

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.05.027

金属矿山崩落采矿法引起的岩层移动规律分析

夏开宗, 陈从新, 付 华, 郑 允, 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:以典型陡倾结构面条件下的金属矿山——程潮铁矿西区为例,通过对矿区的地表变形监测资料及宏观破坏特征分析,认为矿区的岩层移动分为 2 个阶段,第 1 阶段为采空区顶板岩体破坏扩展至地表引起塌陷阶段;第 2 阶段为采空区周边围岩向采空区的倾倒破坏阶段,并得出了倾倒滑移区的地表岩体变形规律:岩体主要发生水平移动,水平移动值大于沉降值;变形先以缓慢变形为主,然后进入一个快速变形阶段,存在明显的转折点;开采沉陷和地形引起的应力同向叠加作用,使得地表岩体沿下坡方向的变形值增大,特别是水平移动值。同时揭示了矿区岩层移动角的分布特征;南部岩层移动角大于北部,究其原因北部受最为发育的 NNW、NNE 结构面影响,倾倒破坏较为严重。研究成果为其他类似的金属矿山工程提供可借鉴的规律。

关 键 词:采矿工程;地下开采;岩层移动;地表变形

中图分类号: U 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 05 - 1434 - 07

Analysis of law of ground deformation induced by caving mining in metal mines

XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, FU Hua, ZHENG Yun, DENG Yang-yang

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

Abstract: The west part of Chengchao Iron Mine is metal mine characterized by steep structure plane. In this study, the monitored data of the ground deformation and macroscopic damage features of the mining area are analyzed. The strata movement in mining area can divided into two stages. The first stage is that the failure of the roof rock masses extends to the ground surface and then cause subsidence, while the second stage is that surrounding rock mass around goaf topples to mined-out area. Through the investigation of toppling-sliding area, it is found that the horizontal displacement mainly occurs in this area, which is greater than the vertical displacement; the ground deformation firstly increases slowly, then enters a rapid deformation phase, there exists a significant turning point; the superimposition stress induced by mining subsidence and terrain characteristics increases the ground deformation in the downhill areas, especially the horizontal displacement. Meanwhile, the distribution characteristics of angle of ground movement are revealed in the mine. The angle of ground movement in the south part of mine is greater than that in the north part, and the reason is that the north part is affected by the NNW, NNE structure planes, where the toppling failure is quite serious. The research results may be applied to the similar metal mines.

Keywords: mining engineering; underground mining; ground movement; ground deformation

1 引 言

由于地质条件极为特殊,且开采沉陷往往引起较大的构造应力场变化,金属矿山地下开采引起的岩层移动规律成为一个十分复杂的系统工程问题^[1]。采矿工程师们往往对其认识不清,造成地表

移动超过设计范围,从而导致矿山建设规划不合理,地表征地、居民搬迁范围过小,造成巨大经济损失,严重影响矿山正常安全生产。因此,如何掌握金属矿山的岩层移动规律已成为一个亟需解决的重大科研与工程课题^[2]。

湖北鄂州程潮铁矿是武钢铁矿石主要生产基

收稿日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51274188)

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51274188).

第一作者简介: 夏开宗,男,1988年生,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: xiakaizong1988@sina.com

地，是我国仅次于镜铁山、梅山铁矿的第 3 个大型地下铁矿，也是我国典型的无底柱崩落法开采铁矿和典型的构造应力型矿山之一^[3]，在岩层移动规律方面具有很高的研究价值。多年来，不少学者对其进行了研究，得出了很多有价值的研究成果。黄平路^[4]认为，开采沉陷引起的较大水平构造应力释放，对程潮铁矿东区地表变形和岩层移动有重要的影响；朱家桥^[5]认为，程潮铁矿东区受主干断裂 NWW 向构造控制，在工业场地形成一系列大致平行、高陡倾角的拉张裂缝，其破坏形式均为倾倒式拉裂破坏；陈从新等^[6]通过对深部岩体变形特征的分析，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。以上文献虽然对程潮铁矿的岩层移动规律取得了诸多有益的成果，但都主要集中在东区。为了应对矿山建设的需求，2002 年 7 月开始开采西区，2006 年 4 月 17 日在该开采区域的程潮大湾东侧第 1 次出现了塌坑之后，矿区下盘岩体变形和移动范围以较快的速度发展下去^[8]。目前，岩层移动规律仍然不明确。为此，本文依据程潮铁矿西区的地表变形监测资料和宏观破坏现象，对矿区地下开采引起的岩层移动规律进行分析研究，所得成果能为其他类似的金属矿山工程提供参考。

2 矿区工程地质概要及采矿情况

2.1 工程地质概要

程潮铁矿上盘近矿体围岩为闪长岩，远离矿体岩体多为角岩；而下盘岩体主要为花岗岩，它也是矿区内主要岩体，岩性较好；介于上、下盘围岩并从矿体顶部出露地表的是大理岩和角岩组成的变质岩带。花岗岩体中，主要结构面有 4 组，分别为 NNW 向、NNE 向、NE 向和 NWW 向。其中，NNW 向节理最为发育，倾向北东东，倾角约为 82°，在地表出露处均为贯通发育，节理密度约为 10 条/m；其次为 NNE，倾向南东东，倾角约为 84°。

矿区的水平应力实际测量结果表明^[9]：最大主应力 σ_1 方向为 N85°~75°W，与矿体走向基本一致；中间主应力 σ_2 在深度上的变化规律接近于岩体自重引起的垂直应力；最小主应力 σ_3 的方向基本上垂直矿体走向，其分布规律见图 1。

可以看出，程潮铁矿矿区最大主应力 σ_1 较大，在 -270 m 中段达到了 2.75 γh ，即 24.874 MPa；在 -430 m 中段也达到了 1.27 γh ，即 17.027 MPa。

2.3 采矿情况

程潮铁矿西区包括 I、II、III、IV、V 号矿体，主要是由交代大理岩变化的砂卡岩形成的。在平面上（见图 2），各铁矿体大致均沿 NWW 方向呈瓦状平行展布；在纵剖面上，则表现为向 NWW 方向侧伏；在横剖面上（见图 3），各主要铁矿体也是呈首尾交错，部分重叠的呈瓦状排列。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。

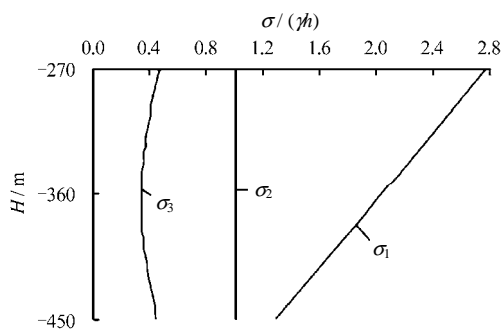


图 1 程潮铁矿主应力分布示意图
Fig.1 Distributions of principal stress in Chengchao Iron Mine

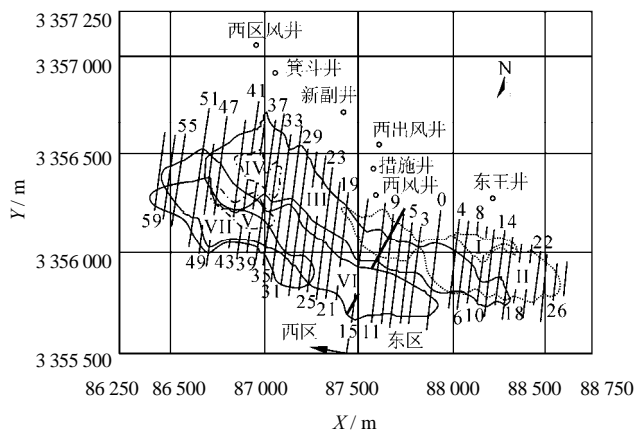


图 2 程潮铁矿矿体边界图
Fig.2 Boundary of ore bodies in Chengchao Iron Mine

目前，正在开采的是 III 号矿体，该矿体东起 16 线，以 NWW 向延伸，至 47 线以西，全长 1 700 m 以上。分布于 15 线以西的 III 号矿体，东西长约 850 m，南北宽 120~450 m，平均厚度为 130 m，其开采情况见表 1。正在开采的是该矿体的 -395 m 和 -410.5 m 两个水平，其中开采活动主要集中在 -393 m 水平，截止到 2013 年 9 月，-393 m 水平已开采的矿体占该水平矿体储量的 2/3，截止到 2013 年 9 月，-410.5 水平只在西端向北推进约 80 m。

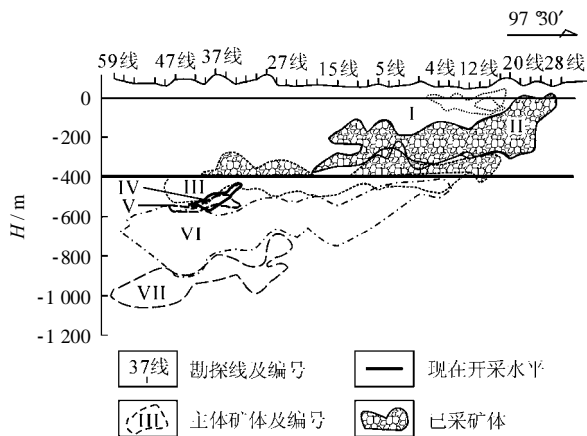


图3 程潮铁矿矿体纵向投影图

Fig.3 Longitudinal projection of Chengchao Ore bodies

表1 西区开采情况

Table 1 The mining situations in west area

开采水平 /m	开采年限/年-月		开采矿体编号
	起	止	
-290.0	2002-07	2004-07	III号
-307.5	2002-11	2004-07	III号
-325.0	2003-05	2004-12	III号
-342.5	2004-07	2006-12	III号
-358.0	2005-10	2008-09	III号
-375.5	2007-07	2012-06	III号
-393.0	2009-05		III号
-410.5	2012-03		III号

3 岩层移动机制

地下采矿引起的岩层移动是一个随时间推进的过程，因此在不同阶段，采矿引起的岩层移动机制不同^[10]。根据程潮铁矿西区地表变形监测资料分析和宏观破坏调查现象，可以把矿区的岩层移动分为两个阶段：在地表塌陷之前为采空区顶板岩体破坏扩展至地表引起塌陷阶段；在地表塌陷之后为采空区周边围岩向采空区的倾倒破坏阶段。

3.1 顶板岩体破坏扩展至地表引起塌陷阶段

由于受程潮铁矿特殊的地质条件的影响，位于顶板上方的大理岩和闪长岩节理裂隙较为发育，岩体比较破碎，在地下采矿的扰动下容易产生变形和破坏。所以，在矿体开采下，采空区上方的大理岩和闪长岩在重力作用下逐步垮落，在开采-290~-325 m水平时，由于采空区的范围还不太大，约为22 024.35 m²，使得顶板岩体的暴露面积不算太大，可以认为顶板岩体进入了初始垮落阶段^[11]。当采至-342.5 m水平时，随着采空区范围在深度和平面

上的拓展，此时顶板岩体的暴露面积约为37 584.56 m²，认为顶板岩体的跨落开始加剧，进入了大量垮落阶段^[11]，发生破坏范围很快向地表延伸(见图4)，此时覆盖层土体失去了下方岩体的支撑而处于临空状态，加之土体的力学性质较差，在自身的条件下不能保持平衡。所以，当-342.5 m水平快要开采完时，即2006年4月17日，程潮铁矿西区在地表出现了塌陷。此时，回采累计垂直高度 $H_1 = 70$ m，矿体平均开采深度 $H_{vc} = 392.5$ m，矿体开采深度与回采累计垂直高度的比值 K_3 (即 $K_3 = H_{vc} / H_1$)=5.6。所以，在程潮铁矿西区，当 $K_3 > 5.6$ 时，岩层移动未扩展到地表，而当 $K_3 \leq 5.6$ 时，岩层移动扩展到地表，即岩层是否扩展到地表的 K_3 的分界值为5.6。而在东区，根据白义如等^[12]学者的研究成果，该分界值为17。

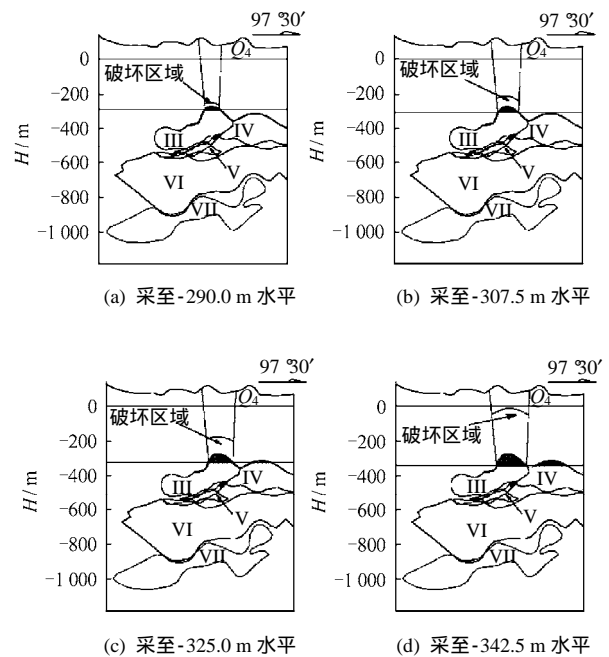


图4 顶板岩体的破坏发展示意图

Fig.4 Schematic diagram of failure process of rock masses of roof

3.2 周边围岩向采空区的倾倒破坏阶段

当地表出现塌坑之后，顶板岩石因冒落变成近乎散体结构，其施加在周边围岩的水平应力开始减小。围岩因在水平方向受力不平衡，开始向采空区方向发生倾斜，最靠近采空区的围岩发生倾斜至一定程度后，对其外侧的围岩的水平应力也开始减小，使得外侧围岩也因受力不平衡，开始向采空区方向发生倾斜。当围岩在水平方向的应力释放到一定程度后，其内部拉应力达到允许抗拉强度时，便发生

弯曲折断破坏。在围岩的弯曲折断面形成之后，水平向的应力基本得到了完全释放，此时围岩进入了以重力为主的阶段，在自重力垂直于轴向上的分力的作用下，沿着弯曲折断面继续向采空区弯曲滑移，而在自重力沿轴向上的分力作用下，会发生沿层面方向的错动和滑落。由于这种滑移和错动的结果，将在岩层露头处出现台阶状的移动。

从现场调查得知，目前矿区下盘的山上矿区公路，粉矿堆场和高压电塔南部区域，在地表随处可见高陡倾角的错动拉张裂缝，错动台阶可达到 1.5 m（如图 5 所示）。所以，认为这些区域深部岩体形成了弯曲折断面^[2]，进入了沿着高陡倾角的拉张裂缝向采空区的倾倒滑移阶段，称之为倾倒滑移区^[2]。图 6 为矿区东北端区域的倾倒变形破坏示意图。



图 5 粉矿堆场处的错动台阶
Fig.5 Dislocation steps in the fines yard

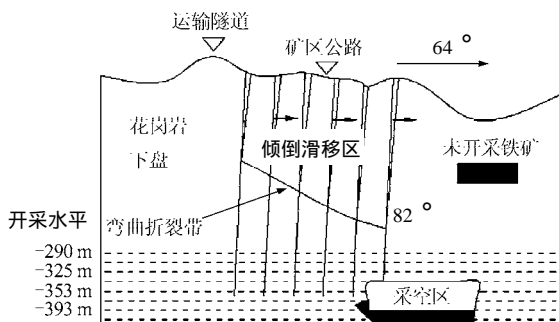


图 6 矿区东北端倾倒变形破坏示意图
Fig.6 Schematic diagram of toppling deformation and failure in north-eastern part

4 倾倒滑移区地表岩体变形的规律

依据对矿区长达 7 年的地表变形监测资料，分析了倾倒滑移区的岩体变形规律。

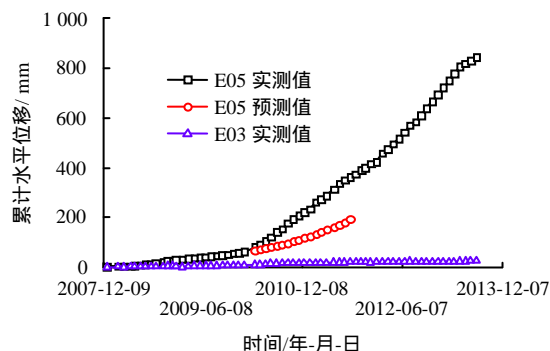
(1)表 2 为倾倒滑移区部分测点水平移动值 U 和下沉值 W 比较。其中测点 LG2 为 2012 年 4 月累计变形值，其他测点为 2013 年 7 月的累计变形值。

从表 2 可以看出，倾倒滑移区岩体的地表下沉值 W 均比水平移动值 U 小，其比值 U/W 最大的测点达到了 2.1，且下坡方向（测点 LG2 所在的区域）的 U/W 值大于平地（测点 E05、SZ20 和 SZ16 所在的区域）的 U/W 值。所以，对于倾倒滑移区的岩体来说，主要发生了水平移动。

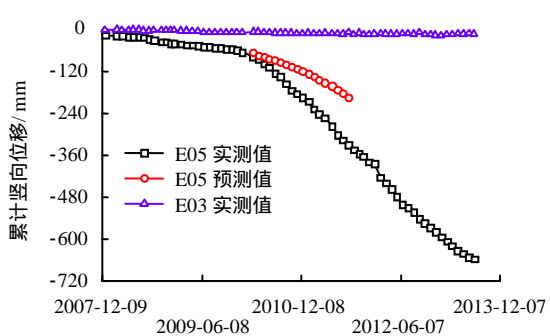
表 2 水平移动值 U 和下沉值 W 比较
Table 2 Comparison between horizontal displacement U and vertical displacement W

测点 编号	U / cm	W / cm	U/W	测点 编号	U / cm	W / cm	U/W
LG2	283.4	134.5	2.1	LC99	108.1	86.4	1.3
E05	845.4	658.7	1.3	SZ20	505.0	451.5	1.1
E04	319.8	196.8	1.6	SZ16	672.7	582.0	1.2

(2)图 7 为倾倒滑移区代表测点 E05 以及其边界处代表测点 E03 的累计变形随时间变化曲线。



(a) 累积水平位移



(b) 累积竖向位移

图 7 测点 E05 和 E03 累计水平位移和竖向位移随时间变化曲线

Fig.7 Variations of cumulative horizontal displacement and vertical displacement with time for monitoring points E05 and E03

从图 7 可以看出,测点 E05 的累计变形随时间变化曲线具有明显的转折点,先以缓慢变形为主,然后进入一个快速变形阶段,出现转折点时间约为 2010 年 1 月^[2-3, 10],说明在此时间之后测点 E05 所在的区域深部岩体开始发生弯曲折断破坏,进入了倾倒滑移区;测点 E03 的累计变形随时间变化曲线表现为稳定增长,所以,目前测点 E03 所在的区域在深部还没有形成弯曲折断面,没有进入倾倒滑移区,但是随着采空区范围在深度和平面上的扩展,测点 E03 的变形有可能进入倾倒滑移区。这就给我们启示:在进行矿区岩体变形预测时,一定要考虑预测区域的岩体是否在此预测时间段内进入倾倒滑移区,否则,将导致预测值比理论值小。如对于测点 E05 来说,以 2010 年 1 月以前的数据为样本,采用灰色模型来预测后面 18 个月的岩体的变形,到达 2011 年 8 月份累计水平值相差约 168 cm (如图 7(a)所示),而累计沉降值相差约 136 cm (如图 7(b)所示)。就目前来说,对矿区倾倒滑移区的岩体进行预测时,应该去掉变形转折时间点之前的数据,也就是说去掉 2010 年 1 月之前的数据,这样所得的预测值与实际值才比较接近。

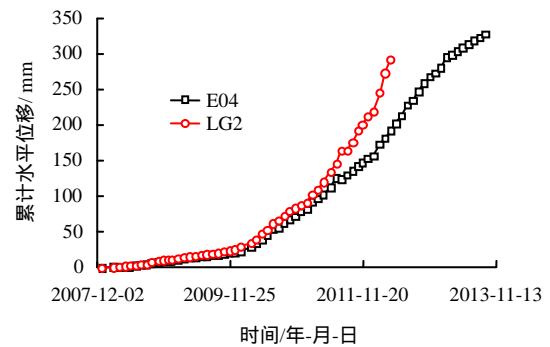
(3) 倾倒滑移区下坡方向的变形值大于平地的变形值,增大的量值与坡体形态、采空区相对位置和结构面性状有关^[2]。

图 8 为下坡方向的测点 LG2 和平地上的测点 E04 的累计水平变形和累计竖向变形随时间变化曲线图。从平面上看,测点 LG2 距采空区的平面距离为 142 m,而测点 E04 距离采空区的平面距离为 134 m,按理说,测点 E04 的变形值应该比测点 LG2 的变形值大,从图 8 可以看出,在采矿之初测点 E04 的变形值确实是大于测点 LG2 的,但之后,随着时间的推移,测点 LG2 的变形值逐渐大于测点 E04 的变形值。所以,两侧点的变形量值与距采空区的距离存在着矛盾。究其原因是:在下坡方向,开采沉陷与地形特性引起的两种水平应力同向叠加作用,使得变形值沿坡体下坡方向增大,特别是水平移动值,增大的量值与坡体形态、采空区相对位置和结构面性状有关。

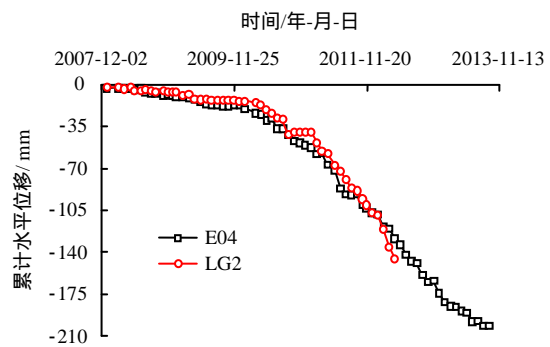
6 地表移动角特点

根据绘制的 2007 年 12 月开始至 2013 年 9 月每

半年观测成果中的移动线^[2](见图 9),依据移动角定义(移动线上的点和采空区边界的连线与水平线之间的夹角)作剖面移动角扩展情况图(见图 10)。



(a) 累积水平位移



(b) 累积竖向位移

图 8 测点 LG2 和测点 E04 累计水平位移和竖向位移随时间曲线

Fig.8 Variations of cumulative horizontal displacement and vertical displacement with time for measuring points LG2 and E04

从图 10 可以看出,剖面的北向移动角在 2007 年 12 月为 74.61° ,在 2009 年 12 月至 2010 年 6 月期间急剧变缓,由 70.16° 变为 59.64° ,相差 10.52° ,到 2013 年 9 月为 48.76° ;而剖面的南向移动角在 2007 年 12 月至 2008 年 6 月期间急剧变缓,由 86.50° 变为 70.55° ,此后,移动角均匀变化,到 2013 年 9 月变为 63.08° 。与北部移动角相比,相差约 14.32° 。所以,矿区的北部移动角比南部移动角严重偏缓,究其原因是:北部下盘岩体受最为发育的 NNW、NNE 结构面的影响,倾倒破坏较为严重,裂缝的扩展和岩体移动范围较大;而南部只在盆地内圈发现了拉剪错断台阶状破坏,裂缝的扩展和岩体移动范围不大。

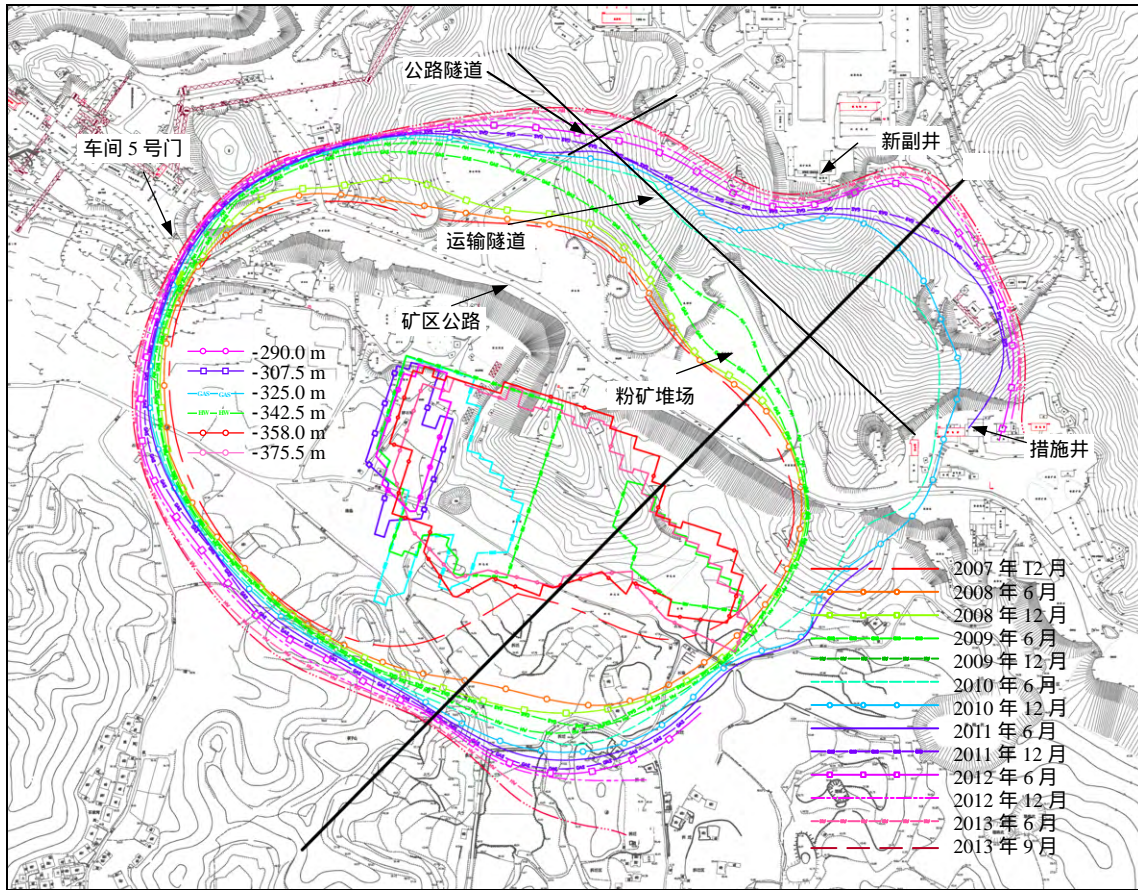


图 9 2007 年 12 月至 2013 年 9 月移动线分布图^[2]

Fig.9 Distributions of movement line from December 2007 to September 2013^[2]

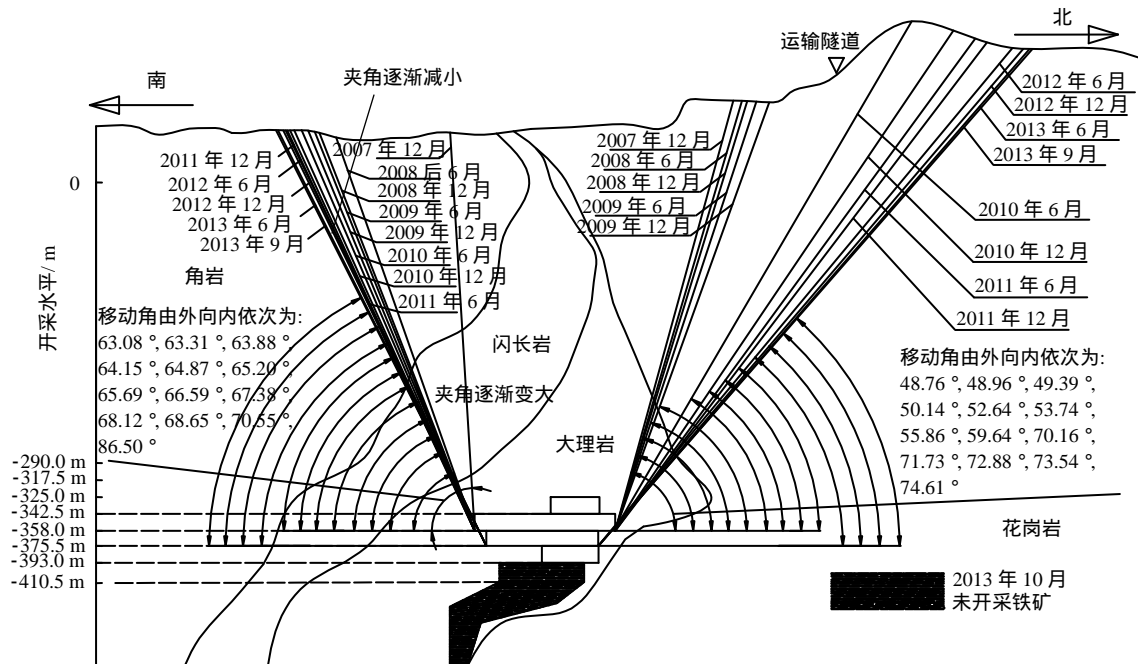


图 10 2007 年 12 月至 2013 年 9 月移动角随剖面 的分布

Fig.10 Angle of ground movement distributions with section I from December 2007 to September 2013

6 结 论

(1) 地下采矿引起的岩层移动分为两个阶段，

第 1 阶段为采空区顶板岩体破坏向上扩展至地表引起塌陷阶段；第 2 阶段为采空区周边围岩向采空区的倾倒破坏阶段。

(2) 在倾倒滑移区, 岩体水平位移大于沉降位移, 变形先以缓慢变形为主, 然后进入一个快速变形阶段。在对倾倒滑移区岩体进行预测时, 应该去掉变形转折点之前的数据。

(3) 开采沉陷和地形引起的应力同向叠加作用, 使得倾倒滑移区下坡方向的变形值大于平地的变形值, 增大的量值与坡体形态、采空区相对位置和结构面性状有关。

(4) 北部的移动角比南部移动角过缓, 造成此种现象的原因是: 北部下盘岩体受最为发育的 NNW、NNE 结构面的影响, 倾倒破坏较为严重。

参 考 文 献

- [1] 黄平路, 陈从新, 肖国峰, 等. 复杂地质条件下矿山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, 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.
- [2] 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 - 1588.
XIA Kai-zong, LIU Xiu-min, CHEN Cong-xin, et al. Study on surface deformation caused by underground mining in western area of Chenchao Iron Mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(8): 1572 - 1588.
- [3] 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 - 1396.
XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, XIA Tian-you, et al. Analysis of influence of discontinuities on surface deformation in eastern area of Chengchao Iron Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1389 - 1396.
- [4] 黄平路. 构造应力型矿山下开采引起岩层移动规律研究[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2008.
HUANG Ping-lu. Study on rock movement caused by underground mining in tectonic stress-mines[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [5] 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 Chenchao Iron Mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(5): 497 - 502.
- [6] 陈从新, 肖国峰, 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.
CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng, WEI Li-de. Report on cause analysis of ground surface cracking and rock mass stability of shaft area in eastern area of Chengchao Iron Mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998.
- [7] 柏威伟. 程潮铁矿东区地表及构筑物变形规律研究[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2010.
BAI Wei-wei. Study on the ground movement and deformation of affiliated architecture in eastern area of Chengchao Iron Mine[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [8] 陈从新, 肖国峰, 夏开宗, 等. 程潮铁矿塌陷区周边地表变形监测和预测[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2013.
CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng, XIA Kai-zong. The monitoring and forecasting of ground deformation surrounding collapse area in Chengchao Iron Mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [9] 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[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
HE Yue-guang. Modeling and monitoring surface movements due to excavation[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [10] 程关文, 陈从新, 沈强, 等. 程潮铁矿地下开采引起岩层移动机制初探[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1421 - 1429.
CHENG Guan-wen, CHEN Cong-xin, SHEN Qiang, et al. The mechanism of rock movement caused by underground mining in Chengchao Iron Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1421 - 1429.
- [11] 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 Kai-zong, CHEN Cong-xin, Fu Hua, et al. Deformation analysis of rock mass at different mining levels in west area of Chengchao iron Mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(4): 792 - 805.
- [12] 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 rock mass 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.