

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.041

竖井变形破坏机制与继续使用可行性探究

宋许根^{1,2}, 陈从新^{1,2}, 夏开宗^{1,2}, 陈龙龙³, 付 华^{1,2}, 邓洋洋^{1,2}, 杜根明^{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; 3. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘 要: 依据程潮铁矿地表变形、岩体变形和井筒裂缝监测资料, 分析东主井井筒变形破坏的成因, 总结井筒裂缝分布规律及其与采空区的关系, 通过数值分析探讨井筒继续使用的可行性。结合后期对地表与深部岩体较为详细的监测资料, 建立了倾倒破坏力学模型, 探讨井筒裂缝扩展与井区岩体水平位移之间的关系以及井区岩体分区与井筒裂缝分布之间的关系。研究结果表明, 东主井变形破坏是由地下采矿引起的, 岩体水平位移对井筒变形破坏起重要作用; 井筒的裂缝分布在空间上与采空区的位置有关, 井筒的东面和西面裂缝发育, 南面和北面基本无裂缝。由数值计算结果可知, 井区地表与岩体变形将继续加大, 但不会发生整体失稳破坏。对比岩体分区与裂缝分布发现, 井筒的裂缝分布在深度方向上与井区岩体分区有很好的对应关系。

关 键 词: 竖井; 变形破坏; 地下采矿; 可行性探讨; 岩体分区; 数值分析

中图分类号: TD31; O242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0331 - 012

Research on deformation mechanism and feasibility of continuous use of mine shaft

SONG Xu-gen^{1,2}, CHEN Cong-xin^{1,2}, XIA Kai-zong^{1,2}, CHEN Long-long³, FU Hua^{1,2},
DENG Yang-yang^{1,2}, DU Gen-ming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on results of surface deformation and shaft cracks monitoring of Chengchao iron mine, the damage reasons of East main shaft are analyzed, by ways of numerical simulation; and then the feasibility of continuous use of shaft is discussed. By using post detailed monitoring data of ground and deep rock mass, a mechanical model for toppling failure is established. The relation between shaft's crack growth and rock mass horizontal displacement and rock zone in East shaft area is discussed. The results show that: damage of the shaft is caused by underground mining. Horizontal displacement of rock mass has vital effect in shaft damage. The distribution of shaft cracks is related to goaf's location; there are a lot of cracks on the East and West of east main shaft; but south and north are little. Numerical analysis results show that deformation of surface and deep rock mass will further increase along with the mining activities extend to depth; but deformation of deep rock still too small to lead to entire failure. Crack distribution in vertical direction is related to rock engineering zone by comparison.

Keywords: shaft; deformation and damage; underground mining; feasibility study; rock zone; numerical analysis

1 引 言

随着经济发展对矿产资源需求的不断增长, 地下资源开采逐渐向深部延伸, 开发规模也不断扩大, 地下开采引起的地表变形与岩层移动规律也随之变得异常复杂^[1-3]。在许多大型矿山, 尤其是在大型金

属矿山, 地下开采引起的地表塌陷、地表变形范围远远超出了采矿初期规划设计, 造成矿区地表民用建筑、工厂等构筑物的变形倒塌, 使矿山生产使用的竖井、尾矿管道等赋存在岩体中的构筑物“过早”地进入了移动或者沉陷范围, 产生较大变形, 影响其正常使用, 如鲁中小官庄铁矿采矿引起了距开采

收稿日期: 2016-11-19

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 was Supported by the National Science Foundation for Young Scientists of China (41602325, 11602284) and the National Natural Science Foundation of China (11472293).

第一作者简介: 宋许根, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定性, 地下采矿稳定性方面的研究工作。E-mail: songxugen@qq.com

边界约 600 m 的主、副井产生了较大程度变形，严重影响了主、副井的正常使用^[4-5]。武钢程潮铁矿东区在地下开采深度不到 300 m 时东主井、西风井的井区地表和构筑物相继出现了裂缝，并产生了较大变形^[6]。

针对上述矿山地下开采引起竖井变形的成因，国内外学者进行了大量的研究，在一定程度上揭示竖井变形的成因和安全防治措施，李文秀等^[4-5]对小官庄铁矿主、副井处于移动范围内的原因进行了分析。赵海军等^[7]采用地质力学分析和数值模拟相结合的方法，研究了甘肃金川二矿在地下开采条件下 14[#]行风井变形破坏问题。孟凡森等^[8]分析了煤矿立井变形情况，总结了立井破坏和变形的监测方法以及井筒安全防护对策。毕思文^[9]利用三维系统物理模拟试验对竖井变形破坏机制进行了研究和模拟，提出了负水平荷载、摩擦力以及薄弱地质体共同作用下的竖井变形破坏“三因素缩合破坏”观点。张鹏等^[10]根据香山公司具体地质采矿条件，采用基于随机介质理论的概率积分法，对建立在采空塌陷活动区的井筒移动和变形进行了预计，并提出有效的加固措施。Bruneau 等^[11-12]综合利用现场监测、数值模拟等多种手段，比较全面系统地研究了澳大利亚蒙特埃萨铜矿断层对竖井安全与使用的影响。

矿山地下开采引起的地表变形范围超越预测，引起竖井的开裂变形，严重影响了其使用安全性，这类现象在国内外部分矿山时有发生，但针对处于大变形区域矿山竖井变形破坏机制与继续使用的可行性研究甚少，目前尚无形成系统的、全面的、可供参考的理论。程潮铁矿是我国规模仅次于镜铁山、梅山铁矿的第三个大型铁矿^[13]，东主井为程潮铁矿最重要的主井之一，其变形破坏机制与继续使用的可行性具有很高的研究价值，本文依据现场变形监测资料，对这两个问题进行探讨。

2 工程概况

2.1 矿区工程地质条件与采矿情况

程潮铁矿年产矿石 300 多万吨，是武钢的主要矿山生产基地。矿区地形为低山丘陵地貌。矿体下盘主要岩性为花岗岩，上盘靠近矿体部分为闪长岩，远离矿体部分多为角岩，矿体正上方分布有大理岩。矿区内地质构造较为复杂，断层是本矿区构造的主要表现形式，主要断层包括近东西走向的程潮南断层和程潮北断层，近南北走向的破面脑断层和塔桥庙断层。

矿体下盘花岗岩体的主要结构面有 4 组，即

NE 向、NWW 向、NNW 向和 NEE 向，NE 向节理最为发育，倾向南东，NWW 向发育次之，其走向与矿体走向和程潮大断裂走向一致，此组节理倾向 SSW，倾角为 82°~86°之间，见表 1。

表 1 结构面统计结果
Table 1 Statistical results of discontinuities

调查点 编号	结构面分组			
	NE 向/(°)	NWW 向/(°)	NNW 向/(°)	NEE 向/(°)
D01	120 87	200 80		
D02		200 82	261 83	168 80
D03	100 65	192 86		

矿区水平构造应力大于垂直应力，最大主应力 σ_1 方向为近东西方向，与矿体走向基本一致，在 -270 m 水平中达到 19.528 MPa，大小约为重力的 2.75 倍，中间主应力 σ_2 为自重应力，最小主应力 σ_3 的方向与 σ_1 方向垂直，为近南北方向，大小约为重力的 0.4~0.6 倍，如图 1 所示^[14]。程潮铁矿东区主要有 ~ 号 3 个矿体。矿体在空间上的分布呈不规则透镜状向南倾斜，部分矿体常有分枝复合以及胀缩现象，如图 2 所示。东区自 1970 年从 -16 m 水平开始起采，至 2007 年开采至 -375.5.0 m 水平（见表 1），主要采矿方法为分段崩落法^[15]。

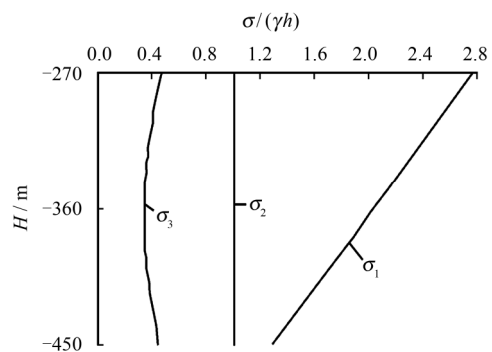


图 1 程潮铁矿主应力分布示意图^[14]

Fig.1 Sketch of principal stress distribution of Chengchao Iron Mine^[14]

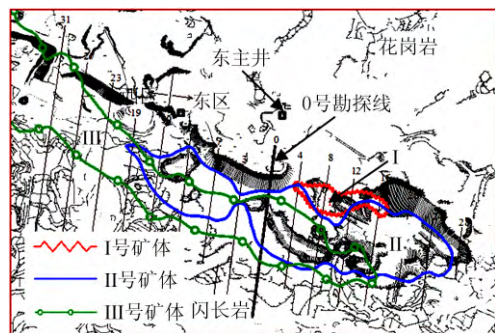


图 2 矿体与勘探线分布

Fig.2 Orebody and exploration line distribution

2.2 东主井

程潮铁矿东主井位于矿体下盘约 300 m 处的 0 号勘探线上（见图 1），为程潮铁矿最重要的主井之一，是包括罐笼提升设备（卷扬小于 5 m 双层罐笼带平衡锤）、矿石箕斗提升设备（卷扬小于 4 m 双箕斗）并兼作进风井的大型混合井，1966 年投产至 2007 已有 40 多年的历史，为程潮铁矿生产任务的顺利完成做出了巨大的贡献。

表 2 东区矿体开采情况
Table 2 Process of ore mining

开采水平/m		开采年限/年		开采矿体界线/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	
-302	-358	2002	2007			15~16
-375.5		2007	2012			39~16
-393.0		2009	2013			19~16
-410.5		2012				39~19
-430.0		2014				15~12

程潮铁矿东主井 1996 年井筒开始出现开裂，1998 年末东主井不再用于采矿运输，由于采矿活动不断向深部扩展，导致地表变形程度不断加剧，地表开裂范围不断向北扩展，在东主井以南出现多个塌坑，东主井井区围墙出现较大开裂，裂缝最大宽度约为 30 cm，卷扬机房基础、墙体及井筒等开裂变形也日益严重（见图 3）。罐笼尺寸被迫缩小，卷扬机和井架提升中心也进行了调整，井筒一直处于带病运行状态。至 2006 年底东主井井口相对于井底偏移了约 40 cm，井架发生明显倾斜，井筒开裂日趋严重，使用东主井受到严重威胁。根据矿山生产规划，2007-2009 年期间井下基建仍然需要使用该井提升废石，有必要了解井区岩体及井筒的变形状态与变形趋势，探讨其继续用的可行性，以保障矿山的正常生产。

3 地表与井筒裂缝变形

3.1 地表变形监测

为了解东主井井区地表与岩体的变形状态与趋势，2007 年 4 月起监测井区地表变形，包括地表垂直位移监测和水平位移监测，其中地表水平位移采用 GPS 监测技术，地表沉降采用水准仪和 GPS 两种监测技术。通过变形监测有效掌握了东主井井区地表变形过程的第一手珍贵资料。图 4 为监测得到的典型测点变形值 表 3 为 2007 年 9 月测点水平



(a) 东主井以南发育的塌坑



(b) 东主井井区围墙开裂情况



(c) 东主井井筒结构破坏

图 3 东主井井区周边塌坑与井区构筑物破坏情况
Fig.3 Collapse pit and building damage around East main shaft

位移与垂直位移的比值，图 5 为东主井井区地表 2007 年变形速率，图 6、7 分别为监测得到的 2007 年 9 月 17 日地表水平位移等值线图、地表垂直位移等值线图和地表水平位移矢量图。

由监测结果可知，（1）从井区代表测点监测成果（见图 4、5）来看，东主井井区地表及深部岩体在 2007 年变形比较稳定，没有加速变形的趋势；变形以水平变形为主，在同一位置地表水平位移大于其垂直位移，如测点 A31 测点最大累计水平位移

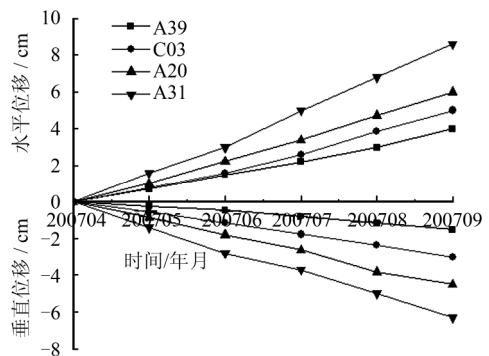


图 4 2007 年东主井附近典型测点变形值
Fig.4 Typical points deformation values around East main shaft

表3 2007年9月东主井附近典型测点累计水平位移与垂直位移的比值

Table 3 Horizontal to vertical ratio of typical points around East main shaft in September, 2007

点号	A39	C03	A20	A31
水平位移与垂直位移比值	2.67	1.67	1.33	1.30

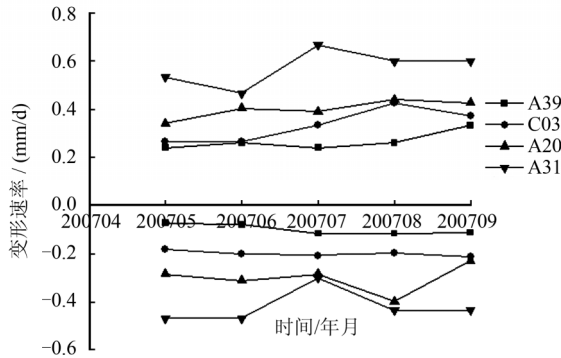


图5 2007年东主井附近典型测点变形速率

Fig.5 Curves of horizontal deformation rate and vertical deformation rate with time of typical points around East main shaft

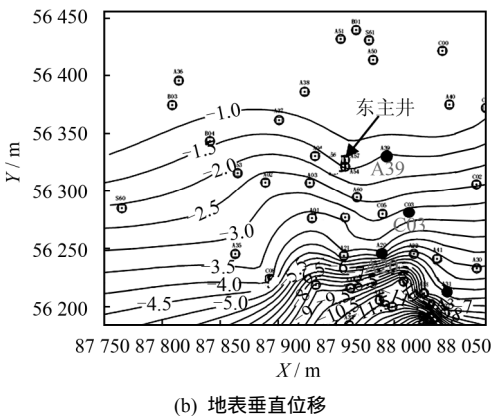
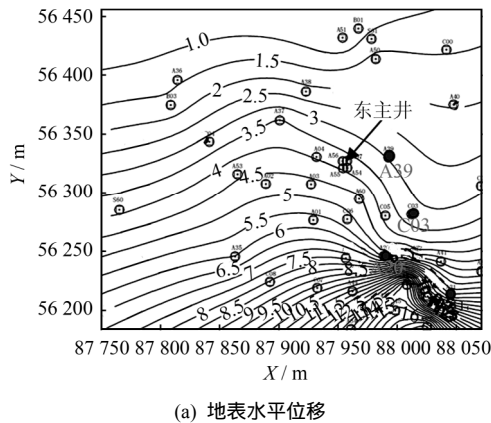


图6 监测得到2007年9月17日地表水平和垂直位移等值线(单位:cm)

Fig.6 Horizontal and vertical displacement contour map on September 17, 2007 obtained by site monitoring(unit: cm)

为8.6 cm,最大累计沉降为-6.3 cm。测点累计水平位移与沉降的比值与测点与采空区的距离与有关,

距离越近,地表水平位移和垂直位移的比值越小,距离采空区的距离越远,比值越大,如测点 A39 水平位移与沉降的比值为 2.67,测点 C03 水平位移与沉降的比值为 1.67,测点 A20 水平位移与沉降的比值为 1.33,测点 A31 水平位移与沉降的比值为 1.30。产生这种现象的原因,是因为矿区较大水平应力的存在(见图 1),在塌陷区形成后水平构造应力得到释放,塌坑围岩产生卸荷变形。(2)由图 6 可以看出,距离采空区越近,水平位移等值线和垂直位移等值线越密,说明距离采空区越近,地表水平应变与倾斜率越大;从边界线扩展情况来看 1 cm 水平位移等值线边界超过东主井约 220 m,1 cm 沉降等值线边界超过东主井约 25 m,可见水平位移对东主井影响更大,从图 7 中 2007 年 9 月 17 日地表水平位移矢量图可见,地表变形是从采空区开始由南向北逐步扩展的,位移方向指向南部采空区,说明东主井井区地表变形是由地下开采和崩落引起的,采空区的存在是控制井区岩体变形的最直接的因素。

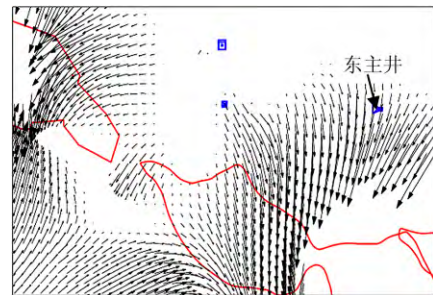


图7 监测得到的2007年9月17日地表水平位移矢量图 Fig.7 Horizontal displacement vectogram on September 17, 2007 obtained by site monitoring

3.2 井筒裂缝变形监测

为了有效掌握井筒的变形状况,对东主井井筒上部产生的裂缝扩张情况进行了监测与统计,监测采用 JMD-2210 型测缝计,灵敏度为 0.01 mm,量程达 100 mm。

通过现场对井筒裂缝调查,东主井井筒裂缝主要分布于标高 85~90 m,起始于井口处,裂缝分布跨度约为 175 m,其裂缝分布如图 8 所示。

图 9 为监测得到的裂缝随时间扩展情况。裂缝总体走向为近东西向。按裂缝延伸长度可以划分为 1~3(>10 m, <10 m 且 >1 m, <1 m)三种类型,延伸长度大于 10 m 的裂缝主要分布于标高 85~35 m,力学性质为张性,张开度为 0.8~10 cm,在井壁上呈蛇形向下延伸。延伸长度小于 10 m 且大于 1 m 的裂缝主要分布于标高 35~60 m,力学性质为张性,张开度为 2~0.3 cm,在井壁上呈蛇形向下延

伸。2007 年在东主井南面井筒深度 30~50 m 处出现大量的近水平向展布的压剪裂隙，引起井筒护壁出现局部掉块现象。

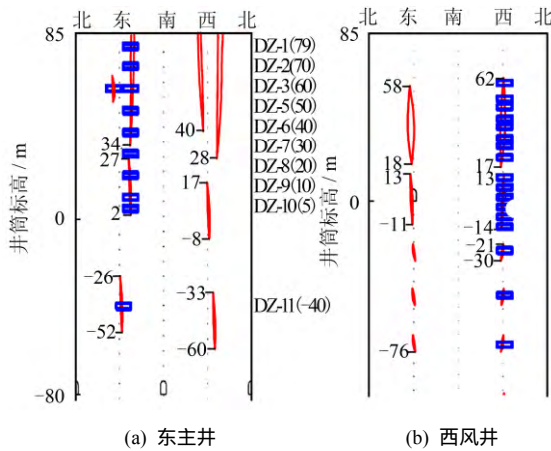


图 8 井筒裂缝分布与裂缝计布置图 (单位: m)
Fig.8 Layout of joint meters on shaft(unit: m)

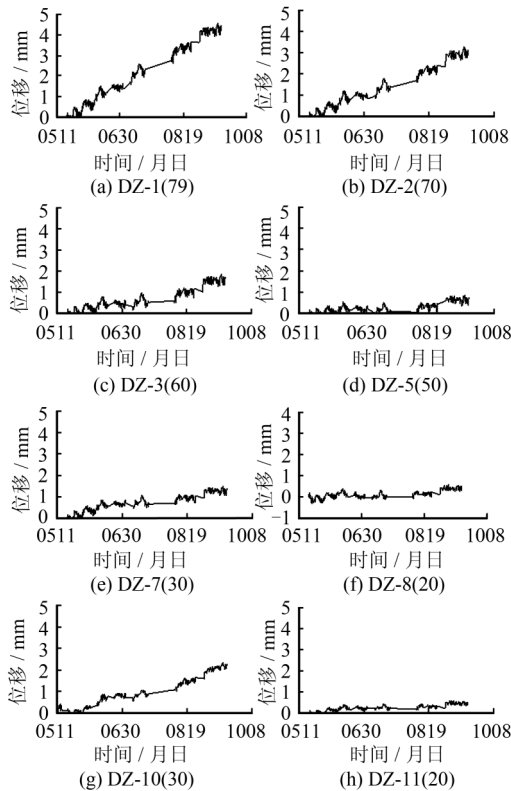


图 9 裂缝宽度随时间变化曲线^[15]
Fig.9 Relation curves of crack width and time^[15]

裂缝的发育程度上至下由强变弱，裂缝的延伸长度和张开度由上至下逐渐减小。陈从新等^[16]从裂缝变形发展历史角度将井筒裂缝发展划分为 3 个阶段：第一阶段，随着地下采矿引起的地表与岩体变形逐步接近井筒，井区岩体应力平衡被打破，产生向塌陷区的卸荷变形；第二阶段，岩体首先在地表临空面沿结构面产生剪张开裂，并随着卸荷应力的进一步作用，井筒裂纹和裂缝向深度发展；第三

阶段，井筒裂缝裂纹扩展至一定深度后形成了塌陷边界，并在采空区下延至一定深度后产生塌陷，井筒结构被完全破坏。根据目前东主井井筒与井区地表裂缝发育情况来看，目前东主井井筒结构的变形处于第二阶段初期。从图 8(a)可以看出，东主井井筒裂缝主要分布在东面和西面，南面和北面基本无裂缝。现场调查发现，程潮铁矿西风井的井筒裂缝发育有着同样的规律，见图 8(b)。产生这种现象的原因是因为采空区在井筒的南面，地下开采引起了地表由北向南的水平变形（见图 6(a)）和南北方向上的不均匀沉降（见图 6(b)），使得井筒向南边倾斜，在南北方向上产生拉应力，因此井筒的东面和西面出现拉张裂缝。

裂缝分布于井筒高程有关，高程越高，裂缝数量越多，裂缝最大变形宽度也越大，见图 9，如位于高程为 79 m 的 DZ-1 裂缝计位移为 4.52 mm，高程为 70 m 的 DZ-2 裂缝计位移为 3.13 mm，DZ-1 裂缝变形速率达到了 0.036 mm/d；0~-40 m 段裂缝最大变形量不到 1 mm。从裂缝类型来看，从井口至+70 m 段井筒裂缝为弯曲型张开，井筒 0~-40 m 段裂缝无明显规律。

4 数值计算分析

分析井区地表与岩体的变形规律，并预测东主安全使用到 2009 年 12 月的可行性，以 2007 年 4 月 12 日东主井井口水平位移 39.0 cm 为与沉降-11.0 cm 为基础，本文利用数值分析方法进行了反分析计算及预测 2009 年 12 月井区与岩体地表变形。图 10、11 分别为反分析计算得到的 2007 年 4 月水平位移等值线图 and 沉降等值线图，图 12、13 计算得到的 2009 年 12 月水平位移等值线图和沉降等值线图，图 14~16 分别为计算得到的水平应变、地表倾斜率和井筒水平位移。

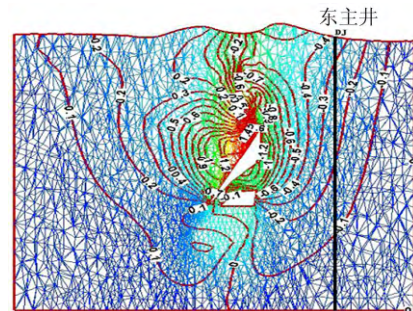


图 10 计算得到的 2007 年 4 月 0 号剖面(指向采空区方向)水平位移等值线图 (单位: m)
Fig.10 Horizontal displacement contour map in April of 2007 by numerical simulation on profile #0(unit: m)

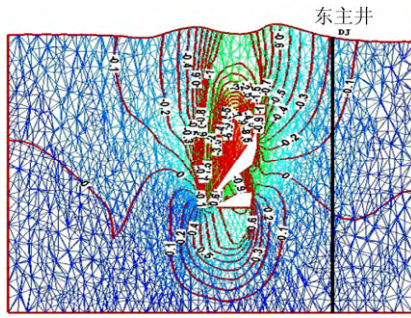


图 11 2007年4月0号剖面沉降等值线图(单位:m)
Fig.11 Vertical displacement contour map in April of 2007 by numerical simulation on profile #0(unit: m)

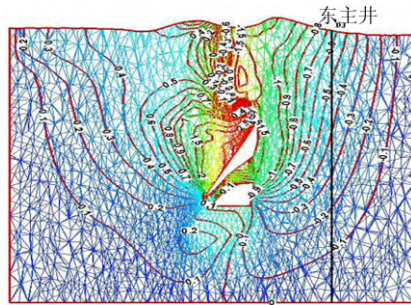


图 12 计算得到的2009年12月0号剖面(指向采空区方向)水平位移等值线图(单位:m)
Fig.12 Horizontal displacement contour map in December of 2009 by numerical simulation on profile #0(unit: m)

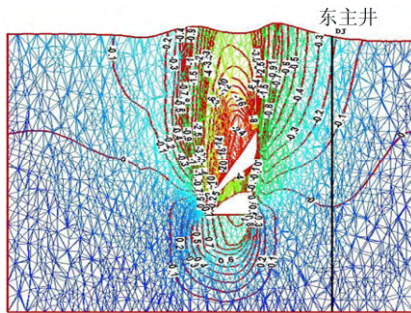


图 13 2009年12月0号剖面沉降等值线图(单位:m)
Fig.13 Vertical displacement contour map in December of 2009 by numerical simulation on profile #0

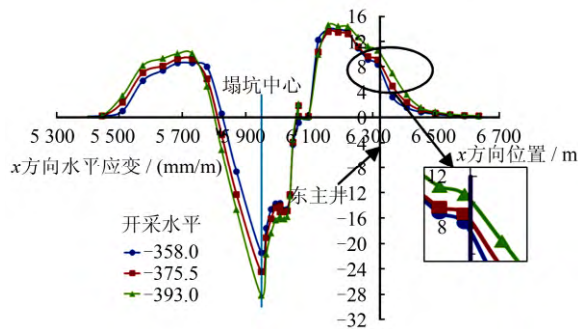


图 14 0#剖面地表水平应变
Fig.14 Ground horizontal strain chart on profile #0

计算结果表明,东主井已发生较大变形,未来两年内井区地表变形将进一步加剧,(1)按采矿计划2年后程潮铁矿东区依次开采-375.5 m和-393.0

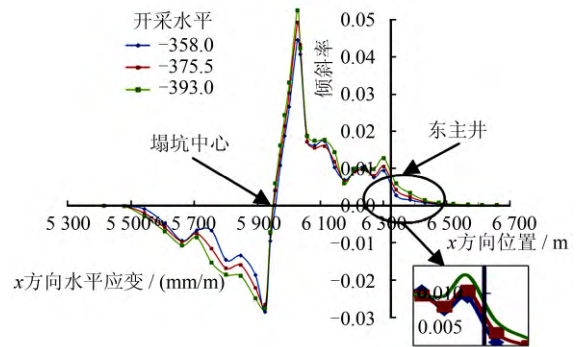


图 15 0#剖面地表倾斜率
Fig.15 Ground vertical strain chart on profile #0

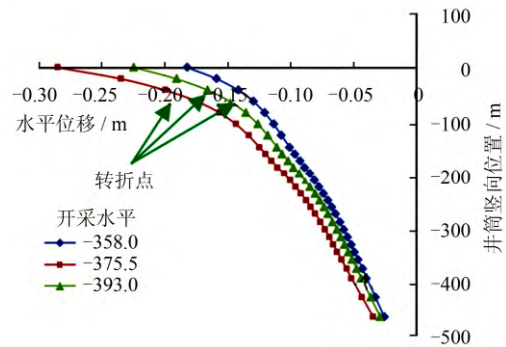


图 16 水平位移图
Fig.16 East main shaft horizontal displacements

m 水平矿体,井口水平位移在2007年4月至2009年12月2年之内将由39.0 cm增大到68.0 cm,增加29.0 cm;井口垂直位移2009年12月由2007年4月11.0 cm增大到22.0 cm,分别增加了11.0 cm(见图10~13)。(2)东主井井口位置的水平应变2年之内由8.38 mm/m依次增大到9.08 mm/m和10.58 mm/m,分别增加了0.70 mm/m和2.20 mm/m;井口位置的地表倾斜率由5.40 mm/m依次增大到6.50 mm/m和8.20 mm/m,分别增加了1.10 mm/m和2.80 mm/m(见图14、15)。(3)井筒-465~0 m段的水平位移不断增加,但井筒深部岩体水平位移依旧较小(见图16),深部岩体未见滑动面,说明井区岩体没有发生滑移破坏。井筒深度35~50 m处水平位移曲线出现明显转折,说明井区岩体发生倾倒弯曲破坏,水平位移转折点就是弯曲折断破坏位置,2007年4月至2009年12月井筒-456 m处水平位移仅0.8 cm,表明深部岩体未发生明显破坏。

基于上述地表以及井筒裂缝监测结果,结合数值计算结果,对东主井井区岩体、井筒的稳定性在2009年12月底前的稳定性情况分析可知,(1)程潮铁矿东主井区整个岩体或井筒结构将继续变形,井区岩体变形无疑增大了卷扬机地基基础的变形和井筒井架的倾斜,整个提升系统的垂直中心将不断

偏移，将严重影响罐笼的上下运行。卷扬机基础和卷扬机房地基继续变形也影响卷扬机和房屋的使用和安全；（2）虽然程潮铁矿东区东主井区岩体在2009年12月底前将产生进一步变形，但总变形量仍在一定范围内，地表变形以水平移动为主，沉降相对较小，井区岩体不会发生坍塌、大规模滑动等总体破坏，因为通过采取减缓岩体变形不使其速度增加，对井筒、井架、卷扬机房等结构物本身和基础进行适当加固和处理等措施，再配合全面地、系统地、持续地监测和强化安全管理措施，东主井区可以再使用。

对井区岩体和相关结构及地基基础进行有效加固或修正处理后结合对地表变形的定期监测和预测，东主井安全使用到了2009年12月底，根据监测，此时井口地表的水平位移和垂直位移相对于2007年初分别增加了29.9 cm和11.5 cm，可见监测结果与计算所得的结果基本一致，说明用数值方法分析程潮铁矿东区岩体下盘变形是准确的。

5 后期监测情况

5.1 地表变形监测

地表变形监测从2007年延续至今，图17为根据地表监测数据绘制出的典型测点2007年4月到2016年10月累计沉降位移图，图18为典型测点从2007年4月到2016年10月累计沉降速率图，图19为Surfer差分软件得到的2010年1月至2016年累计水平位移等值线和沉降等值线图。从图17、18中可以看出，随着地下采矿的继续进行，东主井井区地表变形不断增大。2007年4月至2016年C03测点累计沉降达-160.6 cm，在东主井东南方向约142 m的A31测点累计沉降达-397 cm。测点变形随

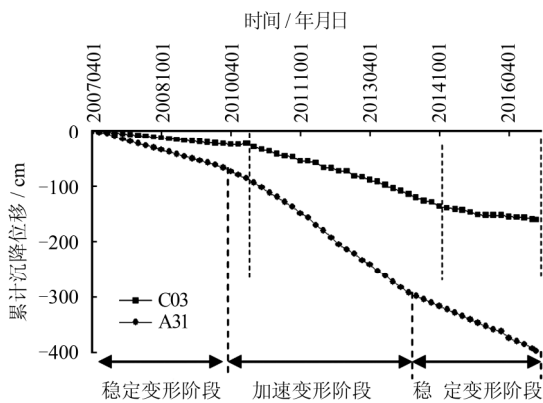


图 17 东主井附近典型测点累计沉降变形曲线 (2007年累计)

Fig.17 Typical points accumulated subsidence and deformation curves around East main shaft(from 2007)

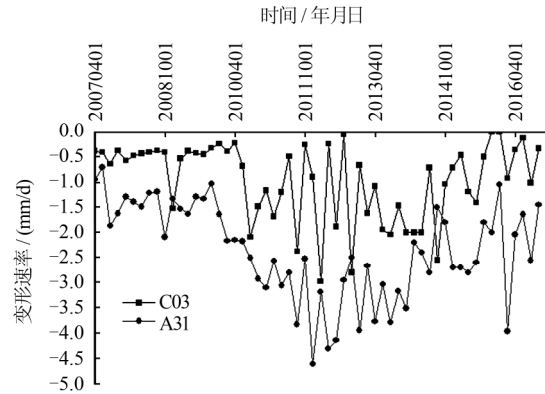
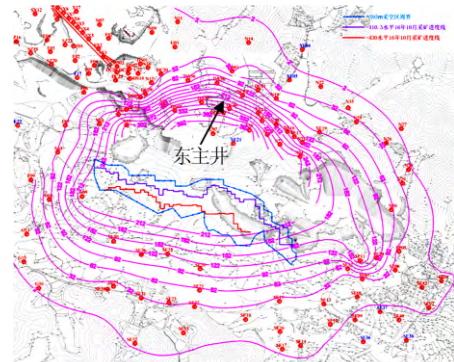
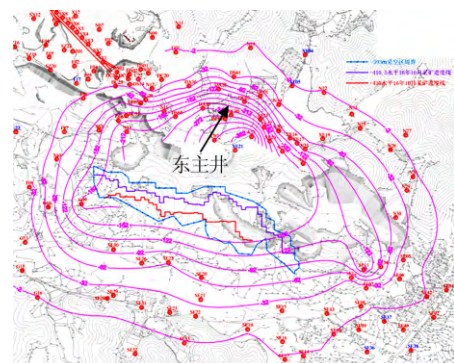


图 18 2016年东主井附近典型测点累计沉降速率曲线
Fig.18 Curves of vertical deformation rate with time of typical points around East main shaft in 2016(from 2007)

时间曲线可以明显分为稳定变形阶段、快速变形阶段和稳定变形3个阶段，随着与采空区距离不同，快速变形阶段发生时间也不同（见图17），离采空区近的测点A31稳定发生加速变形的时间要比离采空区较远的测点早4~6个月。在离采空区较近的A31测点，第一阶段为从2007年4月至2010年2月，变形以稳定为主，平均沉降速率为-1.38 mm/d，



(a) 东区水平变形值



(b) 东区垂直变形值

图 19 2016年10月东区水平和重直 (2010年1月累计)
Fig.19 Horizontal and vertical deformation values of east area of Chengchao iron mine in October,2016 (from January,2010)

第二阶段为从 2010 年 2 月至 2014 年 2 月,变形以快速变形为主,平均沉降速率为-3.08,是第一阶段平均沉降速率的 2.2 倍;第三阶段为 2014 年 2 月至今,变形以稳定变形为主,平均变形速率为-2.29,比第二阶段小但比第一阶段大。在离东主井较近离采空区较远的 C03 测点,第一阶段为从 2007 年 4 月至 2010 年 8 月,变形以稳定为主,平均沉降速率为-0.47 mm/d;第二阶段从 2010 年 2 月至 2014 年 8 月,变形以快速变形为主,平均沉降速率为-1.43 mm/d,是第一阶段平均沉降速率的 3.0 倍;第三阶段为 2010 年 2 月至今,变形以稳定变形为主,平均变形速率为-0.57 mm/d,比第二阶段小但比第一阶段大。夏开宗等^[17]研究程潮铁矿西区地表变形时发现,程潮西区地表变形有类似的规律,因程潮铁矿东区地质条件相似,受水平构造应力的影响,地表先以稳定变形为主,变形积累到一定程度产生水平应力释放,变形加速,水平应力释放结束后变形又恢复稳定,但第三阶段变形速率要大于第一阶段。

东主井位置处于矿体下盘,在采空区南面属于矿体上盘,按照之前的理论,上盘变形应该大于下盘,从图 19 可以看出,程潮铁矿东区下盘变形远大于上盘东主井处从 2010 年 1 月到 2016 年 10 月累计水平位移达 232.0 cm,累计沉降-212.0 cm,东主井距离采空区边界约为 296 m,上盘距离采空区 27 m 处的位置的 SE19 累计水平位移为 13.9 cm,累计沉降为 5.0 cm,可见东主井发生变形破坏,是因为地下采矿引起的下盘地表与岩体变形远远超出矿山规划设计范围。

5.2 裂缝与深部岩体变形监测

井筒裂缝监测时间为 2007 年 4 月到 2010 年 3 月,由于变形较大东主井不再使用,井筒裂缝停止监测。东主井处深部岩体变形监测从 2010 年 1 月开始监测,深部岩体变形监测仪器采用美国 SINCO 公司的 50325-M 型钻孔倾斜仪,钻孔倾斜仪由探头、电缆及测读仪三部分组成,配有专用测斜管,如图 20 所示。

为了解井区深部岩体变形情况,在东主井北侧(DZJ1)及南侧(DZJ2)各布置了一个钻孔,见图 21。钻进过程中 DZJ1 孔在 25.5 m 时完全不返水,DZJ2 孔在 63 m 时完全不返水。将两钻孔的这一特征点进行连线,交于东主井的深度为 35 m 处(如图 22),从透水性角度出发可以断定界线以上岩体是完全透水的。结合钻孔摄像成果,可以得出此界线以上岩体相当破碎,称之为碎裂区。

采用同样的方法,利用钻孔声波成果(见图 23)

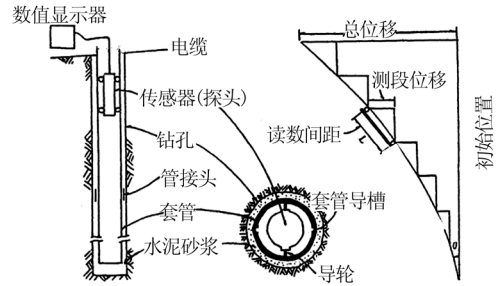


图 20 钻孔倾斜仪工作原理示意图
Fig.20 Borehole clinometer's working principle

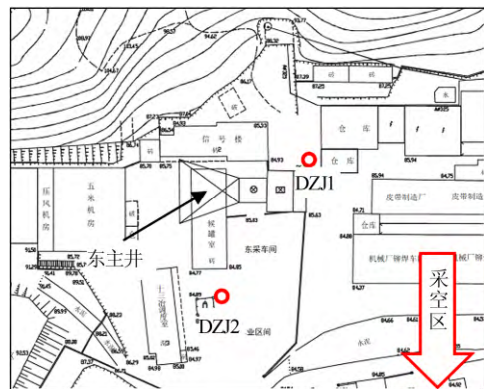


图 21 钻孔倾斜仪布置图
Fig.21 Layout drawing of borehole clinometer

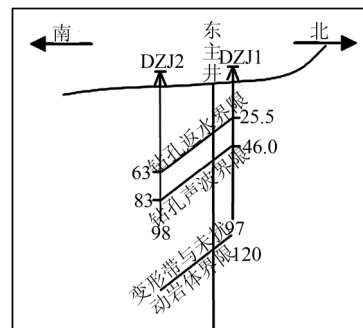


图 22 钻孔揭示特征点连线图(单位:m)
Fig.22 Map of feature point line(unit: m)

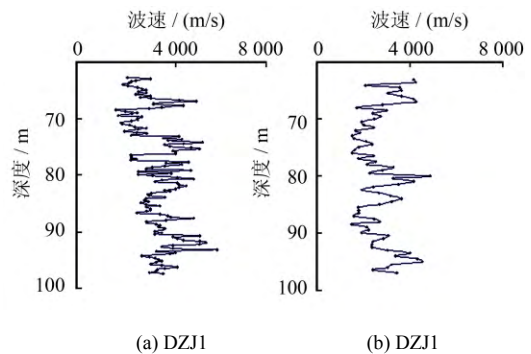


图 23 DZJ1 岩体纵波波速与深度关系^[18]
Fig.23 Relationships between longitudinal wave velocity of rock mass and depth^[18]

可以得到一条钻孔声波界线，在东主井同样交于一个特征点。特别要强调的是，两条分界线是平行的，两个界面这间的岩体的平均波速约为 3 000 m/s，钻孔声波界面以下岩体的平均波速约为 4 000 m/s。与西风井两个钻孔的声波波速相当。参照西风井区的地表变形，岩体波速为 4 000 m/s 左右意味着岩体产生了变形但没有碎裂性破坏。在钻孔返水界线和钻孔声波界面之间的岩体，岩体内产生了破裂但又没有完全碎裂，称之为破裂过渡带。

在破裂过渡带之下的所有岩体并非全部都是变形区，也就是说井区下盘岩体的变形区不可能无限地向地下延伸，在变形与不变形之间总应该有一个界线，未变形区岩体声波波速应超过 5 000 m/s。受钻孔深度所限，在钻孔中无法找到这个界线，调查井筒裂缝时发现井壁可见裂缝的深度为 145 m，以此点作基点，平行于上部的 2 条分界线，划出一条分界线，称之为变形带与未扰动岩体区的分界线。本文将井区岩体在深度方向划分为碎裂区、破裂过渡带、变形区和未扰动岩体 4 个分区。

图 24 为深孔水平位移与井筒裂缝计位移对比图。从图中可以看出，2010 年 1 月至 2010 年 3 月 DZJ1 测孔的最大水平位移在靠近孔口处，约为 11 mm，DZJ2 的最大水平位移同样在靠近孔口处，约

为 17.5 mm，DZJ2 测孔的最大水平位移大于 DZJ1 测孔的最大水平位移，再结合深孔布置位置图 21，说明东主井南部地表变形更大，地表与岩体变形是由南向北扩展的，采空区的存在是地表与岩体变形的最直接的因素，与地表 GPS 监测所得的结果一致。结合图 24(a)东主井一号孔变形、图 24(c)东主井 2 号孔变形和图 24(b)东主井裂缝计位移图可以看出，深孔水平位移与裂缝计位移有较好的对应关系，在测孔深度 60 m 以下，测孔水平位移趋近于 0，对应于井筒高程 20 m 以下井筒裂缝计的位移值也很小，且属于波动状态；测孔深度 60 m 以上测孔水平位移逐渐增加，在孔口处位移值达到最大值，对应于东主井井筒高程 20 m 以上，可以看出裂缝计位移值整体上也逐渐增加，并在井口处裂缝计位移值达到最大，说明岩体水平移与井筒的裂缝扩展有很好的对应关系，水平位移对井筒的变形破坏起重要作用。李文秀等^[4]在研究小官位庄铁矿竖井变形时，也得出竖井变形受深部开采引起的区域性水平移动影响的结论。从图 24 中还可以看出，岩体水平位移从孔口往下，水平位移逐渐减小并趋近于 0，说明深部岩体不存在滑动面，深部岩体的破坏类型属于倾倒破坏而不是滑移破坏，与数值分析所得的结论一致。

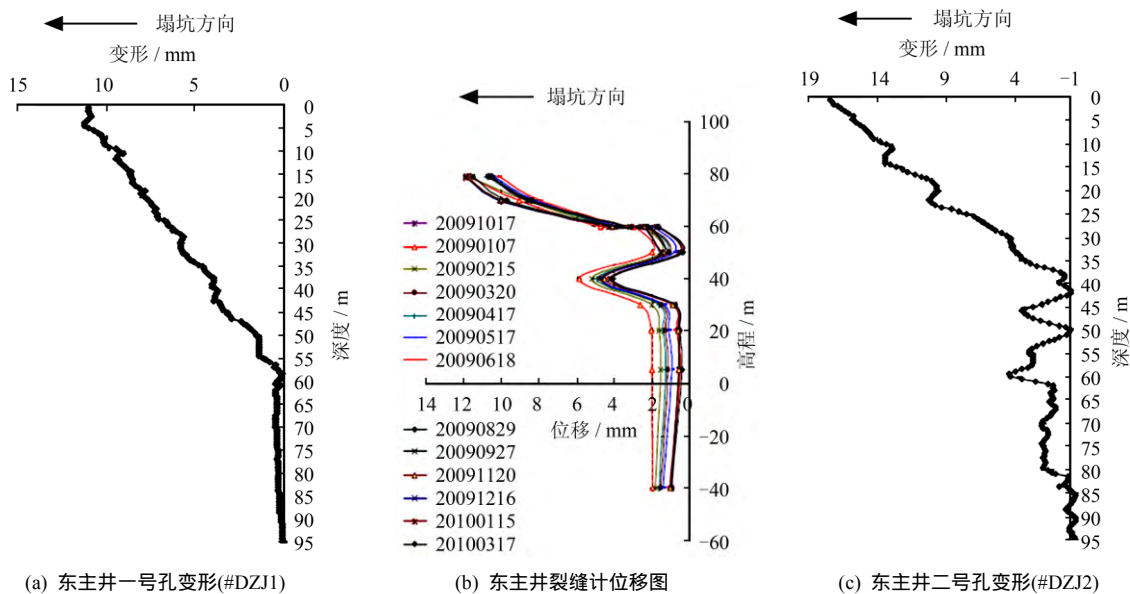


图 24 深孔水平位移与井筒裂缝计位移对比图

Fig.24 Comparison map of deep hole horizontal displacement and crack meter displacement

6 井区岩层移动与井筒裂缝关系

6.1 岩层移动机制

程潮铁矿地下开采引起地表变形规律和岩体移动是一个十分复杂的系统工程问题，朱家桥^[19]、

邓洋洋等^[20]和黄平路等^[21]都认为程潮铁矿的地表变形主要受 NWW 向节理控制，朱家桥认为程潮铁矿东区地表变形破坏为倾倒式拉裂破坏，邓洋洋等认为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。

本文结合程潮铁矿东区工程地质条件以及现场调查的节理发育情况，建立了程潮铁矿东区岩体倾倒破坏力学模型，如图 25 所示。由于地下采矿是一个随时间推进的过程，不同阶段采矿引起深部岩体变形的机制不同，第一阶段为筒状破坏区域产生阶段，随着矿体开采深度和回采垂直高度比值的减小，深部岩体发生筒状塌陷的岩体逐步向地表延伸。第二阶段矿体上方发生塌陷后引起围岩水平构造应力的释放，NWW 向节理对程潮铁矿东区下盘变形和开裂起主要作用，NWW 节理将下盘切割成悬臂梁的模型，在筒状陷落发生以前悬臂梁的受力状态见图 26(a)。此时悬臂梁处于受力平衡状态，当筒状陷落发生以后，靠近塌坑一侧的应力消失，见图 26(b)，受力平衡被打破，悬臂梁在侧压力的作用下最终发生弯曲折断破坏，见图 26(c)。悬臂梁力学模型很好地解释了图 17 中 C03 测点加速变形阶段晚于 A31 测点 4~6 个月，因为当筒状陷落发生后最靠近塌坑的第 1 个悬臂梁最先因原有受力状态改变而发生弯曲折断破坏，当第 1 个悬臂梁发生弯曲折断破坏后第 2 个悬臂梁受力状态发生改变，从而发生弯曲折断破坏，然后是第 3、4 个，以此类推。由于 A31 测点离采空区的距离近，A31 测点所在位置的悬臂梁先发生弯曲折断破坏，产生应力释放，A31 测点变形加速阶段早于 C03 测点，当悬臂梁被折断后应力释放结束，变形速度又放缓，但此时的岩体已经发生折断破坏，第三阶段变形速率大于第一阶段，小于第二阶段。

前文通过对深部岩体的钻孔观测成果将深部岩体变形分为碎裂区、破裂过渡带、变形区和未扰动岩体区 4 个分区 现结合图 26 岩体倾倒破坏力学模型对 4 个区的特征进行阐述，(1) 碎裂区的岩体因靠近筒状破坏区域的悬臂梁发生弯曲折断破坏而形成，水平构造应力得到完全释放；(2) 破裂过渡

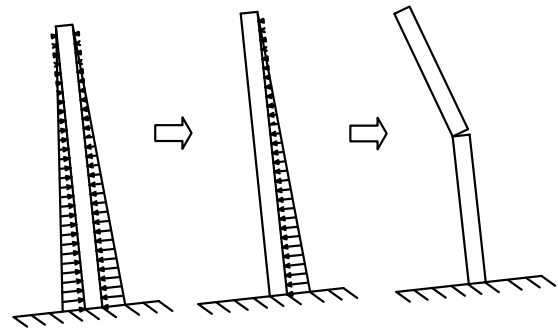


图 26 悬臂梁倾倒破坏示意图
Fig.26 Sketch of cantilever toppling failure

带由于悬臂梁发生弯曲变形折断带 岩体较为破碎，发生压剪与张裂破坏；(3) 变形区悬臂梁在侧压力作用下发生弯曲变形，但变形很小，悬臂梁未发生弯曲折断破坏，水平构造应力没有释放，称为变形区；(4) 变形区以下的岩体由于受到地下采矿的影响很小，岩体的初始状态未发生改变，水平构造应力没有释放，称为未扰动岩体区。深部岩体的 4 个分区，随着地下采矿的不断进行会不断向深部和四周扩展。



图 27 采空区边缘岩体倾倒破坏
Fig.27 Rock mass toppling failure around goaf

6.2 井筒裂缝与深部岩体分区的对应关系

(1) 碎裂区

在钻进过程中 DZJ1 孔在 25.5 m 和 DZJ2 孔在 63 m 时完全不返水，将两钻孔的这一特征点进行连线后交于东主井的深度为 35 m 处，所以将东主井 35 m 深度以上定义为碎裂区。从图 8(a)中可以看出，此深度处正好是井筒开裂在深度方向分布的一个特征点，深度 35 m 以上东主井井筒有多条裂缝发育，且裂缝较宽，延伸长度大于 10 m。碎裂区岩体水平应力得到完全释放，原本作用在岩体中的水平构造应力由井筒承受，并且该区域岩体发生较大水平位移，在水平应力和水平位移共同作用下使得破碎区井筒破坏明显，裂缝发育。

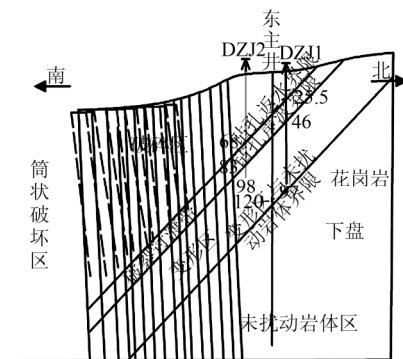


图 25 倾倒破坏力学模型
Fig.25 Toppling failure mechanical model

(2) 碎裂过渡带

碎裂过渡带位于钻孔返水界限与钻孔声波于之间即在井筒深度 35~45.5 m 处,从图 8(a)可以看出,此处井筒顶部发育的主要裂缝在此位置逐渐变窄,因此处虽有水平构造应力释放,但悬臂梁在此处发生弯曲折断破坏,水平位移较小,井筒裂缝没有碎裂区发育。同时,悬臂梁在此处发生弯曲折断破坏也解释了前文提到的在东主井南面井筒深度 30~50 m 处出现大量的近水平向展布的压剪裂隙。数值分析结果显示,在井筒深度 35~50 m 岩体水平位移出现明显转折,转折点为弯曲折断破坏点,说明数值分析的结果是比较准确的。

(3) 变形区

变形区位于井筒钻孔声波界限至井筒可见裂缝之间,位于井筒深度 45.5~145 m 范围。从井筒裂缝分布与裂缝计布置图 8(a)可以看出,此区域井筒顶部延伸下来的长宽裂缝尖灭,因为此处虽有变形,但水平构造应力没有释放,水平构造应力仍由岩体承受,井筒变形较小。

(4) 未扰动岩体区

未扰动岩体区位于井筒深度 145 m 以下,由于受地下采矿影响可以忽略,井筒无裂缝发育。

7 结 论

(1) 程潮铁矿东主井井区地表水平位移大于垂直位移,距离采空区的距离越近,地表水平位移和垂直位移的比值越小,距离采空区的距离越远,比值越大,是由于程潮铁矿水平构造应力的影响。

(2) 地表变形从南向北逐步扩展,位移方向指向南部采空区,说明地表变形是由地下开采和崩落引起,采空区的存在是控制井区岩体变形的最直接的因素。

(3) 东主井井筒裂缝主要分布在东面和西面,南面和北面基本无裂缝,因采空区在井筒的南面,地下开采引起了地表与深部岩体由北向南的水平位移和南北方向上的不均匀沉降,其中岩体水平位移值与井筒的裂缝计位移值有很好的对应关系,水平位移对井筒的变形破坏起重要作用。

(4) 东主井井区岩体没有出现明显滑动面,随着采矿活动向深部延伸,井区地表与岩体变形将继续加大,但深部岩体累计变形量依旧较小,不会发生整体失稳破坏,采取加固措施后东主井可以继续使用,但必须加强监测。

(5) 东主井井区地表变形 2007-2016 年间经历稳定变形、加速变形、再到稳定变形 3 个阶段,

东主井发生变形破坏,根本原因是地下采矿引起的东区下盘地表与岩体变形远远超出矿山规划设计范围。

(6) 井筒的裂缝分布在深度方向上与井区岩体分区有很好的对应关系,碎裂区井筒裂缝发育,延伸长度往往大于 10 m。破碎过渡带处于悬臂梁弯曲折断部位,此处井筒可见大量水平向展布的压剪裂缝。变形区由于岩体水平构造应力未释放,此区域井筒顶部延伸下来的长宽裂缝尖灭。未扰动岩体区受地下采矿影响可以忽略,井筒未见裂缝。

参 考 文 献

- [1] XIA K, CHEN C, LIU X, et al. Mining-induced ground movement in tectonic stress metal mines: A case study[J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2016, 210(3): 212 - 230.
- [2] 黄平路, 陈从新, 肖国峰, 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 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.
- [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): 138 - 1396.
XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, XIA Tian-you, et al. Analysis of influence of discontinuities on surfacedeformation in eastern area of Chengchao Iron Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 138 - 1396.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 丰定祥, 谷志孟, 陈从新, 等. 程潮铁矿东区地表开裂成因及东主井系统岩基稳定性评价[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.
FENG Ding-xiang, GU Meng-zhi, CHEN Cong-xin, et al.

- Analysis on ground cracks and stability of rocks in East main Shaft area of Chengchao Iron Mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998.
- [7] 赵海军, 马凤山, 徐嘉谟, 等. 金属矿充填开采岩体移动对竖井围岩的变形破坏[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 340 - 348.
ZHAO Hai-jun, MA Feng-shan, XU Jia-mo, et al. Shaft deformation and failure due to rock mass movement induced by underground backfill mining of a metal mine[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(2): 340 - 348.
- [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): 42 - 49.
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] 张鹏, 郭文兵. 香山公司副立井变形预计及加固[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 372 - 376.
ZHANG Peng, GUO Wen-bing. Deformation prediction and reinforcement of the Auxiliary Vertical Shaft in Xiangshan Corporation[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2009, 26(3): 372 - 376.
- [11] BRUNEAU G, TYLER B D B, 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, HUDY M A B 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] 夏开宗, 陈从新, 付华, 等. 金属矿山崩落采矿业引起的岩层移动规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(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, 37(5): 1434 - 1440.
- [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.
- [15] 陈从新, 肖国峰, 黄平路, 等. 程潮铁矿东区东主井和西风井结构安全性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, HUANG ping-lu, et al. Analysis on structural safety of East main Shaft and West Air Shaft and stability of rocks in the eastern area of Chengchao Iron Mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [16] 陈从新, 肖国峰, 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. Analysis on feasibility to continue use East main Shaft and West Air Shaft of Chengchao Iron Mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [17] XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, FU Hua, et al. Mining-induced ground movement in tectonic stress metal mines: A case study[J]. **Engineering Geology**, 2016, 210: 212 - 230.
- [18] 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 Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1421 - 1429.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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: 中国科学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[Ph. D. Thesis D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.