

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S1.059

程潮铁矿东主井区地表变形特征和机制分析

邓洋洋, 陈从新, 夏开宗, 付 华, 张海娜

(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: 以地表变形监测成果为基础, 结合数值计算分析, 再现了程潮铁矿东主井区地表的变形过程, 分析得到了井区地表的变形特征和变形机制。研究表明, 当地下采空区和地表塌坑形成一定规模后, 在矿区不同方向水平构造应力的释放和挤压作用下, 被地质结构剖分为柱状结构的围岩向塌坑方向产生倾倒, 引起了井区地表变形; 地表变形主要以水平移动为主, 垂直位移很小, 但是随着柱状结构岩体不断倾斜, 地表垂直位移与水平位移的比值也不断增大, 并在地表形成漏斗形变形曲线。

关 键 词: 地表变形; 快速拉格朗日差分法; 地下开采; 变形监测

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0455 - 07

Analysis of deformation characteristics of surface around east main shaft in Chengchao iron mine

DENG Yang-yang, CHEN Cong-xin, XIA Kai-zong, FU-hua, ZHANG Hai-na

(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 results of ground deformation monitored and the numerical simulation, the process of ground deformation is investigated in East Main Shaft of Chengchao Iron Mine; and then the characteristics and mechanism of ground deformation are given. Research results show that: When the underground mined-out area and the collapse pit form a certain scale, under the release and squeezing of horizontal tectonic stress in different directions, the surrounding rock cut columnar structure cut by geological in structures the surrounding rock toppled to collapse pit, then caused the ground deformation in the surface. Ground deformation is mainly dominated by horizontal displacement, and the vertical displacement is very little. With the constantly tilt of columnar structure, the ratio of vertical displacement to horizontal displacement is constantly increasing, and the funnel-shaped deformation curve forms in the surface.

Keywords: surface deformation; fast Lagrangian analysis of continua(FLAC); underground mining; deformation monitoring

1 引 言

矿山地下开采无疑会引起地表相应区域的变形沉陷, 然而在许多大型矿山, 尤其是在大型金属矿山, 由于矿区存在着较大的构造应力, 地下开采引起的地表变形、塌陷范围严重超出了采矿初期的预测, 造成了矿区地表建(构)筑物“过早”地进入了移动或者沉陷范围^[1-4]。澳大利亚新南威尔士州 Tower Colliery 矿, 开采深度为 450 m, 影响范围距开采边界千米以外^[1]。武钢程潮铁矿西区从地下 300 m 深起采仅 3~4 个分段后, 地表就出现了大面积的变形、沉陷, 并在下盘超出了预测, 远方地表

主要发生了水平位移^[2-4]。鲁中小官庄铁矿地下开采引起了距开采边界 600 m 以外的主、副井井塔楼产生了较大变形^[5-6]。

针对矿山地下开采引起地表变形与岩层移动的“异常”规律及安全对策, 国内外专家已开展了大量的研究工作, 已取得了许多有价值的成果。夏开宗^[2-4]对程潮铁矿西区运输隧道过早地进入移动区、甚至陷落区的原因进行了分析, 认为是与矿区最大主应力方向、岩体结构面走向和采空区形态密切相关。李文秀等^[5-6]对小官庄铁矿主、副井井塔楼处于传统的“移动角”之外的原因进行了分析, 探讨了地表变形的影响因素。侯哲生等^[7]采用数值模

收稿日期: 2015-12-07

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、岩层移动机制及地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: dengyang_2014@sina.com

拟分析了金川二矿围岩及水平矿层在开采过程中的位移及变形特征。孟凡森等^[8]针对我国部分煤矿立井变形情况,介绍了立井破坏和变形两种类型的原因、预计方法、监测方法及治理方案。毕思文^[9]利用三维系统物理模拟试验对我国徐淮地区竖井变形破坏机制进行了研究,提出了地质体薄弱部位、负摩擦力和水平荷载综合作用的竖井变形破坏“三因素缩合破坏”观点。成枢^[10]研究了立井井筒在留设有防护煤柱时发生变形破坏的地点和形式,分析了引起破坏的原因,提出了防护立井破坏的可行措施。Bruneau等^[11-12]综合利用现场监测、数值模拟和理论分析等多种手段,系统地研究了澳大利亚昆士兰蒙特埃萨铜矿两断层对一竖井的影响。

矿山地下开采引起的地表变形范围超越预测,引起相关房屋、竖井等构筑物的开裂变形不仅影响其使用安全性,而且严重影响矿山的正常生产,并可能造成巨额经济损失,此类现象在国内外部金属矿山时有发生,然而针对地表变形范围过大的矿区地表变形特征及其变形机制的研究甚少,目前尚无形成可供参考的理论。本文以典型矿山程潮铁矿为例,以其东区下盘东主井区地表变形为切入点,基于变形监测与数值计算成果,就此问题开展了探索性研究。

2 工程概况

程潮铁矿是武钢的主要矿山生产基地,年产矿石 300 多万吨。矿体下盘围岩为花岗岩,上盘近矿体围岩为闪长岩,远离矿体岩体多为角岩。介于上、下盘围岩并从矿体顶部露出地表的是大理岩和角岩组成的变质岩带,如图 1 所示^[13]。岩层大致呈东西走向,倾向南偏西。

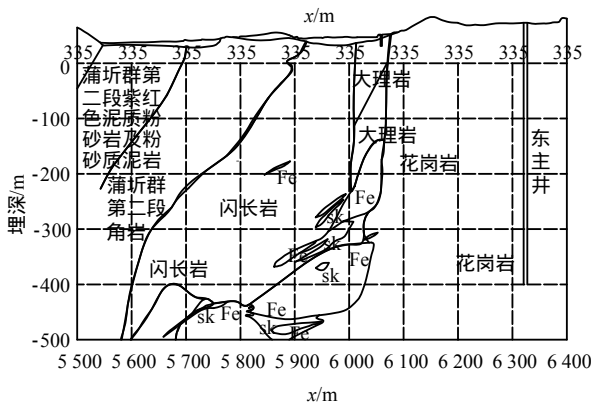


图 1 0#剖面地质图

Fig.1 Geological profile of section #0

矿区地形为低山丘陵地貌。矿区内构造较为复

杂,既有淮阳山字形构造,又有新华夏构造。断层构造是本矿区构造的主要表现形式。北西西向的淮阳山字型构造由线状褶皱、冲断层、挤压带等压性结构面组成,主干断层为北西西向的压性、压扭性断层,由北至南依次有程潮北断层、程潮南断层。新华夏构造叠加于山字型构造之上,主要由北北东向的压性、压扭性断裂组成,在矿体下盘的井区岩体中极为发育,以塔桥庙断层和破面脑挤压断层规模较大,断裂走向以 NNE 为主,倾向南东,倾角为 60°~80°。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。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,陡倾角,其中 NE 向节理最为发育,NWW 向节理次之。

矿区主要有 ~ 号 3 个矿体,系由交代大理岩变化的砂卡岩而成矿,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及附近。平面上沿北西西方向呈迭瓦状平行展布,纵剖面上向北西西方向侧伏,在横剖面上呈首尾交错部份重迭的迭瓦状排列,矿体多呈不规则透镜状向南缓倾斜,开采情况见表 1。

表 1 矿体开采情况

Table 1 Mining situation of ore body

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

井区岩体的地下水为花岗岩裂隙水,透水性由北向南、由深至浅逐渐增强,东主井区的岩体透水性要明显大于西风井区的岩体透水性。地下水的补给主要来源于大气降水和地表水体(拦洪坝水库)入渗。

矿区构造应力显著,矿区最大主应力方向为近东西方向,大小约是重力的 1.4~1.5 倍,近南北方向上的第二主应力约是重力的 1.0~1.1 倍。

3 监测和数值模拟分析成果

程潮铁矿东区东主井井筒 1996 年 4 月开始开裂,1998 年末停止用于采矿运输,之后地表开裂范围不断向北扩展,井筒及卷扬机房基础等开裂也日趋严重。为了分析程潮铁矿东主井区岩体的变形机

制, 探讨其继续使用的可行性, 了解井区地表随地下开采的变形过程和变形趋势十分重要。

以 2007 年 4 月程潮铁矿东区东主井井口水平位移 40 cm 为基础, 笔者等利用快速拉格朗日差分法程序 FLAC3D 进行了反分析计算, 不仅再现了东区下盘岩体随地下开采的变形过程, 而且预测了其在 2009 年 12 月前的变化趋势。图 2 为计算模型的网格划分示意图, 图 3 为计算得到的 2009 年 12 月地表水平位移等值线和沉降等值线图 (图中 DJ 标记为东主井), 图 4 为东主井井口位置地表变形与开采深度关系曲线。

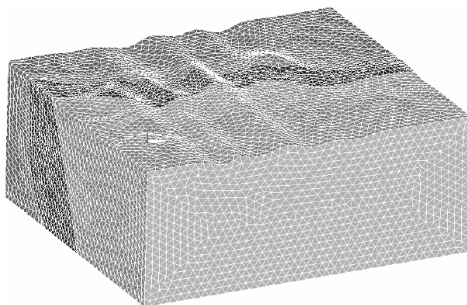
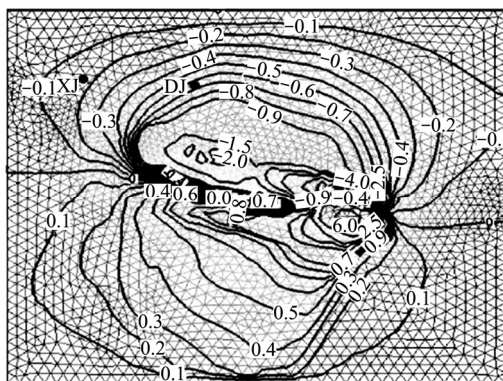
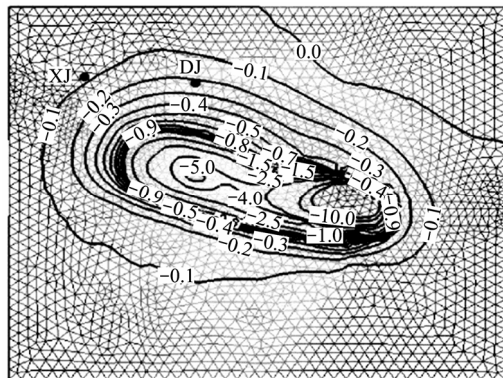


图 2 模型网格划分示意图

Fig.2 Grid generation results sketch of numerical model



(a) 地表水平位移等值线



(b) 地表垂直位移等值线

图 3 计算得到的 2009 年 12 月地表水平、垂直位移等值线 (单位: cm)

Fig.3 Vertical displacement field in December, 2009 obtained by numerical simulation(unit: cm)

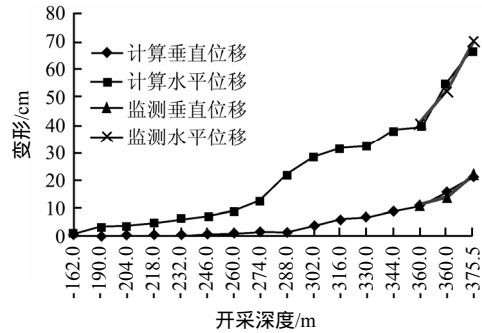


图 4 东主井井口地表变形与开采进度关系曲线

Fig.4 Relation curves of surface deformation of East main shaft and mining depth

在东主井井区岩体稳定性的研究期间以及后期为保障东主井在使用过程的安全性, 从 2007 年 4 月起对东区下盘地表变形进行了监测。地表水平位移采用 GPS 监测技术, 地表沉降采用水准仪和 GPS 两种监测技术, 通过监测有限掌握了东区下盘岩体的变形过程的第一手资料。图 5 为东主井区部分测点布置示意图, 图 6 为监测得到的 2008 年 12 月、2009 年 12 月地表沉降等值线图, 图 7 为同时期的地表水平位移矢量图, 图 8 为东主井井区典型测点 A39、C40、A20 (测点位置见图 6) 水平位移与垂直位移对比。

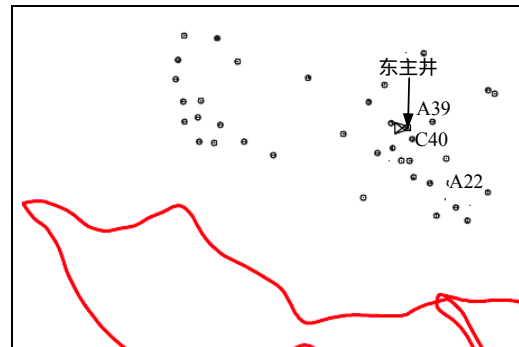
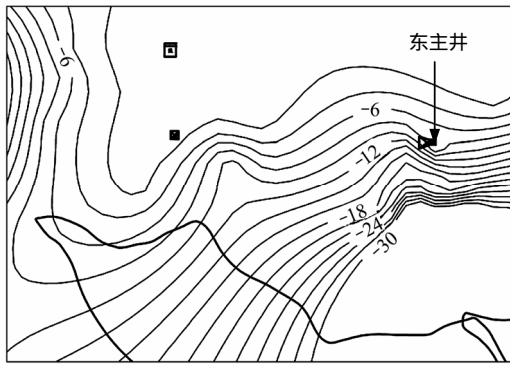


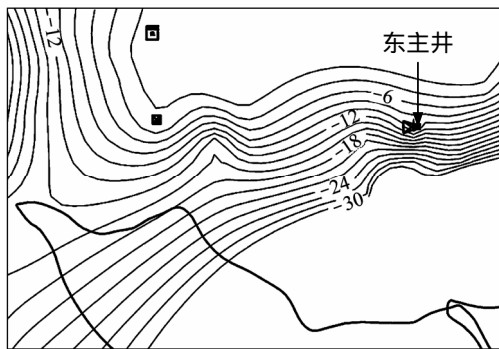
图 5 东主井区域部分测点布置示意图

Fig.5 Sketch of partial measuring points around East main shaft

对比程潮铁矿东区东主井井口 2007 年 4 月 ~ 2009 年 12 月期间变形的计算分析结果与监测结果 (见图 4) 可知, 东主井井口水平位移此期间由 40 cm 增加到 69.9 cm, 增加了 29.9 cm, 在反分析基础上计算得出东主井井口水平位移 2007 年 4 月为 39 cm, 2009 年 12 月为 68 cm (图中 -360 水平、-375 水平分别对应于 2007 年 4 月与 2009 年 12 月的开采进度), 增量为 29 cm, 误差为 0.9 cm; 东主井井口垂直位移在此期间增加了 11.5 cm, 计算得出东主井井口水平位移 2007 年 4 月为 11 cm, 2009 年 10 月为 22 cm, 增量为 11 m, 误差为 0.5 cm。由此可见,



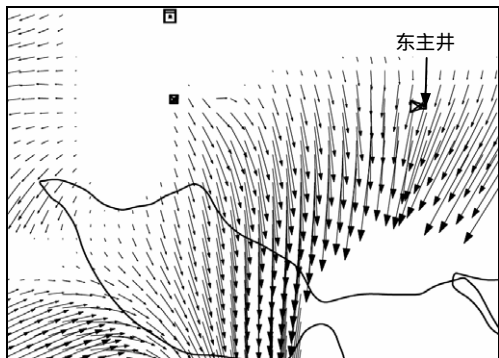
(a) 2008年12月



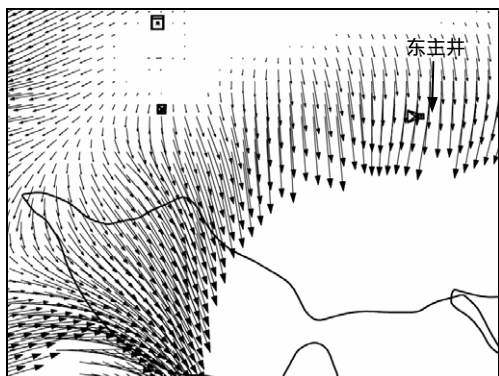
(b) 2009年12月

图6 监测得到的沉降等值线

Fig.6 Vertical displacement contours obtained by site monitoring



(a) 2008年12月



(b) 2009年12月

图7 监测得到的水平位移矢量图

Fig.7 Horizontal displacement vectograms obtained by site monitoring

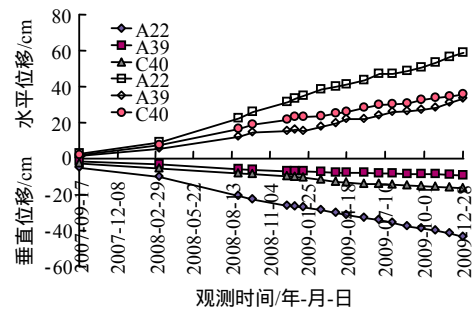


图8 东主井井区典型测点水平位移与垂直位移对比
Fig.8 Comparison between horizontal and vertical displacements of typical points around East main shaft

计算结果与监测结果十分吻合，同时验证了计算结果的准确性。

4 地表变形特征分析

根据上述利用有限差分法计算分析以及现场监测得到的地表变形过程的相关成果，对程潮铁矿东主井区地表变形特征分析如下：

(1)从图3、4以及图8可以看出，从东主井井区典型测点水平位移与垂直位移对比图不难发现，东主井井区地表水平位移大于其垂直位移，如东主井井口地表1996年4月水平位移8.8 cm是垂直位移1.2 cm的7.3倍，2007年4月水平位移40 cm是垂直位移11 cm的3.6倍，2009年12月水平位移70 cm是垂直位移22 cm的3.2倍。随着时间的推移，地表水平位移与垂直位移的比值不断减小。从图4还可以看出，随着开采进度的增加，地表水平位移和垂直位移均不断增大，说明东主井区域变形地表变形范围也在不断向外扩展，直到采矿为止。

(2)从图4、9东主井井口地表变形与开采进度关系曲线可以看出，东主井井区地表在地下开采至-260 m（对应于开采时间为1996年，见表1）时，水平位移已达9 cm，此时井筒开始开裂也验证了这一点。之后，东主井地表变形开始加速，2007年4月，井口水平位移已达40 cm，11年间地表开裂范围越过东主井并不断向北扩展，井筒及卷扬机房基础等开裂也日趋严重，2007年4月-2009年12月地表变形加速之势更加明显，水平位移速率接近1/30 d，沉降速率月0.35 cm/30 d。

(3)由图3(b)、图6沉降等值线可知，从矿区边缘至塌坑方向，等值线变得越来越密，即距离采空区越近，地表倾斜率越大，可以推断东区地表沉陷呈现明显的漏斗形状。

(4)从图7地表水平位移等值线可知，由于东主井在平面上位于矿体的中垂线上，所以水平位移

方向近乎垂直于矿体走向，向采空区方向移动。距离采空区越近，变形越大。

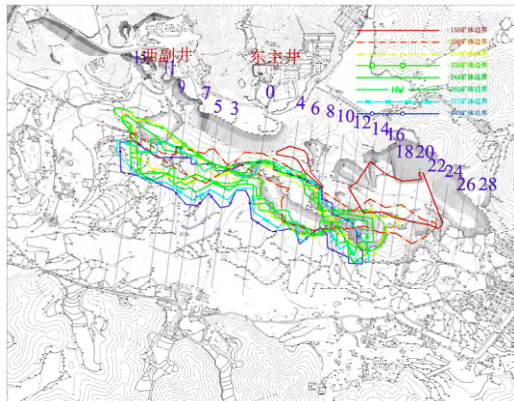


图 9 东区各水平采空区周界与东主井相对位置(单位:m)
Fig.9 Relative position between east main shaft and the boundary of different mining levels(unit: m)

5 地表变形机制分析

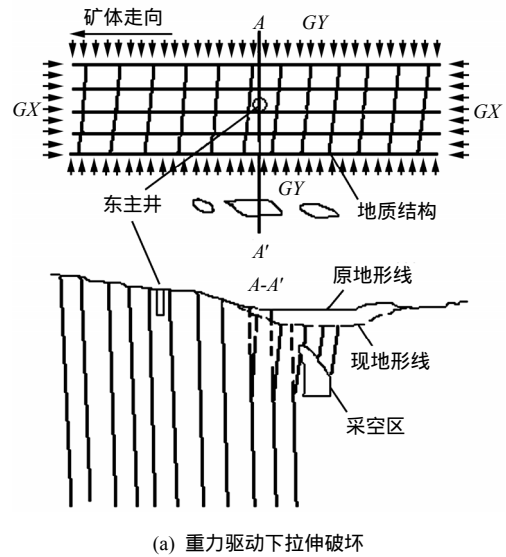
基于上述程潮铁矿东区东主井井区地表变形特征，综合考虑矿区工程地质条件及开采情况，认为井区地表变形特征是在其特殊的工程地质背景下形成的，具体分析如下：

(1) 地下采矿是矿区地表变形的直接诱因，地表开采形成的采空区为围岩移动提供了空间，东区岩溶发育，采空区的存在和地下抽水，矿床疏干排水，加快地下水逸流，也促进地下水的流动。地下水产生的净水压力和动水压力在一定程度上降低了岩石的力学强度，强化了岩体的变形与破坏。

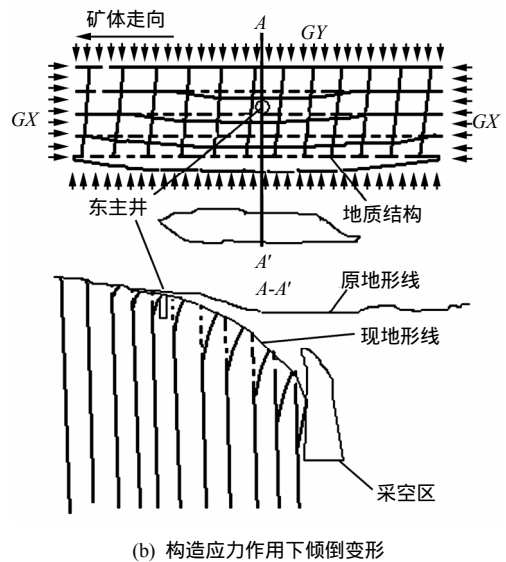
(2) 矿区赋存着平行于矿体走线和垂直矿体走向的断层和节理，如近东西走向的程潮南北断层、近南北走向的塔桥庙断层和破面脑挤压断层、发育良好的 NE 向节理与 NWW 向节理等等。这些主要的断层和节理一般为陡倾角，并呈垂直交叉之势，他们的存在把东区下盘岩体划分成为无数的柱状体（见图 9）。

(3) 矿区存在着较大的水平构造应力，如矿区近东西方向的最大主应力 GX 约为重力的 1.4~1.5 倍（图 10 中 GX），近南北方向上的第二主应力 GY 约为重力的 1.0~1.1 倍（见图 10）。构造应力场的存在，客观上增大了地表的变形，尤其是水平变形。

正是在上述工程地质、水文地质条件及地下开采等因素背景，形成了程潮铁矿东主井区地表特有的变形过程，其变形机制为在采矿初期，由于初始采空区跨度和高度均不大，上覆岩层基本处于稳定状态，引起的地表变形有限。随着开采的深入，地



(a) 重力驱动下拉拉伸破坏



(b) 构造应力作用下倾倒变形

图 10 东主井井区地表变形过程示意图
Fig.10 Deformation process of surface around East Main Shaft

下采空区顶板跨度和暴露面积逐渐扩大，覆岩在重力作用下变形逐渐增大，下沉速度由慢变快，当顶板中央的拉应力超过岩石的抗拉强度时岩石即遭破坏，顶板随即开始崩落，采空区被部分崩落废石所充填。覆岩变形由深至浅逐渐传递到地表，引起了地表明显变形，并逐渐增大，直至出现塌坑。

随着地下开采的进行，地下开采形成的采空区无论是在平面范围，还是纵向采高均逐渐增大。此过程也将引起地表变形、塌陷范围的不断扩展。即便如此地表变形仍在一定范围内，而没有传递到远离采空区的范围，如东主井区域（见图 10(a)）。在此之前，地下开采是地表变形的主因，重力是塌陷的主要驱动力。

当地下开采形成的采空区以及引起的地表塌

坑有一定规模后,在平行于矿体走向的水平构造应力,即最大主应力 G_X 释放、挤压的作用下,塌坑周围被断层、节理剖分成柱状的岩体开始向采空区和塌坑方向产生拱胀变形。同时,垂直于矿体走向的水平构造应力,即第二主应力 G_Y 的释放,促使岩体向塌坑方向产生卸荷拉伸张裂变形。此两方向构造应力的共同作用使柱状结构围岩向塌坑方向产生倾倒变形(见图 10(b))。至此,地表变形范围的扩展进入构造应力主导作用阶段。

地表变形进入构造应力主导作用阶段后,进入变形范围内的相关区域地表变形主要以水平移动为主,垂直位移很小。随着时间的推移,该区域柱状结构岩体倾角不断减小,地表垂直位移与水平位移的比值开始增大。从空间上看,距离采空区越近,垂直位移与水平位移比越大,反之越小。由此地表形成了漏斗形变形曲线。

6 结 论

(1) 东主井井区地表水平位移大于其垂直位移。随着时间的推移,地表水平位移与垂直位移的比值不断地减小。东主井井区地表在地下开采至-260 m 后开始加速,2007 年 4 月后地表变形速率加大。

(2) 从矿区边缘至塌坑方向,距离采空区越近,变形越大,地表倾斜率逐渐增大,地表沉降呈现明显的漏斗形状。

(3) 采矿初期上覆岩层在重力的作用下逐渐破坏,并在地表形成塌坑。地表变形、塌陷范围不断扩展,但地表变形范围仍然有限,重力是塌陷的主要驱动力。

(4) 当地下采空区和地表塌坑形成一定规模后,柱状结构围岩向塌坑方向产生倾倒变形,构造应力主导地表变形。

(5) 进入变形范围内的相关区域地表变形主要以水平移动为主,垂直位移很小。但是随着柱状结构岩体不断倾斜,地表垂直位移与水平位移的比值也不断增大,并且距离采空区越近,比值越大,反之越小。由此形成了地表漏斗形变形曲线。

总之,地下开采是矿区岩体破坏的直接诱因,矿区岩体中断层、节理等特殊地质结构是岩体变形的基础,构造应力场的存在是井区地表变形的驱动力。地下水产生的净水压力和动水压力强化了岩体的变形与破坏。

参 考 文 献

[1] REID P. Horizontal movements around Cataract dam ,

Southern Coalfield[C]//Proceedings of the MSTs 4th Triennial Conference on Buildings and Structures Subject to Ground Movement. Australia: [s.n.], 1998: 157 - 170.

[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 - 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.

[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] 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,2014,34(8):1572 - 1588.

XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, 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**, 2014, 34(8): 1572 - 1588.

[5] 李文秀,闻磊,刘晓敏,等.矿区区域性水平移动及其对竖井的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3926 - 3931.

LI Wen-xiu, WEN Lei, LIU Xiao-min, et al. Regional horizontal displacements and its effect on shaft in mining areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3926 - 3931.

[6] 李文秀,赵胜涛,梁旭黎,等.鲁中矿区地下开采对竖井井塔楼的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):74 - 78.

LI Wen-xiu, ZHAO Sheng-tao, LIANG Xu-li, et al. Influence of underground mining on shaft tower in Luzhong mining areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 74 - 78.

[7] 侯哲生,李晓.金川二矿开采过程中的位移及变形特征分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(2):215 - 27.

HOU Zhe-sheng, LI Xiao. Analysis of characteristics of displacement and derformation of rockmass in No.2 Mine

- Zone of Jinchuan Nickel Mine during mining[J]. **Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)**, 2008, 27(2.): 215 - 217.
- [8] 孟凡森, 郑庆学, 杨中东. 立井变形监测与治理[J]. **中国煤田地质**, 2004, 16(增刊): 59 - 60.
MENG Fan-sen, ZHENG Qing-xue, YANG Zhong-dong. Shaft deformation and monitoring regulating[J]. **Coal Geology of China**, 2004, 16(Supp.): 59 - 60.
- [9] 毕思文. 徐淮地区竖井变形破坏机制三维系统物理模拟实验研究[J]. **系统工程理论与实践**, 1997, 17(3): 43 - 50.
BI Si-wen. Research on the deformation mechanism and physical modeling 3D system of shaft failure in Xuhuai area[J]. **Systems Engineering-Theory and Practice**, 1997, 17(3): 42 - 49.
- [10] 成枢. 地下开采对立井井筒影响的研究[J]. **山东矿业学院学报**, 1989, 8(4): 40 - 43.
CHENG Shu. Study of the effect of underground mining on vertical shafts[J]. **Journal of Shandong Mining Institute**, 1989, 8(4): 40 - 43.
- [11] BRUNEAU G, TYLER B D, HADJIGEORGIOU J, et al. Influence of faulting on a mine shaft—A case study: part I: Background and instrumentation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(1): 95 - 111.
- [12] BRUNEAU G, HUDYMBAB M R, HADJIGEORGIOU J, et al. Influence of faulting on a mine shaft—A case study: part II: Numerical modeling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(1): 113 - 125.
- [13] 陈从新, 肖国峰, 黄平路, 等. 程潮铁矿东区东主井、西风井延期使用可行性研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.
CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng, HUANG ping-lu, et al. Feasibility analysis of continuing to use East Main Shaft and West Air Shaft in the eastern area of Chengchao Iron Mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- 上接第 423 页
- [16] 蒋翔, 姜德义, 陈结, 等. 定向对接连通井造腔可行性分析[J]. **中国科技论文**, 2013, 8(5): 374 - 376.
JIANG Xiang, JIANG De-yi, CHEN Jie, et al. Making cavity using directionally butted wells technology and its feasibility[J]. **China Science Paper**, 2013, 8(5): 374 - 376.
- [17] SADOWSKY M A, STERNBERG E. Stress concentration around an ellipsoidal cavity in an infinite body under arbitrary plane stress perpendicular to the axis of revolution of cavity[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1947, 69: 191 - 201.
- [18] EDWARDS R H. Stress concentrations around spheroidal inclusions and cavities[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1951, 73: 19 - 30.
- [19] 廖丽萍, 杨万科, 王启智. 椭球形空洞地基稳定性分析[J]. **岩土力学**, 2010, 31(增刊 2): 138 - 148.
LIAO Li-ping, YANG Wan-ke, WANG Qi-zhi. Stability analysis of an ellipsoidal cavity in foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 138 - 148.
- [20] 铁摩辛柯, 古地尔. 弹性理论[M]. 徐芝纶, 吴永祯译. 北京: 高等教育出版社, 1965.
TIMOSHENKO S P, GOODIER J N. Theory of elasticity[M]. Translated by XU Zhi-guan, WU Yong-zhen. Beijing: Higher Education Press, 1965.
- [21] 许宏发, 王武, 方秦, 等. 盐岩椭球储气库应力解析及其稳定性分析[J]. **应用基础与工程科学学报**, 2012, 20(6): 1137 - 1146.
XU Hong-fa, WANG Wu, FANG Qin, et al. Stress solutions and stability analysis of ellipsoidal gas storage cavern in salt rock[J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2012, 20(6): 1137 - 1146.
- [22] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
ZHENG Ying-ren, KONG Liang. Geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [23] 杨春和, 马洪林, 刘建锋. 循环加卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(12): 3562 - 3567.
YANG Chun-he, MA Hong-lin, LIU Jian-feng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3562 - 3567.