论文

柔性隔离层下多漏斗矿岩流动特性及影响因素正交模拟试验

陈庆发^{1*}, 陈青林¹, 钟毓¹, 王玉丁²

1. 广西大学资源与冶金学院, 南宁 530004;

2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

* E-mail: chqf98121@163.com

收稿日期: 2016-09-07; 接受日期: 2017-06-12; 网络出版日期: 2017-06-26

国家自然科学基金(批准号: 51464005)资助项目

摘要 研究散粒体的流动性能及其影响因素对于降低损失和贫化具有重要的意义. 借鉴前人研究成果, 选择了隔离层厚度、隔离层界面摩擦系数、颗粒摩擦系数、颗粒半径、墙体摩擦系数5项主要影响因素, 采用正交实验法, 建立了五因素三水平正交放矿数值模型; 通过对多漏斗放矿条件下矿岩流动规律的模拟, 探讨了柔性隔离层作用下多漏斗放矿流动特性; 结合多漏斗放矿试验特点, 选取放出量与放出体交线高度比与隔离层起伏角为评价指标. 利用矩阵分析法, 获取指标体系的权矩阵, 阐明了影响因素作用规律. 研究结果表明: 多漏斗放矿条件下, 因各放矿口间的相互影响而产生交错、缺失等不同程度的变异, 放出体并不呈规则椭球体形状; 隔离层界面在放矿初期呈近似水平下移, 后期弯曲起伏较大, 呈圆弧形下移, 直至放矿终了以波浪形悬浮于底部结构; 隔离层运动形态对放矿效果的影响起着至关重要的作用; 5项主要因素影响的主次顺序是墙体摩擦系数、颗粒摩擦系数、颗粒半径、界面摩擦系数、隔离层厚度; 当墙体摩擦系数为0.2、颗粒摩擦系数为0.8、颗粒半径为0.008 m、界面摩擦系数为0.8、厚度为0.005 m时, 放矿效果最佳.

关键词 多漏斗放矿, 柔性隔离层, 流动特性, 正交实验法, 矩阵分析法

1 引言

陈庆发等人^[1,2] 2010年提出了“同步充填”采矿技术理念, 并发明了一种大量放矿同步充填无顶柱留矿采矿方法(简称同步充填留矿法). 新采矿方法是指, 在传统的留矿法基础上, 在大量放矿前预先在留矿堆表面铺设柔性隔离层, 大量放矿时从回风巷道充填废石, 并保持充填料与矿石同步均匀下沉^[3].

同步充填留矿法在实际应用中采用多漏斗口放矿, 因此多漏斗条件下崩落矿岩流动特性为其研究的重点, 崩落矿岩流动特性及其影响因素的研究对于确定矿山最佳出矿截止品位、降低矿石损失和贫化、提高矿山经济效益具有极其重要的意义^[4].

国内外大量研究者已对矿岩流动特性影响因素进行了大量研究工作, 并取得了大量的研究成果. 例如, Just等人^[5]在矿岩流动特性研究的基础上, 对最优

引用格式: 陈庆发, 陈青林, 钟毓, 等. 柔性隔离层下多漏斗矿岩流动特性及影响因素正交模拟试验. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 923-932
Chen Q F, Chen Q L, Zhong Y, et al. Orthogonal simulation test for flowing characteristics of ore-rock and influence factor in ore drawing from multiple funnels under flexible isolation layer (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 923-932, doi: [10.1360/N092016-00324](https://doi.org/10.1360/N092016-00324)

化的放矿步距数学模型进行了推导, 模型能较好地应用至实际; Panczakiewicz^[6]对无底柱分段崩落法进行了物理放矿模拟研究, 实现了采场结构参数优化; Brunton等人^[7]采用SOM (self-organising map)分析方法总结了Ridgeway gold mine矿山中爆破参数、几何参数、放矿控制、放矿口位置为影响矿石回收效果的因素; Alford^[8]利用数值模拟揭示了分段崩落法主要流动特性, 其矿岩力学性质、炮孔布置形态、矿岩松动扩展形式为影响矿岩流动的主要因素; 王洪江等人^[9]在放矿物理模拟的基础上探讨了矿岩粒级、覆盖层颗粒组成、含水量等因素对放矿规律的影响; 孙浩等人^[10]利用PFC (particle flow code)构建放矿模型, 运用统计学知识确定对放出体流动特性有显著影响的主要因素及其敏感性; 陶干强等人^[11]利用物理实验手段, 分别探讨散体粒径、放矿口尺寸、散体材料、散体堆积高度对散体矿岩移动规律的影响. 而同步充填留矿法为笔者发明的新采矿方法, 传统的研究成果很难有效应用于此方法的开采. 此外, 当前的矿岩流动特性研究成果主要来自崩落法研究领域, 研究手段也多基于各因素的单独影响, 缺乏多因素的综合作用对放矿效果的影响规律研究.

因此, 本文采用正交实验法与矩阵分析法手段, 构建柔性隔离层作用下多漏斗放矿的离散元法PFC^{2D}数值模型, 研究矿岩放出过程的一般流动特性, 并探讨主要影响因素对矿岩流动的作用规律, 为同步充填留矿法应用至实际生产中提供参考.

2 实验方案设计

2.1 影响因素分析

参考文献[12–14], 矿岩流动特性的因素很多, 包括矿岩的物理力学性质(内摩擦角、内聚力、松散系数等)、矿岩的粒径、放矿口尺寸及间距等. 隔离层下的散体流动特性影响因素不仅限于此, 包括隔离层自

身的力学性能(抗弯曲性能、界面力学性能).

为研究多漏斗柔性隔离层作用下矿岩流动特性, 在考虑同步充填留矿法特点的基础上, 选取此正交实验主要考虑的影响因素有隔离层厚度及其界面摩擦系数、矿岩颗粒摩擦系数及其半径、墙体摩擦系数.

2.2 正交实验设计

基于正交实验原理设计五因素三水平正交试验, 各因素及相对应水平设置见表1, 组成的正交设计表 $L(3^5)$ 见表2.

3 模型建立

结合同步充填留矿法的特点, 本次数值试验采用的尺缩放矿模型长为168 cm、高为128 cm、漏斗间距为24 cm. 模型墙体结构如图1所示.

图1中整个墙体结构共有23面墙组成, 漏斗壁与水平面的夹角为45°. 模型底部由7个尺寸相同的单漏斗组成, 每个漏斗由3面“墙”构成, 并左至右依次将模型各漏斗口标号为1~7号, 其中3, 6, 9, 12, 15, 18, 21分别代表漏斗的底墙, 当底墙被删除后, 漏斗被打开, 表示放矿开始. 1和23代表模型的边壁.

试验初始模型生成采用自重堆积法, 并为使初始平衡模型充填密实且各组实验孔隙率一致, 颗粒黏结先采用线性模型, 颗粒摩擦系数取0.3. 模型平衡后, 改颗粒黏结为抗旋转模型, 抗旋转摩擦系数取0.3. 参照前人PFC模型中宏观参数研究成果^[15,16], 并通过多次试算调整选择的最终试验模拟参数如表3所示.

模型建立完成后, 对模型以每10 cm高做分层化处理, 删除128 cm水平以上的矿石颗粒. 柔性隔离层由PFC软件Cubic命令控制生成一层单层颗粒群组, 并置于矿石颗粒面上, 颗粒黏结采用平行黏结方式, 平行黏结强度为10 GPa, 平行黏结模量为50 MPa, 颗粒密度为2000 kg m⁻³, 厚度为颗粒半径的2倍, 长度为178 cm.

表1 因素水平表

水平	厚度(m)	界面摩擦系数	颗粒摩擦系数	颗粒半径(m)	墙体摩擦系数
1	0.003	0.2	0.2	0.006	0.2
2	0.004	0.5	0.5	0.007	0.5
3	0.005	0.8	0.8	0.008	0.8

表 2 正交试验设计方案

序号	厚度(m)	界面摩擦系数	颗粒摩擦系数	颗粒半径(m)	墙体摩擦系数
1	0.003	0.2	0.2	0.006	0.2
2	0.003	0.5	0.5	0.007	0.5
3	0.003	0.8	0.8	0.008	0.8
4	0.004	0.2	0.2	0.007	0.5
5	0.004	0.5	0.5	0.008	0.8
6	0.004	0.8	0.8	0.006	0.2
7	0.005	0.2	0.5	0.006	0.8
8	0.005	0.5	0.8	0.007	0.2
9	0.005	0.8	0.2	0.008	0.5
10	0.003	0.2	0.8	0.008	0.5
11	0.003	0.5	0.2	0.006	0.8
12	0.003	0.8	0.5	0.007	0.2
13	0.004	0.2	0.5	0.008	0.2
14	0.004	0.5	0.8	0.006	0.5
15	0.004	0.8	0.2	0.007	0.8
16	0.005	0.2	0.8	0.007	0.8
17	0.005	0.5	0.2	0.008	0.2
18	0.005	0.8	0.5	0.006	0.5

表 3 颗粒细观力学计算参数

墙体		初始颗粒		
法向刚度 (N m^{-1})	切向刚度 (N m^{-1})	法向刚度 (N m^{-1})	切向刚度 (N m^{-1})	矿石颗粒密度 (kg m^{-3})
1×10^7	1×10^7	5×10^7	5×10^7	2800

图 1 (网络版彩图)模型墙体结构图

放矿前, 先在各底墙漏斗口编译防卡漏FISH函数. 底墙被删除后, 漏斗口被打开, 矿石颗粒从漏口放出, 放矿随即开始. 在整个放矿过程中借助PFC^{2D}中FISH^[17]编译循环语句, 隔离层每下降10 cm, 关闭所有

漏斗, 并在颗粒面上生成适量的充填废石颗粒, 待模型在自重下重新平衡后, 删除多余的充填颗粒, 打开所有漏斗进入下步循环计算. 每步循环均利用History命令和颗粒信息循环函数记录每次放出的矿石量及放出颗粒的ID号, 利用Save命令保存模型平面信息.

4 矿岩流动一般特性

为描述矿岩流动一般特性, 截取表2中实验序号为16的部分放矿模拟图和放出体形态图, 分别如图2和3所示.

由图2可知, 放矿初始阶段, 上部标记颗粒呈准直线下移, 接近漏斗口的标记颗粒呈波浪形下移. 随着放矿过程的持续进行, 标记颗粒层在模型边壁的影响下, 漏斗上部标记颗粒由准直线转化为圆弧形下移, 接近漏斗口后才又以波浪形下移. 放矿前期, 整个隔离层界面近似在同一水平, 并保持平缓下移, 当下降

图2 (网络版彩图)放矿模拟图. (a) 第1次循环; (b) 第5次循环; (c) 第9次循环; (d) 终了循环

图3 (网络版彩图)放出体形态图

到某一深度时, 隔离层开始出现弯曲起伏, 呈圆弧形随矿石颗粒面下移. 当隔离层接触到漏斗底部后, 在底部结构的影响下隔离层最终以波浪形悬浮于各漏斗上. 由于隔离层阻碍的作用, 模型中不存在脊部纯矿石的残留, 只在边壁两漏斗处有少许颗粒的滞留.

由图3可知, 当相邻放出体之间无相互交错时, 各漏斗放出体依然保持着近似椭球的性质, 椭球的发展随着放出量的不断增加而扩大. 当扩大到一定程度时, 各相邻放出体之间产生相互交错, 并出现不同程度的缺失, 放出体呈跑道环形, 竖直边界为直线, 且位置固定在两漏斗中心线上, 水平横向上边界为圆弧形, 随着放出量的增加, 逐渐向上发展. 1和7号漏斗在边壁的影响下放出体的母线略向模型中部偏斜, 放出体竖直边界的分界线也略向模型中部靠近, 与端部放矿规律具有相似性.

5 影响因素的正交试验结果分析

为研究5种影响因素对柔性隔离层作用下多漏斗放矿效果的影响, 需对定性化的矿岩流动特性行为用定量化的指标量化, 从而定量地分析各因素对矿岩流动特性的影响程度.

5.1 评价指标的选取

建立科学合理的评价指标体系, 才有可能得出科学公正的综合评价结论. 结合柔性隔离层下多漏斗放矿试验特点, 选取隔离层起伏角^[18]和放出量与放出体交线高度比作为评价指标.

(1) 起伏角

柔性隔离层作用多漏斗放矿条件下, 在隔离层下降至某一深度 H 时, 采用起伏角 i 表示, 计算示意图如图4所示,

$$i = \arctan\left(\frac{2h}{L-d}\right), \quad (1)$$

其中, h 为起伏高度; L 为模型长度; d 为一个漏斗间距.

(2) 放出量与放出体交线高度比

多漏斗放矿条件下, 各相邻放出体之间产生相互交错并出现不同程度的缺失. 因此传统单漏斗中的放出体高宽比已不能适用于多漏斗放矿条件. 为衡量多漏斗条件下的放矿效果, 以4号放出体作为计算模型, 模型如图5所示, 在漏斗宽度与漏斗间距确定的条件下, 若放出体越宽, 放出体高度与放出体交线高度比越小, 放矿效果越好. 考虑本数值试验统计放出体高度误差要比放出量大, 且放出体高度与放出量存在线性关系, 因此用放出量替换放出体高度, 选用放出量 Q 与放出体交线高度 w 比衡量放矿效果.

结合所选的评价指标及指标特点, 分别读取隔离层下降深度为10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110和120 cm隔离层起伏高度 h 、4号漏斗放出量 Q 及放出体交线高度 w . 经处理, i 与 Q/w 统计结果如表4所示.

图4 起伏角计算图

表 4 i 与 Q/w 统计结果表

序号	指标	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	90 cm	100 cm	110 cm	120 cm	平均
1	i	0.0000	0.1432	0.8116	1.2014	1.7343	2.2827	4.0121	4.4316	3.9883	4.8032	5.7421	5.9941	2.9287
	Q/w	6.6897	5.3342	5.6707	5.3754	5.5096	5.4887	5.4613	5.4796	5.6311	5.4902	5.4557	5.5189	5.5921
2	i	0.0000	2.1158	2.9101	3.8617	5.2297	6.9763	7.1565	9.1448	10.4738	9.8261	10.0114	11.3637	6.5892
	Q/w	7.7047	5.6793	5.4303	5.7680	5.5214	5.6752	5.5442	5.4268	5.2930	5.2657	5.5484	5.4519	5.6924
3	i	1.1697	2.1794	1.7582	1.9330	2.7434	2.6163	4.3288	4.3526	4.4633	3.6557	4.3051	2.9180	3.0353
	Q/w	7.0581	6.4563	5.4272	5.3148	5.3958	5.3383	5.3471	5.2440	5.2874	5.2968	5.3595	5.4267	5.5793
4	i	0.0000	1.6945	3.1799	3.4179	4.4475	6.3325	6.1123	6.3325	7.1252	7.7199	7.7199	7.6964	5.1482
	Q/w	8.3038	6.9344	5.7796	5.8637	5.7611	5.5665	5.4204	5.6972	5.4895	5.3600	5.5168	5.5977	5.9409
5	i	0.0000	1.6786	2.2192	3.2910	4.3526	4.8823	6.1595	7.8761	9.0594	8.9352	8.3207	8.7721	5.4622
	Q/w	8.3038	6.9344	5.7796	5.8637	5.7611	5.5665	5.4204	5.6972	5.4895	5.3600	5.5168	5.5977	5.9409
6	i	0.0000	0.0398	0.3581	0.2944	0.5650	0.9628	1.4798	2.3781	2.5528	2.4257	2.7116	2.3145	1.3402
	Q/w	7.3626	5.7519	5.7067	5.6519	5.6827	5.5252	5.5948	5.5557	5.6743	5.5582	5.6079	5.7037	5.7813
7	i	1.0503	1.8774	2.7275	2.5449	2.7910	4.1626	4.7242	5.3796	6.4504	6.3482	6.6860	7.6183	4.3634
	Q/w	7.6792	5.6308	5.5059	5.5262	5.7155	5.6251	5.3218	5.5009	5.4803	5.3435	5.4233	5.3479	5.6750
8	i	0.0000	1.0822	0.2785	0.6048	0.6366	1.1299	0.9230	0.4854	1.9171	0.6446	1.9569	1.7423	0.9501
	Q/w	7.5969	6.2338	5.4444	5.8552	5.4979	5.4635	5.3556	5.5077	5.4678	5.5270	5.4382	5.5043	5.7410
9	i	0.0000	1.2810	1.3128	2.3145	1.9887	2.7037	2.6005	4.5898	4.2576	3.9647	5.8131	6.2696	3.0913
	Q/w	7.8112	5.9438	5.8815	5.6996	5.2529	5.4034	5.3720	5.2105	5.1623	5.1872	5.3124	5.2237	5.6217
10	i	0.0000	1.5594	1.4321	2.3224	2.5925	2.8625	2.7831	4.0439	4.2734	4.0122	5.7580	6.2224	3.1552
	Q/w	8.6557	6.5798	5.6369	5.4212	5.4491	5.5857	5.3840	5.4077	5.4606	5.6210	5.4999	5.4088	5.8425
11	i	0.9469	2.2907	3.1402	3.8855	3.9805	4.6373	5.2613	6.0493	6.2381	6.8429	7.0468	8.3752	4.8912
	Q/w	6.7688	5.3275	5.2955	5.5773	5.5946	5.3118	5.4358	5.3018	5.5128	5.6416	5.4496	5.5535	5.5642
12	i	0.0000	0.0080	0.0239	1.0424	0.4297	1.2572	0.1512	0.8514	2.2192	3.4337	3.3385	3.2434	1.3332
	Q/w	7.5430	6.4757	5.5237	5.8925	5.8465	5.5602	5.5600	5.4659	5.5647	5.6148	5.5636	5.5387	5.8458
13	i	0.0000	0.6525	0.3263	0.7639	1.1935	1.1776	1.3367	2.3939	3.3623	3.4099	3.4813	4.5582	1.8880
	Q/w	7.6705	5.7006	5.8898	5.7718	5.6524	5.5182	5.6297	5.4924	5.5804	5.4917	5.4597	5.4534	5.7759
14	i	0.4138	1.1458	1.5196	2.4337	3.1323	3.7270	5.3165	6.7174	7.2192	7.1173	7.5792	6.9371	4.4382
	Q/w	7.6001	5.9700	5.9991	5.7562	5.7402	5.5584	5.4247	5.2818	5.3873	5.3309	5.4541	5.5525	5.7546
15	i	1.4480	2.1158	2.8387	3.9884	5.0008	6.7331	7.4149	8.2895	8.3051	8.7488	9.6792	10.0808	6.2203
	Q/w	6.8965	6.2095	5.4517	5.3921	5.2024	5.1177	5.2648	5.2627	5.2193	5.2701	5.2739	5.3769	5.4948
16	i	0.9469	1.4480	1.8615	3.4099	4.6452	6.5525	7.2427	7.9073	9.4316	9.1603	10.6045	11.4326	6.2203
	Q/w	8.7822	6.4072	5.7725	5.4868	5.2897	5.4498	5.3330	5.2080	5.2281	5.2280	5.2780	5.4105	5.7395
17	i	0.0000	0.5491	0.7162	0.7082	1.1140	1.6150	2.0841	2.3939	2.5052	3.0450	3.2196	3.5843	1.7945
	Q/w	6.8260	5.4453	5.5307	5.6740	5.8774	5.6894	5.5637	5.6116	5.4418	5.6384	5.5967	5.5728	5.7056
18	i	0.5968	1.2412	2.1317	3.1164	4.5819	5.1350	6.1988	7.1879	8.1414	8.0946	8.4687	8.1492	5.2537
	Q/w	7.0459	5.9290	5.9042	5.5497	5.5203	5.3031	5.5413	5.5810	5.4882	5.5410	5.5519	5.6866	5.7202

图5 放出体交错图

5.2 指标变化规律分析

将表4中起伏角 i 和放出量与放出体交线高度比 Q/w 与隔离层下降深度 H 的关系分别如图6和7所示. 由图6可知, 15组模型起伏角 i 随隔离层下降深度 H 变化均呈正相关. 各组曲线的分散度随隔离层下降深度 H 的增加而变大, 说明各组模型起伏角 i 在实验后期具有明显的差异. 由图7可知, 15组模型放出体交线高度比 Q/w 随隔离层下降深度 H 呈负指数关系, 曲线间离散度较小, 分布较为集中. 在隔离层下降深度达30 cm后, 放出量与放出体交线高度比主要分布于5~6之间.

5.3 优化分析

统计表4中存在两个评价指标, 为多指标正交实验问题, 不能直观地得到最优的方案, 因此本文采用矩阵分析法^[19-21]对正交试验做优化分析.

(1) 矩阵分析模型

矩阵分析模型是一个三层数据结构模型, 第一层为试验评价指标层; 第二层为因素层; 第三层为水平层. 定义试验评价指标层矩阵: 若正交试验中有 l 个因素, 每个因素有 m 个水平, 因素 A_i 第 j 个水平上的试验指标的平均值为 k_{ij} , 如果试验结果的评价指标是越大越好, 则令 $K_{ij} = k_{ij}$; 如果试验结果的评价指标是越小越好, 则令 $K_{ij} = 1/k_{ij}$. 定义因素层矩阵: $T_i = 1 / \sum_{j=1}^m K_{ij}$. 定义水平层矩阵: 若试验中因素 A_i 的极差为 s_i , 则令

图6 (网络版彩图)起伏角 i 变化规律

图7 (网络版彩图)放出量与放出体交线高度比变化规律

$S_i = s_i / \sum_{i=1}^l s_i$. 定义影响试验指标值的权矩阵:
 $U = MTS$, 其中

$$M = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ K_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{1m} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{21} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & K_{2m} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{l1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{l2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{lm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & T_l \end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$S^T = [S_1 \ S_2 \ \cdots \ S_l], \tag{4}$$

$$U^T = [U_1 \ U_2 \ \cdots \ U_m]. \tag{5}$$

(2) 实验结果的矩阵分析
将统计表4中的起伏角和放出量与放出体交线高

度比的各自平均值作为衡量放矿效果指标, 与5种影响因素及其各自水平共同组成正交表, 对正交表进行极差分析, 结果如表5所示.

由表5可知, 对于起伏角来说, 优方案是A₃B₃C₃D₃F₁; 对于放出量与放出体交线高度比来说, 优方案是A₁B₃C₁D₁F₃. 两考察指标所得优方案不一致, 因此利用矩阵分析法, 分别计算出影响实验结果的两个指标的权矩阵, 以便确定各因素的权重及其最优方案.

第一个考察的指标为起伏角*i*, 越小越好, 其分析过程为

表 5 正交试验处理结果

试验序号	厚度(A)	界面摩擦(B)	颗粒摩擦(C)	颗粒半径(D)	墙体摩擦(F)	<i>i</i>	<i>Q/w</i>
1	0.003	0.2	0.2	0.006	0.2	2.9287	5.5921
2	0.003	0.5	0.5	0.007	0.5	6.5892	5.6924
3	0.003	0.8	0.8	0.008	0.8	3.0353	5.5793
4	0.004	0.2	0.2	0.007	0.5	5.1482	5.9409
5	0.004	0.5	0.5	0.008	0.8	5.4622	5.9409
6	0.004	0.8	0.8	0.006	0.2	1.3402	5.7813
7	0.005	0.2	0.5	0.006	0.8	4.3634	5.6750
8	0.005	0.5	0.8	0.007	0.2	0.9501	5.7410
9	0.005	0.8	0.2	0.008	0.5	3.0913	5.6217
10	0.003	0.2	0.8	0.008	0.5	3.1552	5.8425
11	0.003	0.5	0.2	0.006	0.8	4.8912	5.5642
12	0.003	0.8	0.5	0.007	0.2	1.3332	5.8458
13	0.004	0.2	0.5	0.008	0.2	1.8880	5.7759
14	0.004	0.5	0.8	0.006	0.5	4.4382	5.7546
15	0.004	0.8	0.2	0.007	0.8	6.2203	5.4948
16	0.005	0.2	0.8	0.007	0.8	6.2203	5.7395
17	0.005	0.5	0.2	0.008	0.2	1.7945	5.7056
18	0.005	0.8	0.5	0.006	0.5	5.2537	5.7202
<i>k</i> ₁	3.6555	3.9506	4.0124	3.8692	1.7058	<i>i</i>	
<i>k</i> ₂	4.0829	4.0209	4.1483	4.4102	4.6126		
<i>k</i> ₃	3.6122	3.3790	3.1899	3.0711	5.0321		
<i>R</i>	0.4707	0.6419	0.9584	1.3391	3.3263		
优方案	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃	F ₁	<i>Q/w</i>	
<i>k</i> ₁	5.6861	5.7610	5.6532	5.6812	5.7403		
<i>k</i> ₂	5.7814	5.7331	5.7750	5.7424	5.7621		
<i>k</i> ₃	5.7005	5.6739	5.7397	5.7443	5.6656		
<i>R</i>	0.0953	0.0871	0.1218	0.0612	0.0964		
优方案	A ₁	B ₃	C ₁	D ₁	F ₃		

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3.6555} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{4.0829} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3.6122} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3.9506} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4.0209} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3.3790} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4.0124} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4.1483} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3.1899} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3.8692} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4.4102} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3.0711} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1.7058} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4.6126} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{5.0321} \end{bmatrix},$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1.2573 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.2535 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.2441 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.2333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9982 \end{bmatrix},$$

$$S_1^T = \begin{bmatrix} \frac{0.4707}{6.7364} & \frac{0.6419}{6.7364} & \frac{0.9584}{6.7364} & \frac{1.3391}{6.7364} & \frac{3.3263}{6.7364} \end{bmatrix},$$

$$U_1^T = (M_1 T_1 S_1)^T \\ = \begin{bmatrix} 0.0240 & 0.0215 & 0.0243 & 0.0302 & 0.0297 \\ 0.0354 & 0.0441 & 0.0427 & 0.0555 & 0.0555 \\ 0.0556 & 0.0798 & 0.2890 & 0.1069 & 0.0980 \end{bmatrix}.$$

第二个考察的指标为放出量与放出体交线高度比 Q/w , 越小越好, 其权矩阵计算结果为

$$U_2^T = (M_2 T_2 S_2)^T \\ = \begin{bmatrix} 0.0692 & 0.0681 & 0.0691 & 0.0625 & 0.0628 \\ 0.0634 & 0.0890 & 0.0871 & 0.0876 & 0.0445 \\ 0.0440 & 0.0440 & 0.0694 & 0.0691 & 0.0703 \end{bmatrix}.$$

此正交试验考察指标总权矩阵为两个指标值权矩阵的平均值, 计算结果为

$$U^T = \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right)^T \\ = \begin{bmatrix} 0.0466 & 0.0448 & 0.0467 & 0.0463 & 0.0462 \\ 0.0494 & 0.0666 & 0.0649 & 0.0716 & 0.0539 \\ 0.0498 & 0.0619 & 0.1792 & 0.0880 & 0.0841 \end{bmatrix} \\ = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ B_1 \ B_2 \ B_3 \ C_1 \ C_2 \ C_3 \\ D_1 \ D_2 \ D_3 \ F_1 \ F_2 \ F_3].$$

结合图8及计算结果可知, 各个因素对正交试验的指标值影响的主次顺序为FCDBA, 其中因素F较其他4个因素具有显著的影响性. 因素A中影响权重最大的是 A_3 水平, 因素B中是 B_3 水平, 因素C中是 C_3 水平, 因素D中是 D_3 水平, 因素F中是 F_3 水平. 因此, 正交实验的最优方案为 $A_3 B_3 C_3 D_3 F_1$, 即在厚度为0.005 m、界面摩擦系数为0.8、颗粒摩擦系数为0.8、颗粒半径为0.008 m、墙体摩擦为0.2时, 矿岩的流动效果最佳. 并且可知此最优方案与考察指标为起伏角 i 所得优方案一致, 说明在多漏斗隔离层放矿条件下, 隔离层运动形态对放矿效果的影响起着至关重要的作用.

图8 各因素总权重分布图

在传统的多漏斗放矿工艺中,漏斗负担范围内的矿石在均匀下降和被均匀放出情况下,矿废界面才能够较平缓地沿采场下移,从而使采场脊部残留最小,放矿效果最优^[22]. 此模拟试验中,隔离层起伏角 i 指标对放矿效果具有决定性作用,说明了PFC模拟试验结果的正确性. 实际应用中应注意边壁条件对放矿速度分布的影响,在其他条件允许的情况下,应尽量采用大跨度采场,减少边壁效应的影响,使隔离层平缓下移.

6 总结

(1) 利用PFC^{2D}构建放矿模型,对矿岩流动特性进行探讨,多漏斗放矿条件下,因各放矿口间的相互影

响而产生交错、缺失等不同程度的变异,放出体并不是一个规则的椭球体. 在放矿初期,隔离层界面近似在同一水平,并保持平缓下移,后期隔离层弯曲起伏较大,呈圆弧形下移,直至放矿终了以波浪形悬浮于底部结构.

(2) 正交实验研究表明,隔离层运动形态对放矿效果的影响起着至关重要的作用,5项主要因素影响的主次顺序是墙体摩擦系数、颗粒摩擦系数、颗粒半径、界面摩擦系数和厚度,其中墙体摩擦较其他因素具有明显的显著性.

(3) 当墙体摩擦系数为0.2、颗粒摩擦系数为0.8、颗粒半径为0.008 m、界面摩擦系数为0.8、厚度为0.005 m时,放矿效果最佳.

参考文献

- 1 陈庆发, 苏家红. 协同开采及其技术体系. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44: 733–736
- 2 陈庆发, 吴仲雄. 大量放矿同步充填无顶柱留矿采矿方法. 中国专利, CN 201010181971.2, 2010-10-20
- 3 陈庆发, 陈青林. 同步充填采矿技术理念及一种代表性采矿方法. 中国矿业, 2015, 24: 86–88
- 4 任凤玉. 放矿随机介质理论的研究及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 5 Just G D, Free G D, Bishop G A. Optimization of ring burden in sub-level caving. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstracts*, 1973, 10: 119–131
- 6 Panczakiewicz T. Optimization of the Sublevel Caving Mining Method Investigated by Physical Models. Melbourne: University of Melbourne, 1977
- 7 Brunton I D, Fraser S J, Hodgkinson J H, et al. Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2010, 47: 647–656
- 8 Alford C G. Computer Simulation Models for the Gravity Flow of Ore in Sublevel Caving. Melbourne: University of Melbourne, 1978
- 9 王洪江, 尹升华, 吴爱祥, 等. 崩落矿岩流动特性及影响因素实验研究. 中国矿业大学学报, 2010, 39: 693–698
- 10 孙浩, 金爱兵, 高永涛, 等. 崩落法采矿中放出体流动特性的影响因素. 工程科学学报, 2015, 37: 1111–1117
- 11 陶干强, 杨仕教, 任凤玉. 崩落矿岩散粒体流动性能试验研究. 岩土力学, 2009, 30: 2950–2954
- 12 马拉霍夫 Г М. 崩落矿块的放矿. 北京: 冶金工业出版社, 1958
- 13 Melo F, Vivanco F, Fuentes C. Calculated isolated extracted and movement zones compared to scaled models for block caving. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46: 731–737
- 14 Rustan A. Gravity flow of broken rock—What is known and unknown. In: Proceeding of the International Conference & Exhibition on Mass Mining. Brisbane: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2000. 557–567
- 15 陈亚东, 于艳, 余跃心. PFC3D模型中砂土微观参数的确定方法. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊): 88–92
- 16 李坤蒙, 李元辉, 徐帅, 等. PFC2D数值计算模型微观参数确定方法. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37: 563–567
- 17 Itasca Consulting Group. PFC3D (particle flow code in 3 dimensions) FISH in PFC3D. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 2008
- 18 陈庆发, 陈德炎, 韦才寿. 结构面连通性原理与判别方法. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊): 230–235
- 19 魏效玲, 薛冰军, 赵强. 基于正交试验设计的多指标优化方法研究. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27: 95–99
- 20 周玉珠. 正交实验设计的矩阵分析方法. 数学的实践与认识, 2009, 39: 202–206
- 21 闫红杰, 夏韬, 刘柳, 等. 高铅渣还原炉内气液两相流的数值模拟与结构优化. 中国有色金属学报, 2014, 24: 2642–2651
- 22 任凤玉. 放矿口对崩落法放矿的影响. 有色金属, 1993, 45: 17–23

Orthogonal simulation test for flowing characteristics of ore-rock and influence factor in ore drawing from multiple funnels under flexible isolation layer

CHEN QingFa¹, CHEN QingLin¹, ZHONG Yu¹ & WANG YuDing²

¹ College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, China;

² Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

The study on granular flow characteristics of ore-rock and its influencing factors is significant for controlling ore dilution-loss. With the reference of predecessor's research achievements, isolation layer thickness, friction coefficient of isolation layer interface, particle friction coefficient, particle radius and wall friction coefficient are considered as main influence factors. The orthogonal ore drawing numerical model, which contains four factors and three levels, is established with orthogonal test. The flow characteristics in ore drawing from multiple funnels under flexible isolation layer is explored through the simulation on ore-rock flow law in ore drawing from multiple funnel. Combined with the test characteristics of ore drawing from multiple funnels, the ratio of drawing quantity to intersecting line height of drawing ore body and undulating angle of isolation layer are chosen as evaluating indicators. Weight matrix of index system is obtained and action law of influencing factors is elucidated with the use of matrix analysis. The study results show that the drawing ore body is not a regular ellipsoid in ore drawing from multiple funnels due to the varying degrees variation, e.g., interleaving and deletion caused by interplay between each drawing holes. The isolation layer interface drops at a approximate level at early stage of ore drawing and later at a circular-arc. At the end of the ore drawing, isolation layer suspends in the bottom structure, showing a wave shape. The movement pattern of the isolated layer plays an important role in the effect of ore drawing. The effect weights ranking of each factor is wall friction coefficient, particle friction coefficient, particle radius, interface friction coefficient and isolation layer thickness. The best flowing effects of ore happens when wall friction coefficient is 0.2, particle friction coefficient is 0.8, particle radius is 0.008 m, interface friction coefficient is 0.8 and isolation layer thickness is 0.005 m.

ore drawing from multiple funnels, flexible isolation layer, flow characteristics, orthogonal test, matrix analysis

doi: 10.1360/N092016-00324