

金属矿充填开采岩体移动对竖井围岩的变形破坏

赵海军^{1, 2}, 马凤山^{1, 2}, 徐嘉漠^{1, 2}, 张亚民^{1, 2}, 郭捷^{1, 2}

(1. 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:采用数值模拟和地质力学分析的方法, 对甘肃金川二矿区地下开采条件下, #14行风井变形破坏问题进行了研究, 研究结果表明: #14行风井位于地下开采引起的岩体移动盆地的拉张区, 受岩体移动变形影响剧烈, 地下开采已经成为了影响竖井安全稳定的主要因素; 无论是富矿开采还是贫矿富矿联合开采, 竖井井壁的位移和应力分布规律大体相同, 其大小与分布特征受断层影响突出, 断层所在的部位仍然是竖井井壁的脆弱部位; 地下开采引起的#14行风井的破坏是以穿过井筒的断层出现活化为触发因素, 以井壁发生错动、破裂、冒落为主要形式的断层效应的集中体现, 这也将成为现阶段生产条件下竖井可能再次发生变形、破坏的模式。

关键词:地下开采; 金属矿山; GPS监测; 断层效应; 岩体移动; 金川镍矿

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)02-0340-09

作者简介: 赵海军(1981-), 男, 博士后, 主要从事工程地质与岩石力学方面的研究工作。E-mail: zhaohaijun0823@126.com。

Shaft deformation and failure due to rock mass movement induced by underground backfill mining of a metal mine

ZHAO Hai-jun^{1, 2}, MA Feng-shan^{1, 2}, XU Jia-mo^{1, 2}, ZHANG Ya-min^{1, 2}, GUO Jie^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The vertical shaft plays an important role in underground tunnel mining mines. However, few attempts have been done on the deformation and failure mechanics of shafts suffering from rock mass movement in metallic mines undergoing mining activities. Numerical simulation methods and geomechanical methods are applied in the study of deformation, failure and stability of the line No. 14 ventilating shaft in Jinchuan No. 2 Mine under the conditions of different kinds of mining design. The results show that the shaft is seated in the scope of the depression induced by the underground mining, and the displacement of rock mass keeps increasing. Therefore the underground mining is the main factor for the safety and stability of the shaft. Moreover, whether mining of the rich ore body or combined mining of the rich ore body and lean ore body, the distribution regularities of displacement and stress of the shaft are similar, and the section of the faults is still the vulnerable zone of the shaft in which it influences the size and distribution of the displacement and stress greatly. Consequently, it is the faults which cross the shaft and lead to reactivation due to underground mining are the trigger factor, and the rock mass movement, rupture and fall are the primary form of the shaft deformation and failure mechanism, and this kind of fault effects will be aroused again in the future under the present circumstances of mining.

Key words: underground mining; metal mine; GPS monitoring; fault effect; ground movement; Jinchuan Nickel Mine

0 引言

由地下开采岩体移动、变形而导致的矿山竖井变形、破坏问题近年来逐步受到重视, 据调查统计资料表明, 目前中国已有十多个大中型矿山竖井井筒受开采影响而产生变形和破坏, 仅充填矿区自 1995 年 6 月以来相继就有 8 个竖井井筒发生破裂事故, 另有 3 个井筒在濒临破坏前采取了防治措施, 井筒破裂所造成的经济损失达数亿元^[1-9]。由于工程地质条件的复杂

性和采矿工程的差异性, 对竖井井筒破坏机理研究还不够完善, 而且目前的研究多集中在煤系地层中的竖井破坏问题, 对于构造成因的、受采动影响发生岩移的金属矿山竖井的变形、破坏机理研究较少见。随着对有色金属需求的猛增和矿山竖井破坏的增多, 进行

基金项目: 国家自然科学基金项目(41002107, 40972197, 41030750);
中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-Q03-02)
收稿日期: 2010-10-29

专门针对构造成因的金属矿山竖井的变形、破坏机理的研究就显得十分必要。

金川矿山是中国最大的镍、钴、铂族金属等有色金属生产基地, 在有色金属系统具有举足轻重的作用。金川矿山地质条件复杂, 构造发育, 矿岩破碎, 地应力较高, 工程岩体稳定性极差, 开采难度之大, 为全国之最^[10-11]。建矿几十年来, 针对开采过程中存在的问题, 开展了一系列的研究。2005年3月金川二矿区14行风井突然垮塌, 地表以下170 m到276 m井壁严重破坏, 甚至一度出现无完整井壁的重大灾害事故, 造成了巨大的经济损失。

事故发生后, 对竖井又重资进行返修加固, 2007年1月对返修后的新井筒调查时发现, 在井筒上部又出现了两条较大的近水平的裂缝, 而此时二矿区正计划对#1矿体1250 m水平以上的贫矿(主要是在一期工程开采过程中根据“采富保贫”的开采方针, 保留下来的1250 m水平以上矿体上盘的贫矿, 1332 m水平以上富矿体上覆的贫矿及少量富矿)进行大规模开采(生产规模为2000 t/d, 66万t/a)。无论是保持目前的富矿开采还是贫矿和富矿联合开采后竖井的安全或稳定性再次成为矿山生产和科研上的一个重要问题。因此, 地下开采影响下竖井围岩的变形、破坏与稳定性研究对矿山实际安全生产意义重大。

1 竖井工程地质条件

二矿区#14行竖井位于矿体下盘, 直接穿过井筒的围岩可分为4个主要工程地质岩组, 即超基性岩组、花岗岩组、大理岩组和混合岩组。各岩组的岩性、岩体结构及构造特征如下:

(1) 1717.00~1510.00 m(0~207 m), 为超基性岩(Σ): 以二辉橄榄岩、含辉及辉石橄榄岩为主, 中粗粒结构, 块状构造, 风化、蚀变强烈。并且在F207断层以上还有3条小断裂。

(2) 1510.00~1489.20 m(207~227.8 m), 为超基性岩与花岗岩接触带, 并且在此接触带发育一断层。断层破碎带厚10 m, 井筒与断层破碎带实际交会段长度近20 m左右。断层破碎带主要由二辉橄榄岩、花岗岩、大理岩组成, 并含水, 为对竖井稳定性很不利的一个工程地质条件, 断层产状为S33°E∠58°。

(3) 1489.20~1043.00 m(227.8~674 m), 为肉红色花岗岩夹有超基性岩、大理岩及混合岩。该段岩体为14行风井的主要围岩。由长石、石英等矿物组成, 为镶嵌结构。

(4) 1043.00~1039.50 m(674~677.5 m), 辉绿岩破碎带, 节理发育, 散体结构, 每米约11条节理。

(5) 1039.50~1003 m(677.5~714 m), 为F16断层影响带, 岩性较破碎, 局部为粉砂状。

(6) F16北东东向压扭性断层, 倾向南10°~20°西, 倾角70°左右。在井筒底部1000 m中段、井底距F16断层推测位置约90 m, 若考虑断层影响带宽度达40~50 m, 可能此处距F16断层影响带只有40 m左右, 该段井筒工程地质条件较差。

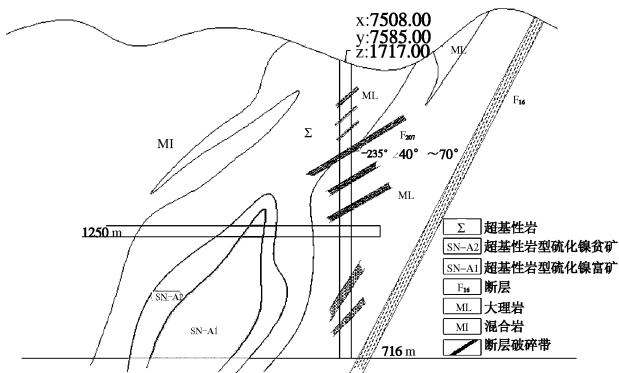


图1 二矿区#14行风井位置及其工程地质概况示意图

Fig. 1 Location and engineering geological conditions of No. 14 ventilating shaft in Jinchuan No. 2 Mine

2 影响竖井围岩稳定性的因素分析

影响竖井围岩稳定性的因素很多, 大体上可以分为地质因素和非地质因素两种类型。地质因素是影响竖井围岩变形和稳定的决定因素, 主要包括竖井围岩的初始应力状态、地质构造特征、岩体结构状态、岩石的基本性质和地下水的状态等。非地质因素是通过地质因素的作用而起作用的因素, 主要包括地下开采、井筒尺寸、支护措施、时间条件等。

通过对影响二矿区#14行风井稳定性的诸多因素的分析认为, 竖井围岩的地质构造特征和地下开采活动是影响竖井稳定性的关键因素, 前者为竖井稳定性的内因, 后者是促使竖井发生变形、破坏的外因。

竖井围岩的地质构造特征的影响主要是指穿过井筒的断层弱面和断层破碎带。在这种情况下, 井筒围岩变形大、稳定性差是竖井工程不良地质地段。对于#14行风井, 主要是指穿过井筒的断层F207以及F207上部的3个小断裂破碎带和下部超基性岩与花岗岩接触的两个主要断层破碎带, 和竖井底端附近的两个主要的岩性接触破碎带。

地下开采对竖井稳定性的影响主要是指地下采动引起的岩体移动、变形和破坏作用。根据GPS监测结果^[12-13], 大规模的地下开采已经导致了二矿区大范围和大幅度的地表岩体移动。2001年5月到2008年11月的GPS监测结果表明, 在二矿区已经形成了一个较大的沉降区域, 沉降中心最大沉降量达到了1287.5

mm。从沉降立体图(图2)上可以看出, #14行风井位于采动引起的沉降盆地的边缘拉张区, 距沉降中心约340 m。在自2001年5月—2008年11月期间, 坚井位置地表产生了470 mm的沉降量, 水平位移量达到了226 mm(图3)。从平面位移矢量图上看(图4), 地下开采后, 在采掘区周围, 监测点平面位移矢量方向均指向采掘区, 矢量的大小随监测点位距位移中心的距离而变化, 距采掘区近的测点位移量大, 距采掘区较远的测点位移量小, #14行风井位于平面位移矢量较为显著的位置。

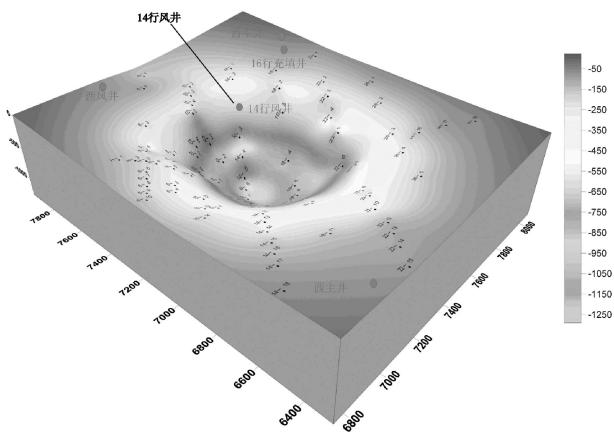


图2 二矿区GPS监测地表沉降立体图

Fig. 2 Stereogram of ground settlements

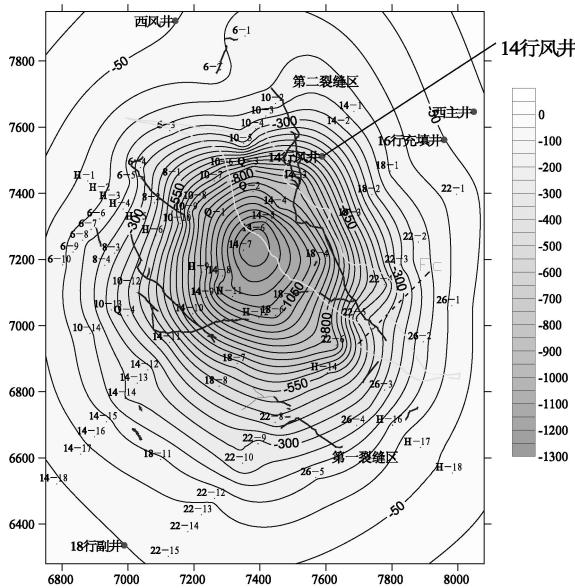


图3 二矿区GPS监测水平位移等值线分布图

Fig. 3 Contour map of horizontal displacements

在地表岩移非连续性变形、破坏方面, 随着地下开采规模的加大, 以地裂缝为宏观特征的地表破坏问题日益突出。在地表岩移问题出现后, 2000年3月—12月兰州有色冶金岩土工程公司对二矿区地表裂缝进行了实测, 共测量裂缝35条, 裂缝分布较分散, 贯通趋

势不明显, 裂缝宽度在20~30 cm, 大部分裂缝主要分布在矿体的上盘。近两年发现地表裂缝发生了较大变化, 几条大的裂缝在上下盘沿矿体走向趋于贯通, 开裂的宽度明显变大延伸加剧, 波及的范围更加广泛。图5为二矿区#14行风井附近出现的山体裂缝照片(图5(a)裂缝宽度1.1~1.4 m, 图5(b)裂缝带宽度2~3 m), 从图5中可以看到, 在裂缝发育带, 地表山体呈现撕裂、塌落等现象。

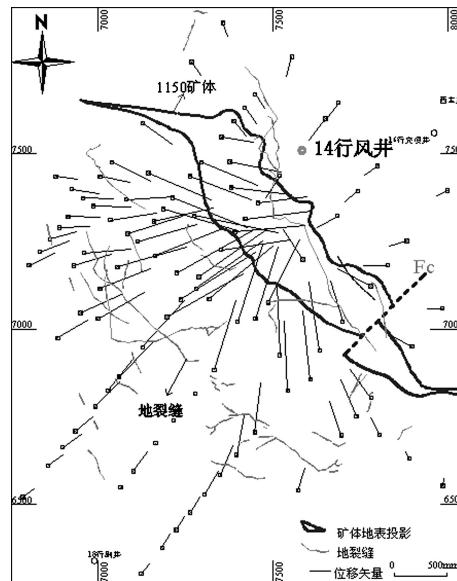


图4 金川二矿区地表岩移监测点平面位移矢量图

Fig. 4 Diagram of horizontal displacement vectors



图5 二矿区#14行风井附近地裂缝

Fig. 5 Photographs of ground fissures near No. 14 shaft

综上, 地下开采引起的岩体移动、变形和破坏对坚井的稳定性已经产生了较为严重的影响, 地下开采成为了坚井围岩发生移动、变形和破坏的主要因素。

3 地下开采对竖井稳定性影响的三维数值模拟

3.1 数值计算模型的建立

根据坚井的工程地质条件, 做必要的简化得到剖面模型。根据地质资料分析, 岩体主要的结构面主要

考虑矿体右侧下盘位置存在的 F₁₆ 断层, 在与竖井相交的结构面中, 主要考虑了在 1510 m 水平的 F₂₀₇ 断层, 以及上部的 3 个小断裂破碎带和下部超基性岩与花岗岩接触的两个主要断层破碎带, 并在竖井下端考虑了两个主要的岩性接触破碎带。选用 FLAC^{3D} 有限差分软件, 在建立数值计算模型时, 断层与岩性接触破碎带均采用实体单元来模拟。

为建立计算所需的力学模型, 以竖井为中心, 剖面计算域的上边界取至地表, 下边界取到地表以下 800 m 水平; 为了消除过近的边界影响, 左右边界向外扩展一定的距离, 总长 2500 m, 沿矿体走向取 100 m 厚。同时根据前期概化模型的试算结果显示, 剖面的地表形态对模拟结果的影响非常小, 可以忽略不计。因此, 在模型建立时, 将地表简化成水平面。最终建立的计算模型示意图如图 6 所示, 尺寸为 2500 m×950 m×100 m。并经过反复试算, 在这一尺寸下, 边界影响小到可以忽略。

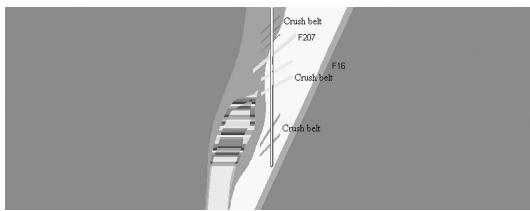


图 6 数值分析模型横剖面逻辑块体分布图

Fig. 6 Cross-section of numerical model and division of groups

3.2 约束条件和初始条件

计算模型除地表面设为自由边界外, 模型底部约束垂直位移, 其它边界均约束水平位移。根据高地应力判别标准, 矿区基本上属于中高—超高地应力范围。在地表附近, 最大水平主压应力约为 3 MPa 左右。应力随深度增大而增大, 在 200~500 m 深度最大主压应力值一般为 20~30 MPa, 最高实测值 50 MPa。矿区地应力随深度变化的计算经验公式^[14]: $\sigma_1 = 3.0 + 0.045h$, $\sigma_2 = 3.0 + 0.027h$, $\sigma_3 = \gamma h$ (MPa)。

3.3 岩体力学参数的选择

本次三维数值计算将岩组简化为富矿、贫矿、含矿超基性岩、大理岩、混合岩、断层带和其他类小破碎带, 将竖井的返修加固的喷锚网、锚杆、混凝土衬砌等整体简化为 3 m 厚的加固带, 辅以相匹配的参数以适应数值计算的要求。分析类型采用大变形模式, 材料为理想弹塑性, 本构模型为 Mohr-Coulomb 准则。参数选取依据以往岩石力学测试结果, 实际变形破坏状态及 GPS 岩移监测结果, 经多次反演计算而确定, 计算结果与实测基本符合。岩组类型及参数见表 1。

3.4 计算方案的选取

计算时, 首先在前面约束条件下生成初始应力状

态, 并对位移场和速度场清零, 为后续的开挖计算做好准备工作。

表 1 岩组类型及参数

Table 1 Parameters for numerical simulation

岩性	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
混合岩	30.0	2.5	0.26	2.0	44	2.0
富矿	29.3	2.2	0.26	1.6	42	0.6
贫矿	28.0	2.0	0.26	1.0	40	0.3
超基性岩	29.3	2.3	0.25	1.0	42	0.6
大理岩	30.0	2.5	0.25	2.0	44	2.0
F ₂₀₇ 断层带	25.0	0.3	0.28	0.3	33	0.3
F ₁₆ 断层带	28.0	0.8	0.27	0.6	36	0.3
其它破碎带	25.0	0.4	0.28	0.3	33	0.3
加固带	30.0	10.0	0.22	3.0	42	5
充填体	20.0	0.2	0.28	0.2	42	0.2

其次, 在初始应力场的条件下, 进行竖井的开挖和加固计算, 形成竖井开挖后的二次应力场, 再次仅将位移场清零, 即在后面矿体开采时不考虑前期竖井开挖本身产生的位移量。最后, 根据二矿区地下开采的进度和开采工艺, 采用将 1328~1250 m 的富矿进行分层、分步单中段下向开采充填。到 1250 m 水平后, 开始进行双中段开采, 即同时从 1150 m 水平下向开采, 当上部开采到目前的 1160 m 水平时, 采用两种工况计算, 一种是贫矿和富矿一起联合开采, 另一种是继续只开采富矿, 贫矿不开采。两种工况下富矿均开采到 980 m 水平。

3.5 计算结果与分析

为了使计算结果既能体现贫矿在矿体开采过程中对竖井稳定性的影响又能反映地下开采对竖井稳定性的影响, 在对上面数值模拟的计算结果整理时, 将贫矿富矿联合开采与只开采富矿这两种工况下的井壁位移、应力等结果放一起进行对比分析。

(1) 竖井位移分析

图 7,8 是贫矿和富矿联合开采和只开采富矿两种情况下的沿井筒轴向井壁单元的水平位移和竖直位移分布图(纵坐标轴斜条代表穿过井筒的断层和岩性接触带, 下同)。从图 7,8 上可看出以下 2 方面的特点:

a) 两种工况下, 沿井筒轴向井壁水平位移和竖直位移分布规律相似。两种开采条件下, 竖井井筒中上部水平位移较小, 中下部靠近采空区方向相对增大; 沉降位移分布越靠近井筒上部, 井筒沉降量越大。此外, 与单纯开采富矿相比, 贫矿和富矿联合开采后竖井井壁的水平位移分量增幅比较大, 特别是在井深 100~570 m 增幅在 50% 左右, 在竖井顶底两端增幅略小于中间部分。在井壁单元的竖直位移方面, 贫矿开采后对竖井井壁竖直位移影响比较突出, 在井深 0~300 m 竖井井壁的竖直位移分量增幅在 15% 左右, 在

井深400~550 m增幅在50%左右。可见贫矿开采后使得井壁的水平位移和竖直位移分量在不同的位置都得到了增大。

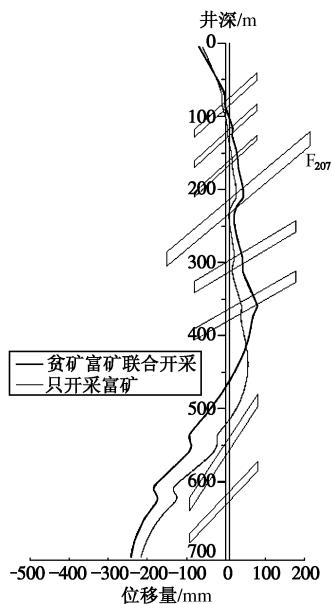


图7 沿井筒轴向井壁水平位移分布图

Fig. 7 Horizontal displacement of sidewall along shaft axis

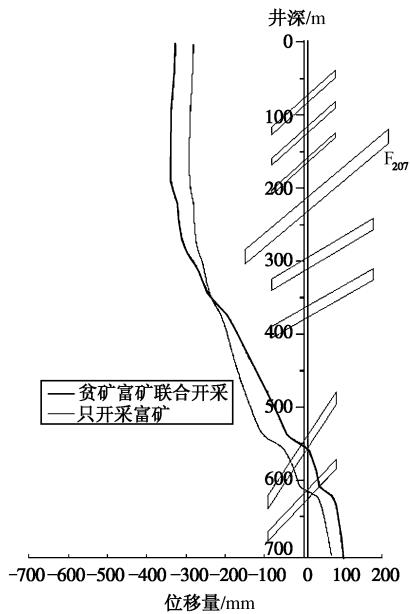


图8 沿井筒轴向井壁竖直位移分布图

Fig. 8 Vertical displacement of sidewall along shaft axis

b)从井壁位移分布和断层破碎带与岩性接触带的分布对应情况看，竖井井筒位移的分布与断层破碎带和接触带的分布具有明显的相关性，表现在在断层带和接触带处，位移分布的连续性较差。在上部F₂₀₇断层上下几个小断层破碎带分布之处，即井深100~460 m井壁差生了向井筒内的正位移，尤其是F₂₀₇断层下部的两个小断层破碎带处，位于井深300~410 m产生的向井筒内部的位移最大。在井筒下部的两个小的

断层破碎带处，井壁的水平位移指向采空区（负值），受断层破碎带影响断层上盘水平位移大于下盘，造成水平位移分布曲线出现扭曲状。在竖直位移分布上，井筒上部断层效应不太明显，但是在井筒下部的两个小断层破碎带处，即550~650 m处竖直位移分布曲线发生明显的阶梯状分布。可见在开采过程中，断层和接触带的存在对竖井井壁位移分布的连续性存在较大的影响。

(2) 竖井应力分析

图9、10是贫矿和富矿联合开采和只开采富矿两种情况下的沿井筒轴向井壁单元的水平应力和剪应力分布图。从图9、10中可以看出以下2方面的特点：

a)从整体上看，两种开采条件下，竖井井壁的水平应力和剪应力分布规律相似。井筒在浅表位置水平应力值较大，而在中间位置受剪应力值较大。两种开采条件下，水平应力和剪应力相差较小，说明井壁水平应力和剪应力的变化受富矿开采的影响较大，增加贫矿的开采对竖井井壁的应力影响并不是很突出，

b)从井壁应力分布特征看，受到开采影响，竖井井壁水平应力均指向开采区，说明开采作用使得竖井井壁产生了一定的附加水平应力，并且受采动影响，竖井井壁不同高程处的剪应力分布也发生了一定的变化。此外，水平应力和剪应力的分布特点与断层破碎带和岩性接触带的分布具有很好的对应关系，表现在断层带和接触带处，井壁的水平应力和剪应力突然增大，形成几处明显的应力高值区，水平应力和剪应力都较高，井筒极易在这部位发生破坏。因此，在竖井井壁应力分布方面，断层和接触带的存在导致竖井井壁应力在分布上出现明显的不均匀性，增加了井壁破坏的风险。

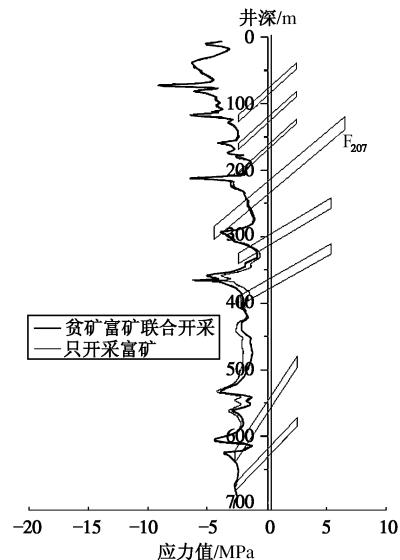


图9 沿井筒轴向井壁水平应力分布图

Fig. 9 Horizontal stress of sidewall along shaft axis

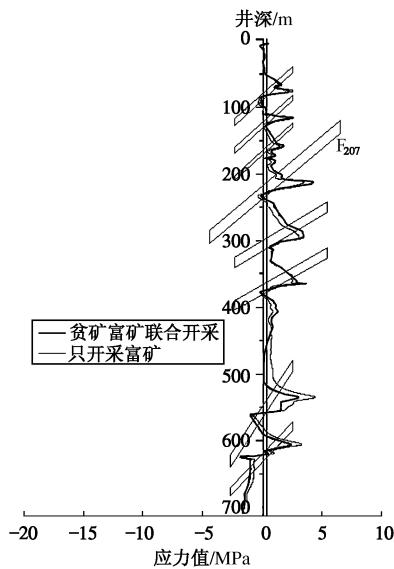


图 10 沿井筒轴向井壁剪应力分布图

Fig. 10 Shear stress of sidewall along shaft axis

图 11 是贫矿和富矿联合开采和只开采富矿两种情况下的沿井筒轴向井壁单元差应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 分布图。从图上可以看出, 竖井井筒中下位置井壁单元差应力较大, 而整体上两种开采条件下井壁单元的差应力差别不大。断层破碎带与接触带的分布对差应力的分布具有显著的影响, 表现在断层破碎带分布的地方差应力增高, 尤其是在井深 200~400 m 断层破碎带分布的部位差应力较大, 导致井壁破坏的可能性增高。

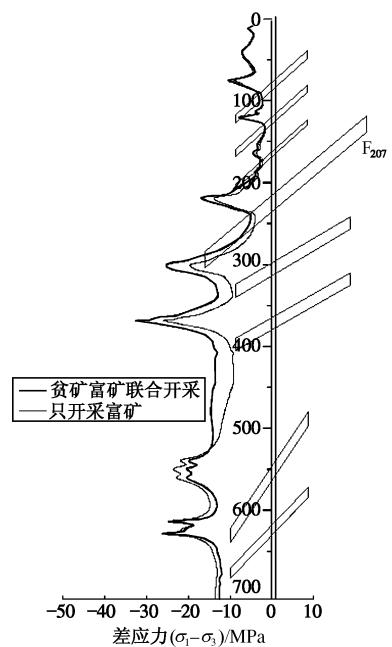


图 11 沿井筒轴向井壁单元差应力分布图

Fig. 11 Differential stress of sidewall along shaft axis

(3) 基于三维数值计算的竖井稳定性评价

通过对上述数值模拟结果的分析, 开采对竖井的影响可以概述如下:

a) 富矿开采或是贫矿富矿联合开采, 竖井井壁的水平位移分量和竖直位移分量都会发生显著增大, 尤其在断层破碎带处, 水平位移增幅较大。

b) 贫矿与富矿联合开采后竖井井壁的水平应力、剪应力和差应力的分布和大小与单纯开采富矿时相比整体涨幅不大, 同样沿井壁应力分布受断层分布影响明显, 说明对竖井井壁应力变化的影响还是以富矿的开采影响为主, 断层与井筒交汇的部位仍然是竖井井壁可能出现问题的部位。

c) 贫矿开采后对竖井的影响总体上是增加了竖井破坏的风险, 尤其是已经发生破坏处的竖井井壁的位移仍然较大。贫矿的开采并没有改变竖井今后可能发生变形、破坏的模式, 穿过竖井井筒的断层破碎带仍然是竖井围岩可能最先发生破坏的部位。

4 竖井发生变形、破坏的机理分析

在实际的工程中, 常遇到很多竖井位于地下采动影响区内, 在采动影响下, 竖井的变形和破坏主要表现为下面四种情况^[15-17]: ①井筒沿轴向的挤压或拉伸变形; 这种变形主要是由于岩层在竖直方向上下沉不等而引起的。②井筒中心线的偏斜与弯曲。这种变形是因为不同深度上, 水平移动量不等造成的。当采区位于井筒的一侧, 或者在井筒两侧不对称开采时, 岩层移动波及到井筒位置, 井壁将跟随围岩而移动, 原来是垂直的井筒中心线将发生位移和偏斜, 偏斜的方向一般指向采区的几何中心。③井壁错动。造成井壁错动的原因有两种: 一是由于在采动影响下, 上覆岩层弯曲而引起的岩层沿层面的滑移致使井壁剪切错动, 另一种是由于岩体沿软弱层面的滑动而引起的井壁错动。④水平挤压破坏。水平挤压破坏一般发生在围岩为软弱岩层的井壁处, 主要是软弱岩层受压横向膨胀所致。

当竖井位于开挖引起的岩移范围内时, 如果岩移较为剧烈, 竖井会发生较大规模的破坏。但是工程中有些竖井的破坏并非如此, 破坏往往出现在一些“特殊”部位, 而其它部位未发生破坏。研究发现, 这些竖井的“特殊”部位都有断层发育, 正是由于在采动影响下岩体沿断层面等软弱面的滑动引起了井壁错动, 并最终导致了井筒的破坏。近年来, 不少矿区因受采动影响而发生了穿过断层的竖井破坏的灾害, 如辽源局西安竖井、阳泉局四矿中央风井、淮南局大通矿七号井、北票局台吉矿竖井等等, 井筒破坏均不同程度的表现为穿过断层处井壁发生断裂、错动。井壁的断裂和错动将严重威胁矿井的安全生产。

鉴于#14行风井特殊的位置(岩移范围内)、变形、

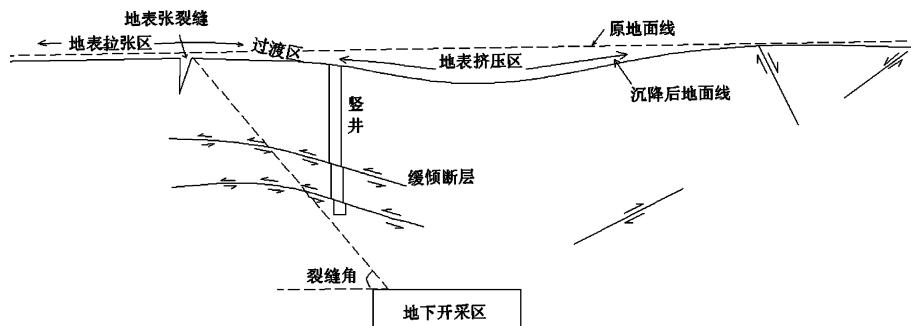
图 12 地下开挖引起断层错动使竖井壁错开^[18]

Fig. 12 Fault movement and vertical shaft stagger caused by underground mining

表 2 受断层影响而破坏的矿山竖井^[2]

Table 2 Statistical data of destroyed vertical shafts influenced by fault effects

矿井名称	破坏情况	备注
辽源局西安竖井	井壁在深 184~209 m 产生错动, 在 212 m 附近产生错碴	井筒在深 184~209 m 穿过断层
阳泉局四矿中央风井	井壁在 11.9 m 处产生裂缝, 在深 42 m 处错动	井深 11.9 m 为第三纪坡积物, 42 m 处穿过 1 号断层
淮南局大通矿井七号井	井深 160~170 m 形成破碎带, 压缩变形达 17.4 mm/m	急倾斜开采, 井深 150~170 m 穿过断层
北票局台吉矿竖井	井筒产生偏斜	急倾斜多煤层开采, 井筒穿过断层
淮南局谢二矿主副井	副井井壁在深 84~94 m 处产生裂缝, 井筒向西南偏斜, 主井井壁在深 160 m 处产生裂缝	副井在深 84~94 m 处, 主井在深 160 m 穿过 F ₁₆ 断层

破坏历史(2005 年井筒上部的严重坍塌返修)和前述三维数值模拟分析的结果, 可以得出二矿区#14 行风井的发生变形、破坏的机理应该是以穿过井筒的断层出现活化为诱发因素, 以井壁发生错动、破裂和冒落为主要形式的断层效应的集中体现。井筒不同高程竖直位移和水平位移的差异性只是促进或增强了井筒出现破裂的断层效应的可能性和所显现的剧烈程度。

断层的存在破坏了岩体的连续性, 当断层位于开采影响范围内时, 断层常常会破坏岩体变形协调条件。在开挖条件下, 断层的存在与非开挖条件下断层只是作为基本不变的工程地质条件不同。当开挖引起断层活化时, 它对井巷围岩变形和破坏的影响更为强烈, 破坏作用更大。当断层处剪应力超过其抗剪强度时, 断层就会发生活化, 发生错动。当断层以一定厚度的破碎带出现时, 在断层带内, 破碎物质结构面间的摩擦制动力作用在岩体移动、变形影响的趋势下将会逐渐失效, 当断层与竖井相交时, 这些部位最容易出现竖井井筒变形、破裂甚至错断的现象(如图 12)。表 2 给出了不同矿山的竖井在开采过程中受断层影响而破坏的实例。

通过以上分析, 可得二矿区#14 行风井井筒可能发生变形、破坏的位置及发生方式的机理, 如图 13 所示。

从图 1 中可以看到, 在穿过竖井的岩体类型中, 发育较多的软弱破碎带, 其中断层 F₂₀₇ 发育比较显著,

在工程现场比较好识别, 在 F₂₀₇ 上部有 3 个大的破碎带, 下部有两个小断层破碎带, 而且在井底端也发育两个破碎带。地下开采引起岩体移动、变形, 首先会在断层及断层破碎带处发生剪切错动, 引起断层活化, 并且在持续甚至是愈加强烈的采动影响下, 断层活化段的长度将逐渐增大, 最终使得断层上盘相对下盘发生较大幅度的正断层性质的错动, 造成竖井围岩及井筒被剪断、破坏。

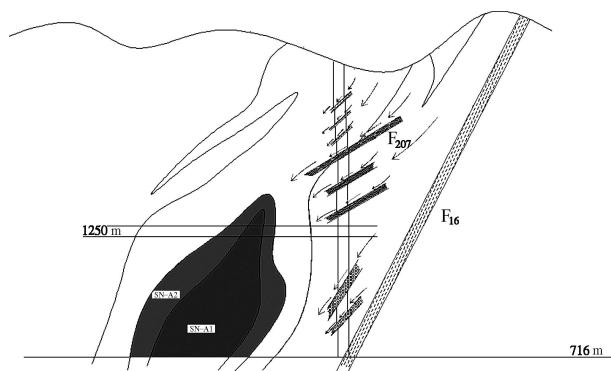


图 13 采动引起的断层活化效应对#14 行风井的破坏机理

Fig. 13 Mechanism of fault reactivation on shaft induced by underground mining

在竖井中上段的断层 F₂₀₇上下一定区域(即地表以下 207 m 水平上下一定范围), 鉴于竖井位于采动引起岩移的危险区内, 水平位移和竖直沉降都比较大, 并且断层发育相对密集, 因此, 受采动影响, 这些部

位是最有可能发生井壁错断、破坏的位置。在 2005 年#14 行风井运行过程中出现地表以下 170~276 m 井筒破坏甚至一度出现无完整井壁的重大灾害事故, 也从侧面证明了上述灾害成因机理解释的正确性, 而目前考虑的竖井的稳定性研究, 其实关键问题还是这些穿过竖井的断层弱面及断层破碎带的稳定性问题, 若不采取更合理、更可靠的处理措施, 依目前的采矿进度和采掘能力, 未来竖井可能发生的变形、破坏必然仍与竖井围岩发生移动、变形的断层效应有关。

5 结 论

(1) 金川二矿区地下开采已经引起了矿区地表大范围的岩体移动和变形, 长期的监测表明二矿区#14 行风井已经位于矿区岩移盆地边缘拉张区, 受岩体移动变形影响剧烈, 地下开采影响已经成为了竖井安全稳定的主要因素。

(2) 无论是富矿开采还是贫矿富矿联合开采, 开采后竖井井壁的水平位移分量和竖直位移分量都会发生明显的增大。贫矿开采后没有改变竖井井壁位移和应力的分布规律, 这也说明对竖井井壁应力变化的影响还是以富矿的开采影响为主, 贫矿的开采总体上是增加了竖井破坏的风险。

(3) 地下开采后竖井井壁的位移、应力大小与分布特征受断层分布影响突出, 断层所在的部位仍是竖井井壁的脆弱部位, 也是竖井未来可能再次发生变形破坏的部位。

(4) 金川二矿区#14 行风井的稳定性问题, 其实质是穿过竖井的断层弱面及断层破碎带的稳定性问题。#14 行风井的破坏是以穿过井筒的断层出现活化为触发因素, 以井壁发生错动、破裂、冒落为主要形式的断层效应的集中体现。依目前的采矿进度和采掘能力, 未来竖井可能发生的变形、破坏从机理上说必然是与竖井围岩发生移动变形的断层效应有关。

(5) 矿山竖井的选址, 在考虑地质和采矿工程因素的同时, 应充分考虑采动影响条件下的可能存在的安全和稳定问题。在经济效益和安全稳定方面, 应充分结合实际工程情况, 尽量选址在受采动影响较弱的矿体下盘, 并且将其布置在移动盆地之外一定范围, 即, 经济上和安全性上都可容忍范围内。而当矿山竖井已深受采动影响之害时, 应积极改善一些采矿技术措施, 以减少岩体移动变形对竖井稳定性的影响, 并加强竖井变形监测工作, 避免突发事故。

参考文献:

[1] 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 towers in luhong mining areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 74~78. (in Chinese))

- [2] 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 1): 59~75. (MENG Fan-sen, ZHENG Qing-xue, YANG Zhong-dong. Shaft deformation monitoring and regulation[J]. Coal geology of China, 2004, 16(S1): 59~75. (in Chinese))
- [3] 王剑. 程潮铁矿东区地表塌陷规律及东主井错动机理[J]. 金属矿山, 2006(4): 7~18. (WANG Jian. Study on law of east district in Chengshao iron mine and displacement mechanism of main east shaft[J]. Metal Mine, 2006(4): 7~12. (in Chinese))
- [4] 郑爱珍. 井巷工程破坏原因分析与防护[J]. 中国矿业, 2002, 11(6): 68~69. (ZHENG Ai-zhen. Reasons for breakage of ground stopes and gangways and their protection[J]. China Mining Magazine, 2002, 11(6): 68~69. (in Chinese))
- [5] 毕思文, 王思敬, 杨志法. 煤矿竖井变形破坏三维数值模拟[J]. 建井技术, 1997, 18(4): 35~37. (BI Si-wen, WANG Si-jing, YANG Zhi-fa. Three dimensional numerical simulation of coal shaft [J]. Building Technique of Shaft, 1997, 18(4): 35~37. (in Chinese))
- [6] BRUNEAUA G, TYLERB 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.
- [7] BRUNEAUA G, HUDYMA B M R, HADJIGE ORGIOUA 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.
- [8] 李文平. 深厚表土层中煤矿立井破裂研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000. (LI Wen-ping. Study on coal shaft rupture of deep topsoil layer[M]. Xuzhou: Publishing house of China University of Mining & Technology, 2000. (in Chinese))
- [9] 张文泉, 卢玉华, 宫红月, 等. 兖滕矿区立井井壁损坏的原因分析及防治方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1977~1980. (ZHANG Wen-quan, LU Yu-hua, GONG Hong-yue, et al. Causes analysis of shaft wall damage in Yan-Teng mining district and its prevention and controlling method [J]. Rock and soil mechanics, 2004, 25(12): 1977~1980. (in Chinese))
- [10] 刘同有. 金川岩石力学与工程地质的研究[J]. 岩石力学与

- 工程学报, 1996, **15**(2): 97 - 101. (LIU Tong-you. On rock mechanics and engineering geology in Jinchuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(2): 97 - 101. (in Chinese))
- [11] 金铭良. 金川镍矿的大面积开采稳定性分析与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **14**(3): 211 - 219. (JIN Ming-liang. Stability analysis of large area mining and the countermeasures in Jinchuan nickel mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **14**(3): 211-219. (in Chinese))
- [12] 马凤山, 李晓, 路世豹, 等. 金川二矿区地表变形 GPS 监测及分析[M]// 工程地质力学研究. 北京: 地质出版社, 2004: 115 - 134. (MA Feng-shan, LI Xiao, LU Shi-bao, et al. Ground movement and deformation monitoring by GPS in Jinchuan No. 2 mine[M]// Engineering Geomechanics Research. Beijing: Geology Press, 2004: 115 - 134. (in Chinese))
- [13] 马凤山, 袁仁茂, 邓清海, 等. 金川矿山地表岩移 GPS 监测及岩体采动影响规律[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(增刊 2): 84 - 97. (MA Feng-shan, YUAN Ren-mao, DENG Qing-hai, et al. GPS monitoring of ground movement and mechanism of underground mining influence in Jinchuan mine[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(S2): 84 - 97. (in Chinese))
- [14] TIAN Y S, ZHANG W. Engineering geological characteristics and rheological properties of rock mass in Jinchuan Nickel Mine[C]// Proc 8th Cong Inter Soc On Rock Mechanics A A Balkema, 1995: 9 - 12.
- [15] 隋惠权, 刘文生, 范学理. 受开采影响煤矿立井损坏的分类与评价[J]. 阜新矿业学院学报, 1996, **15**(2): 182 - 184. (SUI Hui-quan, LIU Wen-sheng, FAN Xue-li. The Classification and evaluation of shaft damage due to mining effect[J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science Edition), 1996, **15**(2): 182 - 184. (in Chinese))
- [16] 米延华, 宋江渝, 隋惠权. 矿山立井采动变形损坏特征及检测技术[J]. 中国计量学院学报, 2005, **16**(3): 247 - 250. (MI Yan-hua, SONG Jiang-yu, SUI Hui-quan. Study on the mine shaft deformation and surveying method [J]. Journal of China Institute of Metrology, 2005, **16**(3): 247 - 250. (in Chinese))
- [17] 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**(S2): 3926 - 319. (in Chinese))
- [18] 徐嘉漠, 李毓瑞, 马凤山, 等. 金川矿山边坡岩体工程地质力学[M]. 北京: 地震出版社, 1998. (XU Jia-mo, LI Yu-rui, MA Feng-shan, et al. Engineering geomechanics of slope rockmass in Jinchuan Mine[M]. Beijing: Earthquake Press, 1998. (in Chinese))