

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2897

地下采矿引起的程潮铁矿东区地表变形规律研究

邓洋洋^{1,2}, 陈从新^{1,2}, 夏开宗^{1,2}, 付 华^{1,2}, 孙朝焱^{1,2}, 宋许根^{1,2}

(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, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 金属矿山由于其矿体形态多变、地质条件复杂、多非充分采动、开采方法异样、构造应力显著及结构效应明显等特点, 难以把握由地下采矿引起的地表变形和岩体的破坏形式。以程潮铁矿东区为例, 依据近多年(2010年3月~2015年9月)的地表变形实测数据, 绘制出相应的监测成果图, 结合三维激光扫描等新技术再现地表变形三维盆地, 探究了地下开采影响下地表变形规律和机制。对矿区上下盘地表变形规律等进行了比较分析, 结果表明: 程潮铁矿东区在采矿初期发生筒状冒落; 变形传递到地表后, 在采空区正上方形成大小不等的漏斗状塌坑群; 上盘地表变形扩展与采矿推进度有较好的对应关系; 根据地表变形特征地表变形规律得出水平应力是影响地表变形主动力, 而结构面倾向影响上下盘岩体的破坏形式; 同时也得出坡体形态对地表变形的影响在下坡方向总变形量增大和垂直变形增量更大的结论。

关 键 词: 地表变形; 水平应力; 结构面; 坡体形态

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)09-0000-00

Study on ground movement and deformation in eastern area of Chengchao due to underground mining

DENG Yang-yang^{1,2}, CHEN Cong-xin^{1,2}, XIA Kai-zong^{1,2}, FU-hua^{1,2}, SUN Chao-yi^{1,2}, SONG Xu-gen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hubei, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese academy of science, Beijing 100049, China)

Abstract: It is difficult to study the surface deformation rules and the rock mass failure pattern caused by underground mining because of many factors such as variational orebody shape, complex geological conditions, mostly subcritical excavation, different mining method, conspicuous tectonic stress, obvious structural effect. As the eastern area of Chengchao Iron Mine for an example, according to the first-hand monitoring data of surface deformation in recent six years (From March 2010 to September 2015), drawing up the main map of monitoring results, reappearing the surface subsidence basin in combination with 3D laser scanning and GPS technology, and exploring the surface deformation rules and the rock mass failure mechanism under the impact of underground mining. The comparative analysis of the surface deformation in hanging wall and footwall of Chengchao East Iron Mine showed that: tubular caving occurred at the beginning of the mining, and different sizes of funnel-shaped collapses formed in the mined-out area after the caving propagated to the ground. Additionally, the expansion of surface deformation was in accord with the mining schedule in hanging wall. The horizontal stress was the main factor affecting the surface deformation, and structural plane tendency impacted on the damage form in hanging wall and footwall rock mass. Moreover, the slope morphology made the total deformation and the vertical deformation rate bigger in downward direction.

Keywords: surface deformation; horizontal stress; structural plane; slope morphology

1 引 言

金属矿山由于其矿体形态多变、地质条件复杂、多为非充分采动、开采方法异样、构造应力显著及

结构效应明显等特点, 造成由地下采矿引起的地表变形和岩体破坏形式与煤矿等沉积类地层矿山不同, 对地表构筑物的影响大小不一样^[1-8]。

许多学者对金属矿山地下开采引起的地表和深

收稿日期: 2016-00-00

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No.41602325, No.11602284); 国家自然科学基金面上项目(No.11472293)。

This work supported by the National Natural Science Found Youth Fund Projects (41602325, 11602284) and National Natural Science Foundation Project (11472293).

第一作者简介: 邓洋洋, 男, 1991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: dengyang_2014@sina.com

通讯作者: 夏开宗, 男, 1988年生, 助理研究员, 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

部岩体移动规律进行了大量研究，并总结出一些规律：宋卫东等^[9-10]认为顶板围岩的崩落呈现明显的间歇性和跳跃，临近塌落时突然发生大范围的筒状冒落现象；席人双等^[11-15]认为由于受结构面的影响，地表岩体变形方向和变形量值与理论预期值不同，结构面是导致矿区下盘变形扩展更大的原因；黄平路等^[15-16]认为围岩水平构造应力是程潮铁矿发生地表塌陷的驱动力，付华等^[5, 17-18]根据岩体变形特征将矿区分区，并分析了深部岩体破坏机制；同时康健荣等^[19-20]认为采动裂缝可在山区地表产生附加水平移动和下沉，其值与地表倾角、采动影响系数、表土层特性等因素有关。

上述研究在一定程度上可部分揭示金属矿山下盘地下开采引起的岩体移动规律，但大多是针对程潮矿体下盘的研究^[21-22]，对上盘地表变形规律和山区地表的影响少有涉及^[23]。本文通过运用三维激光和GPS静态测量等技术构建金属矿山三维监测网络，结合地下开采活动和矿区地质条件，对地表变形实测数据分析，阐释了矿区上盘地表变形部分规律，并解释了山区地形对变形的影响，得到的变形规律和重要结论可为矿山安全生产和地表重要构筑物的安全使用提供依据和指导。

2 矿区工程地质概要及采矿情况

2.1 工程地质条件

程潮铁矿东区岩浆活动强烈，岩浆岩分布广泛。区内岩石包含沉积岩、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。各类岩石平面分布如图1所示。



图1 程潮铁矿东区地质平面图
Fig.1 Geological planar graph in eastern area of Chengchao Iron Mine

区内构造较为复杂，既有淮阳山字形构造，又有新华夏构造，两者在空间上相互重叠，时间上相互交替，其中 NWW 向的山字型构造是矿区的主干构造（见图 2），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。

(1) 淮阳山字型构造形成时间较早，轮廓清楚，表现强烈，由 NWW 向的线状褶皱、冲断层、挤压带等压性结构面组成，NWW 向断裂多发育在褶皱南翼。走向延伸长，倾角较陡。主干构造十分发育，为 NWW 向的压性、压扭性断层，其配套断层为近南北向张性断层和 NW 向和 NE 向的扭性断层。

(2) 由 NNE 向压性、压扭性断裂构成的新华夏构造，形成时间较晚，构造形迹不如山字型构造明显，但分布普遍，常叠加于山字型构造之上，以塔桥庙断层和破面脑挤压断层规模较大。主要由 NNE 向的压性、压扭性断裂组成，倾向南东，倾角 60°~80°。该级断层在矿体下盘的井区岩体中极为发育，是影响井区岩体稳定性的主控断裂。

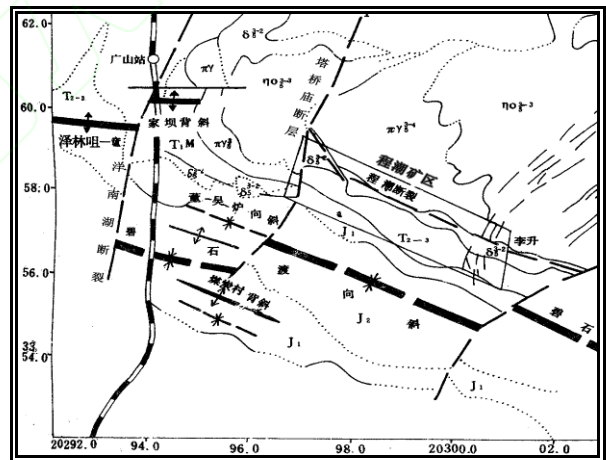


图2 矿区构造形迹图
Fig.2 Mining area tectonic structural figure

矿体花岗岩体的结构面主要有四组^[21]，分别为 NE 向、NWW 向、NNW 向和 NEE 向。所有节理性质均以压剪节理为主，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，节理密度约为 10 条/m。

2.2 地应力场

程潮铁矿下盘岩体的实际测量结果表明^[25]：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。在花岗岩中的实测结果：主压应力 $\sigma_1 = 18.63 \text{ MPa}$ ， $\sigma_2 = 9.0 \text{ MPa}$ ，接近测点岩体自重应力，实测水平应力与垂直应力比值为 2.0:1.0；在矽卡岩中的实测结果：主压应力 $\sigma_1 = 22.65 \text{ MPa}$ ， $\sigma_2 = 10.0 \text{ MPa}$ ，亦接近测点岩体自重应力；实测水平应力与垂直应力比值为 2.3:1.0。近东西向的主压应力大于自重应力。

2.3 采矿情况

程潮铁矿东区赋存 I、II、III号矿体，矿体主

要是由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北西西方向呈迭瓦状平行展布（见图 3）；在纵剖面上则表现为向北西西方向侧伏，各主要铁矿体也是呈首尾交错，部分重叠为迭瓦状排列（见图 4）。

III号矿体已经采完了包括-358、-375.5、-393 m 等多个水平的开采，其开采进度见表 1。目前正在对III号矿体的-410 m 和-430 m 水平进行开采。截止到 2015 年 9 月份，-410.5 m 水平开采已接近尾声，-430 m 水平开的矿体南部的一部分矿体。

表 1 程潮铁矿东区地下开采进度
Table The exploitation schedule of Chengchao East Iron Mine

开采水平 (m)		开采年限		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 线-16 线	20 线-26 线	
-106	-150	1979	1984		10 线-24 线	
-160	-206	1984	1990		9 线-22 线	
-218	-260	1990	1997		11 线-22 线	
-260	-302	1998	2002		13 线-22 线	
-302	-358	2002	2007			15 线-16 线
-358	375	2007.07	2012.06			15 线-16 线
-375	-393	2009.05	2013.12			19 线-16 线
-393	-410.5	2012.03				19 线-14 线
-410.5	-430	2014.07				15 线-12 线

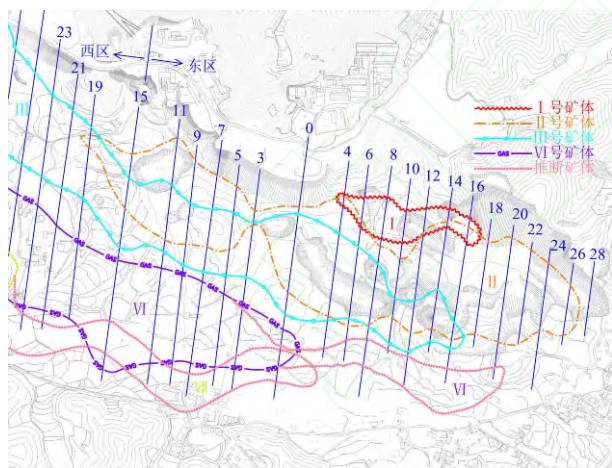


图 3 程潮铁矿东区矿体赋存平面图

Fig.3 Goaf boundary map in Chengchao East Iron Mine

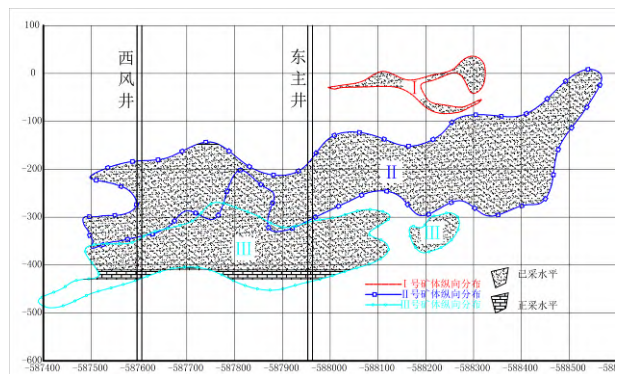


图 4 程潮铁矿东区矿体纵向投影图

Fig.4 Geological section showing longitudinal projective map of ore bodies

3 地表变形监测

3.1 监测方法及结果

矿区地形复杂，监测范围广，变形量级别和精度要求不一样，监测工程量和监测难度大。为了有效掌握程潮铁矿东区的地表变形情况，建立了基于 GPS 多边网控制静态测量技术^[26]及三维激光扫描技术于一体的金属矿山三维立体监测系统，其中 GPS 测点共计 124 个，三维激光扫描基点 6 个，扫描次数共计 5 次。GPS 测点和三维激光扫描基点布置见图 6。

三维激光扫描利用是激光测距的原理（见图 5），通过外业数据采集和内业数据处理，获取塌陷区不同时期地表地形并对其进行比较，得到不同时期地表塌坑的变化情况。

地表 GPS 监测网从 2010 年 3 月开始基本覆盖东区上下盘，监测工作至 2014 年 11 月每月进行一次，之后每两月一次；三维激光从 2014 年 6 月至 2016 年 1 月每 3 月扫描一次；积累了近六年的地表

变形数据真实再现了程潮铁矿东区在采矿活动下地表变形发展情况岩体移动特征。

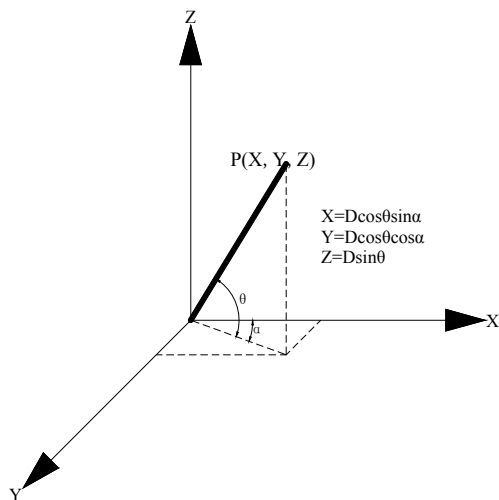


图 5 三维激光扫描原理示意图
Fig.5 3D laser scanning principle diagram

3.2 监测结果分析

(1) 从矿区主要测点变形成果来看(表 2~表 3): 越靠近采空区, 变形越大, 如测点 DE05 水平和垂直变形分别达到 300.3 cm 和-181 cm, 而测点 N14 水平和垂直变形分别为 10.5 cm 和-6.9 cm, 同一勘探线上的其他测点也存在类似规律, 如测点 N13 和 N09, 测点 SE20 和 SE22 等。变形方向指向采空区, 下盘测点多数指向西南方向, 上盘测点多数指向东北方向, 下盘测点变形整体大于上盘测点, 如 DE05 距离采空区约 250 m, SE20 距离采空区约 140 m, 而它们之间的而它们之间的水平和垂直变形比分别约为 4.6 和 3.9。水平和垂直变形比值在边缘区域波动较大, 如 N22 和 SE28, 分别为 4.1 和 0.9, 在中部区域大多数在 1.4~2.1 之间。

表 2 下盘部分测点变形成果
Table 2 Part of deformation results of footwall monitoring points

下盘测点	N/cm	E/cm	水平合成值 U/cm	垂直变形值 W/cm	方向	U/W
N09	-5.5	-9.8	11.2	-2.8	西南	4.0
N13	-277.2	-17.0	277.7	-175.2	西南	1.6
N14	-9.0	-5.3	10.5	-6.9	西南	1.5
N22	-5.7	-9.2	10.8	-2.6	西南	4.1
N24	-120.4	-176.2	213.4	-124.8	西南	1.7
DE05	-285.7	-92.4	300.3	-181.0	西南	1.7

表 3 上盘部分测点变形成果
Table 3 Part of deformation results of hanging wall monitoring points

上盘测点	N/cm	E/cm	水平合成值 U/cm	垂直变形值 W/cm	方向	U/W
SE15	19.8	-0.2	19.8	-12.4	西北	1.6
SE17	5.9	-2.8	6.6	-3.6	西北	1.8
SE20	64.2	15.6	66.1	-46.9	东北	1.4
SE22	12.9	5.1	13.8	-11.2	东北	1.2
SE25	81.6	46.0	93.7	-45.4	东北	2.1
SE26	38.2	29.1	48.0	-28.3	东北	1.7
SE28	6.8	2.6	7.3	-8.2	东北	0.9

(2) 从图 6~图 7 可以看出: 变形矢量指向采空区, 沉降位移等值线基本按照采空区的形态展布(箭头方向表示岩体移动方向, 箭头长短表示变形大小), 等值线梯度由外向内逐渐增大, 采空区形态决定了地表变形的分布特征。同时, 边界线沿 0-0' 剖面 and 6-6' 剖面扩展距离为 1 127 m 和 1 309 m, 与采空区宽度比值分别为 5.2 和 4.2, 较煤矿一般影响范围 1.5R 大^[16]。

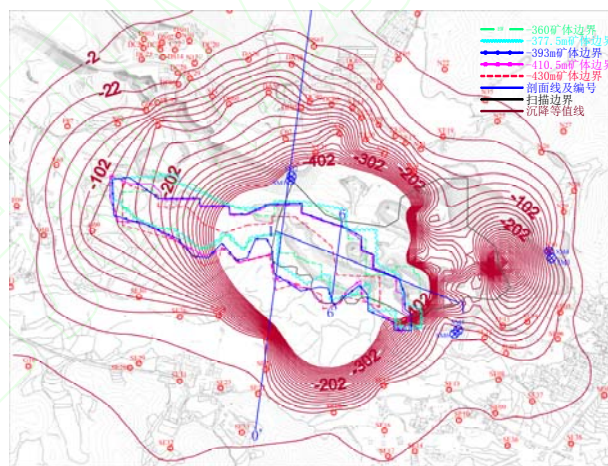


图 6 2015 年 9 月沉降位移等值线图(单位: cm)
Fig.6 Contour map of vertical displacements in september 2015 (unit: cm)

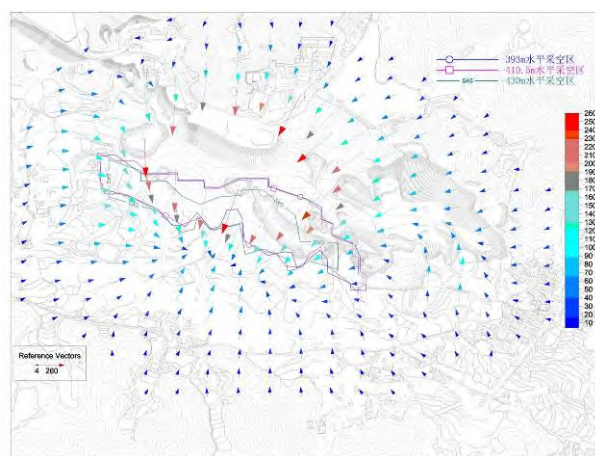


图 7 2015 年 9 月水平矢量图
Fig.7 Vector graph of horizontal displacement on september 2015

(3) 从图 8 可以看出, 6 cm 水平等值线从 2010

年 9 月至 2015 年 9 月沿 0-0'号勘探线向北扩展约 150 m, 向南扩展约 135 m。6 cm 水平等直线从 2013 年 3 月至 2015 年 3 月向北扩展 19 m, 向南扩展 37 m, 较北方向大。

从图 9 可以看出, -6 cm 沉降等值线从 2010 年 9 月至 2015 年 9 月沿 0-0'号勘探线向北扩展约 150 m, 向南扩展约 188 m。2013 年 3 月至 2015 年 3 月移动线向北扩展 24 m, 向南扩展 70 m。

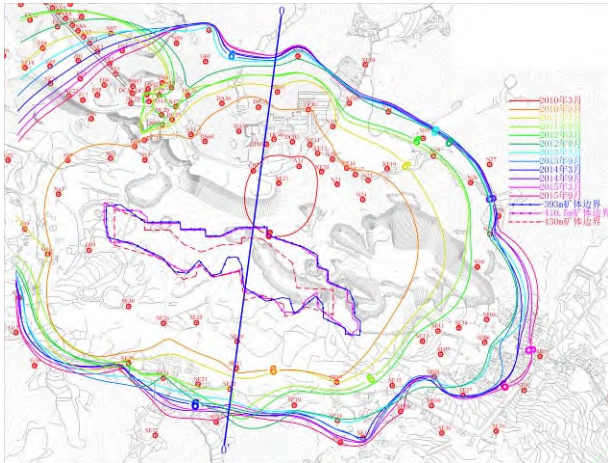


图 8 6 cm 水平等值线扩展图

Fig.8 Distribution map of 6 cm horizontal boundary line

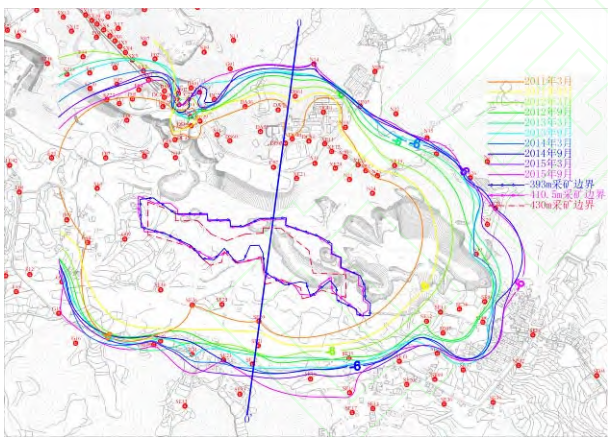


图 9 -6 cm 沉降等值线扩展图

Fig.9 Distribution map of 6 cm vertical boundary line

4 地表变形规律分析

(1) 黄平路等按成因将地表塌陷分为疏干塌陷和采矿塌陷^[15], 并将塌坑形成后的岩体移动过程分为塌坑围岩变形卸荷阶段和塌坑扩展放缓阶段。夏开宗等^[22]依据钻孔资料绘制出了矿区在地表塌陷前顶板的崩落过程, 一些学者^[27]也认为岩体的先期塌陷机制为筒状冒落。从三维激光扫描地形结果可以看出, 随着地下采空区范围不断扩大和和深度继续延深, 地下岩体不断垮塌和应力场重生成, 在采空区上方地表水入渗、地下爆破震动等因素的影响

下, 采空区正上方地表不断塌陷形成大小不等的塌坑群 (见图 12)。从 2014 年 6 月至 2016 年 1 月塌陷区扫描 I - I'和 6-6'剖面地表变形图 (见图 13~图 14) 可以看出, 在这一年半内, I - I'剖面上最大塌陷深度约 18 m, 6-6'剖面上最大塌陷深度约 12 m, 塌陷位置和时间并无规律, 地表发生不连续塌陷。因此, 地下采矿引起的地表塌陷传递到地表后, 采空区上部岩体在受地下采矿活动的重复影响下破碎, 在地表形成漏斗状塌坑群且塌坑深度不断加深, 而在采空区周围地表变形以采空区为中心形成塌陷盆地 (见图 6~图 7)。

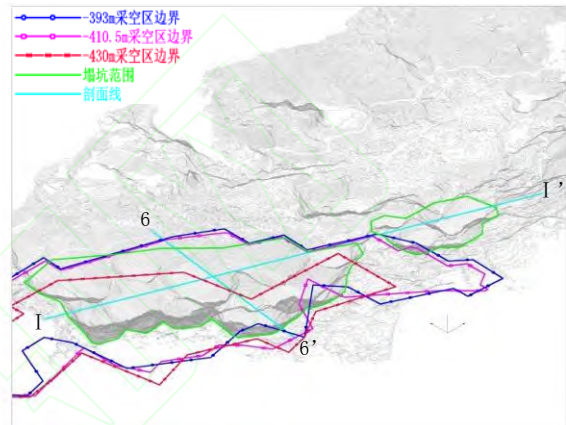


图 12 2016 年 1 月塌陷盆地三维激光扫描图

Fig.12 3D laser scanning subsidence basin on January 2016

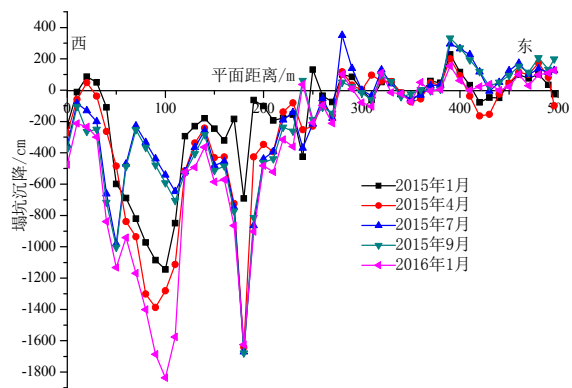


图 13 塌陷区地表沿 I - I'剖面变形图

Fig.13 Vertical deformation along section I - I' in caving area

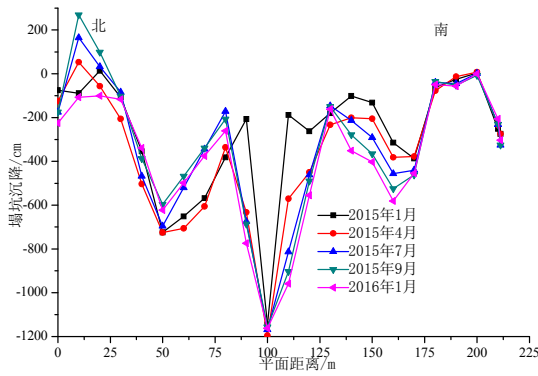


图 14 塌陷区地表沿 6-6'剖面变形图
Fig.14 Vertical deformation along section 6-6' in caving area

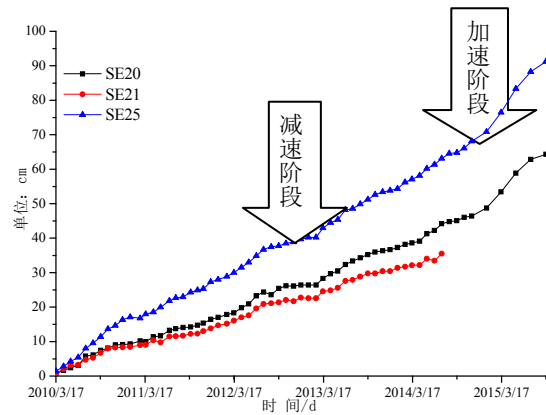


图 15 上盘部分测点随时间变形图
Fig.15 The deformation of hanging wall monitoring points varying with time

(2) 从上盘的部分测点变形来看, 累积变形曲线呈阶梯状上升(见图 15), 如在 2012 年 8 月至 2013 年 2 月, 变形减缓, 在 2013 年 3 月至 2015 年 1 月, 变形加速, 在 2015 年 3 月至 2015 年 9 月, 曲线进一步变陡, 变形再次加速。从 6 cm 水平等值线和 -6 cm 垂直等值线来看(见图 8~图 9), 虽然等值线在 0-0'剖面处有波动, 但总的趋势为, 2012 年 9 月至 2013 年 3 月扩展范围较小, 2013 年 3 月至 2013 年 9 月扩展范围较大, 2015 年 3 月至 2015 年 9 月扩展范围更大。从各水平采矿进度图看(见图 16~图 18), 2012 年 9 月至 2013 年 3 月, 地下采矿集中在 -393 m 水平北部和 -410 m 水平南部的小部分区域; 2013 年 3 月至 2015 年 3 月, 地下采矿主要集中在 -410 m 水平中部区域; 2015 年 3 月至 2015 年 9 月, 地下采矿覆盖了 -410 m 水平北部部分和 -430 m 水平南部的小部分区域。

地下开采进度与等值线和地表测点变形速率有较好对应关系, 特别是, 地下采矿在 2013 年 3 月由 -393 m 水平北端向 -410 m 水平南端过渡和在 2015 年 3 月采矿活动主要集中在 -410 m 水平的北端并开始 -430 m 水平南端的开采, 上盘部分地表测点变形速率增大和上盘等值线加速扩展, 而下盘等值线扩展总体趋势刚好呈相反规律。因此, 随着程潮铁矿东区地下开采深度和开采范围的增加, 地表变形不断增大并向外扩展, 矿体上盘地表变形和扩展速率增大并与采矿推进度息息相关。

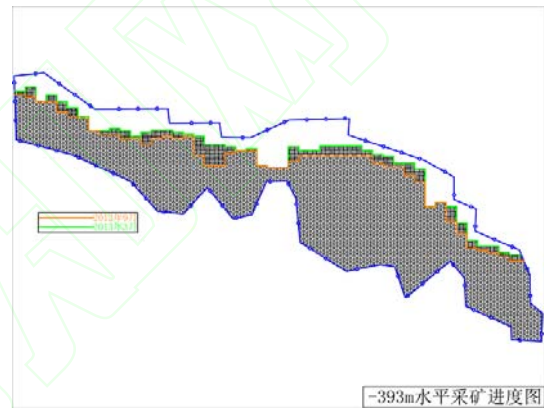


图 16 -393 m 水平采矿进度图
Fig.16 -393 m level mining progress

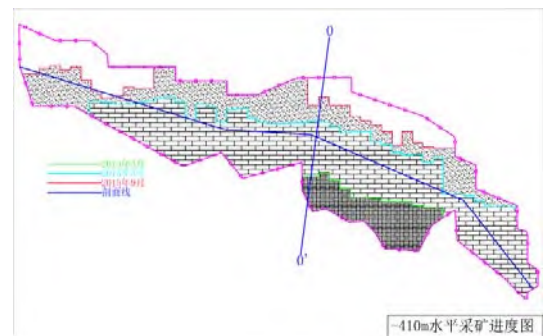


图 17 -410.5 m 水平采矿进度图
Fig.17 -410.5 m level mining progress

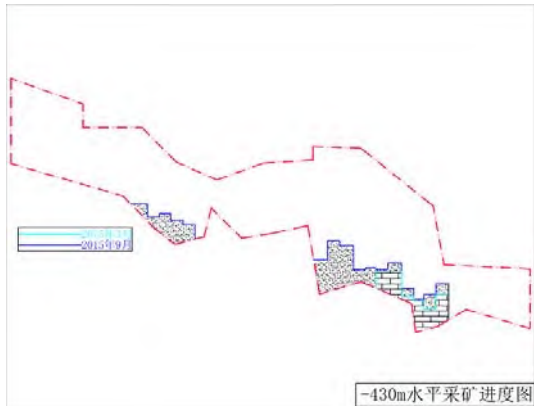


图 18 -430 m 水平采矿进度图
 Fig.18 -430 m level mining progress

(3) 水平构造应力和结构面的存在加速了岩体变形并改变其破坏特征。从垂直变形在 0-0'剖面上

的分布来看 (见图 10): 下盘变形比上盘大, 扩展范围较远, 出现一个较明显的拐点并随时间向外推移; 上盘变形量较下盘扩展均匀, 或呈阶梯性加速。同样, 程潮铁矿东区-430 m 水平原始设计上盘移动角为 52° , 下盘移动角为 62° [28], 而目前开采至-430 m 水平, 上下盘移动角分别为 47.6° 和 55.5° , 下盘比原设计值小 12.4° , 上盘比原设计值大 3.5° 。2013 年 3 月至 2015 年 3 月, 地下采矿活动主要集中在-410 m 水平, 从开采进度图 (见图 17)、6 cm 水平和-6 cm 沉降等值线看 (见图 8~图 9), 在南北方向上, 开采面积比及采空区沿 0-0'剖面距离比为 2.3 和 2.4, 而 6 cm 水平和-6 cm 沉降等值线上下盘方向沿 0-0'剖面扩展比值分别为 1.9 和 3.4 (见表 4), 也即在水平方向上, 下盘较上盘扩展更多, 在垂直方向上正好相反。

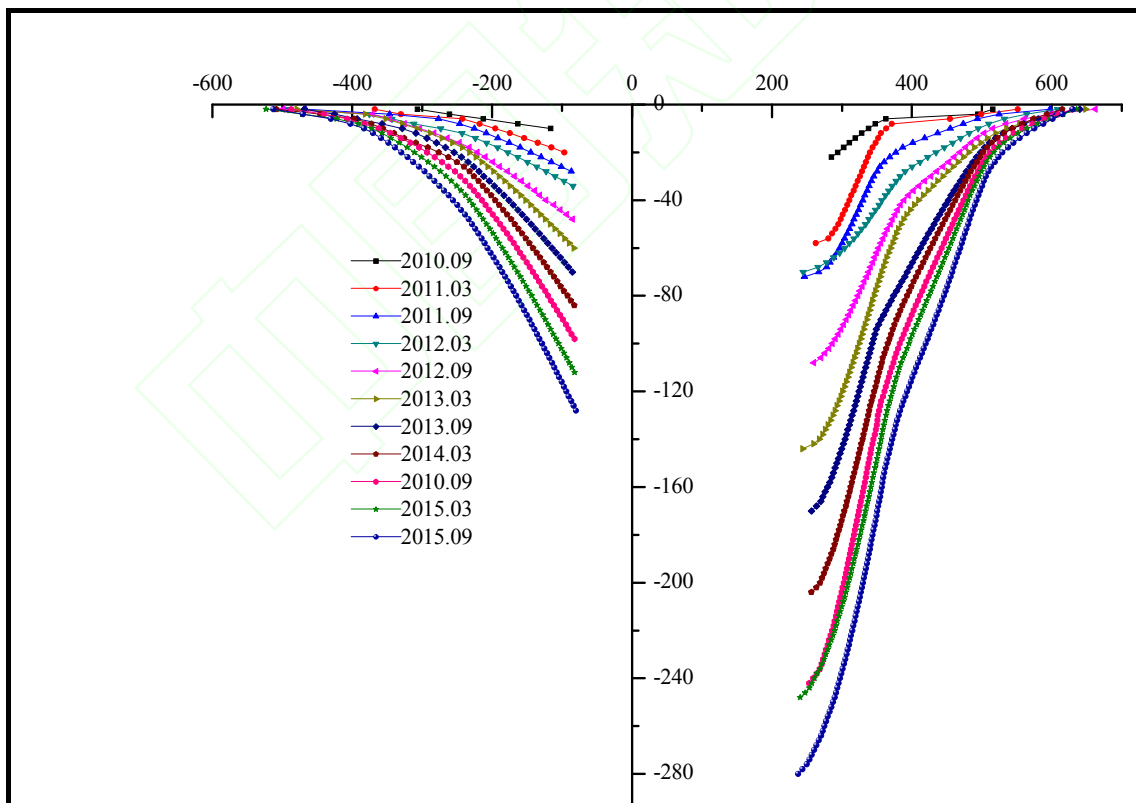


图 10 2010 年 3 月~2015 年 9 月垂直变形的分布 (剖面 0-0')
 Fig.10 Vertical deformations distribution of section 0-0' from March 2010 to September 2015

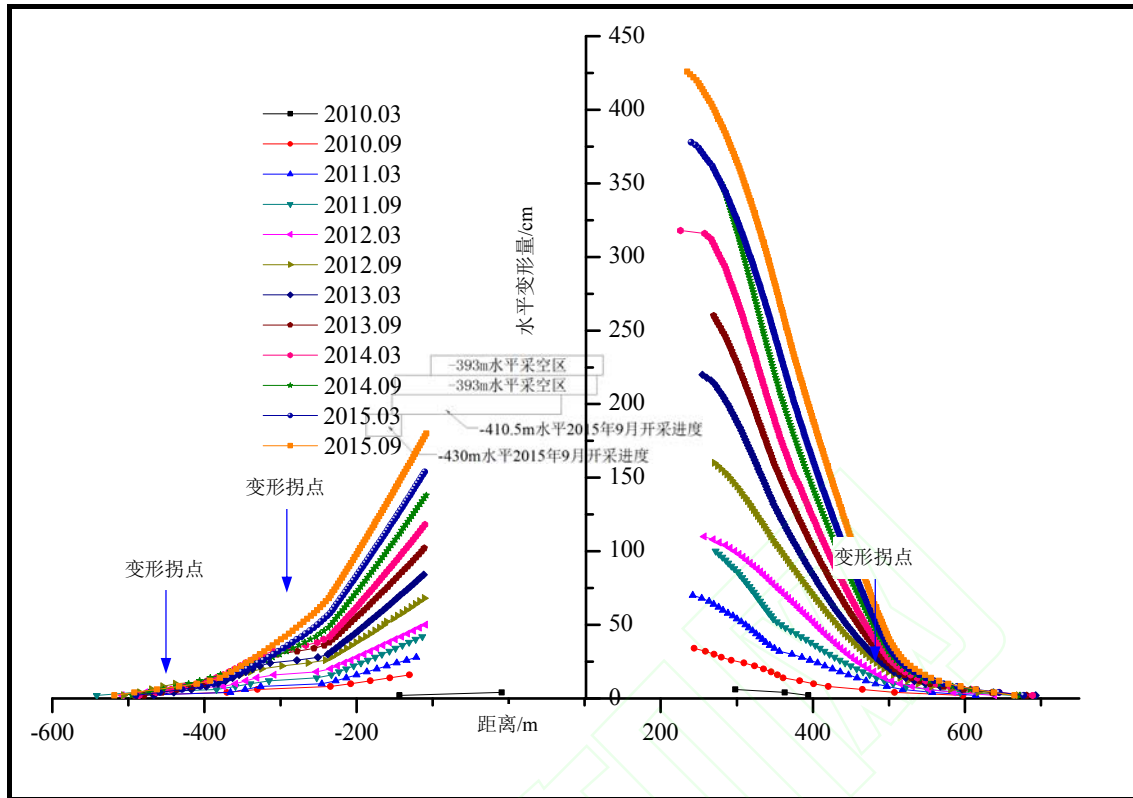


图 11 2010 年 3 月~2015 年 9 月水平变形量的分布 (剖面 0-0')

Fig.11 Horizontal displacements distribution of section 0-0' from March 2010 to September 2015

表 4 -410.5 m 水平开采进度与等值线扩展关系

Table 4 The corresponding relations between mining progress and the extension of contour on -410.5 m level

	上盘方向 (S)	下盘方向 (N)	比值 (S/N)
采空区面积 (m ²)	37207	15853	2.3
沿 0-0'剖面距离 (m ²)	57	24	2.4
6cm 等值线扩展 (m)	36.5	19.3	1.9
-6cm 等值线扩展 (m)	69.8	20.4	3.4

由于地下采空区的形成, 围岩应力释放, 而较大的水平构造应力使得围岩向内部移动。夏开宗等将采空区形成后围岩破坏简化为“悬臂梁”模型^[12], 而矿区倾向南东的 NE 向节理最为发育, 受结构面的影响, 下盘沿“顺层”结构面滑移破坏, 加剧了地表变形和扩展范围, 而上盘沿“反倾”结构面倾覆破坏, 影响不如下盘大 (见图 19)。

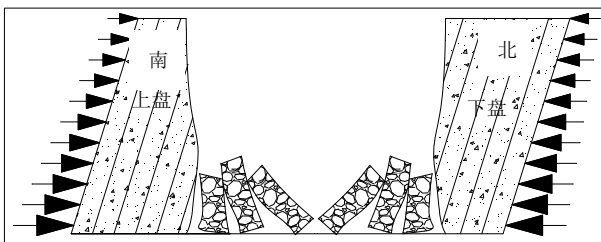


图 19 水平应力和结构面对围岩影响示意图

Fig.19 The influence of horizontal stress and structure on the surrounding rock sketch map

(4) 地表测点水平变形和垂直变形的比值在平地上随着测点距离采空区距离的增加而增加 (见图 20), 在山上随着测点到采空区距离的增加而减小 (见图 21); 随着远离采空区, 水平和沉降比值波动区域滞后, 水平应力逐步释放。在山上, 测点变形受到地下采矿活动和坡体形态的双重影响, 致使山上测点变形较平地大, 如测点 DA53 和测点 DC03 距离采空区分别约 280 m 和 256 m, 而 2015 年 5 月, 测点 DA53 的水平 and 垂直变形分别为 216.3 cm 和 -168.3 cm, 测点 DC03 的水平 and 垂直变形分别为 214 cm 和 -138.3 cm, 特别是垂直变形差的较多。当地下采矿活动对地表变形的影响传递到山上, 山上出现裂缝时发生应力释放, 靠近采空区一侧的下坡方向岩体发生倾覆滑移破坏, 垂直变形速率更大, 造成在山上水平与沉降的比值较平地小, 而总变形较平地大的原因。

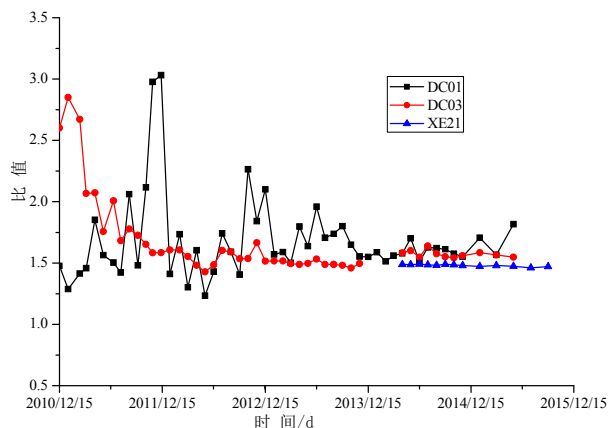


图 20 在平地上水平与垂直变形比值变化图

Fig.21 The horizontal to vertical deformation ratio variations on the ground

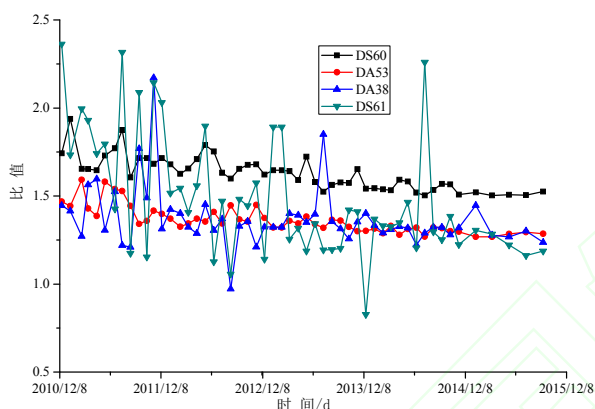


图 21 在山上水平与垂直变形比值变化图

Fig.21 The horizontal to vertical deformation ratio variations on the mountains

5 结论

通过上述对岩潮铁矿东区地下开采引起的地表变形规律研究，总结出了可供其他类似的金属矿山开采参考的规律：

(1) 采矿对岩体的影响传递到地表后，在采空区正上方地表形成漏斗状塌坑群，地表塌陷位置和时间并无规律，发生不连续塌陷。

(2) 矿区扩展形状基本按照采空区形态展布，上盘地表扩展规律与采矿推进度有较好的对应关系，地表测点呈现阶梯状加速变形。

(3) 水平应力是导致地表加速扩展的主要因素，常常使水平与沉降的比值达到数倍；而倾向东南的 NE 向结构面的存在改变了岩体破坏特征，分别削弱和加速了上、下盘岩体的破坏，使得在下盘水平变形扩展和在上盘垂直变形扩展得更多的主要原因。

(4) 地表形态也是影响地表变形的因素之一，坡体形态改变了地表测点变形特征，坡体形态对地

表变形的影响使下坡方向垂直变形增量更大。随着离采空区距离的增加，地表变形水平和沉降的比值在平地上逐渐增大，在山上逐渐减小，而总变形较平地大。

参考文献

- [1] 邓洋洋, 陈从新, 夏开宗, 等. 程潮铁矿东主井区地表变形特征和机制分析[J]. 岩土力学, 2016(增刊 1): 455—461.
DENG Yang-yang, CHEN Cong-xin, XIA Kai-zong, et al. Analysis of deformation characteristics of surface around east main shaft in Chengchao Iron Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016(Supp.1): 455—461.
- [2] DENG Y Y, CHEN C X, XIA K Z, et al. Investigation on the characteristics of overlying strata caving in the Chengchao Iron Mine, China[J]. *Environmental Earth Science*, 2018. (accepted) DOI: 10.1007/s12665-018-7553-9.
- [3] 宋许根, 陈从新, 夏开宗, 等. 竖井变形破坏机制与继续使用可行性探究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 331—342.
Research on deformation mechanism and feasibility of continuous use of mine shaft[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Suup.1): 331—342.
- [4] 陈龙龙, 陈从新, 夏柏如, 等. 程潮铁矿东区地面塌陷机制及扩展机制初探[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2322—2334.
Study on mechanism of formation and expansion of ground caving in the eastern Chengchao Iron Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2322—2334.
- [5] 付华, 陈从新, 夏开宗, 等. 金属矿山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): 1859—1868.
FU Hua, CHEN Cong-xin, XIA Kai-zong, et al. Analysis briefly about the law of rock deformation caused by underground mining of metal mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1859—1868.
- [6] 柏威伟. 程潮铁矿东区地表及构筑物变形规律研究[D]. 武汉: 中国科学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.
- [7] 韩芳. 开采沉陷对地表构筑物的影响分析[D]. 太原:

- 太原理工大学, 2015.
- HAN Fang. Impact analysis on surface structures of mining subsidence[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [8] 刘建军. 开采沉陷对地表构筑物的影响分析[J]. 山西建筑, 2015(34): 89—90.
- LIU Jian-jun. On influence of mining subsidence on surface buildings[J]. *Shanxi Architecture*, 2015(34): 89—90.
- [9] 宋卫东, 杜建华, 尹小鹏, 等. 金属矿山崩落法开采顶板围岩崩落机理与塌陷规律[J]. 煤炭学报, 2010, 7: 1078—1083.
- SONG wei-dong, Du jian-hua, Yin xiao-peng, et al. Caving mechanism of hangwall rock and rules of surface subsidence due to no-pillar sub-level caving method in an iron mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 7: 1078—1083.
- [10] 宋卫东, 陈从新. 程潮铁矿西区地表错动机理及对重要建(构)筑物场地稳定性影响研究总结报告[R]. 北京: 北京科技大学, 2013.
- SONG Wei-dong, Chen Cong-xin. The research report of the surface rupture mechanism and its influence on the field stability of important building in the western area of Chengchao iron mine[R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2013.
- [11] Brady BHG, Brown ET. *Rock Mechanics for underground mining* [M]. USA, Springer Science, 2004.
- [12] XIA K Z, CHEN C X, Liu X M, et al. Mining-induced ground movement in tectonic stress metal mines: a case study[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(3): 1—27.
- [13] 席人双, 陈从新, 肖国锋, 等. 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, (增刊 2): 532—538.
- XI Ren-shuang, CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng, et al. Study of influence of discontinuities on rock movement and surface deformation in eastern area of Chengchao iron mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, (Supp.2): 532—538.
- [14] 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, 5: 1389—1396+1406.
- XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, XIA Tian-you, et al. Analysis of influence of structural planes on surface deformation in western area of Chengchao Iron Mine in western area of Chengchao Iron Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 5: 1389—1396+1406.
- [15] 黄平路. 构造应力型矿山地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, 2006.
- [16] 曹阳, 颜荣贵, 贺跃光. 构造应力型矿山地表移动宏观破坏特征与对策[J]. 矿冶工程, 2002, 22(2): 31—34.
- CAO Yang, YAN Rong-gui, HE Yue-guang. Macroscopic destroy of tectonic stress type surface movement[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2002, 22(2): 31—34.
- [17] 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—1578.
- 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—1578.
- [18] XIA K, CHEN C, LIU X, et al. Mining-induced ground deformation in tectonic stress metal mines: A case study[J]. *Engineering Geology*, 2016, 210: 212—230.
- [19] 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, 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, 1: 59—64.
- [20] 李敏. 山区重复采动下地表移动变形规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- LI Min. Research on regulation of surface movement and deformation in mountain and repeated mining[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [21] 夏开宗, 陈从新, 付华, 等. 金属矿山崩落采矿法引起的岩层移动规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 5: 1434—1440.
- XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, FU Hua, et al. Analysis of law of ground deformation induced by caving mining in metal mines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 5: 1434—1440.
- [22] 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, 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[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 4: 792—805.
- [23] VILLEGAS T, NORDLUND E, DAHNÉR-LINDQVIST C. Hangingwall surface subsidence at the Kiirunavaara Mine, Sweden[J]. **Engineering Geology**, 2011, 121(1): 18—27.
- [24] 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: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng, WEI Li-de, et al. Research report about structural safety of east main shaft and west air shaft and rock stability in eastern Chengchao iron mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [25] 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.
- [26] 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[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- LIN Jian. Surface deformation analysis and forecast study of the underground mining based on GPS monitoring[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [27] 程关文, 陈从新, 沈强, 等. 程潮铁矿地下开采引起岩层移动机理初探[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[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1421—1429.
- [28] 许东俊, 陈从新. 程潮铁矿东区地表开裂成因分析及东主井系统岩基稳定性研究[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 1998.
- XU Dong-jun, CHEN Cong-xin. analysis of cause of surface crack and batholith stability of the east main shaft system in western area of Chengchao iron mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998.