

金川二矿区垂直矿柱的屈服破坏过程

马崇武¹, 慕青松²

(1. 东莞理工学院建筑工程系, 广东 东莞 523808; 2. 兰州大学土木工程与力学学院力学系, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 金川二矿区 2 号矿体采用大面积不留矿柱回填采矿法, 存在 1150 标高之上的采矿平面和 1150 标高之下的采矿平面, 其间的矿体被称为水平矿柱。水平矿柱之上和水平矿柱之下, 都按矿体走向从东到西划分为七个机械化盘区。水平矿柱之下靠近东部的三、四盘区的分界线上, 预留了宽度约 20~30 m 的垂直矿柱, 用来支持水平矿柱。2004 年, 垂直矿柱的高度已经达到 50 m, 矿区亟待论证未来向下采掘中是否有必要继续预留垂直矿柱。通过建立三维有限元弹塑性力学模型, 模拟计算了采矿过程中水平矿柱和垂直矿柱中应力场和变形场的发展变化过程。结果显示, 垂直矿柱中的塑性屈服破坏过程开始于矿柱中央, 然后蔓延扩展到矿柱的顶部和底部, 2005 年的垂直矿柱已经基本上整体进入屈服破坏状态。根据研究结果, 认为已经屈服破坏的垂直矿柱对水平矿柱和上下盘围岩的支持作用将衰减, 其存在与否, 不会对矿区大范围内的应力场和变形场分布规律造成显著影响, 所以建议二矿区在未来开采中不再继续预留垂直矿柱。

关键词: 构造应力场; 垂直矿柱; 水平矿柱; 屈服破坏

中图分类号: TD322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0459-05

作者简介: 马崇武(1965 -), 男, 甘肃甘谷人, 博士, 教授, 主要从事岩土力学、环境与工程中的力学问题研究。E-mail: macw@dgut.edu.cn。

Yield failure process of vertical jambs in Jinchuan No. 2 Mine Area

MA Chong-wu¹, MU Qing-song²

(1. Department of Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 2. Department of Mechanics, School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In Jinchuan No. 2 Mine Area, the backfilled mining in large hypogeal area without jambs have resulted in the two mining levels at two different altitudes, respectively above and under the altitude of 1150 m, and the ore-body between them is called a horizontal jamb. Each of the two mining levels is distinguished seven mechanized panels along the lode from east to west. Under the altitude of 1150 m, between the third and the forth panel on the down mining level, a vertical jamb 20~30 m in width in the lode direction isn't mined for preventing the horizontal jamb from submergence. The vertical jamb in 2004 has already reached 50 m in height, the mine engineers wondered whether or not the vertical jamb would be allowed to become higher without mining in the future. A three-dimensional finite element mechanical model is established to simulate the yield failure process of the horizontal and vertical jambs within the changed tectonic stress field caused by continuous mining. The results indicate that the yield failure process begins at the centre, and then spreads to the top and the bottom within the vertical jamb, and in 2005, almost all part within the vertical jamb attains the failure situation. Based on the simulated results, it is considered that the support effects of the vertical jamb on the horizontal jamb and on the hanging wall and footwall rocks will gradually weaken because of the failure of the vertical jamb. Because the failure of the vertical jamb cannot evidently affect the distribution of the tectonic stress field in the mine area, it is suggested that the vertical jamb should be canceled on the down mining level in the future deeper exploitation besides the upper existent part.

Key words: tectonic stress field; vertical jamb; horizontal jamb; yield failure

0 引 言

金川矿区的现代构造应力场, 追踪继承了中国西北地区扇形辐射状地应力场的基本特征。最大主应力和最小主应力基本位于水平面内, 中间主应力基本位

于竖直方向上。最大水平主应力位于北北东方向上,

基金项目: 金川集团有限公司重大科技攻关资助项目(金科矿 2004-02A)

收稿日期: 2013-06-18

并与金川矿区断裂系统的形成历史及其分布现状相适应^[1-4],大体正交于北西西走向的逆冲型断裂系统。最大主应力约为中间主应力的二倍,中间主应力的大小与最小主应力差不多。

二矿区采用大面积不留矿柱回填采矿法^[5-10],用水泥沙浆回填,并按一定比例配筋,该采矿法在二矿的实践已经超过20年。在早期开采中,矿体在走向上被划分为七个机械化作业盘区,由七个采矿队分布在各盘区进行作业。1996年,当二矿区各盘区的采矿作业还位于标高1246 m至标高1230 m的范围内时,为了增加矿石年产量以促进效益提升,各盘区从标高1150 m开始向下开辟新的采矿工作面,致使标高1150 m以上出现了巨厚的水平矿柱,并随着水平矿柱之上各盘区的连续开采,其厚度逐渐变薄。为了保证水平矿柱之上三、四盘区分界线即17行位置处回风道的安全运行,在标高1150 m以下新工作平面的三、四盘区分界线上预留了宽度为20~30 m的垂直保安矿柱,用于支持其上的水平矿柱,以防止水平矿柱之上的三、四盘区出现明显的沉降位移。

自1996年起,水平矿柱之下经历了10年以上的开采活动,已经形成了高度逼近50 m的采空区域,其间充满填充体。三、四盘区分界线上的垂直保安矿柱的高度与水平矿柱之下采空区域的高度相当,也逼近50 m。垂直保安矿柱仿佛一堵巨厚石墙,支持于上下盘围岩之间和水平矿柱之下,其包含的矿量已经相当于一个中小型镍矿的全部矿量,这些可观的滞留资源能不能回收?如何回收?回收它们会不会对矿山安全造成显著影响?在水平矿柱之下工作平面上各盘区的开采中要不要继续预留垂直保安矿柱?所有这些,都是二矿区决策层重点关注的现实问题,直接关系到科学制定未来多年的生产计划以及能不能实现快速安全的增产增效目标。本文在建立三维弹塑性有限元模型并进行模拟计算的基础上,对这些问题给出了评价和预测。

1 三维弹塑性有限元力学模型

1.1 几何模型及其有限元网格划分

二矿区矿体在走向(沿脉方向)上按照50 m的间隔被划分为行线,行线基本上垂直于矿体走向。矿体在走向上从东到西再被划分为七个盘区,每个盘区包括两个行线间隔,在沿脉方向上的尺度约为100 m。在各个行线的地质纵剖面图上采集矿体和围岩分界线的几何位置数据,用于建立矿体有限元几何模型,如图1所示。在图1中,夹持在围岩之中的矿体位于标高1350 m与标高850 m之间,标高850 m为探矿钻头所达最深处,850 m以下是否有矿还未得到勘探证

明。为了模拟1994年以来直至2010年的采矿过程,将位于标高1250 m与标高1010 m之间厚度为240 m的矿体在竖向按4 m划分为60层,1250 m以上和1010 m以下的矿体在竖向划分为20 m的层。因为各个盘区每年的挖掘回填深度为4 m到8 m,所以4 m层厚的划分,使得金川矿区的三维弹塑性有限元力学分析,首次精确到了逐年模拟开采填充的水平。在矿体有限元几何模型的外围包裹围岩,模型顶端为地面标高1730 m,底端标高850 m,四周围岩边界远离矿体达千米之上。四周矿体外围岩体中的网格划分,采用网格尺寸向外逐渐辐射放大的办法,使得模型的自由度个数被限制在软件容许值范围之内。这样建立的有限元模型,自由度个数达到了20多万。

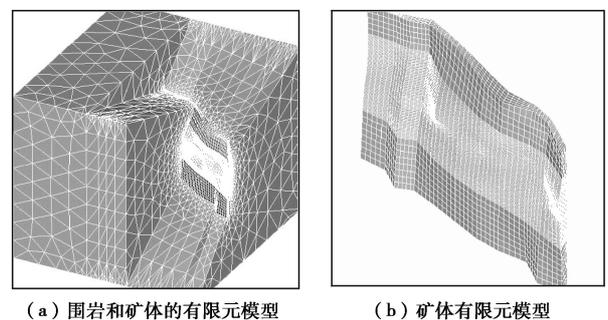


图1 自上盘看矿体和围岩

Fig. 1 Bird's eye view on hanging-wall of ore-body

1.2 初始应力场

金川矿区的最大构造主应力和最小构造主应力基本位于水平面内,最大构造主应力的优势方向为北北东,最小构造主应力与最大构造主应力相垂直,第二主应力基本位于竖直方向上。根据早期矿区地应力实测资料,蔡美峰^[11]回归分析得到的主应力公式为

$$\sigma_{h, \max} = 0.098 + 0.05068H \quad (1)$$

$$\sigma_{h, \min} = -0.015 + 0.0200H \quad (2)$$

$$\sigma_v = -0.208 + 0.02542H \quad (3)$$

式中, H 为埋深,单位为m,应力单位为MPa。最大水平主应力约为最小水平主应力的2.5倍,约为竖直主应力的2倍,3个主应力都随埋深 H 的增加线性增长。可见,金川矿区地应力场中应力椭球明显趋扁,应力张量中偏应力部分水平显著,预示着在金川矿区,岩石将以压剪破坏为主要破坏形式。矿区存在的北西西走向压性兼右旋的逆冲断裂系统和北东走向的平移断裂系统,都是偏应力显著的地应力场中岩体大范围压剪破坏的产物。

1.3 边界条件

取模型底部竖向位移为零,取模型顶部地面处为自由边界条件;穿脉方向(垂直于矿岩走向)上,在位于南边上盘边界上施加水平最大构造主应力,在位

于北边下盘边界上取穿脉方向上的位移为零; 沿脉方向(矿岩走向)上, 在西边的边界上施加水平最小构造主应力, 在东边的边界上取沿脉方向上的位移为零。考虑自重, 应用线弹性模型(材料参数选择在第 2 节中给出) 计算得到原始应力场。固定模型四周边界和底部边界, 模型顶部仍然取自由边界条件, 读入原始应力场文件, 根据二矿区的实际采矿方案, 制定模拟步骤, 对历年开采及填充过程进行模拟计算。将 1994 年以前的开采进行粗化模拟, 将 1994 年至 2010 年的采矿过程(包括未来几年的采矿计划) 实施逐年开采填充模拟。因为弹塑性力学的计算结果与具体的应力路径有关, 所以按照实际采矿历程编写的时空顺序进行模拟, 才能得到与矿区现阶段应力场及变形破坏特征基本相符的计算结果。

2 岩土力学的参数和屈服准则

围岩、矿岩和填充体的弹性参数和密度选北京科技大学 2000 年关于“金川二矿区二期工程无矿柱大面积连续开采稳定性三维有限元分析”之子课题“深部工程地质分区和岩体分类”^[12]所建议的参数, 如表 1 所示。北京科技大学的参数已采用统计办法, 考虑了不连续结构面对岩体弹性性质的影响。

表 1 二矿区岩体力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of rock in Jinchuan No. 2 Mine

岩性	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kN·m ⁻³)
围岩	8.81	0.25	29.3
富矿	6.12	0.25	29.3
贫矿	5.35	0.22	30.0
填充体	1.2	0.21	20.0

假定围岩、矿岩以及填充体为理想弹塑性(程序很难考虑岩土材料屈服后的应变软化特征), 屈服条件选用莫尔-库仑准则(适合描写岩土材料的压剪破坏过程)。定义屈服函数为

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi_1 - c_1 \cos\varphi_1, \quad (4)$$

规定压应力为正, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力, 内摩擦角为 φ_1 , 内聚力为 c_1 。对理想弹塑性, 当 $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$ 时, 为塑性, 当 $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) < 0$ 时, 为弹性。对有限元计算, 如果 $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 比较接近零, 就可以认为进入了塑性屈服状态。

围岩和矿岩的内摩擦角选用金川矿区多次实验数据的平均值 43.33° , 填充体的内摩擦角选用金川矿区多次实验数据的平均值 38.6° 。矿岩、围岩和填充体的内聚力取“北京科技大学”之值^[12], 即围岩内聚力 6.5 MPa, 矿岩(富矿)内聚力 5.1 MPa, 填充体内聚

力 0.57 MPa。

3 垂直保安矿柱塑性屈服破坏的特征

在水平矿柱之下的采矿作业, 使得垂直保安矿柱不断出露, 垂直保安矿柱中的应力状态也在随时发生变化。其位于矿体走向(沿脉方向)的两个侧面暴露于填充体中, 所以垂直保安矿柱在沿脉方向上应力已经释放, 受力较小。另外, 随着水平矿柱之上各盘区采矿作业的进行, 水平矿柱不断变薄, 由于采空区域中的原有矿岩不断地被密度较小的填充体置换, 所以垂直保安矿柱在竖直方向的受力也在不断减小。但垂直保安矿柱在穿脉方向上要承受最大构造主应力的作用, 又因垂直保安矿柱两侧的矿体已被挖去, 这将导致穿脉方向上应力的重分布, 垂直保安矿柱在穿脉方向上所承受的压应力将逐渐增大。可见, 随着采矿过程的进行, 垂直保安矿柱在三个正交方向上主压应力的不均匀化程度将加剧, 差应力越来越大, 使得垂直保安矿柱逐渐逼近发生大面积压剪破坏的临界状态。

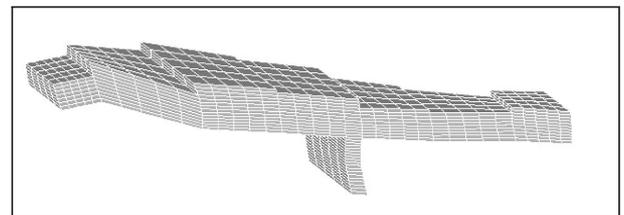


图 2 垂直保安矿柱 2004 年的几何形态(带有限元网格, 从上空看)

Fig. 2 Geometrical shape of vertical jamb in 2004 (with finite element grids, bird's eye view on hanging-wall of ore-body)

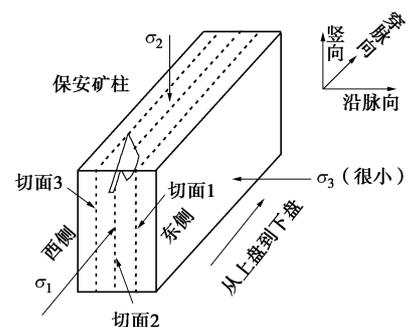


图 3 在垂直保安矿柱中选择用于模拟结果分析的三个剖面
Fig. 3 Three sections chosen for analysis of simulated results within vertical jamb

如图 2、图 3 所示, 在保安矿柱的穿脉方向上切出三个位于竖直面内的剖面, 从东向西, 分别命名为切面 1、切面 2 和切面 3, 来分析这三个切面上塑性区的出现及其扩展过程。关于保安矿柱中这三个切面上塑性区的发展情况, 请参考图 4 之系列彩图(只给出中间切面 2 上塑性区历年发展情况, 整个切面连带了

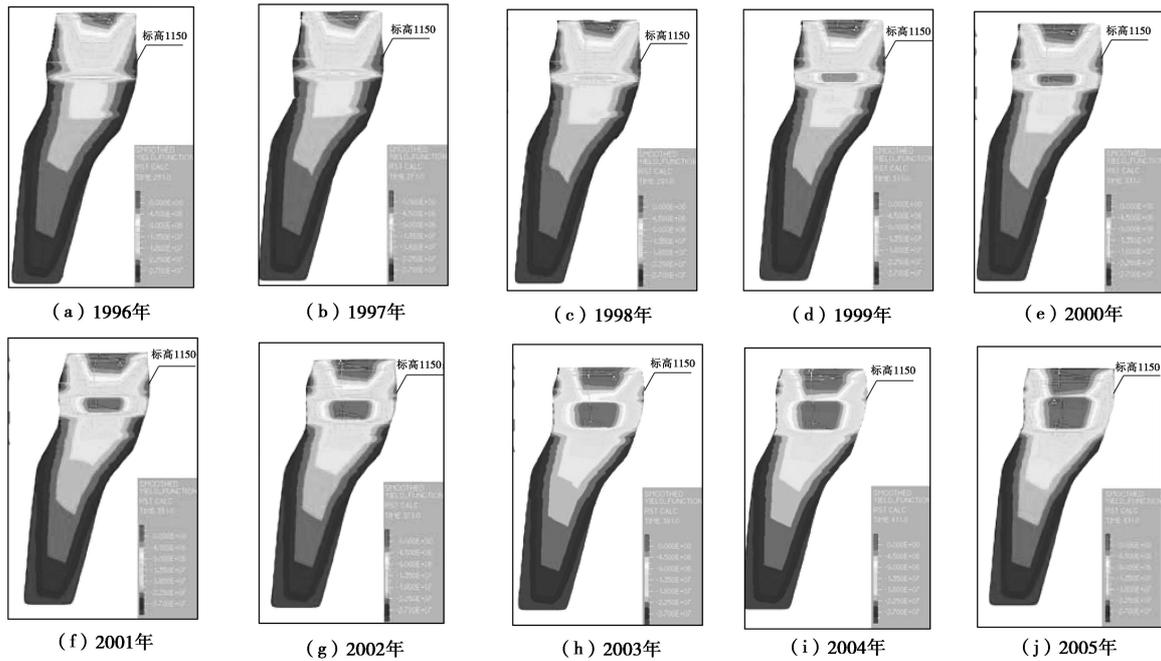


图4 垂直保安矿柱中间切面(切面2)上屈服函数云图

Fig. 4 Nephograms of yield function of central section (section 2) within vertical jamb

垂直保安矿柱之上水平矿柱中的部分切面, 垂直保安矿柱处于标高 1150 m 以下), 彩图上不同颜色代表屈服函数的不同数值, 当该数值接近于零时, 就可认为进入了塑性状态。从图中可以发现, 塑性区首先从垂直保安矿柱的中部出现, 逐渐向垂直保安矿柱的上部和下部蔓延扩张, 在 2005 年底, 已在垂直保安矿柱中形成了上下贯通的塑性破坏区域, 垂直保安矿柱已经基本上达到了整体塑性屈服破坏的状态。

伴随着垂直保安矿柱中应力分布的变化过程以及屈服破坏状态的来临, 水平矿柱中(从东到西共七个机械化盘区)的塑性屈服破坏过程如何呢? 对模拟结果分析表明, 水平矿柱中的塑性区在东部发展比西部早, 2005 年底, 除七盘区外, 水平矿柱已经整体进入塑性屈服破坏状态。已经破碎的水平矿柱各盘区在未来几年将可能出现显著的沉降位移。

4 研究结果的可靠性

从 2005 年开始, 水平矿柱之下三、四盘区的现场采矿人员发现, 随着向下采掘活动的进行, 垂直保安矿柱东西两侧新暴露出来的矿岩发生垮帮塌落的现象较为严重, 这说明矿岩的破坏已经进入非弹性阶段, 隐性节理显性化, 各种结构面开始开裂, 与模拟结果相一致。此时矿岩由于裂隙充分发育而扩容, 并随着进一步的开采行为, 垂直保安矿柱将在上下盘围岩的加载下很快越过峰值强度而走向屈服后的应变软化阶段, 其在穿脉向的受力水平将逐渐趋于矿岩残余强度。伴随着垂直保安矿柱的破坏过程, 必将引起垂直保安矿柱之中以及与之相连的上下盘围岩之中和东西两侧

的填充体之中局部应力场的重分布过程, 以及相应的变形调整过程。

垂直保安矿柱和水平矿柱的屈服破坏时间基本上同步到来。那么, 垂直保安矿柱和与之相连的水平矿柱所组成的矿岩系统, 在屈服破坏的过程中会不会存在一定程度的突发灾变失稳的可能性? 若将上下盘围岩看作实验加载机, 而把保安矿柱和水平矿柱看作受压实验岩样, 根据经典的压机-岩样失稳模式, 若围岩刚度大于屈服后的矿岩负刚度的绝对值(刚性加载), 就不会失稳, 若围岩刚度小于屈服后的矿岩负刚度的绝对值(柔性加载), 就会失稳。由于缺乏对矿区带有原始节理的围岩和矿岩的全应力-应变过程曲线的实验研究, 加之还有填充体参与到围岩和矿岩相互作用的系统之中来, 所以不能肯定在垂直保安矿柱和水平矿柱屈服破坏的过程中, 是否会出现一定程度的失稳现象。故建议矿区, 在垂直保安矿柱和水平矿柱屈服破坏的过程中, 上下盘围岩有可能在短时间内出现向内的较大位移, 所以涉及采矿工程方面的较大建设行动最好等到伴随矿柱破坏可能发生的较大变形调整运动结束之后再安排实施。但有一点可以肯定, 因为矿岩是脆性材料, 所以在矿柱系统还未进入屈服破坏的弹性阶段, 不可能发生弹性范围内的屈曲失稳现象, 矿柱中最先开始的肯定是塑性屈服破坏现象。

5 结 论

2004 年, 垂直保安矿柱的高度已接近 50 m, 相当于一个中小型镍矿的全部矿量。由于已经达到塑性屈服破坏状态, 在未来将以残余强度支持于上下盘围

岩之中, 所以其存在与否, 不会对矿区大范围内的应力场和变形场造成显著影响, 其影响只局限在局部位置。在水平矿柱之下采矿平面上三、四盘区的继续挖掘中新出露的垂直矿柱部分, 由于无法从已经破坏的旧的垂直矿柱部分中得到强度支持, 所以无法协同起来应对局部应力场重新调整过程, 便会很快走向塑性屈服破坏状态。所以建议矿区, 在向下的继续采掘中, 可以不再预留垂直保安矿柱。

致谢: 在项目的完成过程中(2004-06—2005-10), 金川集团有限公司科技部和二矿区专家提供了大量的资料, 并提出了许多宝贵意见, 在此一并表示深切的谢意!

参考文献:

- [1] 苏生瑞, 黄润秋, 王士天. 断裂构造对地应力场的影响及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (SU Sheng-ru, HUANG Run-qiu, WANG Shi-tian. The effect of the faults on the tectonic stress field and the engineering application [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 北京大学. 金川矿区断层泥特征及其与巷道变形关系的研究[R]. 金昌: 金川集团有限公司, 1985. (Peking University. Relation of character of fault clay and distortion of laneway in Jinchuan diggings[R]. Jinchang: Jinchuan Group LTD, 1985. (in Chinese))
- [3] 王福玉, 高 谦, 张周平. 金川矿区地应力规律与人工神经网络预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2601 - 2606. (WANG Fu-yu, GAO Qian, ZHANG Zhou-ping. Law of in-situ stress in Jinchuan diggings and research on prediction model based on artificial neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2601 - 2606. (in Chinese))
- [4] 刘 高, 韩文峰, 聂德新. 金川矿区地应力场特征[J]. 天津城市建设学院学报, 2002, 8(2): 81 - 85. (LIU Gao, HAN Wen-feng, NIE De-xin. Characteristics of earth stress field of Jinchuan Mine Area[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2002, 8(2): 81 - 85. (in Chinese))
- [5] 高 谦, 刘同有, 方祖烈. 金川二矿区深部开采潜在问题与优化控制技术研究[J]. 有色金属, 2004, 56(4): 2 - 5, 14. (GAO Qian, LIU Tong-you, FANG Zu-lie. Latency issue and optimization of controlled technique of deep mining areas for No. 2 mining area of Jinchuan Mine[J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(4): 2 - 5, 14. (in Chinese))
- [6] 张 忠. 金川二矿区 1098 m 分段巷道稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2620 - 2624. (ZHANG Zhong. Stability research of roadway of 1098m level in deposit 2 of Jinchuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (S2): 2620 - 2624. (in Chinese))
- [7] 路世豹, 李 晓, 马建青, 等. 金川二矿区地下巷道变形监测分析及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 488 - 492. (LU Shi-bao, LI Xiao, MA Jian-qing, et al. Interpretation of deformation monitoring of underground roadways and its application to No. 2 diggings of Jinchuan mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 488 - 492. (in Chinese))
- [8] 蔡美峰, 孔广亚. 金川二矿区深部开采稳定性分析和采矿设计优化研究[J]. 中国矿业, 1998, 7(5): 33 - 36. (CAI Mei-feng, KONG Guang-ya. Analysis of stability of deep mining areas and optimization of mining design for No. 2 mining area of Jinchuan Mine[J]. Journal of China Mining, 1998, 7(5): 33 - 36. (in Chinese))
- [9] 高 谦, 岳 斌, 把多恒, 等. 金川三矿区主副井工程变形分析与稳定性评价研究[R]. 金昌: 金川集团有限公司, 2005. (GAO Qian, YUE Bin, BA Duo-heng, et al. Deformation analysis and stability estimation of the engineering of main-well and vice-well in Jinchuan Third Diggings[R]. Jinchang: Jinchuan Group LTD, 2005. (in Chinese))
- [10] 马崇武, 慕青松, 苗天德, 等. 金川二矿区上盘巷道工程的变形破坏与水平矿柱的关系[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(6): 13 - 16. (MA Chong-wu, MU Qing-song, MIAO Tian-de, et al. Effect of the level pillar on the deformation and failure of hanging wall roadway in Jinchuan No.2 mine area[J]. Mining Research and Development, 2007, 27(6): 13 - 16. (in Chinese))
- [11] 蔡美峰, 乔 兰, 于 波, 等. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 414 - 418. (CAI Mei-feng, QIAO Lan, YU Bo, et al. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of No. 2 mining area of Jinchuan Nickel mine[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 414 - 418. (in Chinese))
- [12] 蔡美峰, 高华林, 孔广亚. 金川二矿区二期工程无矿柱大面积连续开采稳定性三维有限元分析及其子课题深部工程地质分区和岩体分类[R]. 北京: 北京科技大学, 1996. (CAI Mei-feng, GAO Hua-lin, KONG Guang-ya. The three-dimensional FEM analysis on the stability of big area without jambs mining, the subarea of the deep engineering geology and the sort of rock in the Jinchuan No. 2 diggings [R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 1996. (in Chinese))