潮铁矿西区为 III, IV, V, VI, VII 号矿体, 矿体本身主要是由交代大理岩变化的矽卡岩而成矿。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。在纵剖面上, 矿体表现为向 NWW 方向侧伏, 如图 5 所示; 在横剖面上, 各主要铁矿体呈首尾交错、部分重叠的迭瓦状排列。

程潮铁矿西区采用分段崩落法开采, 由南往北推进。2002 年 7 月开始从 -290 m 水平起采, 现已

完成 -393 m 以上水平的开采, 目前正在进行的是 -410.5 m 水平和 -430 m 水平的开采。

3.4 程潮西区变形过程

程潮铁矿西区于 2002 年开始开采, 在 2006 年 4 月, 程潮铁矿西区地表 37~39 线之间开始出现小规模塌陷。为了准确掌握地下开采引起的地表变形规律, 采用 GPS 对矿区地表进行变形监测, GPS 测点布置如图 6 所示。在塌陷初期, 随着程潮铁矿西区地下采矿的继续进行, 其地表变形也在继续变化着, 但此时的地表移动过程还是一个岩体变形连续变化的过程。虽然有相当一部分测点的位移超过

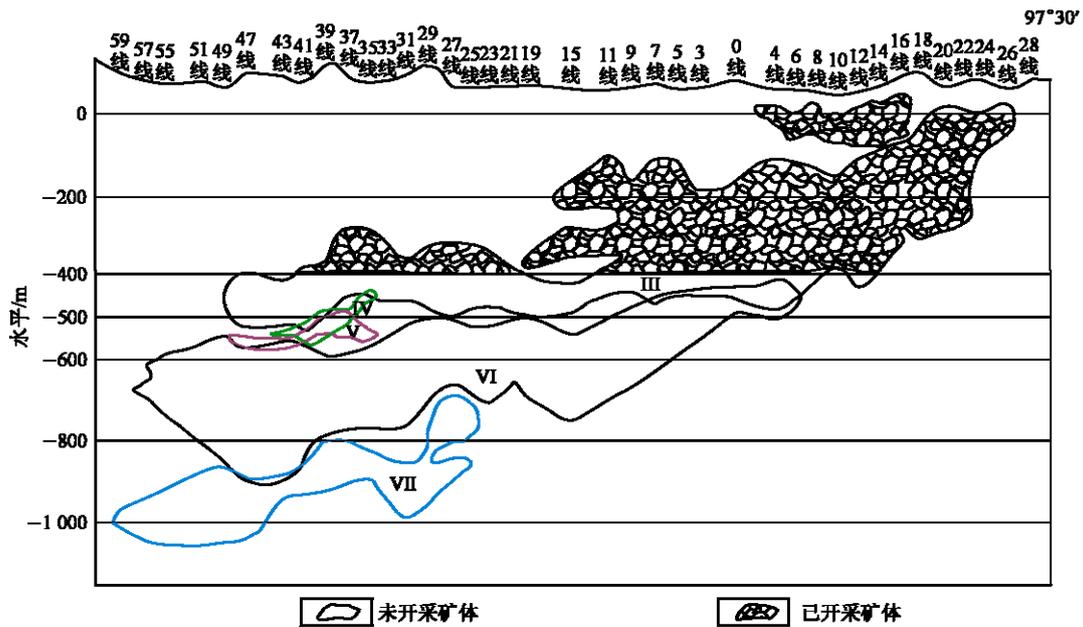


图 5 矿体纵剖面分布图

Fig.5 Ore distribution in the longitudinal section

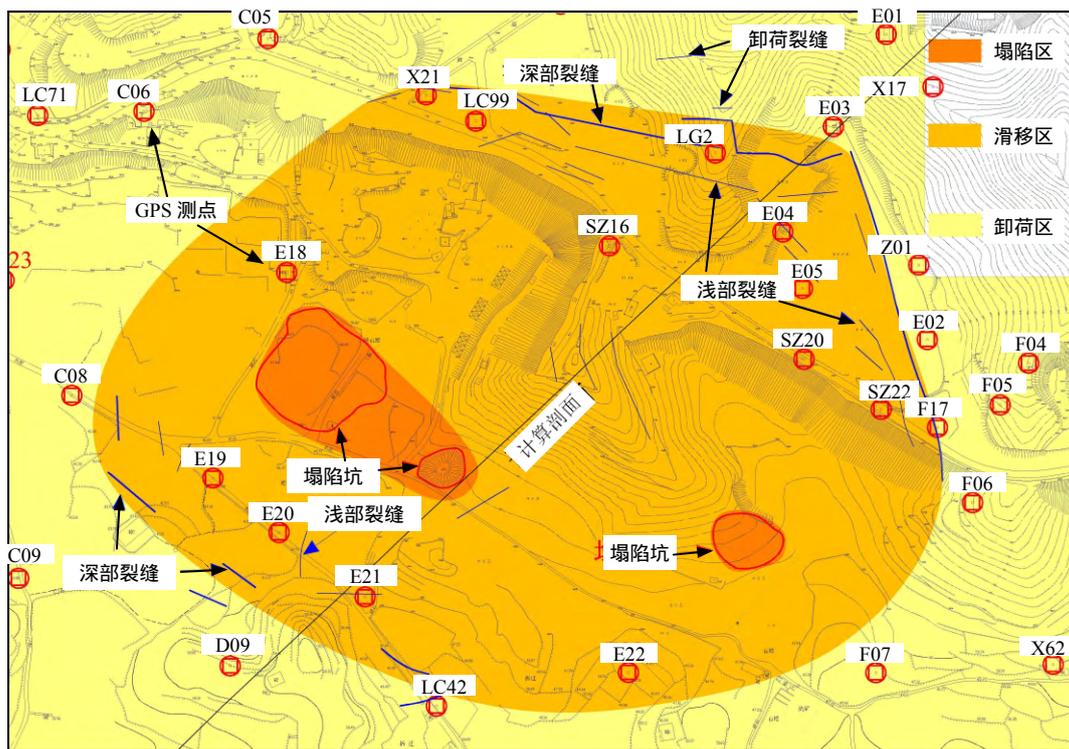


图 6 地表分区示意图

Fig.6 Schematic of surface zoning

了 1 m，有的甚至达到了 4 m，但是，变形的过程均为连续性很强的渐变式变形，没有产生突变式变形，这种特征在图 7^[18]中表现的非常明显。即使是地表裂缝，其出现、张开、扩大和延伸等现象也均是一个连续变化的过程，体现出地表移动的渐变特性^[19]。

从 2010 年开始，距塌坑中心约 300 m 外的矿区公路区域地表开始出现明显的裂缝，并逐渐形成

一条围绕采空区的地表裂缝带。该地表裂缝带形成后，裂缝带两侧的地表变形发生较明显的差异，变形也呈现出非连续特征，如图 6 所示。

3.5 滑移区变形特征

从地表出现变形开始，滑移区的变形过程大致可以分为沉陷、滑移和后续变形 3 个阶段，如图 8 所示，地表变形如图 9 所示。

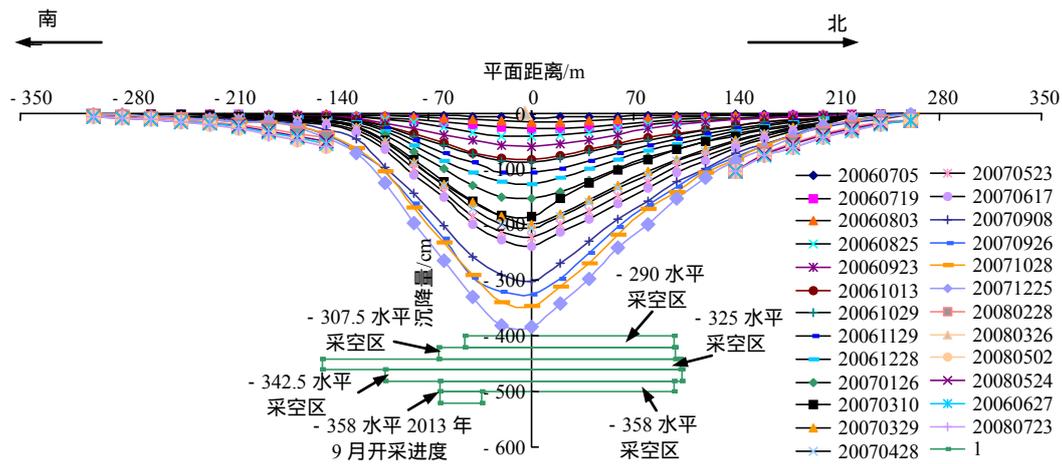


图7 初期地面变形^[18]

Fig.7 Surface deformation at the beginning^[18]

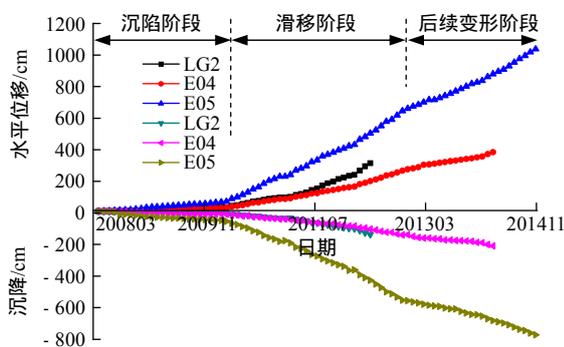


图8 滑移区典型测点位移图

Fig.8 Displacement of typical measuring points in slip zone



图9 地表变形示意图

Fig.9 Schematic of surface deformation

从地面变形开始至2010年1月属于沉陷阶段，此时滑移区地表处于稳定变形阶段。例如测点E05，在沉陷阶段水平变形速度约为2.6 cm/月，沉降速度约为2.7 cm/月。尽管此时间段内发生了地面塌陷，造成水平应力的部分释放，但拉伸裂缝还未贯通至地表。此时的岩体变形，反映了仅在地下开采活动影响下，塌坑周边岩体沉陷变形特征。

从2010年1月至2012年11月属于滑移阶段，此时岩体拉裂缝沿着最大拉伸变形线由深部逐渐延伸至地表形成贯通弱面，地表出现明显裂缝，地面

变形也出现明显加速。如测点E05，水平变形速度从2.6 cm/月加速到17.3 cm/月，沉降速度从2.7 cm/月加速到14.5 cm/月。这表明，潜在弱面贯通至地表后，滑移区变形在采矿作用和滑移变形共同作用下的出现加速。

从2012年11月至14年11月，属于后续变形阶段，此阶段变形速度比滑移阶段的小，但比沉陷阶段的大。如测点E05水平变形速度从17.3 cm/月变为15.7 cm/月，沉降速度从14.5 cm/月变为9 cm/月。一方面，滑移区的后缘有破碎岩体的阻挡，存在残余水平荷载，也没有足够的滑移空间，所以滑移区的变形在经历一段时间的加速后会逐渐减缓；另一方面，随着开采活动对原岩体结构的扰动，原岩体变得破碎、不完整，使得稳定阶段的变形速度大于沉陷阶段的变形速度。

3.6 卸荷区变形特征

在卸荷区，地表变形经历了沉陷、卸荷和后续变形3个阶段，如图10所示。

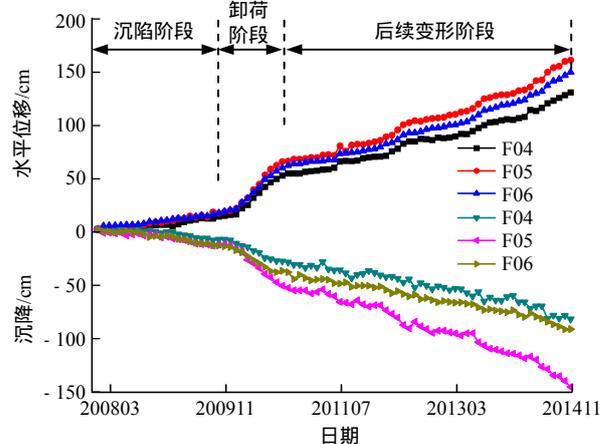


图10 卸荷区典型测点位移图

Fig.10 Displacement of typical measuring points in unloading zone

在 2010 年 1 月之前，卸荷区处于沉陷阶段。与滑移区相似，卸荷区在此阶段的变形也仅是由地下开采引起的。但卸荷区距采空区的距离比滑移区距采空区的距离远，所以卸荷区的变形速度小于滑移区的变形速度。如测点 F05，在沉陷阶段，水平变形速度约为 0.7 cm/月，沉降速度约为 0.6 cm/月。从 2010 年 1 月至 8 月，属于卸荷阶段。此时，由于滑移区发生了滑移，卸荷区的岩体会由于卸荷作用产生向采空区方向的变形，所以滑移区的变形速度会增加。与滑移区的滑移阶段相比，卸荷区的卸荷阶段持续时间较短，卸荷作用引起的变形增量较小。如测点 F05，水平变形速度增加到 5.3 cm/月，沉降速度增加到 4.3 cm/月。

从 2010 年 8 月至 2014 年 11 月，属于后续变形阶段。此时，卸荷区岩体经过应力调整达到新的平衡状态，原卸荷产生的变形加速现象消失，变形速度得以减慢。但由于采矿在深度和宽度上的扩展，此时的变形速度略大于沉陷阶段的变形速度。如测点 F05，水平变形速度从 5.3 cm/月变为 1.9 cm/月，沉降速度从 4.3 cm/月变为 1.9 cm/月。

3.7 地裂缝特征

程潮地下采矿引起的地表裂缝可以分为 3 种：浅部裂缝、深部裂缝和卸荷裂缝，如图 11 所示。

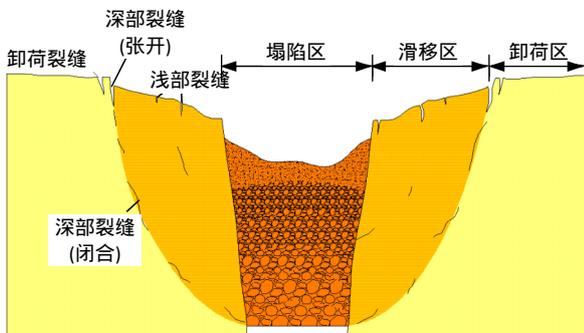


图 11 地表变形和裂缝示意图

Fig.11 Schematic of surface deformation and cracks

浅部裂缝存在于拉伸滑移区地表(见图 12)，是此区域变形过大引起的地面拉伸开裂。这类裂缝一般深度和宽度不大，广泛分布于拉伸滑移区地表，部分模型试验^[20-21]也印证这类裂缝的产生。



图 12 地表浅部裂缝

Fig.12 Shallow cracks on ground

深部裂缝(见图 13)——即上文讨论的最大剪切变形线——存在于滑移区和卸荷区之间，是一条围绕采空区的裂缝带。与浅部裂缝相比，这类裂缝距离采空区的距离更远，而裂缝的宽度和深度都更大。例如在测点 LG2 附近的地表拉开张裂，裂缝宽度约 4 m，测点 E02 附近地表剪切滑移，形成高约 3 m 的陡坎。



图 13 地表深部裂缝

Fig.13 Deep cracks on ground

滑移区发生滑移变形后，卸荷区的岩体会在卸荷作用产生向采空区方向的变形，在地表形成卸荷裂缝(见图 14)。这类裂缝宽度和深度都较小，在地表也不连续，延伸较短。



图 14 地表卸荷裂缝

Fig.14 Unloading cracks on ground

值得注意的是，地下开采引起的岩体变形是由深部逐渐传递至地表的，只有当足以引起岩体开裂的变形沿着最大拉伸变形线传递至地表时，才会形成上述的深部裂缝，引起滑移区发生滑移，并在卸荷区出现卸荷裂缝。否则，将不会出现深部裂缝和卸荷裂缝，地表只存在浅部裂缝，也不会发生滑移现象，与一些模型试验^[20-21]的结果类似。另外，深部裂缝在地面可能是张开的，易于察觉；而在深部，由于上覆压力和水平地应力都很大，致使裂缝全部处于闭合状态，不易察觉。这易导致把深部裂缝视为浅部裂缝，忽视滑移区沿深部裂缝的滑移现象。

4 滑移对后续变形的影响

为了分析程潮地下开采引起地表滑移的形成过程以及地表滑移后地面的变形趋势，采用离散单元法程序 UDEC 对典型剖面(如图 6 所示计算剖面)的变形进行模拟，计算剖面的地质结构如图 15 所示。

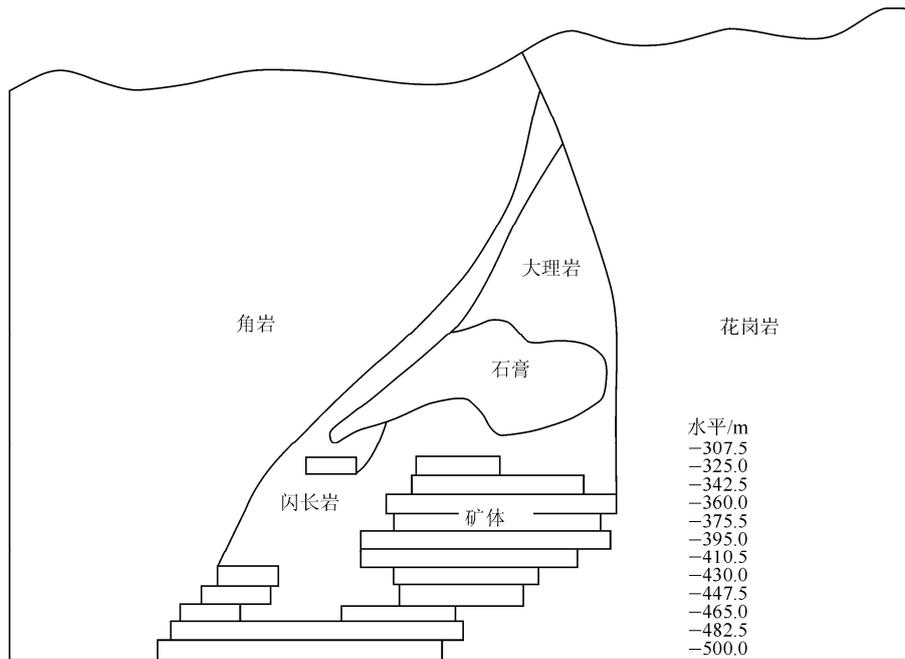


图 15 计算剖面地质结构图
Fig.15 Geological section on calculation section

模拟范围可按采矿设计的错动角、陷落角预估影响范围再作适当扩沿即可，纵向范围根据实际开采情况，取地表至最低开采高程并略作延伸。根据程潮铁矿具体情况，本次计算初始应力场按构造应力场考虑，即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \gamma h \\ \sigma_x &= k_x \gamma h \\ \sigma_y &= k_y \gamma h \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中： k_x ， k_y 分别 x ， y 方向水平应力场的侧压力系数。其中取 $k_x = 0.76$ ， $k_y = 0.98$ ， σ_x 和 σ_y 作为边界的面分布力荷载加在边界面上，与自重重力荷载共同形成计算体的力平衡方程的荷载向量，最终求得计算体内初始应力。在模型两侧施加滑动约束，即在模型两侧指定各块体在 x 方向上的位移为 0， y 方向上无约束；在模型底部施加固定约束，即在模型底部指定各块体在 x ， y 方向上的位移均为 0。计算时采用的岩体参数如表 1 所示。

表 1 岩体计算参数
Table 1 Calculation parameters of rock mass

岩性名称	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
角岩	22.3	2 992	0.23	31.8	1.84	0.18
闪长岩	26.3	1 850	0.27	31.0	0.80	0.16
花岗岩	24.7	2 036	0.27	29.6	1.61	0.16
大理岩	26.7	2 569	0.28	30.2	1.70	0.17
硬石膏	28.3	2 136	0.26	23.9	1.24	0.12
铁矿	43.3	5 352	0.31	38.1	2.48	0.25

如图 16 所示，程潮地下开采引起的地表变形经历了以下过程：在开采初期，岩体的塑性区集中在采空区周围，没有传递至地表，此时地表的变形也较小。当开采至 -342 m 水平时，岩体的塑性区逐渐扩展至地表，形成贯通地面的塑性区，也使得地表在 2007 年出现塌陷。继续开采至 -375 m 水平时，岩体塑性区从采空区两侧逐渐向上延伸至地表，形成贯通的深部裂缝。在深部裂缝形成之后，随着采矿延伸至 -447 m 水平，岩体的塑性区范围没有明显增大，都集中在深部裂缝以内的区域，但在此范围内的岩体变形程度明显加剧。地表变形曲线如图 17，18 所示。

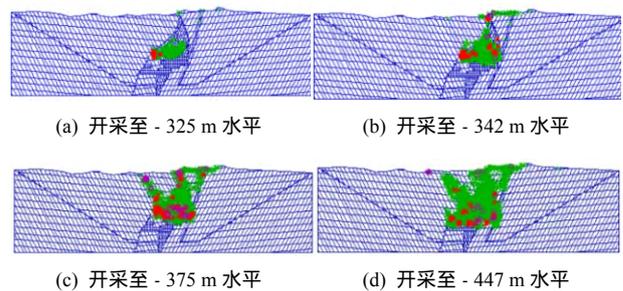


图 16 岩体塑性区变化图
Fig.16 Schematic of rock plastic zone

综上所述，程潮铁矿地下开采引起地面塌陷，造成岩体水平应力部分释放，此后，岩体塑性区沿最大拉伸变形线贯通至地表，形成潜在滑动面。在上述两个因素共同作用下，地面形成滑移区，造成

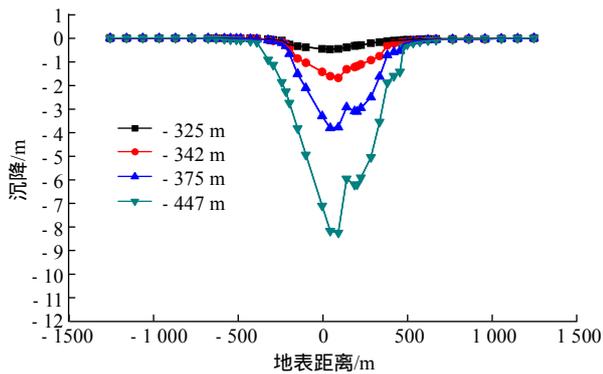


图 17 计算剖面地表沉降曲线

Fig.17 Curves of surface subsidence on calculation section

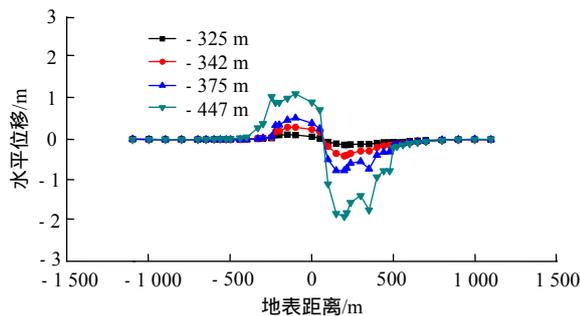


图 18 计算剖面地表水平位移曲线

Fig.18 Curve of surface horizontal displacement on calculation section

地表的滑移破坏。而在下一步开采时，由于深部裂缝的存在，造成滑移区变形增大，但同时抑制了地面变形范围向外扩展。

5 结 论

(1) 程潮铁矿在地下开采作用下，岩体沿着最大剪切变形线破坏，形成地表塌陷，并引起岩体水平应力释放；另外，随着采矿的继续，岩体沿最大拉伸变形线破坏，形成潜在滑动面。在上述 2 个条件同时出现时，地面出现滑移现象。

(2) 滑移区变形过程可以分为沉陷、滑移和后续变形 3 个阶段，而卸荷区可分为沉陷、卸荷和后续变形 3 个阶段。沉陷阶段和后续变形阶段分布反应了开采初期和地面滑移后，地面在采矿作用下的整体变形趋势；滑移阶段和卸荷阶段则反应了滑移区和卸荷区岩体分别在滑移和卸荷作用下的变形加速特征。

(3) 地下开采引起的地表裂缝可以分为 3 种：浅部裂缝、深部裂缝和卸荷裂缝。其中，浅部裂缝分布在滑移区，是岩体变形过大造成的地表开裂；卸荷裂缝分布在卸荷区，是应力卸荷引起的张拉裂

缝；深部裂缝是滑移区和卸荷区的分界线，是从深部扩展至地表的贯通性裂缝，也是使岩体发生滑移破坏的必要条件之一。

(4) 深部裂缝形成后，继续进行地下开采时，引起的滑移区地表变形程度会增大，但地表变形范围会得到抑制。

参考文献(References)：

- [1] 付 华, 陈从新, 夏开宗, 等. 金属矿地下开采引起岩体变形规律浅析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1 859-1 868.(FU Hua, CHEN Congxin, XIA Kaizong, et al. Analysis of rock deformation caused by underground mining of metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1 859-1 868.(in Chinese))
- [2] LI L C, TANG C A, ZHAO X D, et al. Block caving-induced strata movement and associated surface subsidence: a numerical study based on a demonstration model[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(4): 1 165-1 182.
- [3] BRADY B H G, BROWN E T D. Rock mechanics for underground mining[M]. London: George Allen Unwin, 1985: 470-480.
- [4] 何国清, 杨 伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991: 79-115.(HE Guoqing, YANG Lun, LING Gengdi, et al. Mining subsidence theory[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991: 79-115.(in Chinese))
- [5] 李 晓, 路世豹, 廖秋林, 等. 充填法开采引起的地裂缝分布特征与现场监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 361-1 369.(LI Xiao, LU Shibao, LIAO Qiulin, et al. Distribution characteristics and field monitoring of ground fissures caused by backfill mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 361-1 369.(in Chinese))
- [6] 刘 辉, 何春桂, 邓喀中, 等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 380-384.(LIU Hui, HE Chungui, DENG Kazhong, et al. Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 380-384.(in Chinese))
- [7] 范立民, 张晓团, 向茂西, 等. 浅埋煤层高强度开采区地裂缝发育特征——以陕西榆神府矿区为例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1 442-1 447.(FAN Limin, ZHANG Xiaotuan, XIANG Maoxi, et al. Characteristics of ground fissure development in high intensity mining area of shallow seam in Yushenfu coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1 442-1 447.(in Chinese))
- [8] ZHAO H J, MA F S, ZHANG T M, et al. Monitoring and mechanisms

- of ground deformation and ground fissures induced by cut-and-fill mining in the Jinchuan Mine 2, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68: 1903–1911.
- [9] ZHAO H J, MA F S, XU J M, et al. Preliminary quantitative study of fault reactivation induced by open-pit mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 59(5): 120–127.
- [10] 黄平路, 陈从新. 厚覆盖层矿山地下开采地表塌陷机制分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增1): 357–362. (HUANG Pinglu, CHEN Congxin. Analysis of mechanism of surface subsidence caused by underground mining with thick overburden[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Supp.1): 357–362. (in Chinese))
- [11] 黄平路, 陈从新, 肖国锋, 等. 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 Pinglu, CHEN Congxin, XIAO Guofeng, et al. Study of rock movement caused by underground mining in mines with complicated geological conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3020–3024. (in Chinese))
- [12] TOMAS V, ERLING N, CHRISTINA D L. Hangingwall surface subsidence at the Kiirunavaara Mine, Sweden[J]. *Engineering Geology*, 2011, 121(1/2): 18–27.
- [13] 李文秀, 梅松华, 翟淑花, 等. 大型金属矿体开采地应力场变化及其对采区岩体移动范围的影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(23): 4047–4051. (LI Wenxiu, MEI Songhua, ZAI Shuhua, et al. Analysis on in-situ stress field change due to underground mining of metal ore and its influence on range of rock mass displacements[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(23): 4047–4051. (in Chinese))
- [14] 贺跃光. 工程开挖引起的地表移动与变形模型及监测技术研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2003. (HE Yueguang. Modeling and monitoring of ground surface movements due to excavation[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2003. (in Chinese))
- [15] 方建勤. 地下工程开挖灾害预警系统的研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2004. (FANG Jianqin. Study on prewarning system of underground engineering excavating disaster[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese))
- [16] 夏开宗, 刘秀敏, 陈从新, 等. 程潮铁矿西区地下开采引起的地表变形规律初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1572–1587. (XIA Kaizong, LIU Xiumin, CHEN Congxin, et al. Surface deformation in west area of Chengchao iron mine induced by underground mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1572–1587. (in Chinese))
- [17] 夏开宗, 陈从新, 夏天游, 等. 结构面对程潮铁矿西区地表变形的影响分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1389–1406. (XIA Kaizong, CHEN Congxin, XIA Tianyou, et al. Analysis of influence of structural planes on surface deformation in western area of Chengchao Iron Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 1389–1406. (in Chinese))
- [18] 夏开宗, 陈从新, 付华, 等. 程潮铁矿西区不同采矿水平下的岩体变形规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(4): 792–805. (XIA Kaizong, CHEN Congxin, FU Hua, et al. Analysis of influence of discontinuities on surface deformation in eastern area of Chengchao iron mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 792–805. (in Chinese))
- [19] 陈从新, 肖国锋, 黄平路, 等. 程潮铁矿西区地表塌陷变形监测与预测预报研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007. (CHEN Congxin, XIAO Guofeng, HUANG Pinglu, et al. Research on surface subsidence monitoring and forecasting in western Chengchao iron mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))
- [20] REN W Z, GUO C M, PENG Z Q, et al. Model experimental research on deformation and subsidence characteristics of ground and wall rock due to mining under thick overlying terrene[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47: 614–624.
- [21] 黄平路, 陈从新. 露天与地下开采联合引起岩层移动规律的模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1310–1314. (HUANG Pinglu, CHEN Congxin. Model test study on rock movement caused by open-underground combined mining[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1310–1314. (in Chinese))