

基于椭球体放矿理论的后和睦山铁矿脊部残留原因分析

王石,张钦礼,王新民

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 后和睦山铁矿生产中发现,相邻进路中间的脊部矿石在下一分段难以回收,而冒险在中间增加一条进路以提高回收率的思路又增大了危险性。本文运用椭球体放矿理论,找到了导致该铁矿脊部残留矿量多的原因,并优化了进路间距。基于矿岩散体的整体流动特性,分析多漏斗放矿时的松动椭球体形态,并结合该铁矿无底柱分段崩落法开采的生产数据,最终反推得到相邻漏斗松动椭球体的空间形态关系,为优化进路间距提供依据。结果表明,该铁矿松动椭球体短半轴 b_0 与放出体短半轴 b 之间的关系为 $b_0=1.82b$; b_0 的范围是5.90~7.96 m,即相邻漏斗松动椭球体不相互影响或相切是导致该铁矿存在脊部残留的主要原因;进路间距以8~10 m为宜。该方法为使用无底柱分段崩落法的矿山分析存在脊部残留的原因提供了一条路径。

关键词 脊部残留;椭球体放矿理论;矿岩散体;多漏斗放矿;无底柱分段崩落法

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.06.009

Analysis of Causes for Ridge Hangover in Houhemushan Iron Mine Based on Ore-drawing Ellipsoidal Theory

WANG Shi, ZHANG Qinli, WANG Xinmin

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

Abstract During the production of Houhemushan iron mine, ridge hangover of two contiguous routes was difficult to recover in the lower subsection. The thought of adding another route between two primary ones venturesomely to increase recovery magnified dangerousness. Therefore, causes leading to higher quantity of ridge hangover in this iron mine were found and space between two routes was optimized by applying the ore-drawing ellipsoidal theory. Loosening ellipsoidal shapes of multi-funnel drawing were analyzed on the basis of the whole flowing characteristics of ore-rock granules. Production data of this iron mine using non-pillar sublevel caving was combined. The spatial relationship of loosening ellipsoidal shapes, based on contiguous funnels, was finally reverse calculated, providing the basis for optimizing access space. The results show that the relationship between the ranges of short half axis of loosening ellipsoid and drawing ellipsoid is $b_0=1.82b$. The range of b_0 is 5.90~7.96 m. In other words, the main reason resulting in ridge hangover in this iron mine is that the spatial relationship of two contiguous loosening ellipsoids, based on contiguous funnels, is separated or tangent, and 8~10 m is suitable for the access space. This method provides a new way to analyze the reason why ridge hangover exists in a mine using non-pillar sublevel caving.

Keywords ridge hangover; ore-drawing ellipsoidal theory; ore-rock granules; multi-funnel drawing; non-pillar sublevel caving

矿石贫化损失大是无底柱分段崩落法的最大缺点,而脊部残留是造成矿石损失的主要原因之一^[1]。目前,高分段大间距无底柱分段崩落法的研究和应用已成为国内外诸多矿

山的发展方向,其具有推广性强、采准量少、地压控制好等优点^[2,3]。然而,少数矿山在没有进行大量实验研究或没有对地质情况不同的矿段进行区别性研究的状况下,把不成熟的采

收稿日期:2013-09-29;修回日期:2013-11-19

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB32B03)

作者简介:王石,博士研究生,研究方向为深井开采理论与技术,电子信箱:stonersxx@126.com

引用格式:王石,张钦礼,王新民.基于椭球体放矿理论的后和睦山铁矿脊部残留原因分析[J].科技导报,2014,32(6):59-62.

场结构参数盲目用于生产实际,导致上一个分段出现大量脊部残留,这不仅影响到技术经济指标和矿山产能,而且在极大程度上造成了资源浪费。针对这一问题,大部分专家学者都把注意力放在理论研究^[4]、实验分析^[5]和软件模拟(FLAC3D^[6])上,并没有找到一条能有效契合矿山实际情况来分析脊部残留原因的研究路径。由此,本文提出一条根据实际参数数据反推放矿过程中松动椭球体空间形态的新思路。

后和睦山铁矿采用的采场结构参数为12.5 m×12 m(分段高度×进路间距),在生产中发现相邻进路中间的脊部矿石在下一分段难以回收,而冒险在中间增加一条进路以提高回收率后又增大了危险性,地压难以控制。针对这一情况,本文根据矿山现有生产数据,运用椭球体放矿理论^[7]反推矿岩流动性,通过计算多漏斗放矿时放矿椭球体的形态,结合多漏斗放矿时相邻漏斗松动椭球体相互关系的判定方法,得到导致该矿存在脊部残留的根本原因。

1 椭球体放矿理论

椭球体放矿理论是一种描述矿岩散体在放出时一些基本规律并用方程式表达出来的理论^[8]。该理论可有效用于研究矿岩散体整体流动特性。

1.1 放出椭球体与松动椭球体的关系

基于实际地质情况,运用椭球体放矿理论,研究其在进行多漏斗放矿时放出椭球体与松动椭球体之间的关系^[9,10]。由椭球体放矿理论可知纯矿石体积 Q 由放出口宽度的一半 r 、放矿层高度 h 及椭球体偏心率 ε 确定^[9]。松动椭球体体积 Q_s 由松动椭球体高度 H_s 及松动椭球体偏心率 ε_s 确定。即

$$Q = \frac{\pi}{6} h^3 (1 - \varepsilon^2) + \frac{\pi}{2} r^2 h \quad (1)$$

$$Q_s \approx \frac{\pi}{6} (1 - \varepsilon_s^2) H_s^3 \quad (2)$$

当放矿模式为单漏斗放矿时,放出椭球体体积 Q_f 、 Q 和漏斗体积 Q_l 这3者大致相等^[9]。即

$$Q_f \approx Q \approx Q_l \quad (3)$$

假设从漏口露出了散体 Q_f ,在这个散体下移替换过程中,矿岩发生二次松散,得松动体 Q_s , K_s 为二次松散系数^[9]。即

$$K_s = \frac{Q_s}{Q_f - Q_l} \quad (4)$$

由式(1)~式(4),并结合矿山实际二次松散系数,可基本确定松动椭球体短半轴与放出体短半轴间的数值关系。

1.2 放出椭球体的参数确定

确定放矿层高度 h 是计算放出椭球体基本参数的基础,当只有一个上部废石接触面时,贫化刚开始时的放出体高度正好等于放矿层高度^[11]。由于实际放矿层的高度难以测量,一般采用经验公式来确定,其与分段高度 h_i 及脊部高度 h_j 有关。即

$$h = h_i + h_j \quad (5)$$

由式(1)可得 ε 的计算公式:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\pi h_i (h_i^2 + 3r^2) - 6Q}{\pi h_i^3}} \quad (6)$$

由椭球体放矿理论可得出椭球体长半轴 a 和短半轴 b 的表达式^[9]:

$$a = \frac{h_i}{2} \left[1 + \frac{r^2}{h_i^2 (1 - \varepsilon^2)} \right] \quad (7)$$

$$b = a \sqrt{1 - \varepsilon^2} \quad (8)$$

1.3 多漏斗放矿时相邻漏斗的相互关系

多漏斗放矿时,两相邻漏斗松动椭球体的关系有互不影响、相切和相交3种情形(图1)。这3种情况的判定方法与漏斗轴线间距 l_d 、松动椭球体短半轴 b_s 、放出椭球体短半轴 b 以及放出漏斗最大半径 R 有关^[11]。其判断标准为

$$R < \frac{l_d}{2} > b_s, \quad \frac{l_d}{2} > b \quad (9)$$

$$R < \frac{l_d}{2} = b_s, \quad \frac{l_d}{2} > b \quad (10)$$

$$b_s > \frac{l_d}{2} < R, \quad \frac{l_d}{2} = b \quad (11)$$

满足式(9)~式(11)的两相邻漏斗松动椭球体分别对应互不影响、相切和相交的关系。且从图1可以看出要提高矿石回收率,就要增大崩落矿石层高度 h 和漏斗口直径 d ,减少 l_d ,使相邻漏斗放出时所产生最终松动椭球体相交,此时脊部残留的矿石量最小。

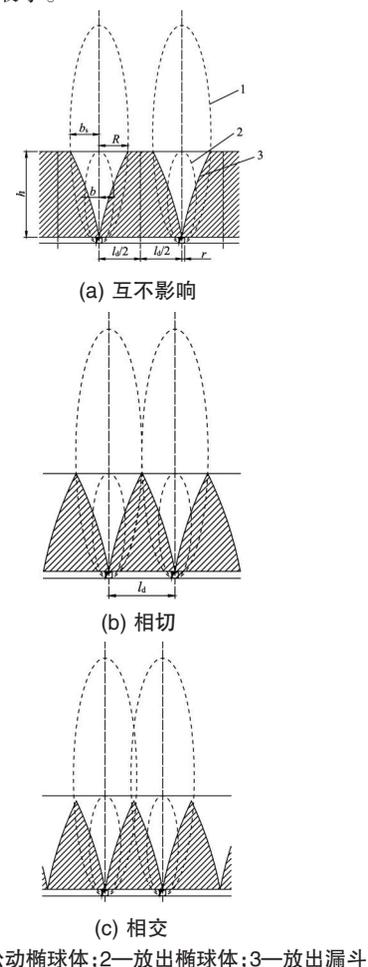


图1 相邻漏斗松动椭球体关系
Fig. 1 Relationship of loosening ellipsoids based on contiguous funnels

2 矿山实例分析

后和睦山铁矿现采用无底柱分段崩落法开采矿石,采选能力30万 t/a,损失率37%,当前采用的分段高度12.5 m,进路间距12 m,进路规格3.2 m×2.8 m。该矿矿岩破碎、粉矿多、含水量高、遇水易结块,存在大量脊部残留。增加进路后的-162.5 m水平现状见图2。

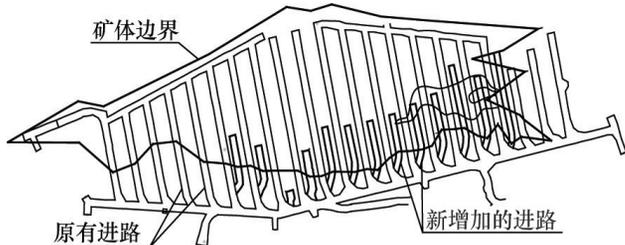


图2 -162.5 m水平现状

Fig. 2 Current situation of -162.5 m level

2.1 参数选取

根据后和睦山铁矿现场实际情况选取自然安息角、分段高度、放出口宽度等参数的数值。结合该铁矿爆破后矿岩破碎成粉状及地下水丰富的现场实际,参考类似矿山的经验选取二次破碎系数。各参数取值结果为:自然安息角44.25°,分段高度 h_i 12.5 m,放出口宽度 r_i 3.2 m,进路间距 L 12 m,脊部高度 h_j (由自然安息角与进路间距计算得到)7.2 m,二次破

碎系数 K_s 1.17~1.22。

2.2 松动椭球体短半轴与放出体短半轴之间关系的确定

由式(3)和式(4)可得

$$Q_s = (5 \sim 7)Q \quad (12)$$

取中间值可得 $Q_s = 6Q$,并结合式(1)与式(2)可得

$$H_s = 1.82h_i \sqrt{\frac{1-\varepsilon^2}{1-\varepsilon_s^2}} \quad (13)$$

将 $\sqrt{\frac{1-\varepsilon^2}{1-\varepsilon_s^2}}$ 大致取作1,则可得: $H_s = 1.82h_i$,结合式(7)与式(8)可得 $b_s = 1.82b$ 。即松动椭球体短半轴与放出体短半轴之间存在1.82倍的数值关系。

2.3 关键参数确定

根据后和睦山铁矿提供的生产数据可得各个进路一次崩矿放出的纯矿石体积 Q ,但在生产过程中,由于各种因素的不确定性, Q 具有较大的离散型,数据差异大,有些甚至无法参与计算。因此,本文对比选用比较稳定的回采进路取得的 Q 参与计算。用经验公式计算 Q ,其与出矿斗数 n 、铲运机容积 V (取 1.5 m^3)及不装满系数 K (取0.8)有关。即

$$Q = nVK \quad (14)$$

部分进路的纯矿石放出量统计计算结果见表1。

由式(5)可得放矿层高度 h_i 为19.7 m,结合式(6)~式(8),可得表2。

表1 后和睦山铁矿部分进路的纯矿石放出量统计

Table 1 Statistics of the drawing quantity of opure ore in partial routes of Houhemushan iron mine

| 进路名称 | 出矿斗数 | 平均出矿斗数 | 纯矿石放出量/ m^3 | | | | |
|------------|-------|--------|----------------------|-----|-----|--------|--------|
| -162.5 m水平 | 17-2# | 315 | 305 | 328 | 337 | 321.25 | 385.50 |
| | 18-2# | 362 | 451 | 383 | — | 398.67 | 478.40 |
| -175 m水平 | 10-2# | 640 | 490 | — | — | 565.00 | 678.00 |
| | 12-2# | 300 | 456 | 262 | 261 | 317.75 | 383.70 |
| | 13-2# | 466 | 331 | 248 | — | 348.33 | 418.00 |
| | 14-2# | 278 | 453 | — | — | 365.50 | 389.67 |
| | 15-2# | 410 | 280 | 485 | — | 389.67 | 470.00 |

表2 后和睦山铁矿放矿椭球体参数计算

Table 2 Calculation of parameters of drawing ellipsoids in Houhemushan iron mine

| 进路名称 | ε | a/m | b/m | |
|------------|---------------|--------------|--------------|--------|
| -162.5 m水平 | 17-2# | 0.9610 | 10.6987 | 2.9603 |
| | 18-2# | 0.9488 | 10.5012 | 3.3171 |
| -175 m水平 | 10-2# | 0.9221 | 10.2841 | 3.9786 |
| | 12-2# | 0.9612 | 10.7037 | 2.9529 |
| | 13-2# | 0.9567 | 10.6173 | 3.0897 |
| | 14-2# | 0.9540 | 10.5733 | 3.1690 |
| | 15-2# | 0.9499 | 10.5152 | 3.2864 |

2.4 结果分析

由表2可得,放出椭球体短半轴 b 的取值范围是2.9529~

3.9786 m,且 $b_s = 1.82b$,则松动椭球体短半轴 b_s 的范围是5.3742~7.2411 m。本文中漏斗轴线间距 l_0 与进路间距 L 相

同,即 $l_0/2=6$ m。各个进路 b_0 与 $l_0/2$ 的关系见图3。

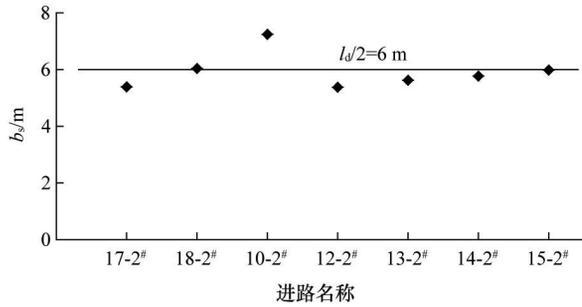


图3 各个进路 b_0 与 $l_0/2$ 的关系对照

Fig. 3 Comparison of relationships between b_0 and $l_0/2$ in each route

由图3可知,计算出的 b_0 主要满足式(9)和式(10),即相邻漏斗松动椭球体处于不相互影响和相切两种状态,只有10-2#进路的椭球体形态满足式(11)。由此可知,导致该铁矿存在脊部残留的主要原因是相邻漏斗松动椭球体不相互影响或相切。要想提高脊部残留的回收率,必须对进路间距作出合理调整,使得相邻漏斗松动椭球体相交。

2.5 进路间距优化计算

回采进路间距按照放矿理论,应使两相邻进路间距尽可能的减小,当进路宽度与回采进路间距矿柱宽度相等时,即形成所谓的“筒仓式”放矿时,这时的进路间距最为理想,回采、贫化指标也最好^[12]。但这种情况一般很难实现,因为进路地压随着进路间距的减小而变大,此时进路更难维护。根据相关论文研究成果和专家经验,当矿柱宽度大于等于4 m时,进路间矿柱具有一定的稳定性。根据最佳回采进路间距经验公式: $L=2b/1.2+M=8.42\sim 10.13$ m(其中, M 为进路宽度,3.5 m),即回采进路间距以8~10 m为宜。

3 结论

1) 根据后和睦山铁矿现有的生产实际数据,运用椭球体放矿理论反推放矿过程中松动椭球体的空间形态。

2) 参考类似矿山的经验选取二次破碎系数 $K_s=1.17\sim 1.22$,由此计算出该铁矿松动椭球体短半轴 b_0 与放出体短半轴 b 之间的关系为 $b_0=1.82b$ 。

3) 由计算出的松动椭球体短半轴 b_0 的范围5.3742~7.2411 m和多漏斗放矿时相邻漏斗相互关系的判定方法可得,导致该铁矿存在脊部残留的主要原因是相邻漏斗松动椭球体不相互影响或相切。

4) 由经验公式优化可得回采进路间距以8~10 m为宜。该方法对矿山分析类似问题有一定的借鉴意义。

参考文献(References)

[1] 黄泽, 盛建龙, 李迅. 金山店铁矿无底柱分段崩落法大间距结构研究[J]. 金属矿山, 2011, 40(4): 9-11.

Huang Ze, Sheng Jianlong, Li Xun. Study on large spacing structure with non-pillar sublevel caving in Jinshandian iron mine[J]. Metal Mine, 2011, 40(4): 9-11.

[2] 余健, 汪德文. 高分段大间距无底柱分段崩落采矿新技术[J]. 金属矿山, 2008, 38(3): 26-31.

Yu Jian, Wang Dewen. New mining technology of pillarless sublevel caving with high sublevel and large drive interval[J]. Metal Mine, 2008, 38(3): 26-31.

[3] 胡杏保. 大间距无底柱开采进路应力状况研究[J]. 金属矿山, 2005 (S1): 123-127.

Hu Xingbao. Study on stress state of drift in large-spacing pillarless mining[J]. Metal Mine, 2005(S1): 123-127.

[4] 李海洲. 大间距无底柱分段崩落法进路稳定性研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2009.

Li Haizhou. Study on the stability of surrounding rock in mining with the large space non-pillar[D]. Tangshan: Hebei Polytechnic University, 2009.

[5] 曹其华. 后和睦山采矿方法实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2004.

Cao Qihua. The experimental research of mining method in Houhemushan iron mine[D]. Shenyang: Northeastern University, 2004.

[6] 余健. 高分段大间距无底柱分段崩落采矿贫化损失预测与结构参数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.

Yu Jian. Research on the prediction of ore dilution and loss rate and the optimization of structural parameters of high sublevel large-space drive interval pillarless sublevel caving[D]. Changsha: Central South University, 2007.

[7] 赵彭年. 松散介质力学[M]. 北京: 地震出版社, 1995.

Zhao Pengnian. Mechanics of loose media[M]. Beijing: Seismological Press, 1995.

[8] 刘振东. 无底柱分段崩落法结构参数优化研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2011.

Liu Zhendong. Optimization research of stope structural parameters in sublevel caving with non-pillar[D]. Hengyang: University of South China, 2011.

[9] 朱志根. 自然崩落法放矿过程中矿岩散体流动规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

Zhu Zhigen. Study on flowing law of caved ore-rock bulk during ore drawing process of block caving[D]. Changsha: Central South University, 2006.

[10] 江兵. 大冶铁矿无底柱分段崩落法采场结构参数优化的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.

Jiang Bing. Study on optimizing of structure parameter of non-pillar sublevel caving in Daye iron mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2008.

[11] 王长军. 基于动态最佳经济出矿品位的控制放矿技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.

Wang Changjun. Research of the controlling techniques of ore drawing based on the best economic dynamic removal ore grade[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[12] 郭忠林, 余兆禄, 梁忠荣. 化念铁矿采场结构参数试验研究[J]. 铜业工程, 2003(1): 36-39, 56.

Guo Zhonglin, Yu Zhaolu, Liang Zhongrong. Study of the Huanian's iron ore stope structure parameter[J]. Cooper Engineering, 2003(1): 36-39, 56.

(责任编辑 侯澄芝)