

基于超静定理论及数值模拟的胶结矿柱稳定性分析

余健, 汪圭煌

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为科学、精确地评价井下胶结矿柱的稳定性, 提出基于超静定理论及数值模拟的矿柱稳定性分析方法。将人工胶结矿柱简化为超静定结构, 建立超静定理论模型, 计算矿柱在尾砂充填体不均匀侧压载荷、自重和顶部冒落拱压力综合作用下的最大应力, 并采用 Midas 有限元软件模拟分析矿柱的有效应力及应变位移, 结合废石块胶结模型的单轴抗压强度试验值对矿柱的稳定性进行评价。以大红山铜矿人工胶结矿柱为例的分析结果显示, 超静定理论模型计算的最大应力为 6.27 MPa, 数值模拟的最大应力、最大位移为 3.55 MPa 和 40.46 mm, 试验测得的胶结废石块模型单轴抗压强度为 10.9 MPa, 表明采用超静定理论计算与数值模拟相结合评价矿柱稳定性的方法可行。

关键词 胶结矿柱稳定性; 超静定结构; 充填体侧压

中图分类号 TD323

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.22.004

Analysis of Cement Pillar Stability Based on Hyperstatic Structure Theory and Numerical Simulation

YU Jian, WANG Guihuang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In order to evaluate the stability of cement pillar scientifically and accurately, an analytic evaluation method that is based on the theory of statically indeterminate structure and numerical simulation is proposed. An artificial pillar is simplified to a statically indeterminate structure and the maximum stress is calculated by an indeterminate model using the comprehensive action of tailings backfill lateral pressure, top loose rock pressure and its own gravity. The pillar stability is tested by uniaxial compressive test data on cemented waste-rock and the finite element analysis software Midas, which is used to simulate the loading force and output the effective stress and strain-displacement. The cement pillar of Dahongshan copper mine is used as an example, and it is shown that the maximum stresses by statically indeterminate theory and simulation software are 6.27 MPa and 3.55 MPa, respectively, the maximum strain-displacement is 40.46 mm, and the cemented waste-rock uniaxial compressive strength is 10.9 MPa. All of the above shows that it is feasible to test the pillar stability by the method of statically indeterminate and numerical simulation.

Keywords stability of cement pillar; statically indeterminate structure; tailings backfill lateral force

地下金属矿山回采中, 为最大限度回收矿产资源和提高回采效率, 通常以废石胶结体作为人工矿柱来替代矿石矿柱, 这样既能减小矿石损失贫化率, 也能提供相对安全的作业环境^[1], 还可以防止尾砂泄入正在开采的矿房中^[2], 避免影

响井下作业。胶结充填矿柱因具有较高的承压能力, 近几年在地下金属矿山无废开采中得到迅速推广^[3]。

井下矿柱在顶板松散岩体压力、自重和周围岩体作用力的综合作用下以被动方式控制采场地压^[4]。对于作业中的采

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-06-20

基金项目: 云南省科技合作计划重大项目 (2003UDBEA01A052)

作者简介: 余健, 教授, 研究方向为无轨机械化采矿工艺与技术, 电子信箱: zxs143@163.com; 汪圭煌 (共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为无轨机械化采矿工艺与技术, 电子信箱: 15274940340@163.com

引用格式: 余健, 汪圭煌. 基于超静定理论及数值模拟的胶结矿柱稳定性分析[J]. 科技导报, 2014, 32(22): 34-37.

场,矿柱能否有效控制地压直接关系到井下作业人员和采掘设备的安全,因此判断矿柱是否会发生破坏,分析其是否稳定就显得尤其重要。材料力学作为一门研究材料应力、应变、强度等指标的应用学科,可以用来对矿柱的稳定性进行评价^[5]。陈庆发等^[6]根据材料力学理论分析了矿柱两端都为采空区模式下的顶板-人工矿柱协同机制,但没有考虑充填体对人工矿柱的侧压。Parathap等^[7]和Lo等^[8]分析了水平悬臂梁在自由端受竖向力作用的非弹性大挠度问题,李会知等^[9]对均衡作用下两固支梁进行了弹塑性分析,但没有对不均匀载荷的作用进行研究,也没有与工程实例相结合。本文以云南大红山铜矿的废石块胶结人工矿柱^[10]为研究对象,提出一种将超静定理论计算与数值模拟相结合的矿柱稳定性分析方法。

1 超静定理论计算模型

由于研究的胶结矿柱顶部和底部处于固结状态,因此将矿柱简化为上下两端固定的超静定结构^[11]。如图1所示,假设矿柱为一超静定梁,其厚度为 w 、宽度为 b 、两端长度为 l ,梁的弯曲刚度为 EI 。分析时对 B 端解除固定约束,简化为向上的应力 F_B 、弯矩 M_B 和三角形不平衡载荷 q ,假设 F_B 、 M_B 和 q 对 B 端的挠度与转角分别为 (y_1, θ_1) 、 (y_2, θ_2) 、 (y_3, θ_3) ,挠度向上为正,转角逆时针为正,如图2、图3及图4所示。

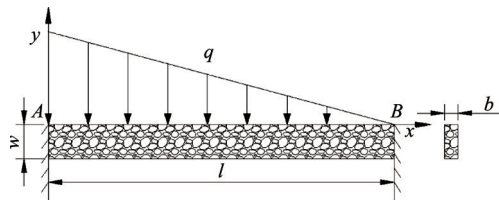


图1 超静定梁

Fig. 1 Statically indeterminate beam

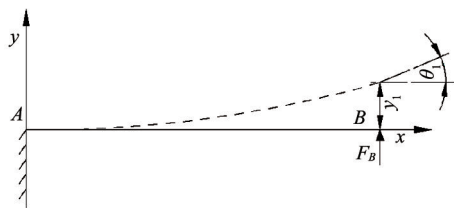


图2 应力 F_B 作用示意

Fig. 2 Force F_B

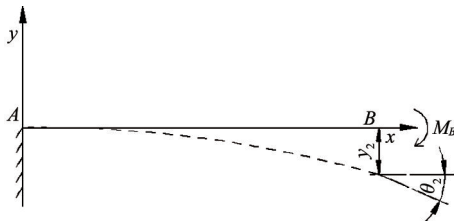


图3 弯矩 M_B 作用示意

Fig. 3 Bending moment M_B

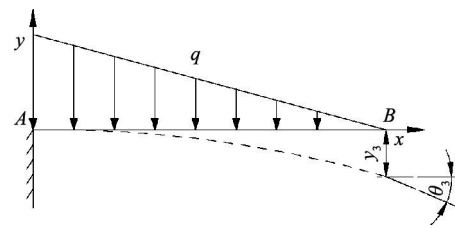


图4 三角形载荷 q 示意

Fig. 4 Triangular load

按叠加原理,变形几何方程式^[12]为

$$y_1 + y_2 + y_3 = 0 \quad \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 0 \quad (1)$$

应力 F_B 对 B 端的挠度、转角的物理关系为

$$y_1 = \frac{F_B l^3}{3EI} \quad \theta_1 = \frac{F_B l^2}{2EI} \quad (2)$$

弯矩 M_B 对 B 端的挠度、转角的物理关系为

$$y_2 = -\frac{M_B l^2}{2EI} \quad \theta_2 = -\frac{M_B l}{EI} \quad (3)$$

三角形不平衡载荷 q 对 B 端的挠度、转角的物理关系为

$$y_3 = -\frac{ql^4}{30EI} \quad \theta_3 = -\frac{ql^3}{24EI} \quad (4)$$

将关系式(2)、(3)、(4)代入式(1)有

$$\frac{F_B l^3}{3EI} - \frac{M_B l^2}{2EI} - \frac{ql^4}{30EI} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{F_B l^2}{2EI} - \frac{M_B l}{EI} - \frac{ql^3}{24EI} = 0 \quad (6)$$

解式(5)、(6)得

$$F_B = \frac{3ql}{20} \quad M_B = \frac{ql^2}{30}$$

如果 F_B 、 M_B 为正,表明上文所取的方向正确。

求得 F_B 后可以求出任意 x 处界面的应力值。设 x 处的弯矩为 $M(x)$,则

$$M(x) = \frac{ql^2}{30} - \frac{3ql}{20}x + \int_0^x qx \frac{l-x}{l} dx \quad (7)$$

为求梁内最大弯矩,对 $M(x)$ 求导,即

$$M'(x) = -\frac{3ql}{20} + qx - \frac{q}{l}x^2 \quad (8)$$

令式(8)等于0,求得 $x = l - \sqrt{30}l/10$,梁内弯矩极值取在 $x=0$ 、 $x = l - \sqrt{30}l/10$ 、 $x=l$ 处,则

$$M(0) = \frac{ql^2}{30} \quad M\left(l - \frac{\sqrt{30}l}{10}\right) = \frac{(3\sqrt{30} - 10)}{300} \quad M(l) = \frac{ql^2}{20} \quad (9)$$

梁的抗弯截面系数为

$$W = \frac{bw^2}{6} \quad (10)$$

截面应力为

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (11)$$

将式(9)、式(10)代入式(11)得最大应力为底部A点应

力,即

$$\sigma^A(l) = \frac{3ql^2}{10bw^2} \quad (12)$$

如果结果为正,说明充填体一侧受拉,临空面受压。

矿柱底部还受自重作用,所以底部临空面应力为 $\sigma^A(l)+G$ 。当 $\sigma^A(l)+G \leq R$ 时,即理论值小于或等于胶结废石模型的抗压强度,矿柱稳定,不会破坏。当 $\sigma^A(l)+G > R$ 时,即理论计算值大于胶结废石抗压强度,矿柱不稳定,会发生破坏。

2 实例计算与试验

2.1 超静定模型实例计算

选取大红山铜矿 385 中段一回采矿体为研究对象(图 5)。该矿柱高 $l=50$ m,厚度 $w=5$ m,容重 $r=2.73$ t/m³,所受尾砂充填体最大侧压(位于矿柱底部) $q=0.139$ MPa,顶部冒落拱压力 $F=0.213$ MPa。将相应参数(这里将宽度 b 取为 1)代入式(12)求得 $\sigma^A(l)=4.17$ MPa。矿柱自重 $G=rl$,即 $G=2.10$ MPa,则矿柱底部垂直方向的最大应力为 $\sigma^A(l)+G=6.27$ MPa。

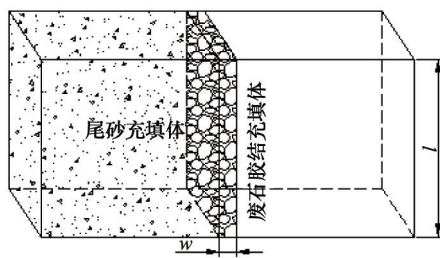


图5 回采矿体
Fig. 5 Stopping orebody

2.2 抗压强度试验

现场对胶结废石块原料进行取样,制作4块长、宽、高为250 mm×25 mm×250 mm的胶结废石块模型。在中南大学现代分析测试中心对胶结废石块模型进行抗压强度测试,检测设备采用INSTRON 1346电液伺服控制材料试验机(200 t),检测项目为单轴抗压强度、弹性模量及泊松比。通过试验测得胶结废石块模型的单轴抗压强度、弹性模量及泊松比的平均值分别为10.9 MPa、 2.746×10^3 MPa、0.26。

3 模拟结果与分析

上述实例的矿柱模型和Midas有限元分析软件加载如图6、图7所示。

对模型施加边界限制条件,运行Midas分析矿柱在充填体侧压、自重和上部松散体压力综合作用下的应力分布和应变位移。

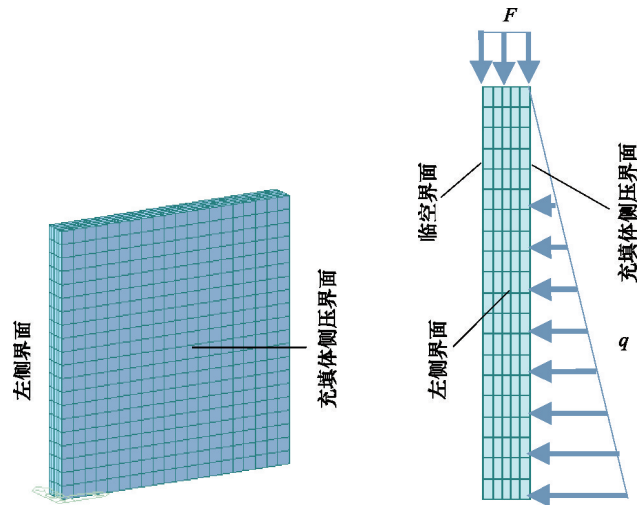


图6 矿柱模型
Fig. 6 Pillar model

图7 矿柱加载
Fig. 7 Pillar loading

3.1 矿柱应力分析

矿柱在充填体侧压、自重和上部松散体压力综合作用下,其侧压界面的应力分布如图8所示,临空面的应力分布如图9所示。

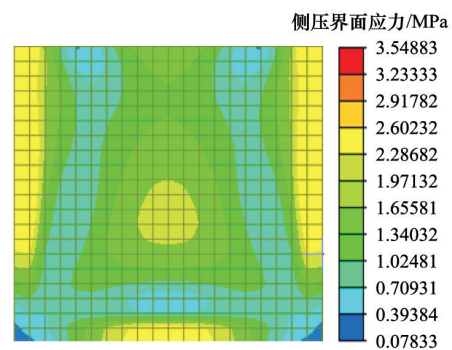


图8 侧压界面应力
Fig. 8 Lateral pressure

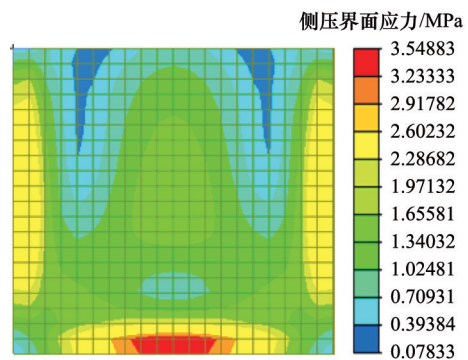


图9 临空面应力
Fig. 9 Stress of free surface

矿柱受到的有效应力为正值,即矿柱受到压力作用,最大应力 $\sigma_{\max}=3.55$ MPa,最小应力 $\sigma_{\min}=0.0783$ MPa。在综合作用力下矿柱受力基本成对称分布,矿柱下端中间部分受

力最大;两侧端壁由于围岩对其反作用产生应力集中,因此端壁受力较大,约为2.29~2.60 MPa;上部沿中心线对称有两块向下的低应力区域,底部两侧受力较小。

由图8、图9可知,矿柱的整体应力分布为越往下受力越大。在侧压界面应力中,低应力区为H形分布,因为该区域离两侧边界较远,区域内应力集中不明显,中间黄色部分也有一小块介于2.29~2.60 MPa之间的应力区,较之周围充填体受力较大。在临空面应力中,上部的∩形应力分布区域的应力较小,中间往下的一小块浅蓝色区域的应力相对较小。由于矿柱受充填体侧压 q 作用,矿柱整体表现出向另一侧的临空区弯曲的趋势,故临空面应力比侧压面应力大。

3.2 矿柱应变位移分析

矿柱在外载荷、自身重力作用下会产生位移变形,由于矿柱4条边界(除侧压面与临空面)都与外围岩胶结,所以在边界处不会发生位移,而是在远离边界处逐渐形成应变位移。如图10所示,在尾砂充填体侧压作用下,矿柱在 y 轴方向发生的应变位移较大,且位移由端壁向中心部位逐渐增大,应变位移最大值发生在中心部位,方向朝向临空面一侧,即矿柱向临空一侧发生的最大位移达到40.46 mm。矿柱在自重作用下在 z 轴方向发生的位移为9.781 mm。矿柱沿 x 轴方向的位移量只有5.957 mm,这是因为矿柱在 x 方向受力很小, x 轴方向的应变位移是伴随着 y 、 z 方向的位移而产生的。

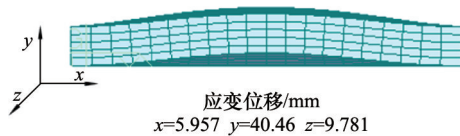


图10 应变位移

Fig. 10 Strain-displacement

4 结论

1) 现场废石块样品胶结模型试验测得的最大单轴抗压强度为10.9 MPa,而矿柱底部临空面的最大应力,超静定理论模型计算结果为6.27 MPa,软件模拟结果为3.55 MPa,同时软件模拟得到矿柱向临空一侧发生的最大位移为40.46 mm,说明采用超静定理论计算与数值模拟相结合分析矿柱稳定性是可行的,分析结果可作为相关研究的参考。

2) 鉴于矿柱在 y 轴方向变形位移较大,实际操作中可以在顶底部围岩和矿柱之间加锚索以限制其变形。

参考文献(References)

[1] 王洪武, 吴爱祥. 胶结充填体矿柱结构可靠性设计方法[J]. 黄金, 2003, 24(3): 27-30.

- Wang Hongwu, Wu Aixiang. The reliability design method of consolidated filling pillar structure[J]. Gold, 2003, 24(3): 27-30.
- [2] 杨正松. 大红山铜矿高效低损无废开采技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- Yang Zhengsong. Research on high efficiency and low loss and wasteless technique for Dahongshan copper mine[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [3] Hassani F R, Mortazavi A, Shabani M. An investigation of mechanisms involved in backfill-rock mass behaviour in narrow vein mining[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, 108(8): 463-472.
- [4] 杨涛波, 王晓军, 熊雪强, 等. 房柱法深部开采人工矿柱合理宽度设计[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(2): 84-85.
- Yang Taobo, Wang Xiaojun, Xiong Xueqiang, et al. Reasonable width design of artificial pillar for deep mining by room-and-pillar method[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011, 2(2): 84-85.
- [5] 张新国, 江宁, 张玉江, 等. 矽石膏体充填材料力学特性试验[J]. 金属矿山, 2012(12): 127-135.
- Zhang Xinguo, Jiang Ning, Zhang Yujiang, et al. Study on mechanical properties of coal waste paste filling materials[J]. Metal Mine, 2012 (12): 127-135.
- [6] 陈庆发, 古德生, 周科平, 等. 对称协同开采人工矿柱失稳的突变理论分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2338-2342.
- Chen Qingfa, Gu Desheng, Zhou Keping, et al. Analysis of catastrophe theory for artificial pillar instability in symmetric synergistic mining[J]. Journal of Central South University: Natural Sciences Technology, 2012, 43(6): 2338-2342.
- [7] Prathap G, Varadan T K. The inelastic large deformation of beams[J]. Journal of Applied Mechanics, 1976, 43(4): 689-690.
- [8] Lo C C, Gupta S D. Bending of a nonlinear rectangular beam in large deflection[J]. Journal of Applied Mechanics, 1978, 45(1): 213-215.
- [9] 李会知, 杨建中, 刘敏娜. 均布载荷作用下两端固支梁的弹塑性分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 447-451.
- Li Huizhi, Yang Jianzhong, Liu Minshan. Elastic-plastic analysis of beams fixed at two ends subjected to uniformly-distributed loads[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(4): 447-451.
- [10] 吴东旭, 曾庆田, 魏仁旭. 大红山铜矿铜铁合采矿柱废石胶结充填工艺技术研究[J]. 湖南有色金属, 2012, 28(6): 1-3.
- Wu Dongxu, Zeng Qingtian, Wei Renxu. Study on using waste rock cemented filling technology for copper and iron commingling in Dahongshan copper mine[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2012, 28(6): 1-3.
- [11] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- Liu Hongwen. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [12] 陈锦艳. 有固定端的等截面单跨超静定梁的快速解法[J]. 中国科技信息, 2008(18): 75-77.
- Chen Jinyan. Fast solution of the statically indeterminate beam with constant cross section and single-span with fixed-ends[J]. China Science and Technology Information, 2008(18): 75-77.

(责任编辑 韩星明)