

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.021

程潮铁矿东区地面塌陷机制及扩展机制初探

陈龙龙^{1,2}, 陈从新¹, 夏柏如², 夏开宗¹, 付 华¹,
邓洋洋¹, 宋许根¹, 孙朝焱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, 湖北 武汉 430071;
2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘 要: 根据程潮东区塌陷历史与现状, 借助三维激光扫描技术重建了地面塌陷三维地表模型, 结合 surfer 绘制出了地面累计沉降等值线图和累计沉降值盆地; 最初塌陷点大多分布在大理岩及围岩蚀变带中; 塌陷区自东向西呈条带状分布, 北部塌陷要比南部严重; 塌陷区内呈现类似“角峰”、“刃脊”等冰川地貌的特点。根据地质条件、采矿情况以及监测资料分析, 认为地下采矿是诱因, 地质条件是内因, 二者共同作用导致了塌坑大多首先在大理岩及围岩蚀变带区域中出现。在塌坑出现后, 较高的水平构造应力得到释放, 使得由 NE 向节理切割成悬臂梁板的岩体被折断。通过建立的力学模型分析得到岩体折断的范围达到了 172 m 宽。折断的岩体沿着折断面发生倾倒滑移破坏。这种力学扩展机制使得塌坑范围不断扩大, 最终形成一个大的塌陷盆地。

关 键 词: 地下采矿; 金属矿山; 三维激光扫描技术; 塌陷机制; 扩展机制; 悬臂梁板模型

中图分类号: TU 434

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)08-2322-13

Study on mechanism of formation and expansion of ground caving-in in the eastern Chengchao Iron Mine

CHEN Long-long^{1,2}, CHEN Cong-xin¹, XIA Bo-ru², XIA Kai-zong¹, FU Hua¹,
DENG Yang-yang¹, SONG Xu-geng¹, SUN Zhao-yi¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;
2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: According to the history and current situation of ground caving-in in the eastern Chengchao Iron Mine, a 3D surface model of ground caving-in was reconstructed with the help of a 3D laser scanning technology. Furthermore, the ground subsidence contour map and the accumulative subsidence basin were obtained by combing with Surfer program. It showed that the initial ground caving-in points were mostly distributed in the marble area and the wall rock alteration zone. It is found that the ground caving-in area was a zonal distribution from east to west. Moreover, the situation of ground caving-in in the north was more severe than in the south. The terrain and landform of the ground caving-in area show similar glacier landscape features, such as the horn and blade ridge. According to geological conditions, underground mining situations and monitoring data of cracks and ground surface deformation by the 3D laser scanning technology, it is considered that underground mining is an internal cause and geological condition is an external cause for ground caving-in. The combined effect of these two factors led ground caving-in to appear mostly in the marble and surrounding rock alteration zone area for the first time. After the emergence of ground caving-in, a high level horizontal tectonic stress was released. As a result, rock mass, which was cut into a cantilever beam-plate by NE-trending joints, was broken. Through the analysis of the mechanical model of a cantilever beam-plate, the scope of fractured rock mass reached up to 172 meters wide. The fractured rock mass produced toppling-sliding failure along the sliding surface. Therefore, this mechanism of mechanical expansion makes the scope of ground caving-in wider, and finally forms a large ground caving-in basin in the eastern Chengchao Iron Mine.

Keywords: underground mining; metal mine; three-dimensional laser scanning technology; mechanism of ground caving-in; mechanical expansion mechanism; cantilever beam-plate model

收稿日期: 2017-01-16

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

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (11472293) and the National Science Foundation for Young Scientists of China (11602284).

第一作者简介: 陈龙龙, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定性等方面的研究工作。E-mail: 2002150061@cugb.edu.cn

通讯作者: 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

1 引言

由于人类社会经济活动的迅速发展，对于金属型资源的需求急剧增长。为了满足这种需求，越来越多的金属矿山向着大规模地下采矿发展，开采的深度、空间范围不断延伸和扩展。地下采矿引起的地面形变问题是一个十分复杂的系统工程，学界针对这个问题做了许多研究。朱家桥^[1]认为，程潮铁矿东区的地质灾害和地表变形问题是由地下采矿引起的，地表变形的破坏形式是倾倒拉裂破坏。席人双等^[2]认为，程潮东区东主井区的地表变形主要受控于 NWW 节理，地表呈现以阶梯状的变形向采空区发展。邓洋洋等^[3]通过实测数据得出，在东主井区地表变形以水平位移为主，垂直位移较小的结论。王剑等^[4]则认为，东主井区的地表移动和构筑物开裂是由老滑坡所致，地下采矿是其诱因。夏开宗^[5]和黄平路等^[6]都认为，地下采矿引起的水平构造应力的释放是地表快速变形的牵引力，它驱动岩体向采空区快速移动，在结构面的影响下产生岩体的错动和张裂。夏开宗等^[7]研究了程潮铁矿北部移动角要缓于南部移动角的岩层移动规律，认为这是由于北部下盘岩体受控于 NNW、NNE 向结构面所致。陈从新等^[8-10]通过分析多年深部岩体变形的观测数据，将深部岩体变形区域分为破裂岩体区、破裂过渡区、变形区和未扰动区。这些研究从不同的角度揭示了程潮铁矿地下开采所引起的地面形变和岩体变形的产生和演化规律。但这些研究大多是以地表变形问题来展开工作的，特别是以西区的地表变形为主。对于矿区普遍存在的地面塌坑则没有做太多系统的研究工作，特别是对塌坑形成、演化机制及扩展规律缺乏系统、深入地分析和研究。本文在前人工作的基础上，根据多年的监测数据，对程潮铁矿东区地面塌坑的形成、演化机制及扩展规律进行初步的分析和探讨。

2 矿区采矿与工程地质概况

2.1 采矿情况

程潮铁矿位于鄂州市郊东南方，是国内第三大地下采矿型铁矿山，作为武钢集团重要的铁矿石生产基地，每年担负着 300×10^9 kg 铁矿石的生产目标。程潮矿区范围，东起细王冲，西至塔桥庙。东西长约 3 km，南北宽约 1.5 km，面积为 4.5 km²。以西 15 线为界划分，该线以东为东采区，以西为西采区。程潮铁矿为矽卡岩型矿床，因热液交代作用而成矿，主要由大小 163 个磁铁矿体和大小 136 个

硬石膏矿体组成，系一综合性矿床。规模较大的铁矿体有 II 号、III 号、VI 号、VII 号 4 个。各主要矿体的分布如图 1 所示。

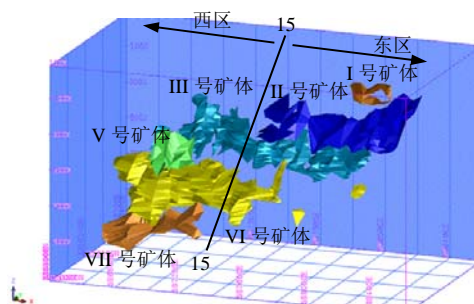


图 1 程潮铁矿主要矿体三维空间分布图
Fig.1 3D spatial distribution of main ore bodies in Chengchao Iron Mine

东区主要存在 I~III 号矿体，各矿体在空间上相互接触、缠绕，呈现空间上的叠瓦状形态，在平面上向 SEE 方向平行展布，在垂直面上向 NWW 方向倾伏。

程潮铁矿采用崩落法开采，开采情况见表 1、图 2。东区 I 号、II 号矿体起采于 1970 年，目前已采完。III 号矿体起采于 2002 年，目前开采到 -410.5 m 和 -430 m 两个水平。

表 1 东区开采情况
Table 1 Mining information of eastern ore body

开采水平/m		开采时间/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
-375	-393	2007	2012			39~16 线
-393	-410	2009	2013			19~16 线
-410		2012				19~14 线
-430		2014				15~12 线

2.2 工程地质情况

根据大地构造理论，程潮铁矿属于下扬子区大冶小区，位于下扬子凹陷西端，处于淮阳地盾与江南古陆之间。北临南淮阳大断裂，南以幕阜山东西向构造带为界，西至新华夏构造梁子湖凹陷。

区内构造运动强烈，具有多期性、继承性，主要发育淮阳山字型构造和新华夏构造。这两者在空间上相互重叠，时间上相互交错。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。

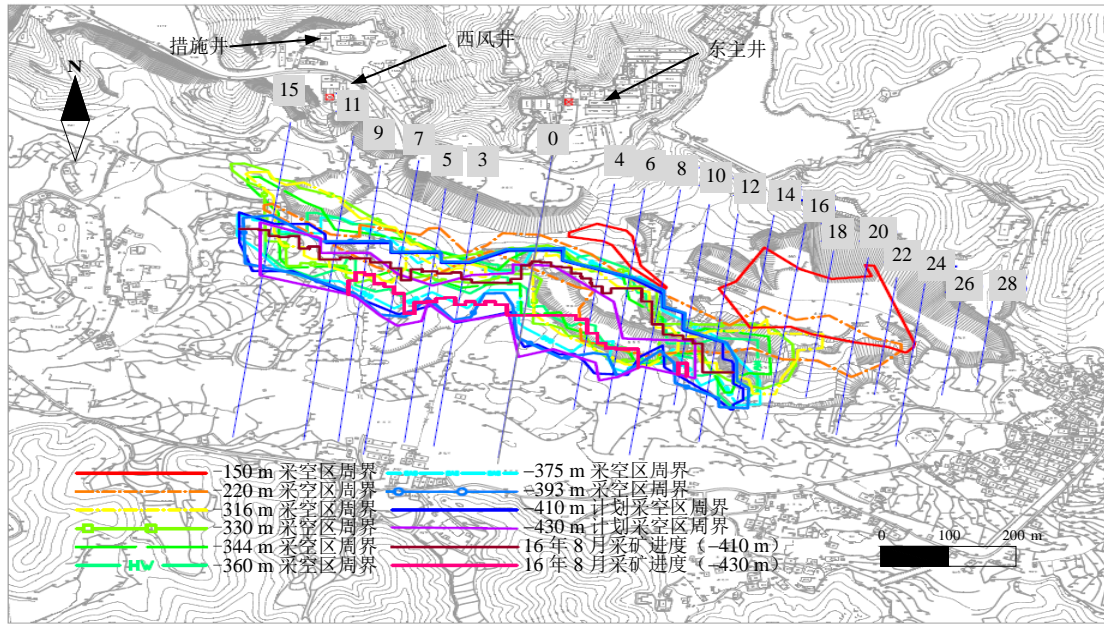


图2 东区开采情况平面图
Fig.2 Mining plan of ore body in the east area

矿区南部上盘岩体离矿脉从近至远依次为闪长岩、角岩，北部下盘岩体为花岗岩，闪长岩与花岗岩均有宽 100 余米的蚀变带。矿脉顶部至地表出露的岩体为大理岩。在东区主要发育 4 组结构面，分别为 NE 向、NNW 向、NWW 向、NEE 向。其中 NE 向节理最为发育，NNW 向节理、NWW 向节理次之，NEE 向节理最不发育，其中 NE 向节理与 NNW 向节理呈共轭关系。结构面的情况见表 2。

表 2 结构面统计分析情况
Table 2 Statistics of discontinuities in eastern rock masses

结构面分组	结构面产状	结构面密度 / m	结构面性质
NE 向	129° ∠86°	10	压剪
NNW 向	260° ∠77°	3~8	压剪
NWW 向	200° ∠85°	3~5	压剪
NEE 向	168° ∠80°	0.1~1	压剪

根据地应力实测资料表明：在 -410 m 处，最大主应力方位角为 N87° W，实测水平应力与垂直应力比值为 1.4:1.0；最小主应力基本垂直矿体，与垂直应力比值为 0.48:1.0。主应力分布见图 3。

矿区主要含水岩体大理岩位于花岗岩和闪长岩之间，平面呈条带状展布，走向 NWW，倾向 SSW，形成了以大理岩为主体及大理岩、花岗岩、闪长岩和铁矿体接触破碎带共同组成四周封闭的裂隙岩溶综合含水构造带。含水构造带最深可达 -500 m 高程，在 -150 ~ 0 m 的标高范围内为大理岩强含水

带，这里溶蚀现象发育，常有岩溶和土洞分布。因含水带为封闭型，地下水主要以大气降水垂直补给为主，与地表水体无水力联系，故地下水的补、径、排均欠佳。但地下开采后，人为的疏干排水活动改变了地下水原有补、径、排的平衡关系，这使得大理岩的溶蚀现象更为发育。工程地质情况详见图 4、5。

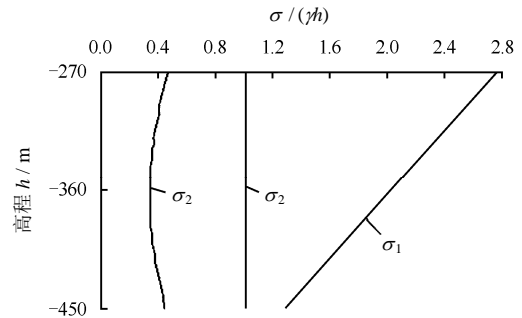


图3 程潮铁矿主应力分布示意图^[9]
Fig.3 Sketch of the principal stress in Chengchao Iron Mine^[9]

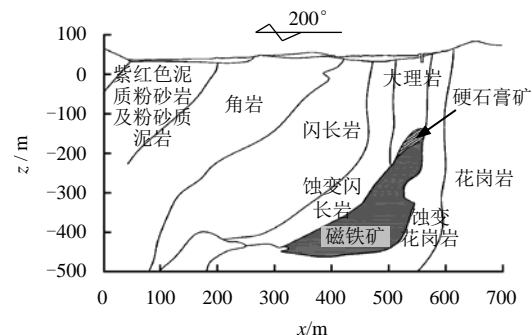


图4 典型地质剖面图
Fig.4 Typical geology section

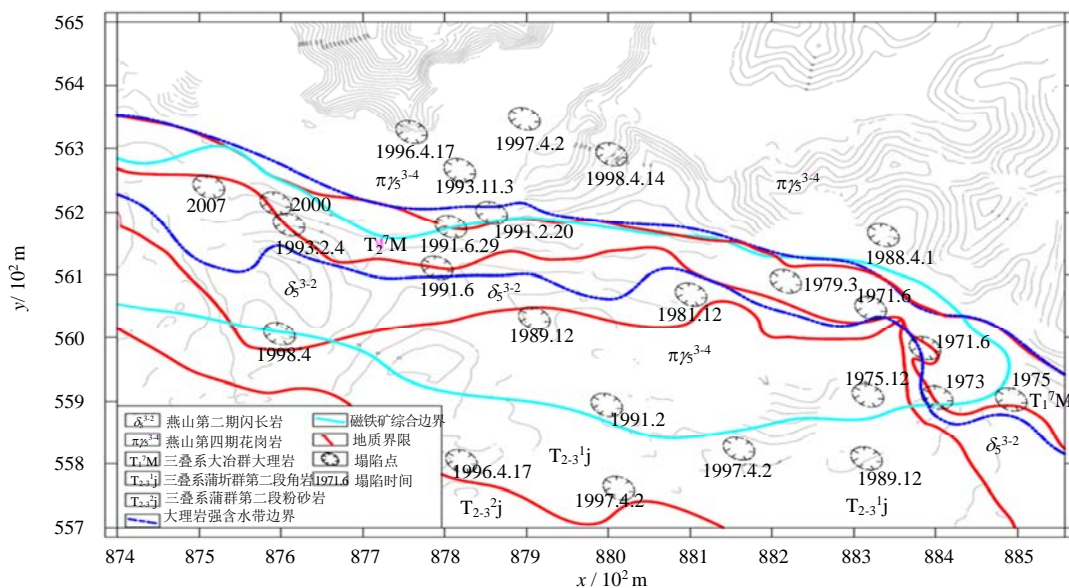


图 5 程潮铁矿东区工程地质平面图

Fig.5 Geological plan of the east area of Chengchao Iron Mine

3 东区地表塌陷情况

东区地表塌陷在整个矿区中产生的时间最早，发展最为广泛。塌陷自东向西呈串珠状展布，形成了一个东西长 1 200 m、南北宽度超过 800 m 的塌陷坑群。自 I 号矿体 1970 年开采以来，1971 年便在其 22 号勘探线地表处出现塌陷。随着地下采矿向西推进塌陷范围也不断向西发展，同时南北方向上也不断延伸。20 世纪 80 年代年初，随着 II 号矿体的持续开采，塌陷范围急剧向西延伸到 12 号勘探线，其中西南方向延伸最快，东侧无变化。此时塌陷东西长为 400 m，南北宽约 400 m。20 世纪 90 年代初，

塌陷继续快速向西发展至 0 号勘探线，其他方向基本没有变化。此时塌陷的范围东西长约 800 m，南北宽约 500 m。1996 年塌陷范围向北扩展到东主井区域，造成了东主井的弃用，此后继续向北扩展。2000 年，塌陷快速向西扩展到了 11 号勘探线。2007 年 6 月在西风米处出现了一条塌陷面，错动深度达 30 余厘米。东主井的塌陷边界也由 1998 年的东主井北缘向北推进约 75 m。此时整个塌陷群已达到了东西长约 1 200 m、南北宽度超过 800 m 的范围。塌陷的发展呈现向西拓展、南北同时延伸的总趋势。图 6 展示了塌陷范围随时间的扩展情况。

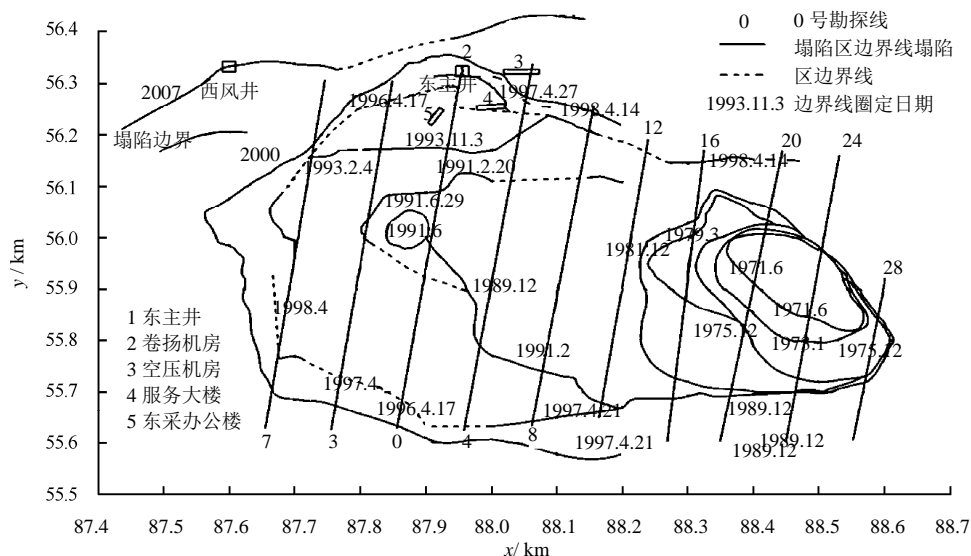


图 6 东区不同时期地面塌陷情况^[11]

Fig.6 Ground caving-in of east area at different periods^[11]

4 基于三维激光扫描的塌陷现状分析

在矿区塌陷坑分布众多,考虑到测量人员的人身安全,应用传统监测手段并不可行。因此,为了更好地研究塌陷及塌坑的分布和沉降情况,在本研究区内采用了三维激光扫描技术对塌坑进行监测(见图7)。



图7 莱卡三维激光扫描仪 HDS8800
Fig.7 Leica HDS8800

4.1 三维激光扫描技术简介

三维激光扫描技术自20世纪90年代产生以来,因其高精度快速测量地形地物的特点发展迅速,应用广泛。它可以完整地构建近乎真实的实体模型。目前广泛应用于文物修复、工业设计、美术、建筑、测绘、地质灾害监测与预警等与国民经济发展息息相关的行业中。因此,将这一先进技术引入程潮矿区地面塌陷监测工作中是十分具有意义的。

4.2 三维激光扫描原理

三维激光扫描技术的工作原理是基于激光脉冲测距原理发展而来,以扫描仪位置为坐标系原点,通过发送激光反射回来的时间间隔、扫描过程中仪器上下左右的旋转范围来获取距离 D 、水平方向角 d 、垂直方向角 α ,最后通过点云数据的形式来反应目标实体的三维表面几何形状,如图8所示。再根据下式计算出目标实体几何表面上某一点在此坐标系中的空间几何位置

$$\left. \begin{aligned} X &= D \cos \theta \sin \alpha \\ Y &= D \cos \theta \cos \alpha \\ Z &= D \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: X 、 Y 、 Z 为目标实体表面某点的三维坐标值。

4.3 三维激光扫描过程及数据处理

由于三维激光扫描设备分为机载、车载、手持等3类,手持型设备因携带简便而广泛应用,故这里主要介绍手持型设备的扫描过程及数据处理流程。

(1) 扫描

根据地形复杂程度、目标大小、范围等因素,

选好测站点及数目,架好仪器,选择扫描范围后开始扫描。

(2) 编辑

将扫描得到的点云数据导入处理软件中,对点云去噪声、删除与建模无关的点云。

(3) 配准和拼接

输入不同测站点坐标和与之相适应的定向点坐标,将点云数据转换到相应的大地坐标系中。

(4) 建模

根据处理好的点云数据生成与地形相适应的三维地表模型。

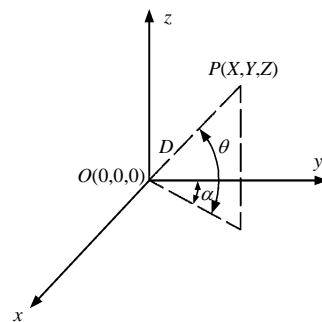


图8 三维激光扫描原理示意图
Fig.8 Principle diagram of the 3D laser scanning technology

4.4 塌陷现状分析

通过 studio 软件对数据处理得到了东区塌陷的分布情况见图9、10。再将 studio 软件生成的高程模型与2007年东区地形图高程相减,得到累计沉降值后,经 surfer 插值生成累计沉降值盆地和绘制出累计沉降等值线见图11、12。结合三维激光技术扫描监测成果,绘制了1(东西向)、2(南北向)剖面自2007年以来的累计沉降值变化见图13、14。

(1)通过图9、10可以得知,东区塌坑分布范围很广,总体沿着矿体的走向自东向西呈带状分布,塌坑形状多为不规整漏斗状,越往西则塌坑数目越多,直径越大,深度越深。塌坑在南北方向上往往表现出并排分布的特点,在东西方向上则呈现串珠状的分布。有些邻近的塌坑已经连接成片,形成一些大的塌坑群落。若若干个大塌坑群不断塌陷向着更大的塌坑群发展。

(2)通过图10得知,在塌坑群里,地形地貌十分复杂,总体呈现类似冰川地貌的特点。大塌坑里套着若干个小塌坑,由于地下采矿各采准巷道向北推进进度不一,导致这些小塌坑塌陷的深度也不一,进而在小塌坑互相交接处形成了类似角峰的特殊地形。在东西方向上,由于目前采用先中间后两侧的

采矿推进方式，使得东西向上若干个大塌坑群不断向中心塌陷，塌陷的深度从中间向两侧呈阶梯式递减，在若干个塌坑群的交接处自东向西平行地形成了刃脊一样的类似地形。

(3)东区的沉降情况十分普遍，从沉降值来看，呈现西大于东、北多于南的特点，从沉降区域分布来看，呈现西部和北部的范围多于南部和东部的现象，从沉降中心集中范围来看，则多集中分布在矿体采空区上方。矿体南部的沉降值多为 -10 m，石家湾、昌家村、涂家村基本未出现沉降。北部沉降剧烈，沉降多大于 2 m 以上，拦洪坝区域已处于 -2 ~ -1 m 的沉降范围内。东部沉降深度最多达到 12 m 以上，西部沉降深度普遍在 10 m 乃至数十米以上。沉降的范围总体呈现沿矿体自东向西的宽条带状分布特征。自东向西沉降范围不断扩大并向南北方向扩展，其中在南北方向上向北要比向南扩展的范围要大得多。在东区存在多个塌坑群，与之相适应的也出现了多个沉降中心群。沉降中心群自东向西分布，主要有 3 个，分别为东、中、西部沉降中心群。东部沉降中心群只有一个沉降漏斗，沉降深度达到 12 m 以上。该区域的所属程潮的 I、II 号矿体早在 2002 年以前采完，现为民采点。中部沉降中心群是东区塌陷最为严重的区域。该区域直接位于现采空区上方，是东区目前采矿活动的主要所在地。该沉降群存在多个沉降漏斗，大漏斗里套着若干个小漏斗，小漏斗呈现并排分布特点。这种特殊的沉降漏斗现象是由于各采矿巷道推进的进度、推进的方向以及各采矿水平存在不同范围采空区所叠

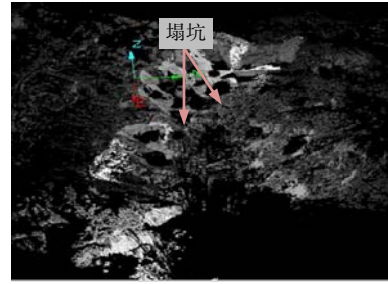


图 9 东区地面塌陷点云图

Fig.9 Point cloud image of ground caving-in in the east

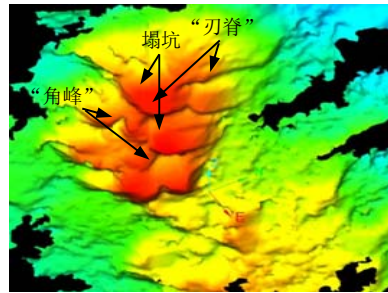


图 10 东区地表三维模型

Fig.10 The 3D model of eastern surface

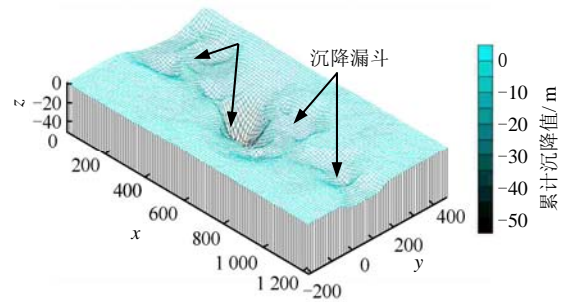


图 11 累计沉降值盆地 (单位: m)

Fig.11 Accumulated subsidence basin (unit: m)

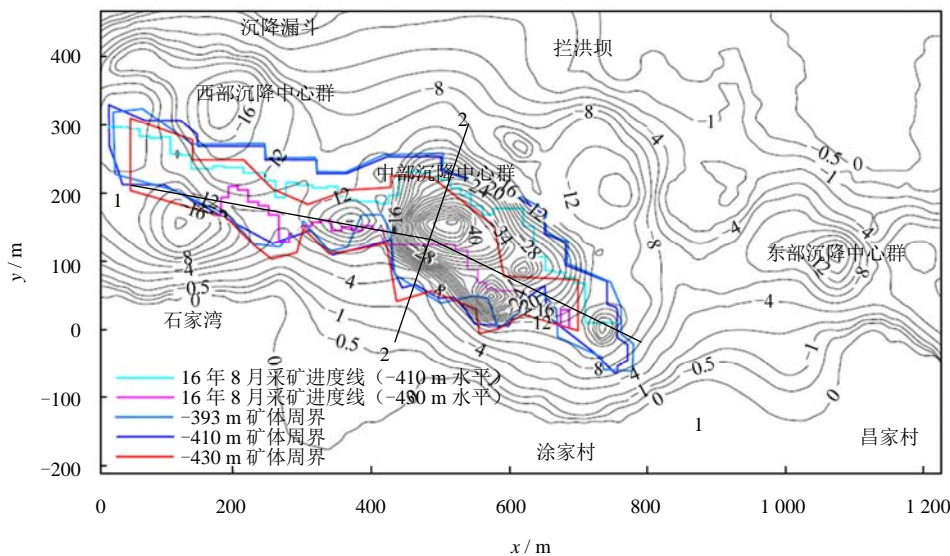


图 12 东区累计沉降等值线图 (单位: m)

Fig.12 Cumulative settlement contour map in the east (unit: m)

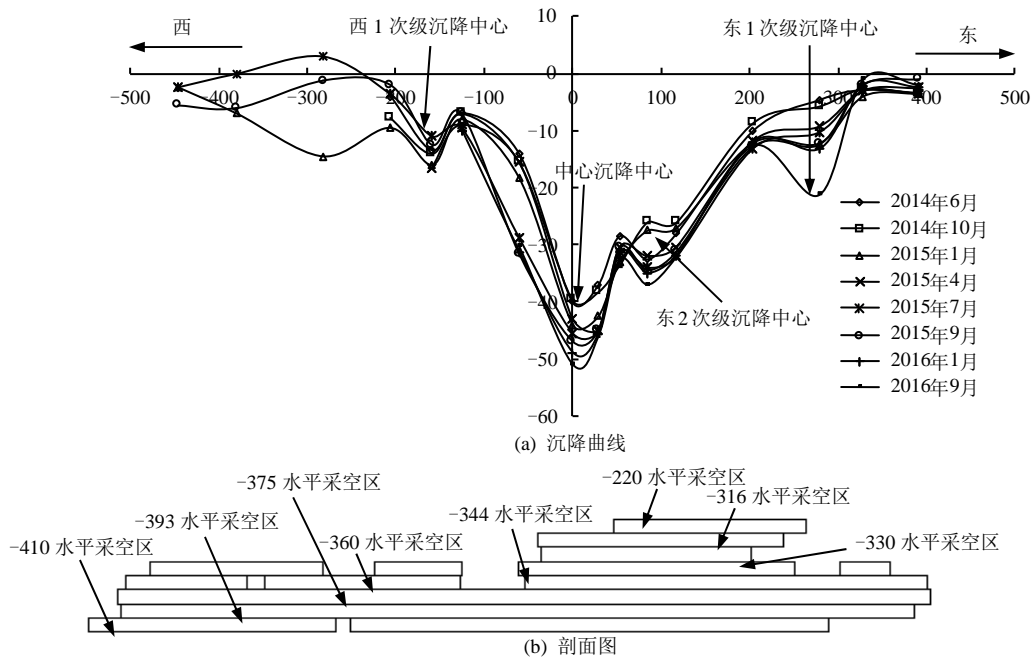


图 13 东西向剖面累计沉降曲线 (单位:m)
 Fig.13 Cumulative settlement curve of the East-West profile (unit: m)

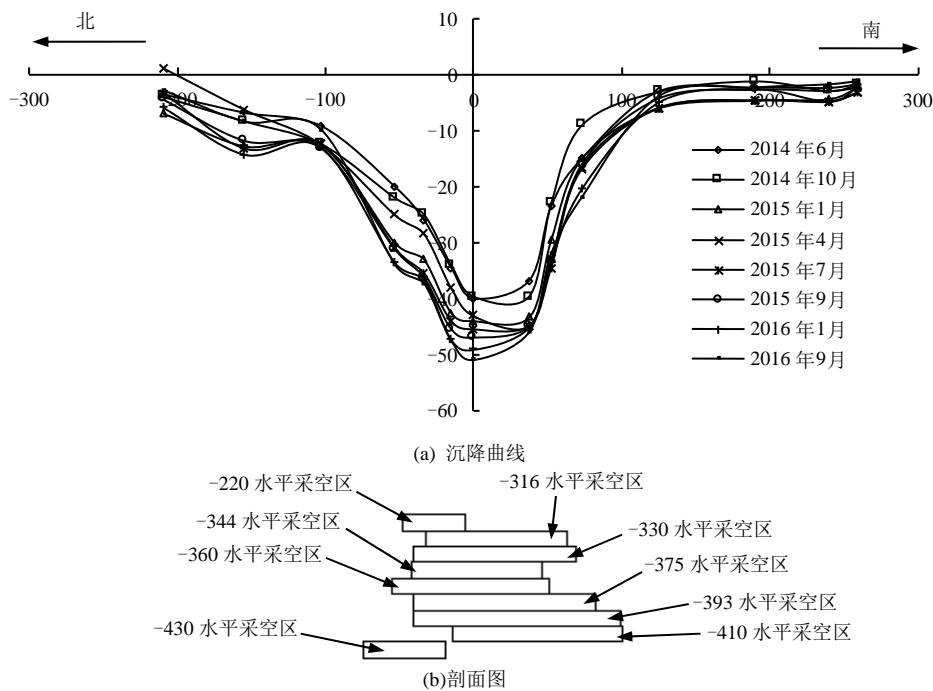


图 14 南北向剖面累计沉降曲线 (单位: m)
 Fig.14 Cumulative settlement curve of North-South profile (unit: m)

加形成的。西部沉降中心群主要存在南北并排的两个沉降漏斗，沉降的深度基本一致。该处的矿体宽度较窄，并且受西区采矿影响较大，当采矿方向从南至北推进时导致地表分段塌陷形成并排的沉降漏斗。

(4)图 13 反映了采空区东西向的累计沉降值曲线变化图。由图可以看出，东西向沉降曲线在中心 - 100 ~ 200 m 处范围内最陡，再往外急剧变缓至近

水平状。东侧的沉降曲线要比西侧平缓。沉降曲线从中心至两侧出现了若干个次一级的沉降中心。东侧次一级沉降中心要比西侧多，并且东 1 次级沉降中心沉降曲线在 2014 年主要呈现水平阶梯状下沉，2015 年至今呈漏斗状下沉。东 2 次级沉降中心在 2014 - 2015 年呈现水平阶梯状下沉，2016 年至今呈漏斗状下沉。中心沉降中心和西 1 次级沉降中心则一直为漏斗状下沉，中心最大沉降深度达 50 余米。

造成此种现象是由于这些区域不同时期存在不同进度的采矿活动所致。图 14 反映了采空区南北向的累计沉降值曲线变化图。中心沉降呈现平坦盆地状的沉降曲线，北侧则出现了斜率相对较缓的阶梯状下沉沉降曲线，南侧沉降曲线从 50 m 处的陡倾状直到 100 m 处开始变为平缓状。南北两侧沉降曲线呈现一缓一陡的原因主要是这里发育一组 NE 向节理。北侧为顺倾结构面，使得岩体破坏可以沿结构面向北发展，导致沉降曲线呈现较缓的阶梯状。南侧为反倾结构面，这起到了限制岩体破坏向南侧发展，使得岩体只能向采空区倾倒，导致南侧沉降曲线陡倾。

5 采矿区塌陷机制及扩展机制

由于东区采矿一直采用无底柱崩落法，故必然要产生地表塌陷。地表塌陷的演化历史分为塌陷坑的形成和扩展。塌陷坑的形成与东区的独特地质条件有关，而塌陷坑由点到群、由群到片的扩展则与岩体的节理发育情况及应力释放密切相关。

5.1 塌坑的形成机制

通过调查统计及前述塌陷现状的分析，东区地表首次塌陷大多数分布在大理岩及大理岩与闪长岩、花岗岩的围岩蚀变带（大理岩与闪长岩、花岗岩岩性接触带）区域，且这一区域沉降最严重，基本沿着大理岩及围岩蚀变带呈条状分布。少数塌陷则无规律分布在未蚀变的闪长岩和花岗岩中。热液型铁矿的地面塌陷往往会出现这样的现象。这种奇特的塌陷现象与东区的独特地质条件是密不可分的。

(1) 独特的水文地质条件。东区的岩溶较为发育，大理岩最深可达 -500 m，在 0 ~ -150 m 标高内大理岩溶蚀现象发育，岩体破碎，常常发育土洞、溶洞等岩溶地貌，溶洞最大高度可达 7.83 m^[12]。该层为东区的强含水带，由闪长岩、花岗岩、大理岩和矿体破碎接触带包围形而成。地下采矿的强疏水活动将加剧大理岩的溶蚀，使大理岩成为不稳定的岩体。

(2) 多组节理面的影响。由于东区构造运动的多期性，节理发育众多、延伸长。多组节理纵横交错、互相切割，将围岩切割成楔形、菱形、方形等不规则块体，十分易于损伤和破坏。这种破碎的状况在围岩接触带更加明显。

(3) 围岩蚀变带的存在。程超铁矿系由热液交代作用成矿，故一定会形成一定厚度的围岩蚀变带。蚀变带主要是大理岩及与大理岩接触的蚀变闪长岩

和蚀变花岗岩。蚀变带是不同岩性的过渡带，岩体破碎，岩体质量差，抗压强度低，根据表 3 可知，蚀变闪长岩和蚀变花岗岩的岩矿抗压强度分别为 56、68 MPa，这远低于未蚀变的闪长岩和花岗岩的岩矿抗压强度，再考虑到岩体大量结构面的存在，岩体的强度将远小于岩块的强度。因此，围岩蚀变带是一个地质弱带，当地下采矿推进到这里时，往往出现围岩失稳的情况。

表 3 岩矿抗压强度点荷载试验计算值^[13](单位: MPa)
Table 3 Calculation of compressive strength from rock point load tests^[13](unit: MPa)

花岗岩	蚀变花岗岩	闪长岩	蚀变闪长岩	大理岩	硬石膏
128	68	171~151	56	84~94	67

(4) 较高的水平构造应力。多期的构造运动使得深部岩体聚集了较高的水平构造应力，在 -290 m 处最大主应力可达 18.63 MPa。当采用崩落法开采时，由于岩体的卸载及短时间释放了较高的构造应力，使得岩体被折断、破碎、充满裂隙。在水平构造应力下，冒落区的破碎岩体会出现压力拱效应，这暂时有利于冒落区的自稳。但在这种较高的水平构造应力会加大地表变形，并且随着采矿不断向前推进、压力拱的跨度超出安全长度时，压力拱效应就会失效，岩体破碎的区域就会急剧扩大，水平构造应力出现二次释放。这进一步加剧了围岩的失稳，使得进路冒顶、跨落现象严重。

(5) 独特的岩体及矿体空间组合关系。铁矿体呈现上陡下缓、上薄下厚、上小下大的特点，并且硬石膏矿体与铁矿体相互穿插，形成一个硬中有软、软中有硬的组合关系。大理岩及围岩蚀变带直接位于铁矿体上方，这种特殊的位置为冒落提供了易于产生和发展的入口。

(6) 结合前述的几点因素，东区塌陷的形成机制可以这样解释，如图 15 所示。当地下采矿在 2 号矿体进行时，随着放矿的进行及深部岩体构造应力的释放，围岩产生许多采动裂隙，原有地质弱面（节理面和围岩蚀变带）进一步扩展、张开，这使得围岩更加破碎。由于破碎岩体的自锁效应及较大构造水平应力的影响，破碎的围岩会在顶板上部形成一个松散岩体压力拱，这个压力拱可以使破碎岩体产生自稳效应并且维持一定的安全周期。当采矿不断向前推进、回采深度不断加大，采场的跨度和高度超出了压力拱所能支撑的范围时，顶板上部破碎岩体便会崩落下来，并且首先向着矿体上方围岩

蚀变带中的大理岩冒落。在冒落的过程中，因强排水而溶蚀加剧的大理岩进一步跨落、崩塌，这使得冒落的空间不断加大，这为大理岩周围的蚀变岩浆岩体的失稳提供了有利的临空面。当采矿范围不断加大，冒落也不断向蚀变岩浆岩（主要是蚀变的闪长岩、花岗岩）发展。蚀变岩浆岩在构造应力作用下向冒落区失稳，进一步破碎、崩落。当这种冒落现象一旦发展到地表，崩落岩体的膨胀体积不足以弥补空区的体积时，就会在地质弱面的地表出露附近（如围岩蚀变带）产生突然陷落，形成塌坑（见图 16）。这些塌坑往往形状、大小各异。当向角度较缓、厚度较厚的 3 号矿体开采时，除产生在上述类型的塌坑外，在闪长岩区域则产生筒状陷落（见

图 17）。这种筒状陷落多为缓慢进行的，形成近圆形的深漏斗状塌坑。程潮东区地面塌陷的形成是由多种因素决定的，其中独特的地质条件是内因，地下采矿活动则是诱因。在地面的塌陷过程中，内、外因共同作用导致了这种塌坑形成机制和分布规律。

5.2 塌陷的力学扩展机制

地面塌坑形成后必然经历一个扩展的过程，通过这个过程，在塌坑周围形成一个沉降量很大的沉降区，本文称之为扩展区。正是通过这个扩展区将单个塌坑逐渐连成片，再形成整个塌坑群，进而向采空区外侧扩展。为了更好地研究塌陷的扩展过程，建立了相应的地质力学模型见图 18。

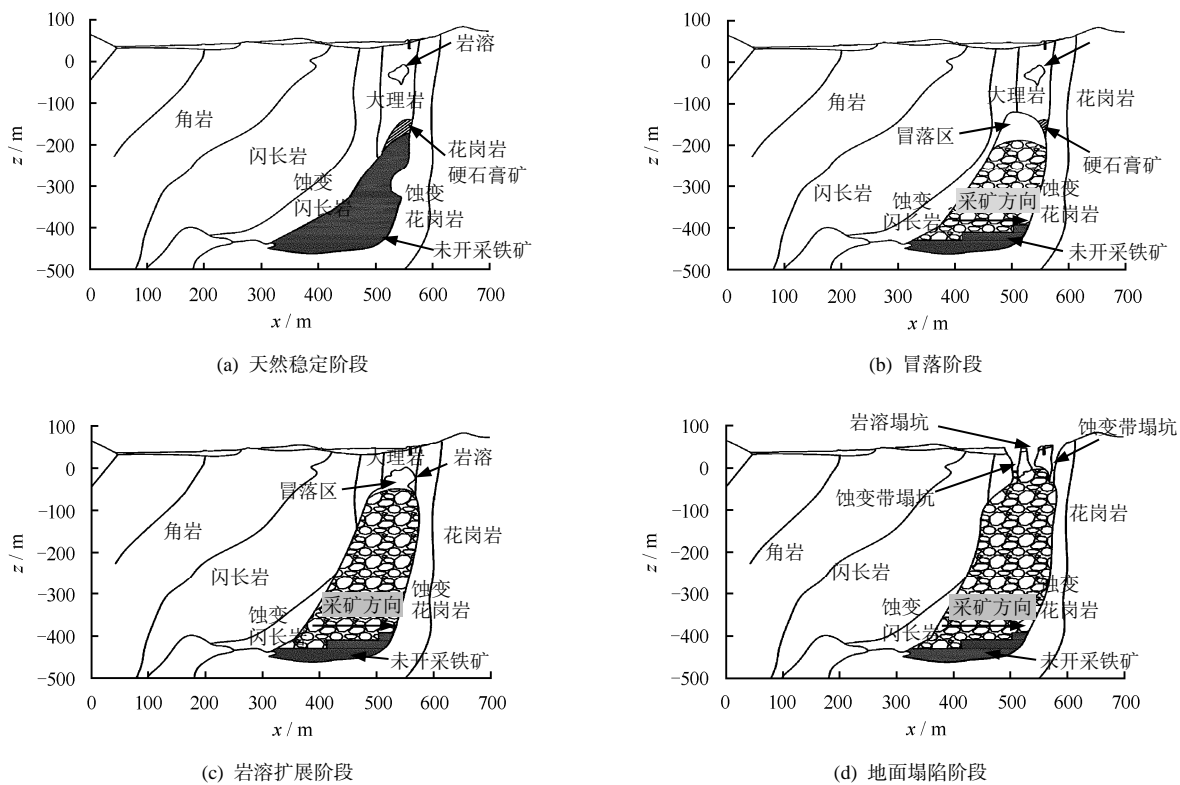


图 15 东区地面塌陷形成示意图

Fig.15 Schematic of the formation of ground caving-in in the east



图 16 围岩蚀变带区域中的塌坑
Fig.16 Collapse crater in the surrounding



图 17 闪长岩区域中的筒状陷落

Fig.17 Tubular collapse in the diorite zone

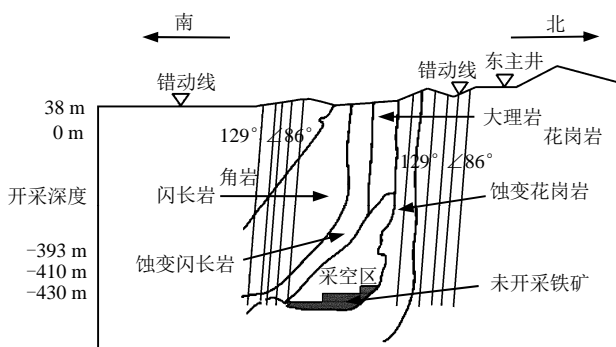


图 18 地质力学模型

Fig.18 Geomechanical model

由于 NE 向节理的存在，将围岩切割成如图悬臂梁板的结构，则最靠近采空区的第 1 个顺倾悬臂梁板力学模型如图 19 所示。Aydan 等^[14]的研究认为，层状边坡岩体的弯曲倾倒破坏是由于岩体的抗拉强度抵抗不了最大弯曲应力而产生拉裂缝导致的。他提出了该类问题的极限平衡法。此后，Adhikary 等^[15]进行了改进。为了清楚地分析围岩破坏的形式，结合本研究区的实际情况，在 Aydan 和 Adhikary 的模型基础上做了些改正，如下几点所示：

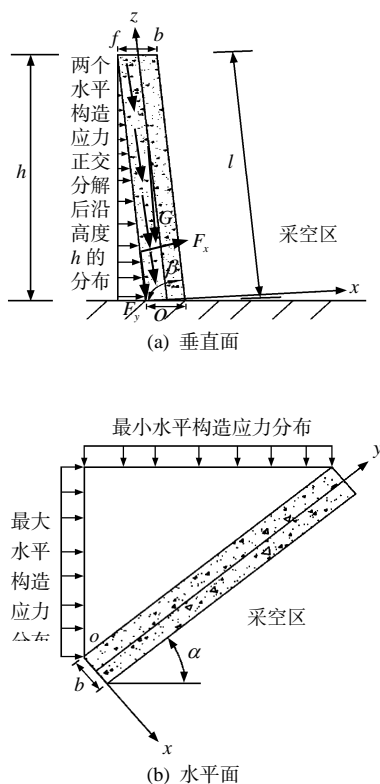


图 19 悬臂梁板力学模型

Fig.19 Mechanical model of the cantilever beam-plate

(1) 无论是在 Aydan 和 Adhikary 的模型中，悬臂梁板都只受一个方向的正应力，未考虑到两个方向的正应力作用。而在本研究区内，围岩的水平构造应力的卸荷是在两个水平方向上发生的。所以悬臂梁板会受到两个水平方向的水平构造应力。在本文的力学模型中采用力的正交分解方法将两个水平方向的构造应力分解到与悬臂梁板垂直的水平方向上，再合成此方向上的正应力。

(2) 在 Adhikary 等^[16-17]的改进模型中，通过试验得出岩层折断面与岩层法向夹角 θ 范围为 $12^\circ \sim 20^\circ$ ，并且认为折断面为一斜面。但这是基于反倾岩层试验中的结果，在实际情况中，特别是在顺倾岩层中往往并不是这样的。而且根据郑允等^[18]的研究结果反倾岩层的折断面是一折线面，借鉴夏开宗等^[19]的做法，在本研究区内，将折断角 θ 定义为折断面与水平面的夹角，再结合悬臂梁板顶部位移测点水平位移和垂直位移来确定 θ 角的取值，这是比较符合实际的，见表 4。

表 4 典型位移测点 θ 角值
Table 4 The value θ of typical displacement measuring points

测点	θ 值 / ($^\circ$)	测点	θ 值 / ($^\circ$)
DE05	31.6	XE11	34.9
DC03	34.0	DA53	35.4
C07	33.6	θ 均值	33.9

通过受力分析，有以下公式：

自重 G 在 x 、 z 方向上的分力为

$$\left. \begin{aligned} G_z &= \gamma l b \sin \beta \\ G_x &= \gamma l b \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

水平构造应力在 x 、 z 方向上的分力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{hz} &= (k_1 \gamma h \sin \alpha + k_3 \gamma h \cos \alpha) \cos \beta \\ \sigma_{hx} &= (k_1 \gamma h \sin \alpha + k_3 \gamma h \cos \alpha) \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

摩擦力为

$$f = \mu \frac{1}{2} h \sigma_{hx} \quad (4)$$

在 x 方向上的合力为

$$F_x = G_x + \frac{1}{2} h \sigma_{hx} \quad (5)$$

在 y 方向上的合力为

$$F_z = - \left(G_z + \frac{1}{2} h \sigma_{hz} + f \right) \quad (6)$$

弯矩为

$$M_o = \frac{1}{2}lG_x + \frac{1}{6}hl\sigma_{hx} - \left(\frac{1}{4}hb\sigma_{hz} + \frac{1}{2}bf \right) \quad (7)$$

抗弯刚度为

$$W_x = \frac{b^2}{6} \quad (8)$$

最大拉应力为

$$\sigma_{max} = \frac{M_o}{W_x} + \frac{F_z}{A} \quad (9)$$

将式(2)~(8)代入式(9)中得出悬臂梁板破坏失稳判据为

$$\sigma_{max} - \sigma_t = \gamma l^2 \sin \beta^2 \left(\frac{l}{b^2} \sin \beta - \frac{2}{b} \cos \beta - \frac{2}{b} \sin \beta \tan \varphi \right) + (k_1 \sin \alpha + k_3 \cos \alpha) + \frac{3\gamma l^2 \cos \beta}{b} - \gamma l \sin \beta - \sigma_t = 0 \quad (10)$$

式中： l 为岩层的长度； b 为岩层宽度； h 为岩层高度； A 为岩层横截面面积； α 为最大水平构造应力与岩层的水平夹角； β 为岩层的倾角； φ 为节理面摩擦角； γ 为岩层材料重度； k_1 为最大水平构造应力侧压系数； k_3 为最小水平构造应力侧压系数； σ_t 为岩层材料的抗拉强度； $\mu = \tan \varphi$ ，为岩层间滑动摩擦系数。

取 $k_1 = 1.4$ ， $k_3 = 0.48$ ， $\alpha = 60^\circ$ ， $\beta = 86^\circ$ ， $\varphi = 60^\circ$ ，下盘花岗岩抗拉强度 $\sigma_t = 3 \text{ MPa}$ ，重度 $\gamma = 2.6 \text{ kN/m}^3$ ，代入式(10)中后，可以得到含有 l 与 b 的一个三次方程式。将三次方程式代入 matlab 进行解算，可以绘制出 l - b 的关系曲线图(见图 20)。

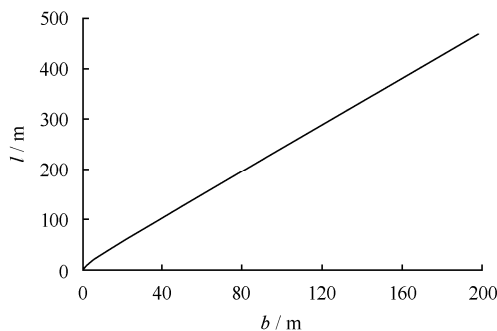


图 20 悬臂梁板失稳长度 l 与悬臂梁板宽度 b 关系曲线
Fig.20 The relationship between the instability length l of cantilever beam-plate and the width b of the cantilever beam-plate

由图可以看出，当开采到 -410 m 水平时，要使 410 m 长的悬臂梁板不发生折断，则 NE 向节理切割的悬臂梁板厚度要达到 172 m。事实上，NE 向

节理实测密度达到 10 条/m。因此，可以认为，至少在距离采空区或塌坑 172 m 的范围内，岩体产生了折断，发生了倾倒滑移变形，将这个范围称为塌陷坑的扩展区。根据实际情况调查，该区域已扩展到东主井以南的矿区公路处，地表已经发生很大的沉陷，出现多条错动裂缝台阶，每个台阶高数十厘米，累计错动距离可达数米以上。该区域虽然未有塌坑存在，但整体沉陷严重，已属于整个塌陷盆地，是塌陷盆地的边缘部分。所以塌坑的力学扩展机制可这样解释。较高的水平构造应力将由节理切割而成的悬臂梁板折断，使单个悬臂梁板发生倾倒。悬臂梁板反生倾倒后整体沿着折断面向采空区滑移。随着采矿不断的进行，构造应力不断释放，悬臂梁板的倾倒滑移破坏不断加剧，导致在折断范围内的地表产生许多拉张裂缝。这些拉张裂缝往往是易于产生沉陷的地带。在后期的采矿活动中，折断的岩体将沿着弯曲折断面继续向采空区失稳，地表则沿着拉张裂缝不断向采空区沉陷。悬臂梁的倾倒滑移破坏是由采空区依次向外产生，则地表沉陷也是依次向外发展并产生若干个沉陷错动台阶(见图 21)。只要地下采矿继续向深部进行，这种地表沉陷就不断向外扩展，最终将塌陷坑的范围不断扩大，使得塌陷坑由点到群，由群成片，形成一个大的塌陷盆地。



图 21 沉陷错动台阶
Fig.21 Subsidence faulting step

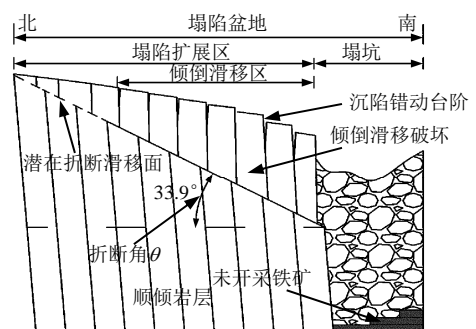


图 22 塌陷扩展过程示意图

Fig.22 Schematic of ground caving-in expansion process

采空区北部地面塌陷范围巨大且沉降剧烈，这是因为 NE 向节理切割的岩体在北部为顺倾。由于顺倾岩体弯曲折断面为直线型，影响的地表范围较远，岩体沿着折断面滑动、错动，地表沉降的范围远超过岩体折断的范围。根据夏开宗等^[20-21]在程潮铁矿西区的研究也表明，矿区北部的地表变形无论从变形的范围还是变形的程度都是十分严重的。东区毗邻西区，有着类似的工程背景，因此，东区采空区北部地面塌陷十分严重的情况是符合实际工程背景的。

6 结 论

(1) 东区地面塌陷自东向西沿矿体总体呈条带状分布，最初塌陷点出现在大理岩及附近围岩蚀变带处，具体表现为南北向呈并排状分布、东西向呈串珠状分布。

(2) 塌陷区内地形地貌十分复杂，总体呈现冰川地貌的特点，可见类似“角峰”、“刃脊”的冰川地貌。

(3) 东区沉降情况十分普遍，最大沉降可达 52 m，沉降值呈现西大于东、北多于南的特点，沉降范围表现为西部和北部比东部和南部更广的分布情况。自东向西分布多个沉降中心群，南北并排分布多个沉降漏斗。

(4) 在东区，采矿活动是导致地面塌陷的直接原因，而以较高的水平构造应力、丰富发育的节理结构面、存在溶蚀现象发育等独特的地质条件则是内因。外因通过内因起作用，两者共同作用导致了地面塌陷在大理岩及附近围岩蚀变带呈带状出现。

(5) 地面出现塌陷后，水平构造应力释放，被 NW 向节理切割成悬臂梁板的岩体发生了折断。靠近采空区的岩体沿着折断面发生倾倒滑动破坏，这使得沉降塌陷的区域不断扩大，最终将塌坑由点到片、由片到群形成一个大的塌陷群落盆地。

(6) 由于东区采用无底柱崩落法进行开采，只要采矿活动一直持续，地面塌陷就会一直进行，塌陷的范围会越来越广，塌陷程度会越来越剧烈。采矿方向从南向北推进，且进度不一。从目前到未来很长一段时间内，采空区北部是地面塌陷的主要发展区域。

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] 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, 37(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, 37(Supp.1): 455—461.

[4] 王剑, 王永清, 何峰, 等. 程潮铁矿东区地表移动及东主井错动机制研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 1255—1260.

WANG Jian, WANG Yong-qing, HE Feng, et al. Research on rule of surface displacement and mechanism of disturbance in East-main-shaft in Chengchao Iron Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp): 1255—1260.

[5] XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, 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): 1089—1115.

[6] 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.

[7] 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 Chengchao Iron Mine[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(8): 1572—1578.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘泉声, 朱家桥. 程潮铁矿东区工程地质、水文地质研究及评价[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 1998.
- [13] 陈从新, 李炼. 程潮铁矿东区围岩物理力学性质试验研究报告[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 1998.
- [14] AYDAN O, KAWAMOTO T. The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilization[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1992, 25(3): 143—165.
- [15] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J. Modeling of flexural toppling failures of rock slopes[C]// Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics. Tokyo, Japan: [s. n.], 1995: 25—29.
- [16] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, 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.
- [17] ADHIKARY D P, DYSKIN A V. Modeling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2007, 40(4): 349—362.
- [18] 郑允, 陈从新, 刘秀敏, 等. 层状反倾边坡弯曲倾倒破坏计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 4252—4261.
- ZHENG Yun, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Investigation on calculation method of layered counter-tilt slope for flexural toppling failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.2): 4252—4261.
- [19] XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Ground movement mechanism in tectonic stress metal mines with steep structure planes[J]. **Journal of Central South University**, 2017, to be press.
- [20] 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 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 Min[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1389—1406.
- [21] XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, FU Hua, et al. Mining-induced ground deformation in tectonic stress metal mines: A case study[J]. **Engineering Geology**, 2016, 210: 212—230.

上接第 2321 页

- [17] CUI X, BUSTIN A, BUSTIN R M. Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: Different approaches and their applications[J]. **Geofluids**, 2009, 9(3): 208—223.
- [18] 夏伟, 符文熹, 赵敏, 等. 多空隙组合地质单元渗流理论分析与试验[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3175—3183.
- XIA Wei, FU Wen-xi, ZHAO Min, et al. Theoretical analysis and experiment for the seepage of a combinational fractured-vuggy-porous geological media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(11): 3175—3183.
- [19] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. **Journal of Applied Physics**, 1941, 12(2): 155—164.
- [20] 黄书岭, 冯夏庭, 周辉, 等. 水压和应力耦合下脆性岩石蠕变与破坏时效机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3441—3451.
- HUANG Shu-ling, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Study of aging failure mechanics and triaxial compression creep experiments with water pressure coupled stress of brittle rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3441—3451.
- [21] Itasca consulting group, FLAC^{3D} (Version 3.0) user's manual[M]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.