

文章编号: 1000-7598 (2014) 07-2041-07

矿柱安全留设尺寸的宽度折减法与应用

张 涛, 张 帅, 张百胜

(太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024)

摘 要: 从岩石强度理论出发, 提出房柱式开采中矿柱安全留设尺寸的宽度折减法思想, 通过不断折减矿柱宽度, 研究矿柱由稳定状态向临界失稳状态演化过程, 从而得到矿柱的临界宽度, 引入矿柱安全系数, 获得矿柱安全留设尺寸。采用宽度折减法对磨坊矿 3[#]井房柱法开采矿柱安全留设尺寸进行研究, 获得不同矿房跨度下矿柱的安全留设宽度。将宽度折减法得到的安全矿柱宽度与 Lunder 经验公式比较, 研究发现, 宽度折减法得到的安全矿柱宽度和 Lunder 经验公式的计算结果较为吻合且偏安全。结合磨坊矿 3[#]井的开采条件和矿柱宽度折减法分析结果, 确定矿房基本参数为: 矿房跨度为 13 m 左右, 矿柱宽度为 5.0~5.5 m。通过对磨坊矿 3[#]井采空区上覆岩层移动规律的监测, 发现岩层相对稳定, 地表沉降量控制在 120~150 mm 之间, 用宽度折减法分析得到的矿房基本参数是合理的。

关 键 词: 岩石力学; 宽度折减法; 矿柱安全宽度; 房柱式开采

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Width reduction method and its application to determining safety size of pillar

ZHANG Tao, ZHANG Shuai, ZHANG Bai-sheng

(College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the strength theory of rock, a width reduction method for determining safety size of pillar is proposed in room and pillar mining. Through reducing pillar width gradually, the process of pillars from stable state to limit equilibrium state is studied; and the pillar critical width is obtained. Then the pillar safety width can be determined via introducing the pillar safety factor. By the width reduction method, the pillar safety width of Mofang mine No. 3 is studied to obtain the pillar safety widths in different spans. It is shown that the pillar safety width calculated by width reduction method is in good agreement with that by the Lunder theory through comparison; and the former is safer. According to the mining conditions of Mofang mine No. 3 and the results calculated by width reduction method, the pillar widths are determined to be from 5 m to 5.5 m, responding to the pillar span of 13 m. By monitoring the goafs overlaying strata of Mofang mine No. 3, it is found that the strata movement is relatively stable; the values of ground surface settlement are controlled in the range between 120 mm and 150 mm. To a certain extent, the fundamental parameters of room obtained by width reduction method are reasonable.

Key words: rock mechanics; width reduction method; safety width of pillar; room and pillar mining

1 引 言

房柱式开采是金属与非金属矿山井工开采的一种较为普遍的采矿方法, 采用留设规则或不规则的矿柱支撑顶板, 以期达到安全开采的目的, 其开采体系的关键是矿柱设计, 涉及到安全、经济开采的重大问题, 矿柱的合理优化设计已成为一个亟待解决的课题^[1-4]。

矿房、矿柱尺寸和形状是充填法和空场法设计

的关键。现行的矿床开采方法中, 使用矿房、矿柱组合的采矿方法所占比例较大^[5-6], 如加拿大的基德克里克矿、澳大利亚的芒特艾萨矿、中国的凡口铅锌矿等, 都是使用这类采矿方法的典型代表。在设计留设矿柱时, 如果矿柱留得过厚会造成矿产资源浪费, 回采率低。对于矿柱安全宽度确定大多采用极限跨度理论、经验公式法以及极限平衡方法, 如 K.B.鲁别涅依矿柱安全宽度的计算公式^[7]、Lunder 矿柱平均抗剪强度的计算方法^[8]、Salamon

收稿日期: 2013-05-27

第一作者简介: 张涛, 男, 1984 年生, 硕士, 主要从事矿山压力与岩层控制等方面的研究。E-mail: yuweijian@163.com

通讯作者: 张百胜, 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事矿山压力与岩层控制等方面的研究。E-mail: baishengzhang@163.com

矿柱强度公式^[9]等。近 20 年来,国内学者在矿柱稳定性方面开展了大量研究工作,王金安等^[10]以采空区留矿柱采矿为背景,建立采空区矿柱-顶板体系流变力学模型;赵兴东^[11]对谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性进行了分析,得到了谦比希矿深部隔离矿柱下部回采的临界高度。

目前房柱式开采体系中矿柱的安全宽度很大程度上是根据工程类比和经验来确定^[10-13]。本文从岩石强度理论出发,借鉴强度折减法思想,提出房柱式开采体系中安全矿柱尺寸的宽度折减法。通过不断折减矿柱宽度,研究一定强度矿柱随着宽度的减少,矿柱由稳定状态向极限平衡状态演化。将厚度折减法应用于瓮福磷矿磨坊矿 3[#]井房柱法开采实践,提出磨坊矿 3[#]井的安全矿柱尺寸;并通过 Lunder 经验公式和现场监测验证了厚度折减法得到的安全矿柱尺寸的合理性。

2 矿柱安全留设尺寸的宽度折减法

从岩石强度理论出发,矿柱失稳是作用于矿柱的岩层压力,导致处于单向应力状态下的矿柱发生压剪破坏或劈裂拉破坏。伴随着矿柱的失稳,矿柱不具有承载力,无法抵抗顶板传递下来的矿山压力,而导致顶板岩层发生大规模移动,甚至导致顶板整体坍塌、采空区塌陷、地表呈现出连续变形。

由于矿柱的破坏方式主要有剪切破坏和受拉破坏。采用 FLAC^{3D} 中既能考虑剪切破坏又能考虑拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 准则对矿柱进行计算。

该准则的剪切破坏判据为

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} = 0 \quad (1)$$

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

拉伸破坏判据为

$$f^t = \sigma_1 - \sigma_3 = 0 \quad (3)$$

式中: f^s 、 f^t 分别为剪切破坏和拉伸破坏包络线函数; φ 为岩体内摩擦角; c 为凝聚力; σ_1 为抗拉强度。

矿柱安全留设尺寸的宽度折减法的基本原理是:在计算过程中不断调整矿柱宽度,对于某一宽度,若矿柱处于稳定状态则减小该值,反之增加,直到其达到临界失稳状态,此时对应的宽度即为矿柱临界宽度,即矿柱处于临界状态时的宽度值。折减过程为一优化问题,采用优化理论中的二分法进行处理,矿柱安全留设尺寸的宽度折减法的实现过

程如下^[14-15]:

(1) 收集矿区地质资料并获得矿岩的强度参数,建立矿柱计算模型。

(2) 根据矿区采矿经验,计算上限宽度 W_1 和下限宽度 W_2 以确定矿柱宽度。

(3) 在 FLAC^{3D} 中采用 Mohr-Coulomb 模型,开启大变形模式 (set large), 应用二分法不断折减矿柱宽度,直至临界失稳状态 (计算不收敛,顶板岩层全部垮落),此时矿柱的宽度即为矿柱临界宽度 W_e 。

(4) 根据工程类比确定矿柱的安全系数 k ,得到矿柱安全宽度 W_s 为

$$W_s = kW_e$$

矿柱安全留设尺寸的宽度折减法的计算流程图见图 1。

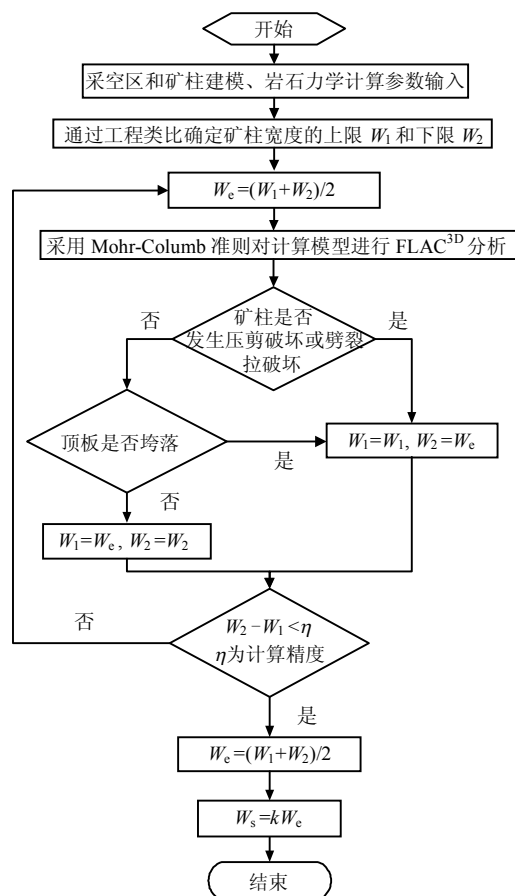


图 1 矿柱安全留设尺寸的宽度折减法的计算流程图

Fig.1 Calculation procedure of pillar safety size for width reduction method

3 房柱法开采矿柱安全留设尺寸分析

3.1 工程概况

瓮福磷矿磨坊矿 3[#]井属磨坊矿 II 号矿体, 平均

宽度为 9.15 m, 呈层状, 倾角为 $6^{\circ}\sim 12^{\circ}$, 矿体构造复杂, 顶板破碎, 直接顶板为灯影组第一段白云岩、含硅质团块白云岩及硅质岩, 直接底板为陡山沱组第三段, 含胶磷矿团块的白色硅质岩。针对 3[#]井矿体的产状和宽度, 在无规则间柱浅孔房柱法的基础上, 总结提炼出小矿房、小矿柱房柱法采矿工艺。将原来的矿房划分成 9 个小矿房, 原来的矿柱划分成 9 个小矿柱, 矿柱形状近圆柱形式, 减小了空场的暴露面积, 降低了安全生产隐患。图 2 为小矿房、小矿柱房柱法开采体系中矿柱布置图。为确定小矿房、小矿柱房柱法开采体系中矿柱安全宽度, 本文采用矿柱安全留设尺寸的宽度折减法, 探讨磨坊矿 3[#]井小矿房、小矿柱房柱法开采体系中矿柱安全宽度。

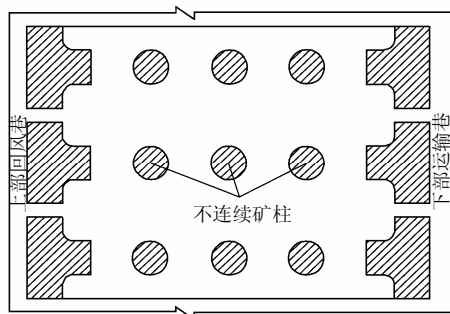


图 2 小矿房、小矿柱房柱法开采体系中矿柱布置示意图

Fig.2 Arrangement of pillars in small room and pillar mining

3.2 计算模型

为研究磨坊矿 3[#]井小矿房、小矿柱房柱法下矿柱的合理尺寸, 结合磨坊矿 3[#]井的传统采矿工艺特点, 选取矿房跨度为 12、13、14 m 共 3 种不同情况进行研究, 矿柱采用圆柱形, 宽度(直径)从 4.0~7.2 m 之间选择取不同的尺寸。磷矿体距地表埋深取 40 m。对磨坊矿 3[#]顶板的含硅质团块白云岩和底板的含胶磷矿团块的白色硅质岩进行岩石力学试验, 并按规范对岩石力学试验结果进行修正, 得到岩石力学计算参数见表 1。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock mass

编号	密度 /(g/cm ³)	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
矿体	3.62	39.2	8.5	0.351	0.68	35.96	0.34
底板	2.58	32.5	15.0	0.261	1.29	38.08	0.36
顶板	2.75	35.6	8.0	0.302	0.70	35.11	0.21
表土	1.83		0.3	0.250	0.15	12.40	0.05

图 3 为磨坊矿 3[#]井房柱法采矿的力学计算模型, A 为矿房跨度, H 为矿柱高度, W 为矿柱宽度。

下面以矿房跨度 $A=13$ m 为例, 用矿柱宽度折减法来研究磨坊矿 3[#]井房柱法采矿的矿柱稳定性。选取过模型中心平行于 XZ 平面的纵剖面为计算分析剖面。

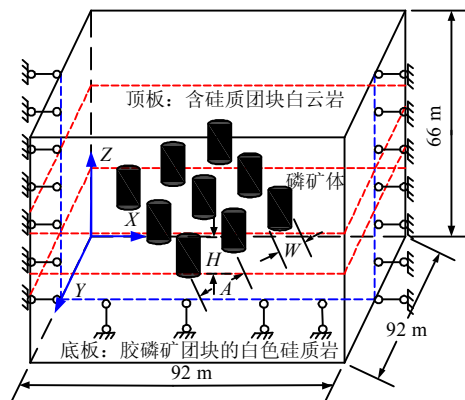


图 3 计算模型

Fig.3 Numerical calculation model

3.3 不同矿柱宽度下顶板岩层位移

在矿房跨度一定的条件下, 矿柱宽度不同导致顶板岩层位移不同, 随着矿柱宽度的减小, 采空区上覆岩层移动量增加, 图 4 为矿房跨度 13 m 下矿柱宽度在 4.4~7.2 m 之间变化时, 分析剖面上地表沉降量的分布图, 当矿柱宽度在 6.0~7.2 m 之间时, 地表沉降在 3 cm 以内; 当矿柱宽度在 4.8~6.0 m 之间时, 随着矿柱宽度的减小, 地表沉降位移近线性增加, 当矿柱宽度大于 6.0 m 时, 地表沉降位移变化不大; 矿柱宽度由 4.8 m 减小为 4.4 m 时, 地表沉降最大位移由 7.6 cm 激增至 13.8 cm。

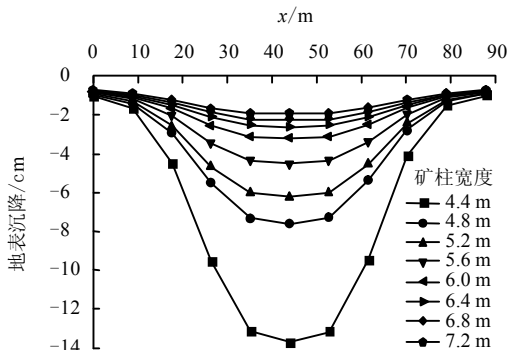


图 4 不同矿柱宽度下分析剖面上地表沉降曲线

Fig.4 Ground settlement curves of different pillar widths

图 5、6 分别为矿柱宽度 6、4.2 m 下, 分析剖面上的竖向位移分布图, 可以看出, 矿柱宽度 6 m 时采空区顶板岩层稳定, 顶板位移在 3~4 cm 之间,

矿柱宽度 4.2 m 时矿柱失稳, 顶板岩层垮落, 地表弯曲下沉达 7.5 m。此时矿柱的宽度为矿柱临界宽度, $W_c = 4.2$ m。

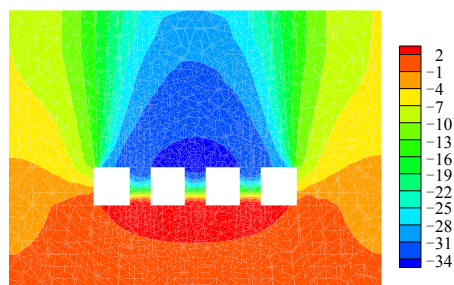


图 5 矿柱宽度为 6 m 时岩层位移分布云图 (单位: mm)

Fig.5 Nephogram of strata displacement distribution of pillar with width of 6 m (unit: mm)

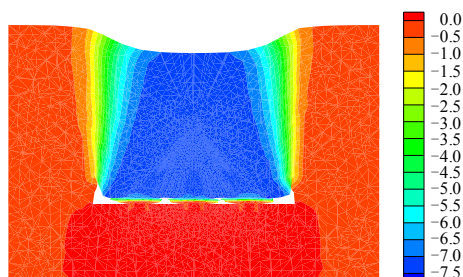


图 6 矿柱宽度为 4.2 m 时岩层位移分布云图 (单位: m)

Fig.6 Nephogram of strata displacement distribution of pillar with width of 4.2 m (unit: m)

3.4 不同矿柱宽度下矿柱塑性区演化

矿柱失稳是矿柱塑性区扩展演化而诱发矿柱发生大规模的塑性流动, 伴随着矿柱失去承载力, 而发生横向屈服变形、顶板垮落、采空区被上覆岩层填充、岩层发生弯曲下沉等现象。图 7 为不同矿柱宽度下矿柱塑性区所占比例图, 可以发现, 随着矿柱宽度的减小, 矿柱内塑性单元增加, 当矿柱宽度为 4.4 m 时, 矿柱内 81% 的单元处于塑性状态, 当矿柱宽度为 4.2 m 时, 矿柱处于全塑性状态。

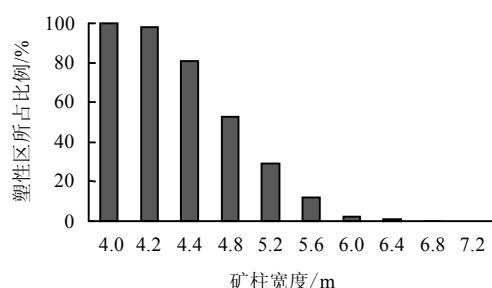


图 7 不同矿柱宽度下矿柱塑性区所占比例

Fig.7 Pillar state proportion of different pillar widths

图 8 为矿柱宽度为 4.2 m 时, 分析剖面上塑性区分布图。可以发现, 矿柱失稳导致采空区上覆岩层错动下沉, 采空区上覆岩层几乎全部发生剪切屈服和受拉破坏。

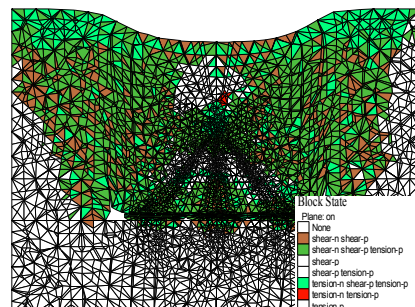
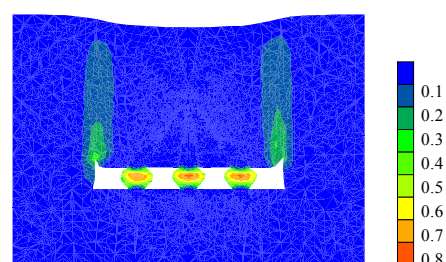


图 8 矿柱宽度为 4.2 m 塑性区分布

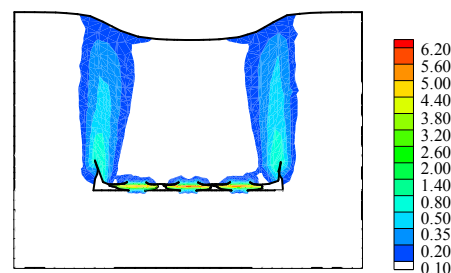
Fig.8 Plastic zone distribution of pillar with width of 4.2 m

3.5 矿柱失稳剪应变增量演化

矿柱失稳源于矿柱承载力不足以抵抗顶板传递下来的矿山压力, 用 FLAC^{3D} 再现采空区失稳演化过程: 矿柱中部剪切屈服, 发生横向膨胀变形, 采空区上覆岩层向下错动, 导致顶板垮落, 岩层弯曲下沉, 最终采空区被上覆岩层填充, 地表大规模塌陷。图 9 为矿柱宽度为 4.2 m 时, 计算时步 step = 5 000、32 000 下, 分析剖面上剪应变增量演化对比图。图 9 显示了顶板矿山压力作用下矿柱首先沿中部破裂, 剪应变增量在矿柱中部高度集中, 随计算时步的增加, 矿柱破裂面不断扩展, 顶板下移, 覆岩破裂面沿着采场边界向上发展直至与地表沟通。



(a) step=5 000



(b) step=32 000

图 9 Step=5 000、32 000 下分析剖面上剪应变增量演化

Fig.9 Shear strain increment evolution of step=5 000, 32 000

3.6 矿柱安全宽度确定

取矿柱安全系数 $k=1.2$ 、矿房跨度 $A=13\text{ m}$ 时, 矿柱的安全宽度 W_f 为

$$W_f = kW_e = 1.2 \times 4.2 = 5.04\text{ m} \quad (4)$$

用同样的研究方法, 得到矿房跨度 $A=12$ 、 14 m 时, 具有安全系数 $k=1.2$ 的矿柱安全宽度 W_f 分别为 4.87 、 5.52 m 。

4 宽度折减法与 Lunder 经验公式的比较

为验证矿柱安全留设尺寸的宽度折减法的合理性, 在这里采用 Lunder 经验公式来计算磨坊矿 3[#] 井房柱法开采的安全矿柱留设宽度。

对于水平及缓倾斜的层状矿体的矿柱应力分析, 假设每一个矿柱支撑的顶板面积等于矿柱截面积加上矿房平均摊派在一个矿柱上的面积 (见图 10)。

每个矿柱承担的荷载为

$$p = \gamma h A^2 \quad (5)$$

式中: γ 为岩体的重度; h 为采空区埋深。

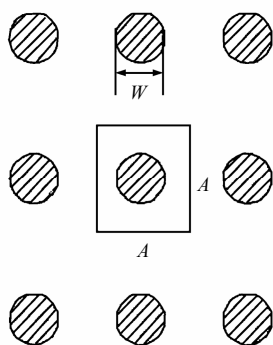


图 10 矿柱负载图

Fig.10 Pillar load diagram

矿柱尺寸设计的合理性, 主要取决于强度理论的选取和所承担荷载的计算。Lunder 等^[8]结合矿柱稳定性分析和 178 例实测资料确定硬岩矿山的矿柱强度 σ_s 为

$$\sigma_s = 0.44U(0.68 + 0.52\mu_a) \quad (6)$$

$$\mu_a = \tan \left(\arccos \frac{1 - c_p}{1 + c_p} \right) \quad (7)$$

$$c_p = 0.46 [\lg(W/H + 0.75)]^{1.4H/W} \quad (8)$$

式中: μ_a 为矿柱摩擦因数; c_p 为矿柱平均强度系数; U 为完整岩样单轴抗压强度。

矿柱安全系数为

$$k_s = \frac{\pi W^2 \sigma_s}{4p} \quad (9)$$

在式 (9) 中令 $k_s=1.2$, 结合式 (5)~(9) 可得到具有安全系数 $k_s=1.2$ 的矿柱宽度 W_f 。

磨坊矿 3[#] 井的顶底板、矿体的岩石力学参数见表 1, 矿房跨度 A 分别取 12 、 13 、 14 m , 矿柱高度 $H=9\text{ m}$ 。将计算参数代入式 (5)~(9), 得到磨坊矿 3[#] 井不同矿房跨度下具有 $k_s=1.2$ 的安全矿柱宽度见表 2。

表 2 宽度折减法和 Lunder 经验公式的对比

Table 2 Calculation results comparison between Lunder theory and width reduction method

矿房跨度 A /m	具有 $k_s=1.2$ 的安全矿柱宽度 W_f/m	
	Lunder 经验公式	宽度折减法
12	4.25	4.87
13	4.61	5.04
14	4.90	5.52

由表 2 可知, Lunder 经验公式和宽度折减法得到的安全矿柱宽度值比较接近, 但宽度折减法得到的安全矿柱宽度比 Lunder 经验公式要大, 用宽度折减法得到的矿柱安全宽度偏于安全。

结合磨坊矿 3[#] 井现有开采条件和矿柱安全留设尺寸的数值分析结果, 确定该矿小矿房、小矿柱房柱法采矿的基本参数为: 矿房跨度为 13 m 左右, 矿柱宽度在 $5.0\sim 5.5\text{ m}$ 之间。

为验证矿柱留设宽度的合理性, 在磨坊矿 3[#] 井地下开采的影响范围内布置 6 个钻孔, 利用智能综合测试仪量测出孔内各点的相对沉降量。图 11 为 4[#] 钻孔的多点位移计及智能综合测试仪图, 图 12 为采空区中央的 4[#] 钻孔各传感器的位移曲线。从图 12 的现场监测曲线可以看出, 采用上述矿房基本参数的条件下, 岩层移动相对稳定, 地表最大沉降量控制在 $120\sim 150\text{ mm}$ 之间。宽度折减法得到的矿房基本参数具有一定的合理性。



图 11 4[#] 钻孔的多点位移计及智能综合测试仪图

Fig.11 Multipoint extensometer and intellectualized and integrated testing instrument of borehole #4

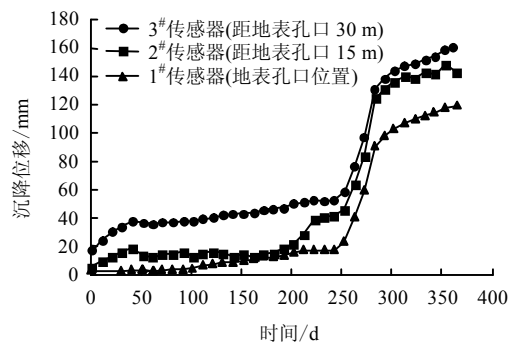


图 12 4#钻孔各传感器的位移曲线

Fig.12 Sensor displacement curves of borehole #4

5 结 论

(1) 矿柱宽度折减法是从岩石强度理论出发, 研究随着宽度的减小, 矿柱由稳定状态向极限平衡状态演化的过程, 为研究房柱式开采体系中矿柱安全留设宽度提供了一种新的定量的研究方法。

(2) 通过宽度折减法与 Lunder 经验公式的对比研究发现, 宽度折减法得到的安全矿柱宽度与 Lunder 经验公式的计算结果较为吻合且偏安全。

(3) 结合磨坊矿 3#井现有开采条件和矿柱安全留设尺寸的数值分析结果, 确定该矿小矿房、小矿柱房柱法采矿的基本参数为: 矿房跨度为 13 m 左右, 矿柱宽度在 5.0~5.5 m 之间。

参 考 文 献

- [1] 李俊平, 冯长根, 郭新亚, 等. 矿柱参数计算研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(5): 662—664.
LI Jun-ping, FENG Chang-gen, GUO Xin-ya, et al. A study on pillar parameter calculations[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(5): 662—664.
- [2] 李元辉, 南世卿, 赵兴东, 等. 露天转地下境界矿柱稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 278—283.
LI Yuan-hui, NAN Shi-qing, ZHAO Xing-dong, et al. Stability of boundary pillars for transition from open pit to underground mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 278—283.
- [3] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922—928.
LI Xi-bing, LI Di-yuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 922—928.
- [4] GONZALEZ-NICIEZA C, ALVAREZ-FERNANDEZ M I, MENENDEZ-DIAZ A, et al. A comparative analysis of pillar design methods and its application to marble mines[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006, 39(5): 421—444.
- [5] 陶干强, 孙冰, 宋丽霞, 等. 充填法采场结构参数优化设计[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 460—464.
TAO Gan-qiang, SUN Bing, SONG Li-xia, et al. Optimal design of stope structural parameters using back-filling method[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(4): 460—464.
- [6] 刘洪强, 张钦礼, 潘常甲, 等. 空场法矿柱破坏规律及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 138—143.
LIU Hong-qiang, ZHANG Qin-li, PAN Chang-jia, et al. Analysis of the failure law and stability of the pillar in open stope mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(1): 138—143.
- [7] NOMIKOS P P, SOFIANOS A I, TSOUTRELIS C E. Structural response of vertically multi-jointed roof rock beams[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39(1): 79—94.
- [8] LUNDER P J, PAKALNIS R C. Determination of the strength of hard-rock mine pillars[J]. *World Mining Express*, 1998, 14(4): 24—28.
- [9] SALAMON M D G, MUNRO A H. A study of the strength of coal pillars[J]. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1967, 68: 55—67.
- [10] 王金安, 李大钟, 马海涛. 采空区矿柱—顶板体系流变力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 577—582.
WANG Jin-an, LI Da-zhong, MA Hai-tao. Study of rheological mechanical model of pillar-roof system in mined-out area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 577—582.
- [11] 赵兴东. 谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 2616—2622.
ZHAO Xing-dong. Stability analysis of insulating pillar of excavation of Chambishi copper mine in depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 2616—2622.