

# 覆岩散体粒径空间分布对岩石混入的影响

由 希<sup>1,2</sup>, 张国建<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘 要:** 针对崩落法在覆盖岩层下放矿岩石混入率高的问题, 提出基于隶属度描述覆岩散体粒径空间分布对岩石混入影响的方法. 在散体级配的基础上, 用模型实验的方法构建了同一粒径级配下覆盖岩层的三种粒径空间分布模型, 并用隶属度对模型进行量化. 首先建立三种覆岩散体粒径空间分布模型, 然后将其对指定子集的隶属度作为描述岩石混入的方法, 对比等量放矿条件下的岩石混入结果. 实验结果表明: 本方法揭示了覆岩散体粒径空间分布对岩石混入过程的影响, 对认识岩石混入与矿石贫化发生具有指导意义.

**关键词:** 覆岩散体; 粒径空间分布; 模型实验; 隶属度; 岩石混入

中图分类号: TD 853.36 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)11-1604-05

## Effect of Particle Size Space Distribution in Coverage Rocks on Rocks Mixture

YOU Xi<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-jian<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China. Corresponding author: ZHANG Guo-jian, professor, E-mail: zgj6677@163.com)

**Abstract:** In view of higher rocks mixture rate of ore drawing under the coverage rocks, a method describing the effect of particle size space distribution in coverage rocks on rocks mixture was proposed based on the degree of membership. On the basis of coverage rocks gradation, the model-experiment method was used to construct three sorts of coverage rocks' particle size space distribution with identical gradation, and the degree of membership was used to quantify the model-experiment. Firstly, three sorts of particle size space distribution in coverage rocks were constructed. Then the degree of membership about specific subset was used to quantify the particle size space distribution in coverage rocks and rocks mixture process was estimated. Finally, the results of rocks mixture rate at equal ore drawing were compared. The model-experimental results showed that the method can reveal the effect of particle size space distribution in coverage rocks on rocks mixture, and it is a significant and helpful method to understand the process of rocks mixture and ore dilution.

**Key words:** coverage rocks; particle size space distribution; model-experiment; degree of membership; rocks mixture

在崩落法放矿中, 崩落的矿石在松散覆盖岩层散体的覆盖下靠重力放出, 由于岩石与矿石直接接触, 导致该类方法的损失、贫化指标差, 生产中还经常出现细粒、粉状岩石过早混入, 使回收指标进一步恶化, 不利于矿产资源的回收. 散体颗粒在自重作用下的运动过程, 相对在粮食和物料运输等领域研究较多, 目前, 对矿山崩落矿岩颗粒流

动过程的研究主要有随机介质放矿理论、椭球体放矿理论和放矿计算机仿真<sup>[1-6]</sup>. 经崩落后的矿岩散体, 不同于粒径单一、粒径级配稳定的人工散体或谷物, 其粒径组成是非均匀的, 且受崩落作用的影响矿岩颗粒在空间各位置上的粒径级配也是多变的. 在覆岩散体的放出流动过程中散体结构发生二次松散, 重力作用下原本由放出散体颗粒

所占位置被周围颗粒填补,但周围颗粒的填补下移过程具有明显的随机性,不同空间位置上的散体颗粒呈现出非均匀、不连续的流动特点.虽然简化的散体颗粒模型及现有理论可以较好地描述出放出体形态,在确定采场结构参数及降低损失贫化方面做出了明显贡献,但应该指出的是基于形态均一、分布连续的假设,会掩盖散体的一些重要流动特征<sup>[7-10]</sup>.本文采用理论分析和实验相结合的方法描述了散体的运动特点,并首次提出了散体的粒径空间分布概念,实验通过改变覆岩散体的粒径空间分布,来揭示覆岩散体流动过程中的运动特点,其结果显示了松散覆盖岩层对矿石的混入过程,以及覆盖岩层散体粒径空间分布对岩石混入的影响.

## 1 散体运动特点

崩落的覆岩散体是由许多不同粒径、形状固体颗粒构成的堆积物.在堆积状态下,散体颗粒除受到重力作用外还与周围相邻颗粒发生力的作用,颗粒在平衡力的作用下保持静止.如果在某一位置上的颗粒产生移动,将会改变其周围相邻颗粒的受力状态,使作用在这些颗粒上的合力或合力矩不等于零,从而引起相邻颗粒运动状态的改变,可以说散体的平衡就是散体颗粒的平衡.崩落的覆岩散体颗粒因其呈角砾状、非均一、不连续等特点,在其约束面上可能发生滑移、旋转、类抛物及落体运动.

当不同粒径的颗粒堆积构成具有一定粒径级配的散体时,各粒径颗粒分布在空间位置的不同,改变了颗粒间的接触关系.由于颗粒在间隙中所具有的滑移、旋转、类抛物及落体运动,受颗粒粒径、形状以及颗粒间接触关系影响,使得散体不同粒径颗粒在流动中表现出不同的运动形式.若在粒径的空间位置分布中大粒径颗粒总是位于小粒径颗粒上方,大粒径颗粒不可能通过小粒径颗粒间隙下落,则在下移过程中,上层颗粒总是跟随下层颗粒的运动,不同粒径颗粒间有完整清晰的接触面.反之,若在粒径的空间位置分布中小粒径颗粒总是位于大粒径颗粒上方,小粒径颗粒易于通过大粒径颗粒间隙,则在下移过程中,小粒径颗粒比大粒径颗粒下降速度更快,不同粒径颗粒间的接触面很快消失不见,即出现小粒径颗粒向下部大粒径颗粒的混入.可以预见的是,散体中细小粒径颗粒易于穿越散体间隙,比大粒径颗粒具有更快的下降速度,从而使散体在流动过程中,具有在

空间位置上趋于形成下部细小颗粒集中,上部较大颗粒集中的空间分布特点.

当覆岩颗粒的粒径在空间位置上具有上述不同分布形式时,改变了矿岩接触关系与覆岩颗粒的运动过程,并会对岩石混入以及矿石贫化产生重要影响.因此有必要进一步研究覆岩散体的粒径在空间位置上的分布形式对岩石混入的影响.

## 2 散体粒径空间分布

### 2.1 散体粒径空间分布

散体粒径空间分布描述的是,散体粒径在空间位置上的分布情况,是将粒径与空间位置一同考虑,能够表示散体颗粒在空间各处的接触关系及运动特点,可用于认识岩石混入过程与矿石贫化发生的原因.因为是将由统计得到的粒径级配与空间位置联系在一起,所以在散体的某一粒径级配下,可存在无数种粒径空间分布情况,也就是说,整个散体所具有的粒径级配并不代表在空间各处上的粒径级配,因此覆岩散体受粒径空间分布变化的影响,散体颗粒会表现出不同的运动过程.

### 2.2 散体粒径空间分布描述

将覆盖岩层颗粒按照粒径划分 3 个子集,计算出不同粒径颗粒对已知子集的隶属度,用于综合地描述覆盖岩层散体的粒径与级配情况,并通过空间上各位置处的隶属度来描述整个覆岩散体的粒径空间分布及运动特点.

本文所设计实验中覆盖岩层颗粒粒径范围为 0~10 mm,即论域  $U = [0, 10]$ ,元素  $x, x \in U$ ,有 3 个子集  $A, B, C$  均  $\subseteq U$ .

子集描述如下:

$A$ : 颗粒粒径小于 1 mm 的细小颗粒;  $B$ : 颗粒粒径大于等于 4 mm, 小于等于 6 mm 的中颗粒;  $C$ : 颗粒粒径大于 9 mm 的大颗粒. 一个元素  $x$  在论域上的一个子集, 记为  $A$ .  $\mu_A$  是该子集的隶属函数,  $\mu_A$  在  $x \in U$  点处的值  $\mu_A(x)$  称为  $x$  对  $A$  的隶属度, 它表示  $x$  属于  $A$  子集的程度或“资格”. 对于  $U$  内任意一个元素  $x$  隶属于某子集的程度需要建立在隶属函数的基础上, 分别给出了确定子集  $A, B, C$  的隶属函数关系式:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x < 1; \\ (10-x)/9, & 1 \leq x < 10; \\ 0, & 10 \leq x. \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ x/4, & 0 \leq x < 4; \\ 1, & 4 \leq x < 6; \\ (10-x)/4, & 6 \leq x < 10; \\ 0, & x \geq 10. \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ x/9, & 0 \leq x < 9; \\ 1, & x \geq 9. \end{cases} \quad (3)$$

实验所用颗粒粒径为小于 1 mm 的白云石, 1 ~ 4 mm 的白云石与铁矿石, 4 ~ 10 mm 的白云石. 根据式(1) ~ 式(3)计算出 3 种粒径颗粒对子集 A, B, C 的隶属度, 如表 1 所示.

表 1 颗粒粒径与子集隶属度  
Table 1 Degree of membership about specific subsets depended on particles size

x 粒径/mm	0.5	2.5	7
$\mu_A(x)$	1.000	0.833	0.333
$\mu_B(x)$	0.125	0.625	0.750
$\mu_C(x)$	0.056	0.278	0.778

则论域内元素 0.5, 2.5, 7mm 的颗粒对不同子集的隶属度可表示为:  $A = \frac{1.000}{0.5} + \frac{0.833}{2.5} + \frac{0.333}{7}$ ,  $B = \frac{0.125}{0.5} + \frac{0.625}{2.5} + \frac{0.750}{7}$ ,  $C = \frac{0.056}{0.5} + \frac{0.278}{2.5} + \frac{0.778}{7}$ .

在应用中对颗粒粒径的隶属度计算取决于两点: 一是实验所取用颗粒的 3 种粒径  $x_1, x_2, x_3$  各自对应子集 A 的隶属度  $\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \mu_A(x_3)$ ; 二是  $x_1, x_2, x_3$  3 种粒径颗粒混合时各自所占体积百分比  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ . 针对子集有 2 个因素相互作用, 则多因素影响下的对子集 A, B, C 的隶属函数表达式为

$$\begin{cases} A = \frac{\delta_1 \mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\delta_2 \mu_A(x_2)}{x_2} + \frac{\delta_3 \mu_A(x_3)}{x_3}, \\ B = \frac{\delta_1 \mu_B(x_1)}{x_1} + \frac{\delta_2 \mu_B(x_2)}{x_2} + \frac{\delta_3 \mu_B(x_3)}{x_3}, \\ C = \frac{\delta_1 \mu_C(x_1)}{x_1} + \frac{\delta_2 \mu_C(x_2)}{x_2} + \frac{\delta_3 \mu_C(x_3)}{x_3}. \end{cases}$$

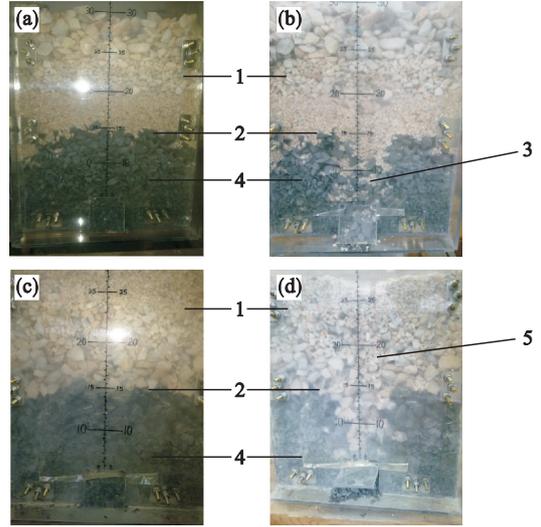
其中:  $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$  是权重向量, 且满足  $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$ .  $\delta_i$  反应了第  $i$  个因素的重要程度.

### 3 模型实验

#### 3.1 实验方案

采用端部放矿, 将粒径大小在 1 ~ 4 mm 的铁矿石颗粒装至实验模型 15 cm 处, 覆盖岩层用粒

径小于 10 mm, 级配 < 1, 1 ~ 4, 4 ~ 10 mm 各占 33% 的白云岩颗粒. 覆岩散体装入前先用筛网将白云岩散体筛分为粒径 < 1 mm, 1 ~ 4 mm, 4 ~ 10 mm 3 组, 覆盖岩层分 3 层布置, 每组 1 层, 每层高度 5 cm, 覆盖岩层厚度 15 cm, 覆岩散体粒径空间分布与隶属度描述见表 2、表 3. 根据覆岩散体的粒径空间分布形式, 分别进行 3 组放矿实验, 其中最具代表性的粒径空间分布三, 分布一形式如图 1a, 图 1c, 各组实验均采用等量放矿, 记录各次中的岩石混入量.



1-覆岩颗粒, 2-矿岩接触面, 3-矿岩混杂区域, 4-矿石颗粒, 5-细小粒径岩石颗粒混入区域

图 1 覆岩散体粒径空间分布形式及运动特点  
Fig. 1 Movement feature and particles size with space distribution of coverage rocks  
(a)一分布三; (b)一分布三的实验结果;  
(c)一分布一; (d)一分布一的实验结果.

#### 3.2 结果分析

由实验结果(图 2)可以看出, 不同覆岩散体粒径空间分布下的岩石混入率变化特点: ①在粒径空间分布三的实验, 岩石混入发生最早, 且前

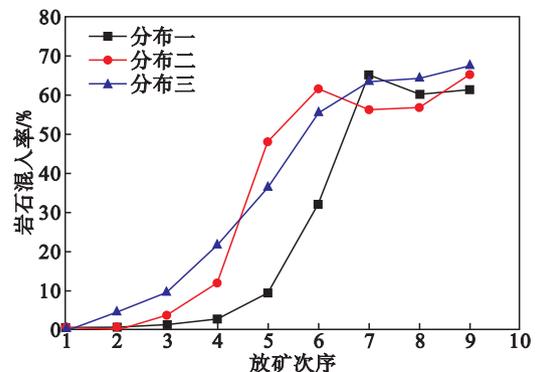


图 2 等量放矿条件下岩石混入率变化曲线  
Fig. 2 Curve of rocks mixture rate with equal ore drawing

期混入率较大。②在前 4 次放矿次序中,粒径空间分布二的岩石混入增长速率介于分布一、三之间,从第 4 次放矿次序后混入增长率迅速升高,并超越此过程中粒径空间分布三的岩石混入率。③在粒径空间分布一的实验中,岩石混入发生最晚,且

岩石混入率在前 5 次放矿次序中最低,但该分布在第 5 次放矿次序后仍发生了迅速增长。在实验结束时,粒径空间分布三、分布二、分布一的累计混入率分别为 35.7% ,33.8% ,25.7% .

表 2 实验中 3 种覆岩散体的粒径空间分布

Table 2 Three sorts of particles size with space distribution used in the model-experiment

覆岩高度/cm	粒径/mm	粒径空间分布一/%	粒径空间分布二/%	粒径空间分布三/%
25 ~ 30	< 1	70	20	0
	1 ~ 4	20	20	20
	4 ~ 10	10	60	80
20 ~ 25	< 1	40	70	25
	1 ~ 4	20	20	70
	4 ~ 10	40	10	5
15 ~ 20	< 1	0	50	95
	1 ~ 4	30	30	5
	4 ~ 10	70	20	0

表 3 覆岩散体粒径空间分布的隶属度描述

Table 3 Expression of coverage rocks' particles size with space distribution used degree of membership

覆岩高度/cm	模糊子集	粒径空间分布一	粒径空间分布二	粒径空间分布三
25 ~ 30	$A(u)$	0.70/0.5 + 0.16/2.5 + 0.03/7	0.20/0.5 + 0.16/2.5 + 0.19/7	0.00/0.5 + 0.16/2.5 + 0.26/7
	$B(u)$	0.08/0.5 + 0.12/2.5 + 0.07/7	0.02/0.5 + 0.12/2.5 + 0.45/7	0.00/0.5 + 0.12/2.5 + 0.60/7
	$C(u)$	0.03/0.5 + 0.05/2.5 + 0.07/7	0.01/0.5 + 0.05/2.5 + 0.46/7	0.00/0.5 + 0.05/2.5 + 0.62/7
20 ~ 25	$A(u)$	0.40/0.5 + 0.16/2.5 + 0.13/7	0.70/0.5 + 0.16/2.5 + 0.03/7	0.25/0.5 + 0.58/2.5 + 0.01/7
	$B(u)$	0.05/0.5 + 0.12/2.5 + 0.30/7	0.08/0.5 + 0.12/2.5 + 0.07/7	0.03/0.5 + 0.43/2.5 + 0.03/7
	$C(u)$	0.02/0.5 + 0.05/2.5 + 0.31/7	0.03/0.5 + 0.05/2.5 + 0.07/7	0.01/0.5 + 0.19/2.5 + 0.03/7
15 ~ 20	$A(u)$	0.00/0.5 + 0.24/2.5 + 0.23/7	0.50/0.5 + 0.24/2.5 + 0.06/7	0.95/0.5 + 0.04/2.5 + 0.00/7
	$B(u)$	0.00/0.5 + 0.18/2.5 + 0.52/7	0.06/0.5 + 0.18/2.5 + 0.15/7	0.11/0.5 + 0.03/2.5 + 0.00/7
	$C(u)$	0.00/0.5 + 0.08/2.5 + 0.54/7	0.02/0.5 + 0.08/2.5 + 0.15/7	0.05/0.5 + 0.01/2.5 + 0.00/7

在等量放矿过程中,不同覆岩散体粒径空间分布下的岩石混入变化原因:

1) 粒径空间分布三的岩石混入特点是由于:前期覆岩底部隶属于细小粒径颗粒子集程度为 0.95,集中了大量细小粒径颗粒,远大于分布二、分布一的 0.50 和 0,并直接接触崩落矿石,依据小粒径颗粒易于在间隙中运动的特点,放矿时具有更快的下降速度,使岩石混入立即发生,矿岩接触边界很快难以分辨。

2) 粒径空间分布二的岩石混入特点是由于:覆岩底部颗粒隶属细小粒径颗粒子集的程度为 0.5,低于分布三的 0.95,覆岩中部颗粒隶属于小粒径颗粒子集的程度为 0.7,高于分布三的 0.25,覆岩上部颗粒隶属于小粒径颗粒子集的程度为 0.2,高于分布三的 0,前期矿岩接触边界较清晰,但在放矿时覆岩中不同粒径颗粒的运动状态并不

稳定,细小粒径颗粒在间隙中易于流动,具有快于大粒径颗粒的下移速度,逐渐地细小粒径颗粒均集中于覆岩底部,增大了覆岩底部颗粒对细小粒径颗粒子集的隶属度,并增强了对崩落矿石的混入,当到达放矿口的细小粒径岩石颗粒逐渐增多时,岩石混入率升高。

3) 粒径空间分布一的岩石混入特点是由于:覆岩底部颗粒隶属于细小粒径颗粒子集的程度为 0,中、上部分别为 0.4 和 0.7,前期矿岩接触边界清晰,岩石混入增长最为缓慢,但覆岩上部易于流动的细小粒径颗粒仍通过间隙,逐渐向覆岩底部集中,增大了覆岩底部颗粒对细小粒径颗粒子集的隶属度,当到达放矿口的细小粒径岩石颗粒逐渐增多时,岩石混入率升高。

由上述分析可以得出,虽然哪一种覆岩散体的粒径空间分布都不能阻止岩石颗粒向崩落矿石

的混入发生,但是在粒径空间分布一中,矿岩接触边界上覆岩颗粒隶属于细小粒径颗粒子集的程度为 0,隶属于细小粒径颗粒子集程度高的颗粒都位于覆岩中、上部,这种粒径空间分布形式延缓了细小粒径岩石颗粒对崩落矿石的混入,从而前期具有最为缓慢的岩石混入增长,有利于提高矿石回收品位.可见,覆岩散体粒径空间分布对岩石混入过程有着重要影响.通过隶属度研究覆岩散体粒径空间分布对岩石混入影响的方法,对认识岩石混入与矿石贫化的发生具有指导意义.

## 4 结 论

1) 本文首次提出了散体粒径空间分布的概念,并通过隶属度对其进行了定量描述.

2) 本文通过实验研究了具有不同隶属度的覆岩散体粒径空间分布对岩石混入的影响.

3) 本文通过实验得出,覆岩散体粒径空间分布的隶属度是影响岩石混入过程的关键因素.在覆岩散体的粒径空间分布中,减小矿岩边界处覆岩颗粒对细小粒径颗粒子集的隶属度,有利于延缓岩石的混入过程,提高矿石回收品位.

### 参考文献:

- [ 1 ] 陶干强,杨士教,任凤玉.崩落矿岩散体流动性实验研究[J].岩土工程,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. )
- [ 2 ] 王述红,任凤玉,魏永军,等.矿岩散体流动参数物理模拟实验[J].东北大学学报(自然科学版),2003,24(7):699-702.  
(Wang Shu-hong, Ren Feng-yu, Wei Yong-jun, et al. Experimental physical simulation of mineral moving [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, 24(7):699-702. )
- [ 3 ] Katherine S K, Steve M, Mark S D. Block geometry and rockmass characterization for prediction of dilution potential into sub-level cave mine voids[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2008, 45 ( 6 ): 929 - 940.
- [ 4 ] Malakhov G M. Theoretical principles of ore drawing and factors influencing index of yield[J]. *Powder Technology*, 1970,3(1):364-366.
- [ 5 ] John G H, Hani S M. Numerical modelling of ore dilution in blasthole stoping [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2007, 44(4):692-703.
- [ 6 ] Brzovic A, Ernesto V. Rock mass characterization and assessment of block-forming geological discontinuities during caving of primary copper ore at the EI Teniente mine, Chile [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2007, 44(4):565-583.
- [ 7 ] 张国建,蔡美峰.无底柱分段崩落法应进一步研究的几个问题[J].中国矿业,2003,12(11):41-44.  
(Zhang Guo-jian, Cai Mei-feng. Some critical issues in application of pillarless sub-level caving method [J]. *China Mining Magazine*, 2003, 12(11):41-44. )
- [ 8 ] Jerzy L. Application of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies[J]. *Archives of Mechanics*, 1956, 8:393-411.
- [ 9 ] David J. Computer simulation of the movement of ore and waste in an underground mining pillar[J]. *The Journal of Canadian Mining and Metal*, 1968, 67(4):854-859.
- [ 10 ] Vivanco F, Francisco M H. The effect of rock decompaction on the interaction of movement zones in underground mining [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2013, 60(6):381-388.