

文章编号:1673-3363(2010)02-0239-05

随机介质放矿理论的改进研究

陶干强¹,任凤玉²,刘振东¹,任青云¹

(1. 南华大学 核资源与核燃料工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 在实验的基础上,分析了放矿口宽度对放出量和散体流动参数的影响,改进了随机介质放矿理论,揭示了放矿口宽度对散体移动规律的影响,并指出了其影响范围.将改进后的随机介质放矿理论与原来的随机介质放矿理论进行了对比,3个矿山实验结果表明,改进后的随机介质放矿理论与实际符合较好.提出了确定采场结构参数的新方法,当放出体为非标准椭球体时,上下分段菱形布置的放出体三点相切时可得到最优的采场结构参数.该方法的提出,进一步扩大了随机介质放矿理论的应用范围.

关键词: 无底柱分段崩落法;随机介质放矿理论;放出体形态;放矿口;放出体方程

中图分类号: TD 853.31 **文献标识码:** A

Research on Improvement of the Stochastic Medium Theory for Ore Drawing

TAO Gan-qiang¹, REN Feng-yu², LIU Zhen-dong¹, REN Qing-yun¹

(1. School of Nuclear Resource and Nuclear Fuel Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. College of Resource and Civil Engineering, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: Based on the experiments, the relationship among draw-point size, released volume, and granular flow parameters are analyzed. Then, the improved stochastic medium theory of drawing (ISMTD) considering the effect of draw-point size is put forward. ISMTD shows the relationship between granular flow rules and size of stoping drift in sublevel caving and indicates the influence scope of draw-point size. Then two methods, namely the stochastic medium theory of drawing (SMTD) and ISMTD, are compared by three experiments in three different mines. The experimental results show that ISMTD can well reflect flow characteristics of caved ore and rock. Moreover, new methods for determining the stope structure parameters are proposed. As the draw body is not a normal ellipsoid, the optimized stope structure parameters can be obtained by tangency of three draw bodies in diamond sublevels in three points. ISMTD not only enlarges the application field but also develops the stochastic medium theory of ore drawing.

Key words: pillarless sublevel caving; the stochastic medium theory of drawing (SMTD); draw-body shape; drawpoint; drawbody equation

无底柱分段崩落法由于其具有生产效率高、成本低和作业安全等优点,已在国内外获得广泛应用.我国采用无底柱分段崩落法采出的矿量,地下

铁矿山占采出矿石总量 80% 以上,有色金属矿山约占 35%. 长期以来,由于采用小结构参数及低效风动设备,致使采准工程量大,生产成本低,经济效

收稿日期: 2009-11-12

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(07JJ3090)

作者简介: 陶干强(1971-),男,湖南省宁乡市人,副教授,博士,从事采矿工艺、散体动力学方面的研究.

E-mail: nhutgq@126.com Tel: 0734-8282230

益差,这种局面急需改变。

当前世界采矿的发展趋势是最大限度地简化采矿工艺和使用高效的无轨采矿设备^[1]。随着大型凿岩设备和出矿设备的投入,将引起井下凿岩进路和放矿口尺寸的增大。如采用崩落法开采的瑞典基鲁纳铁矿,采场结构参数为 33 m×24 m,放矿口尺寸宽×高为 7 m×5 m,有的达到 11 m×5 m。同时,对于复杂开采条件的矿体,采用崩落法开采时存在一些突出的问题^[2]:下盘围岩不稳固,易过早混入,贫化率高;矿体平均厚度较窄,出矿进路不能菱形布置,矿石回采率低。因此,在该种开采技术条件下,保持巷道高度不变时,增加出矿进路的断面宽度,有利于改善矿石流动性能,提高矿石回采率。进路断面增大后,放矿口尺寸对散体移动规律有何影响?如何确定合理的采场结构参数?工程设计时必须考虑这些问题。目前我国放矿理论建立在点源放矿的基础上,对放矿口增大后散体移动规律的研究较少,工程设计中缺少相应的理论指导。

放矿口对散体移动规律的影响已提出多年,许多科研人员进行了研究^[3-11],建立了考虑放矿口尺寸的散体移动概率密度方程,取得了一些开创性的研究成果。然而,由于其所提出的方程复杂,不能有效地指导现场生产设计。因此,有必要对其简化以在现场推广应用。

本文在实验的基础上,考虑放矿口尺寸的影响,对随机介质放矿理论进行了改进,建立了基于放矿口尺寸的随机介质放矿理论;同时,提出了确定无底柱分段崩落法采场结构参数的新方法。

1 随机介质放矿理论的基本原理

随机介质放矿理论将松散矿岩视为一种“随机介质”,将松散矿岩放出过程视为一随机过程。从统计学观点,描述散体内部的移动规律,即颗粒由概率较小的位置向概率较大的位置移动。

如图 1 所示,点源放矿时放矿口上部任一点 (r, Z) 的下移概率 p 为

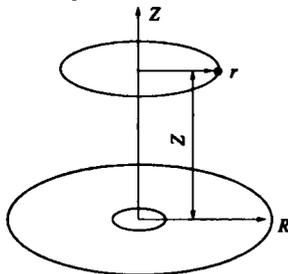


图 1 放矿坐标系

Fig. 1 Drawing coordinate system

$$p(r, Z) = \frac{1}{\sqrt{\pi\beta Z^\alpha}} e^{-\frac{r^2}{\beta Z^\alpha}}, \quad (1)$$

式中: α, β 为散体流动参数。

设放矿口单位时间放出量为 q ,在移动带内每一位置颗粒的下移速度与该点移动概率成正比,散体移动满足无源场连续流动条件,则散体移动速度方程为

$$\begin{aligned} v_z &= -\frac{q}{\pi\beta Z^\alpha} e^{-\frac{r^2}{\beta Z^\alpha}}, \\ v_r &= -\frac{aqr}{2\pi\beta Z^{\alpha+1}} e^{-\frac{r^2}{\beta Z^\alpha}}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: v_z, v_r 分别为底部放矿时垂直方向和水平方向散体的流动速度; q 为单位时间放矿口散体的放出量。已知速度场后,便可求出颗粒移动的轨迹、放出体、移动漏斗和放出漏斗等方程。

2 放矿口尺寸对散体移动规律影响实验

2.1 放矿口尺寸与散体放出量的关系

立体放矿实验模型尺寸为 25 cm×27 cm×40 cm,散体为白云岩,粒径 2~6 mm。散体为自然堆积状态,装填密度 1.654 8 g/cm³。在放矿口中心轴上每隔 5 cm 布置 2 个标志颗粒,共布置 7 层。实验测得不同放矿口尺寸对应的放出量见表 1。

表 1 放矿口直径 D 与散体放出量的关系

Table 1 Relationship between drawpoint diameter and granular released volume in experiment cm³

D/ cm	散体放出高度/cm						
	5	10	15	20	25	30	35
3	78.6	244.7	688.9	1075.7	2027.4	3130	4698.5
2	69.5	184.3	562	948.8	1819.0	2964	4351

由表 1 可知,放矿口大小对散体放出量的影响很明显。保持散体放出高度不变时,放出量随放矿口增大而增大。

2.2 放矿口尺寸与散体流动参数值的关系

为了研究放矿口尺寸与散体流动参数值的关系,对同一种散体开展了 4 种不同放矿口尺寸的实验,实验结果见表 2^[3]。

表 2 放矿口尺寸与散体流动参数值的关系

Table 2 Relationship between size of drawpoint and granular flow parameters in experiment

放矿口 半径/m	Q 与 H 回归式	相关系数	α	β
0.75	$Q=0.349H^{2.562}$	0.9995	1.562	0.2846
1.00	$Q=0.5287H^{2.469}$	0.9975	1.469	0.4155
1.25	$Q=1.1474H^{2.27}$	0.9940	1.270	0.8291
1.50	$Q=1.2207H^{2.26}$	0.9940	1.260	0.8781

由表 2 可知,随放矿口尺寸加大,散体流动参数 α 减小、 β 值增大;表 2 中回归相关系数数值随漏

口半径增大而变小，这表明散体流动参数 α, β 不仅受到放矿口尺寸的影响，还受到放矿边界条件等因素的影响。

3 改进随机介质放矿理论

上述随机介质放矿理论的基本方程是在假设放矿口宽度为 0 的情况下得到的。如图 2 所示，实际中放矿口宽度不为 0，因此，需要对随机介质放矿理论的基本方程进行改进。

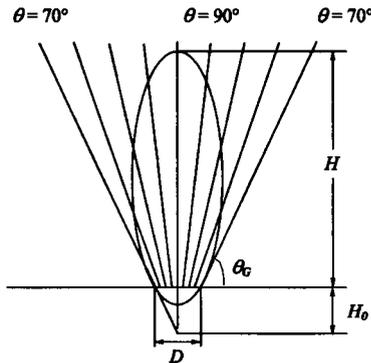


图 2 放矿口尺寸与放出体形态示意图
Fig. 2 Relationship between size of drawpoint and drawbody shape

3.1 放出体方程

在图 2 中，放矿口宽度为 D ，将 $\theta=90^\circ$ 直线和 $\theta=\theta_G$ 直线向下延伸并相交于一点，该交点到放矿口中心的垂直距离为 H_0 ，其值为

$$H_0 = \frac{D}{2} \tan \theta_G, \quad (3)$$

式中 θ_G 取决于颗粒内摩擦角 φ_0 ，由下面关系式决定^[12]

$$\theta_G = \pi/4 + \varphi_0/2, \quad (4)$$

式中 φ_0 为内摩擦角，随颗粒大小及颗粒的粗糙程度而变化，颗粒越粗糙其值越大。

图 2 中放出体方程为

$$r^2 = (\alpha + 1) \beta z^\alpha \ln \frac{H + H_0}{z}. \quad (5)$$

3.2 放出体体积计算

放出体体积可根据式(5)，采用图 1 中水平微小圆盘积分求得。圆盘微元体积为

$$dV = \pi r^2 dz = \pi(\alpha + 1) \beta z^\alpha \ln \frac{H + H_0}{z} dz. \quad (6)$$

则放出体体积为

$$V = \int_V dV = \pi(\alpha + 1) \beta \int_{H_0}^{H+H_0} z^\alpha \ln \frac{H + H_0}{z} dz = \pi h_0^{\alpha+1} \left\{ \frac{1}{\alpha + 1} \left[\left(\frac{H + H_0}{H_0} \right)^{\alpha+1} - 1 \right] - \ln \frac{H + H_0}{H_0} \right\}. \quad (7)$$

改进后的随机介质放矿理论与原随机介质放矿理论的体积对比见表 3。

表 3 两种随机介质放矿理论放出体体积对比
Table 3 Comparison of drawbody volume between SMTD and ISMTD

D/ m	α	放出体高 H/m					
		5	10	15	20	25	30
3	0.8	0.55	0.82	0.90	0.93	0.95	0.96
4	0.8	0.39	0.73	0.84	0.90	0.92	0.94
5	0.8	0.24	0.64	0.79	0.86	0.90	0.92
6	0.8	0.12	0.55	0.73	0.82	0.86	0.90
3	1.0	0.61	0.86	0.93	0.95	0.97	0.98
4	1.0	0.44	0.78	0.88	0.93	0.95	0.96
5	1.0	0.28	0.70	0.83	0.89	0.93	0.94
6	1.0	0.15	0.61	0.78	0.86	0.90	0.93
3	2.0	0.81	0.96	0.99	0.99	1.00	1.00
4	2.0	0.65	0.93	0.97	0.99	0.99	1.00
5	2.0	0.46	0.88	0.95	0.98	0.99	0.99
6	2.0	0.27	0.81	0.93	0.96	0.98	0.99

从表 3 可知，放矿口宽度 D 和散体流动参数 α 对体积比影响较大。给定 α ，体积比随 D 增大而减小；给定 D ，体积比随 α 增大而增大。同时也可看出，体积比随放出体高 H 增大而增大。当 H 与 D 比值大于 5 时，体积比达到 0.9，说明放矿口对散体移动规律影响小；而当 H 与 D 比值小于 5 时，放矿口的影响较大。

4 两种随机介质放矿理论的比较

4.1 散体流动参数对比

首先对 3 个矿山的实验数据采用两种方法进行了对比和计算^[10]，得到的散体流动参数如表 4 所示，同时给出了数据拟合时的相关系数 ρ 和剩余标准差 s 。

表 4 随机介质放矿理论散体流动参数对比
Table 4 Comparison of granular flow parameters deduced by SMTD and ISMTD

实验者	随机介质放矿理论	α	β	H_0	ρ	s
陶干强 ^[6]	原/改进后	1.4602/1.212	0.2189/0.4182	1.426	0.865/0.902	0.33/0.32
刘芸 ^[13]	原/改进后	1.3019/1.4016	0.5164/0.342	1.159	0.951/0.998	0.15/0.08
张慎河 ^[13]	原/改进后	1.7892/1.4779	0.1151/0.3062	2.018	0.986/0.995	0.31/0.16

从表 4 中可知,两种方法拟合的相关系数都超过 0.85,表明两种方法都具有较高的精度;改进随机介质放矿理论具有更高的相关系数和更小的剩余标准差.说明其结果与实际相符合较好.

4.2 随机介质放矿理论采场结构参数确定

某铁矿设计采用无底柱分段崩落法开采,由实验得出其矿石散体流动参数为

$$\alpha = 1.0646,$$

$$\beta = 1.4782.$$

回归相关系数为 0.988^[6].

为使残留于采场内的矿石在下分段具有良好的回收条件,要求进路间距与分段高度保持合理的比例关系.通常采用公式(8)来计算散体移动带宽度 R .

$$R = 5\sqrt{\frac{1}{2}\beta Z^\alpha}. \quad (8)$$

当分段高度 Z 为 15 m 时, R 为 18.2 m.

因此,根据原随机介质放矿理论得到的无底柱分段崩落法采场结构参数为:分段高度 15 m,进路间距 18.2 m.此时,采场上下分段的放出体是相互重叠的.说明采用该结构参数时放矿的贫化率较大.因此,所得到的采场结构参数不是最优的.

4.3 改进随机介质放矿理论采场结构参数确定

对椭球体放矿理论而言,合理采场结构参数的理论依据是本分段两相邻进路的放矿椭球体不相切,而是与上、下分段呈菱形布置的放矿椭球体相切,且隔分段的放矿椭球体在流轴线上相切,形成五点相切^[14-15].

如图 3 所示,由于实际测得的放出体形态为非标准椭球体,因此,需要推导非标准椭球体合理的采场结构参数的确定方法.

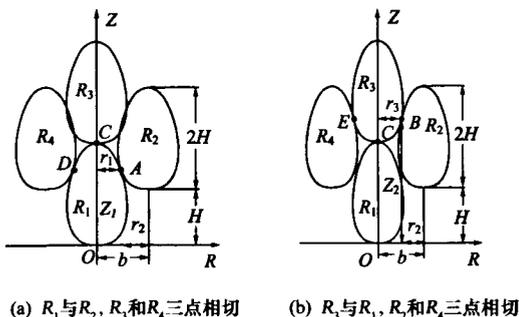


图 3 非标准椭球体三点相切示意图
Fig. 3 Schema of nonstandard ellipsoid tangent in three points

由图 3 可知,上下分段的放出体只在 3 点相切,而不是 5 点相切.合理的采场结构参数应是上下分段菱形布置的放出体在 3 点相切的同时,放出

体不相互重叠.因为当上一分段放矿结束后,其空间已被废石填满.而下一分段的放出体与上一分段放出体相互重叠时,说明本分段在回采矿石的同时也放出了上一分段的废石.

放出体 R_1 的极坐标方程为

$$r^2 = (\alpha + 1)\beta Z^\alpha \ln\left(\frac{2H}{Z}\right), \quad (9)$$

其中 $0 < Z < 2H$.

放出体 R_2 的极坐标方程为

$$(r - b)^2 = (\alpha + 1)\beta(Z - H)^\alpha \ln\left(\frac{2H}{Z - H}\right), \quad (10)$$

其中 $H < Z < 3H$.

放出体 R_3 的极坐标方程为

$$r^2 = (\alpha + 1)\beta(Z - 2H)^\alpha \ln\left(\frac{2H}{Z - 2H}\right), \quad (11)$$

其中 $2H < Z < 4H$

1) 当 R_1 与 R_2 在 A 点相切时(如图 3a 所示),切点 A 同时满足式(9)和式(10),并且 R_1 和 R_2 在 A 点的切线斜率相等,则

$$r_1^2 = (\alpha + 1)\beta Z_1^\alpha \ln\left(\frac{2H}{Z_1}\right),$$

$$r_2^2 = (\alpha + 1)\beta(Z_1 - H)^\alpha \ln\left(\frac{2H}{Z_1 - H}\right), \quad (12)$$

$$r_1 + r_2 = b,$$

$$\frac{dr_1}{dZ_1} = \frac{dr_2}{dZ_1}.$$

2) 当 R_2 与 R_3 在 B 点相切时(如图 3b 所示),切点 B 同时满足方程(10)和(11),并且 R_2 和 R_3 在 B 点的切线斜率相等,则

$$r_2^2 = (\alpha + 1)\beta(Z_2 - H)^\alpha \ln\left(\frac{2H}{Z_2 - H}\right),$$

$$r_3^2 = (\alpha + 1)\beta(Z_2 - 2H)^\alpha \ln\left(\frac{2H}{Z_2 - 2H}\right), \quad (13)$$

$$r_2 + r_3 = b,$$

$$\frac{dr_2}{dZ_2} = \frac{dr_3}{dZ_2}.$$

给定散体流动参数 α, β 和分段高度 H 时,式(12)和式(13)的求解方法有两种.一是作图法,先画出放出体 R_1 和 R_3 ,并使其在 C 点相切;然后在分段高度为 H 的水平面画出放出体 R_2 ,平移 R_2 ,使其与 R_1 相切于 A 点或者与 R_3 相切于 B 点.此时可得到不同的 b 值,其中 b 的最大值为最优的进路间距.方法二是,采用优化方法求解.限于篇幅,本文不作详述.

当 $\alpha = 1.0646, \beta = 1.4782, H = 15$ m 时,由(12)式可求得 $Z_1 = 29.15, r_1 = 1.779, r_2 = 6.205, b = 7.984$.则进路间距为 $B = 2b = 16$ m.由(13)式可

求得 $Z_2=37.87, r_2=4.81, r_3=6.06, b=10.87$. 则进路间距为 $B=21.75$ m. 因此, 当分段高度 $H=15$ m 时, 合理的进路间距 B 为 $16\sim 21.75$ m. 从经济方面考虑, 大结构参数可降低其采准比和提高采场稳定性, 建议取进路间距 21.75 m.

5 结 论

1) 从实验得知, 散体放出量随放矿口增大而增大; 散体流动参数不仅受放矿边界条件等因素的影响, 还受放矿口尺寸的影响.

2) 考虑放矿口尺寸的影响, 改进了随机介质放矿理论; 指出了放矿口对散体移动规律的影响范围: 当放出体高度大于放矿口宽度 5 倍以上高度时, 影响小; 当放出体高度小于放矿口宽度 5 倍以下时, 影响较大.

3) 将改进的随机介质放矿理论与原来的随机介质放矿理论进行了对比, 3 个矿山散体流动参数实验结果表明, 改进的随机介质放矿理论与实际符合较好.

4) 提出了确定采场结构参数的新方法. 对于放出体为非标准的椭球体时, 上下分段菱形布置的放出体三点相切的同时, 使进路间距最大, 可得到最优的采场结构参数.

参考文献:

- [1] FREIDIN A M, NEVEROV S A, NEVEROV A A, et al. Mine stability with application of sublevel caving schemes[J]. *Journal of Mining Science*, 2008, 44(1):82-91.
- [2] 郑建明. 弓长岭井下矿大断面结构参数应用研究[D]. 沈阳:东北大学, 2003.
- [3] 任凤玉. 放矿随机介质理论及其实际应用[D]. 沈阳:东北大学, 1992.
- [4] 任凤玉. 放矿口对崩落法放矿的影响[J]. *有色金属*, 1993, 45(4):17-23.
REN Feng-yu. Influence of draw hole on ore-drawing[J]. *Nonferrous Metals*, 1993, 45(4):17-23.
- [5] 任凤玉. 随机介质放矿理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 1994.
- [6] 陶干强. 崩落矿岩流动规律及其应用研究[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2003.
- [7] 乔登攀, 马正位. 放矿口散体流动速度分布及显著影响高度研究[J]. *金属矿山*, 2007, 376(10):37-41.
QIAO Deng-pan, MA Zheng-wei. Study on flow velocity of bulk at drawing opening and its significant influence height[J]. *Metal Mine*, 2007, 376(10):37-41.
- [8] 乔登攀, 周宗红, 马正位. 无底柱分段崩落法端部放矿口的影响机理研究[J]. *中国矿业*, 2007, 16(11):59-62.
QIAO Deng-pan, ZHOU Zong-hong, MA Zheng-wei. Study on influence mechanics of drawing outlet in sublevel caving[J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(11):59-62.
- [9] 王鹏. 基于 SLS 系统的弓长岭井下矿大断面结构参数应用研究[J]. *中国矿业*, 2007, 16(1):98-101.
WANG Peng. Research on big cross section structure parameters in underground mine of Gongchangling based on SLS system [J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(1):98-101.
- [10] 陶干强, 杨仕教, 任凤玉. 随机介质放矿理论散体流动参数实验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊):3464-3470.
TAO Gan-qiang, YANG Shi-jiao, REN Feng-yu. Experiment on granules flow parameters of the stochastic medium theory of ore drawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28 (Supp): 3464-3470.
- [11] 陶干强, 杨仕教, 任凤玉. 崩落矿岩散粒体流动性实验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10):2950-2954.
TAO Gan-qiang, YANG Shi-jiao, REN Feng-yu. Experimental research on granular flow characters of caved ore and rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10):2950-2954.
- [12] KUCHTA M E. A revised form of the Bergmark-Roos equation for describing the gravity flow of broken rock [J]. *Mineral Resources Engineering*, 2002, 11(4):349-360.
- [13] 张慎河. 放矿理论及其检验[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2001.
- [14] 程海军. 大间距无底柱采矿新工艺工业试验[J]. *金属矿山*, 2003, 330(12):55-59.
CHENG Hai-jun. Commercial test of new technology in sublevel caving with new wide-spacing [J]. *Metal Mine*, 2003, 330(12):55-59.
- [15] 董振民. 大间距集中化无底柱采矿新工艺研究[J]. *金属矿山*, 2004, 333(3):33-36.
DONG Zhen-min. Research of new process of sublevel caving with wide-spacing [J]. *Metal Mine*, 2004, 333(3):33-36.