

大结构单进路放出体各参数间关系分析研究

Analysis on the Relationship Between Parameters of the Draw Body in
Single Drift with Large-Scale Structure

许观青(紫金矿业建设有限公司, 福建 龙岩 364200)

摘要:针对大结构单进路放矿过程中传统椭球体模型难以精确描述放出体上粗下细复杂形态的问题,本研究基于某矿山实际矿岩样品的崩落块度预测分布,构建了大型物理放矿模型进行单进路放矿实验。通过分层布设标志颗粒并记录放出过程,创新性地采用双半旋转椭球体对接模型表征放出体形态,并应用 Levenberg-Marquardt 最小二乘算法进行高精度拟合(相关系数普遍 >95%)。实验结果表明:①放出体体积(V)与放矿高度(h)及进路口宽度(w)之间满足幂函数关系 $V = 30.42 \times (h/w)^{2.626}$ ($R^2 = 0.9992$),且在相对高度 $h/w < 4$ 时稳定性较差;②放矿高度(h)与放出体长半轴(a)、短半轴(b)分别呈现强线性关系 $a = 0.5136h - 5.043$ ($R^2 = 0.9993$)、 $b = 0.0908h + 3.6273$ ($R^2 = 0.9992$);③贫化率(p)随放出体积(V)线性增长,关系式为 $p = 8.941 \times 10^{-5}V - 32.38$ ($R^2 = 0.9133$)。

关键词:放矿特征;物理模型;拟合关系;贫化控制

中图分类号:TD853 文献标志码:A 文章编号:1672-609X(2025)06-0015-06

Abstract: To address the issue that the traditional ellipsoid model cannot accurately describe the complex morphology of the draw body (characterized by a coarse upper part and a fine lower part) during ore drawing in a single drift with a large-scale structure, this study established a large-scale physical ore drawing model to conduct single-drift ore drawing experiments, based on the predicted distribution of blasted fragment sizes of actual ore-rock samples from a mine. By arranging marker particles in layers and recording the ore drawing process, a butted model of double semi-ellipsoids of revolution was innovatively adopted to characterize the morphology of the draw body, and the Levenberg-Marquardt least squares algorithm was applied for high-precision fitting (with correlation coefficients generally >95%). The experimental results show that: ① The volume of the draw body (V) exhibits a power function relationship with the ore drawing height (h) and the drift opening width (w), expressed as $V = 30.42 \times (h/w)^{2.626}$ ($R^2 = 0.9992$), and the stability is poor when the relative height $h/w < 4$; ② The ore drawing height (h) shows strong linear relationships with the major semi-axis (a) and minor semi-axis (b) of the draw body, which are $a = 0.5136h - 5.043$ ($R^2 = 0.9993$) and $b = 0.0908h + 3.6273$ ($R^2 = 0.9992$) respectively; ③ The dilution rate (p) increases linearly with the drawn volume (V), following the relationship $p = 8.941 \times 10^{-5}V - 32.38$ ($R^2 = 0.9133$). Furthermore, a scale conversion method for on-site engineering application was proposed. Based on the geometric similarity criterion, the concept of dimensionless volume was introduced to realize the conversion of experimental data to the on-site scale, ensuring the effective application of theoretical results in practical scenarios. This study quantitatively reveals the morphological characteristics of the draw body and the intrinsic relationships between its key parameters under the condition of single drift with a large-scale structure. The established mathematical models can be directly used to predict the draw body volume and expected dilution rate under specific ore drawing heights and drift widths, providing an important theoretical basis and operational guidance for on-site precision control of ore drawing processes, optimization of ore recovery, and reduction of dilution.

Key words: ore drawing characteristics; physical model; fitting relationship; dilution control

1 前言

自然崩落法的高效开采与经济效益紧密依赖于精准的放矿控制,其中放出体形态演化规律及其几何参数间的关系是理论核心与工程实践的关键^[1-4]。传统椭球体放矿理论虽被广泛应用,但其

轴对称理想化假设难以准确描述大结构单进路条件下放出体呈现的上粗下细非规则形态,尤其对放出体上部膨胀特征的拟合存在显著偏差^[5-6]。近年来,国内外学者针对复杂条件下放矿理论优化开展了多维度研究:文献^[7-9]深入探讨了多进路

[作者简介] 许观青(1986—),男,工程师,主要从事金属矿山采矿技术、采掘生产及安全生产管理等方面的研究工作。

[引用格式] 许观青. 大结构单进路放出体各参数间关系分析研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):15-20.

协同放矿的回收率问题,但对单进路大结构下放出体精确形态的研究尚显不足。文献^[10-14]通过数值模拟优化了无底柱崩落法的崩矿步距、粒径匹配等关键参数,其结论为本研究的参数设计提供了重要参考,但物理模型可直观呈现散体颗粒从崩落、迁移到堆积的动态演化过程,清晰捕捉粒径分异、安息角变化等微观细节,这种可视化揭示能力是数值模拟难以替代的,仍具有独特研究价值。文献^[15]相关学者基于模拟实验等手段在宏观及微观角度针对放矿过程中对贫损指标可能产生影响的各类因素进行了分析总结,为放矿理论及实际提供了指导作用。

本研究通过物理模型实验,结合矿岩力学参数测定,分析放出体几何特征。采用“双半旋转椭球体对接模型”来拟合大结构单进路放出体的非标准形态(上粗下细),并使用LM算法进行高精度拟合,探究放出体体积、长轴、短轴及贫化率的定量关系,旨在为放矿工艺参数优化提供新思路。

2 大结构单进路放矿研究

2.1 工程背景

西南某铜矿采用无底柱分段崩落进行矿体回采,矿体赋存于花岗闪长岩-糜棱岩带内,走向 320° ,倾向NE,倾角 $60^\circ \sim 65^\circ$,厚度 $18 \sim 40$ m,埋深 $820 \sim 980$ m。围岩整体性为中等($RMR \approx 55 \sim 60$),矿石平均容重 2.60 t/m^3 。采场采用“单进路+单漏斗”出矿组织,分段高 15 m,漏斗(进路)间距 12 m,单个进路净宽 3.2 m、净高 2.4 m,计划单个进路控制的目标放矿高度范围为 $12 \sim 16$ m井下原位块度预测显示 90% 。粒径约为 0.35 m,采场上覆存在 $4 \sim 6$ m厚的围岩破碎带,矿岩界面接触清晰。实际生产按“先中心后两侧、薄放勤拉、等量均衡”原则推进。为更好的了解大结构单进路放矿对各参数的影响关系,采用物理模拟进行相关实验研究。

2.2 实验力学参数测定

1) 试验材料的选取与加工

实验前将某矿山矿岩样送至实验室破碎至合格块度,并按表1和表2中的粒度划分要求分别筛分矿样和岩样,之后按预测的矿石及围岩的崩落块度粒度分布进行混合配制。粒度分布见表1、表2。

2) 基本性能参数的测定

实验测得松散颗粒矿石的平均自然安息角为 $\alpha = 39.12^\circ$;松散颗粒围岩的平均自然安息角为 $\alpha =$

表1 崩落矿石的预测块度粒度分布表

体积/ m^3	当量直 径/m	试验材 料/mm	占百分 比/%	累计百 分比/%
≤ 0.003	≤ 0.15	≤ 3	20	20
$0.003 \sim 0.01$	$0.15 \sim 0.25$	$3 \sim 5$	38	58
$0.1 \sim 0.06$	$0.25 \sim 0.4$	$5 \sim 8$	28	86
$0.06 \sim 0.1$	$0.4 \sim 0.5$	$8 \sim 10$	8	94
$0.1 \sim 0.2$	$0.5 \sim 1$	$10 \sim 15$	3	97
≥ 0.2	≥ 1	≥ 15	3	100

表2 崩落混合岩的预测块度粒度分布表

体积/ m^3	当量直 径/m	试验材 料/mm	占百分 比/%	累计百分 比/%
≤ 0.003	≤ 0.15	≤ 3	10	10
$0.003 \sim 0.01$	$0.15 \sim 0.25$	$3 \sim 5$	30	40
$0.1 \sim 0.06$	$0.25 \sim 0.4$	$5 \sim 8$	36	76
$0.06 \sim 0.1$	$0.4 \sim 0.5$	$8 \sim 10$	16	92
$0.1 \sim 0.2$	$0.5 \sim 1$	$10 \sim 15$	3	95
≥ 0.2	≥ 1	≥ 15	5	100

39.37° 。松散矿石的容重为 1.83 g/cm^3 ;压实矿石的容重为 2.44 g/cm^3 ;松散围岩的容重为 1.80 g/cm^3 ;压实围岩的容重为 2.37 g/cm^3 ;

2.3 单进路放矿试验研究

1) 试验设备及器材

根据试验要求,建立合适的实验模型如图1所示:单进路放矿实验模型架、破碎机、震动筛、电子台秤、铲子、塑料盆、破碎后的贫矿和混合岩及标志颗粒等。模型架规格为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),底座高 0.4 m,装矿高度可达 3.6 m。



图1 单进路、单漏斗放矿实验模型台架及放矿模型底部结构

2) 装模

将配好的矿岩样分层装入模型中,矿石装填 27 层,装填高度为 245 cm,上面 6 层装填围岩,装填高

度为 60 cm。装填的过程中,在每一层布设标志物。

3) 放矿及数据记录

每次出矿量为 2 kg 左右并观察是否有标志物放出,如有标志物放出,则记录标志物的编码。如此循环出矿,当出现围岩时,称量围岩混入量,计算出矿的贫化情况,并在整个放矿的过程中记录出现卡斗的情况。

3 实验结果分析

3.1 放出体表面方程

放出体形状与某一放出高度累计放出矿量对应着一组放出标志颗粒实验点,将这组实验点在直角坐标系中描绘出来,即获得不同放出高度条件下的放出体表面的散点图,具体如图 2 所示。

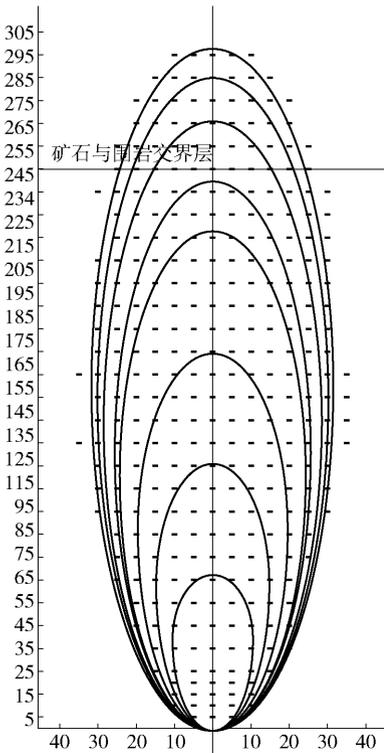


图 2 放矿试验标记散点图及拟合椭圆

由图中散点可见,放出体的高度愈大,则放出体愈变的呈上粗下细的形状,不是标准的椭球体形态。显然用传统的椭球体来描述该放出体,放出体的上部则落在椭球体的表面外侧,与实际不符。

采用求解非线性问题的最小二乘法 Levenberg-Marquardt 算法,这是一种针对非线性最小二乘问题的高效迭代优化算法,能有效避免迭代过程中的发散问题,且收敛速度较快,适用于放出体母线的拟合计算。根据模型试验结果,放出体是两个半旋转椭

球体对接组成。该放出体的表面特征,由放出体表面方程式(1)确定。

$$x^2 + y^2 = \begin{cases} \frac{b^2}{a^2}(2az - z^2) & 0 \leq z \leq a \\ \frac{b^2}{(h-a)^2}[2a(z-h) - (z^2 - h^2)] & a \leq z \leq h \end{cases} \quad (1)$$

式中: b 为放出体短半轴; a 为放出体下半椭球长半轴; h 为放出体高度。

将坐标原点设在放矿口,放出体为一近似旋转体,其体积计算公式如下:

$$Q_v = \frac{2}{3}\pi b^2 a + \frac{2}{3}\pi b^2 (h - a) = \frac{2}{3}\pi b^2 (a + h - a) = \frac{2}{3}\pi b^2 h \quad (2)$$

式中: b 为放出短半轴; a 为放出体下半椭球长半轴; h 为放矿高度。

确定 a 、 b 、 h 的过程也就是拟合放出体的过程。当 a 、 b 、 h 一定时,则放出体的形状也就确定了。根据试验数据求得拟合值 a 、 b 、 h ,拟合结果见表 3。

表 3 放出体长短轴数据拟合表

层数	放矿高度 h/cm	放出体短 半轴 b/cm		放出体长 半轴 a/cm		相关 系数
10	68.30	上	10.80	上	28.45	0.9835
		下	10.24	下	39.86	
15	116.95	上	14.73	上	53.26	0.9868
		下	14.86	下	63.69	
20	165.05	上	20.09	上	77.20	0.9870
		下	19.10	下	87.86	
25	219.01	上	24.44	上	107.14	0.9827
		下	24.18	下	111.86	
27	240.61	上	25.75	上	118.79	0.9623
		下	25.48	下	121.81	
30	269.96	上	29.44	上	133.50	0.9531
		下	27.62	下	136.46	
32	287.12	上	30.48	上	141.07	0.9732
		下	29.88	下	146.05	
33	298.72	上	31.50	上	147.80	0.9471
		下	31.70	下	150.92	

根据拟合结果,计算不同高度的放出体体积,结果见表 4。

3.2 参数耦合关系定量表征

1) 放出体体积(v)与放矿高度(h)、放矿口宽度

表4 不同放出高度的放出体体积

放矿高度/cm	短轴/cm	放出重量/g	实际放出体积/cm ³	理论放出矿石体积/cm ³	损失率/%	贫化率/%
245	25.61	706 850	408 583.82	336 374.94	4.83	4.15
255	26.56	867 525	501 459.54	374 930.23	16.33	12.46
265	27.53	991 610	573 184.97	414 300.49	25.72	18.87
275	28.53	1 074 485	621 089.60	455 044.92	31.25	23.16
285	29.47	1 166 850	674 479.77	493 734.75	37.79	27.93
295	30.18	1 267 745	732 800.58	525 268.60	45.84	33.14
305	31.60	1 359 415	785 789.02	582 660.35	50.74	37.88

(w)的关系

放矿试验数据见表3和表4,研究表明放出体积与放矿高度、放矿口宽度存在明显的相关性,在放矿高度(h)小于4倍进路口宽度(w)时,放出体体积(V)不稳定,随着放矿高度增加放出体积呈幂函数增长。

对V-h数据回归得到的拟合曲线如图3所示。

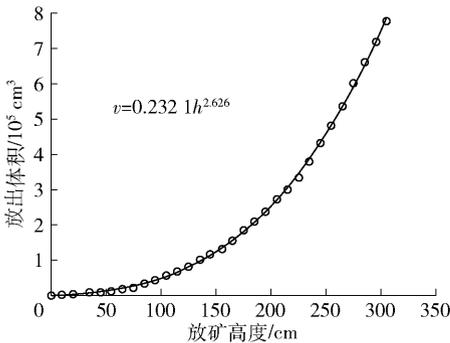


图3 放矿高度与放出体积的关系

拟合曲线方程为

$$V = 0.232 \cdot 1h^{2.626} \quad (3)$$

式中:V为放出体体积,cm³;h为放矿高度,cm;相关系数 r₁ = 99.92%。

放矿口宽度(w)、放矿高度(h)、放出体体积(V)的对应 V-h/w 拟合曲线如图4所示,回归曲线方程为

$$v = 30.42(h/w)^{2.626} \quad (4)$$

式中:v为放出体体积,cm³;h为放矿高度,cm;w为放矿口宽度,cm;相关系数 r₁ = 99.92%。

从曲线图图3与图4及表4中可以看出,随着放矿层的增高放出矿石的体积增大,他们均为幂函数关系,相关系数 r 接近1,回归方程是可靠的。放出体积由 h/w 比值幂律控制,但 h/w < 4 时需警惕波动风险。

2)放矿高度(h)、长轴(a)与短轴(b)之间的

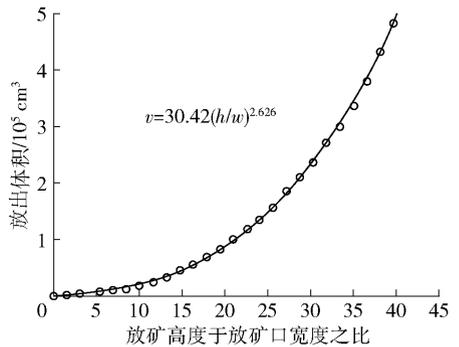


图4 放出体积与放矿高度、放矿口宽度的关系

关系

在一定放矿高度条件下,长轴与短轴的大小表明了放出椭球体的发育规模,是放出椭球体的重要指标。实验表明放矿高度与长轴、短轴及长短轴之间均呈线性相关,其拟合曲线和回归方程如下:

放矿高度(h)与长半轴(a)的拟合曲线如图5所示,回归方程为

$$a = 0.5136h - 5.043 \quad (5)$$

式中:a为放出体长半轴,cm;h为放矿高度,cm;相关系数 r₁ = 99.93%。

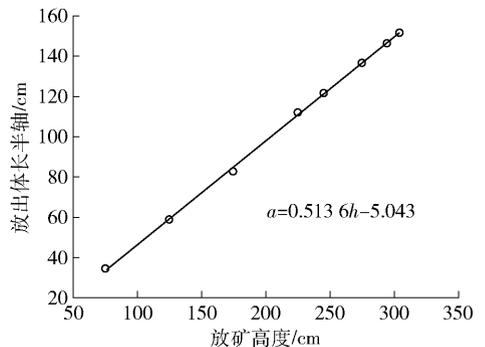


图5 放矿高度与放出体长半轴关系图

放矿高度(h)与短半轴(b)的关系如图6所示。回归方程为

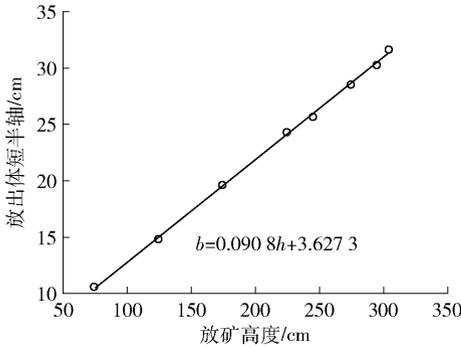


图6 放矿高度与放出体短半轴关系图

$$b = 0.0908h + 3.6273 \quad (6)$$

式中: b 为放出体短半轴,cm; h 为放矿高度,cm;相关系数 $r_1 = 99.92\%$ 。

放出体长半轴(a)与短半轴(b)的关系如图7所示。

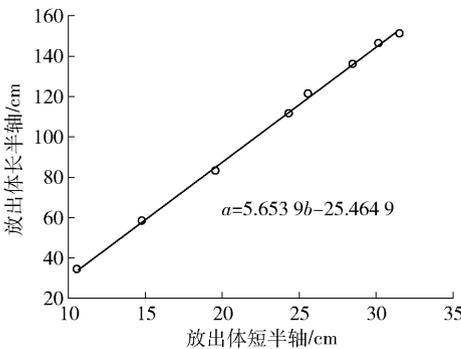


图7 放出体长半轴与短半轴关系图

回归方程为:

$$a = 5.6539b - 25.4649 \quad (7)$$

式中: a 为放出体长半轴,cm; b 为放出体短半轴,cm;相关系数 $r_1 = 99.85\%$ 。

综上所述,放矿高度 h 是轴长的线性驱动因子,且对纵向扩展(a)的影响强度为横向(b)的5.7倍($0.5136/0.0908 \approx 5.65$)。

3) 贫化率(p)与放出体积(V)的关系

在自然崩落法中,贫化率是放矿管理的主要控制指标,实验表明放出体积与贫化率存在线性相关关系,其拟合曲线如图8所示。

回归方程如下:

$$p = 8.941 \times 10^{-5}v - 32.38 \quad (8)$$

式中: p 为贫化率,%; v 为一放出体积, cm^3 ;相关系数 $r_1 = 91.33\%$ 。

通过上述分析可以看出,贫化率与放出体积呈强线性正相关,且模型可准确预测纯矿石放出量临

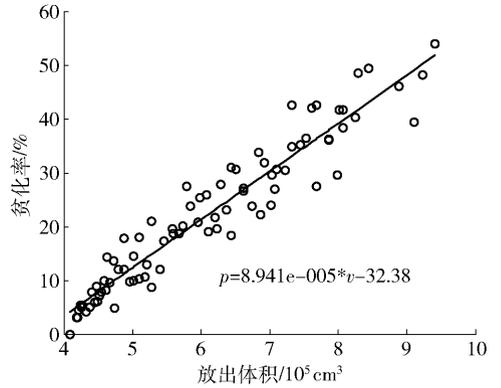


图8 贫化率与放出体积的关系

界点。

综上所述,放出体体积(V)与放矿高度(h)、进路口宽度(w)呈幂函数关系;放矿高度与长半轴(a)、短半轴(b)呈线性相关;贫化率(p)随放出体积线性增长。在矿山实际生产过程中可以适当优化放矿工艺,对于控制放矿过程中的贫化具有重要的指导意义。

3.3 实验模型-实际采场相似准则与尺度换算

为使实验结果可以有效的指导现场生产实践,实现由实验室尺度向现场尺度的转化,采用相似原理中的几何相似准则对上文利用实验结果所归纳总结的放矿规律进行换算。由上文可知,实验过程中采用的放矿高度(h)与进路宽度(w)之间比值应与现场保持一致。假设现场单个进路的净宽记为 W_f ,控制出矿的计划放矿高度记为 H_f ,椭球体的长半轴为 a_f ,短半轴为 b_f ;实验模型中的单个进路的净宽记为 W_m ,控制出矿的计划放矿高度记为 H_m ,椭球体的长半轴为 a_m ,短半轴为 b_m ,将实际生产现场尺度与模型尺度统一比例为:

$$S_l = \frac{W_f}{W_m} \quad (9)$$

因此,实际放矿高度、椭球体的长半轴与短半轴可以进行相同比例扩大为 $H_f = S_l H_m$ 、 $a_f = S_l a_m$ 、 $b_f = S_l b_m$ 。实际体积则可以用式(10)表示。

$$V_f = S_l^3 V_m \quad (10)$$

为便于直接工程应用,将体积关系式无量纲化。由式(4)可定义无量纲体积 $V^* = V/W^3$,从而得到式(11)。

$$V_m^* = \frac{V_m}{W_m^3} = k \left(\frac{H_m}{W_m} \right)^{2.626} \quad (11)$$

在式(11)中, k 的取值为 $30.42/W_m^3$ 。

因此,基于维度分析与几何相似可知,实际采场

中单进路放矿条件下放出体体积满足:

$$V_f = kW_f \left(\frac{H_f}{W_f} \right)^{2.626} \quad (12)$$

在式(12)中, k 的取值为 $V_m / (W_m^3 (H_m / W_m)^{2.626})$, 可以从实验模型中多组实测的 (V_m, H_m, W_m) 进行计算并取平均值, 降低偶然误差, 再代入现场 W_f, H_f 直接得到 V_f 。该式通过引入无量纲体积 V^* , 可以有有效的规避换算过程出现量级出错的情况。其中指数 2.626 来自物理模型回归, 且当 $H/W > 4$ 时, 式(12)预测的准确性更高。同时为避免单位与尺度混淆, 可基于将现场预测体积遵循等效模型体积法的原则, 依据式(10)。将现场预测体积换算成为等效模型体积, 进而代入式(8)求 p 。

3.4 矿山现场工程应用

在实际生产过程中, 可以依据式(8)建立的 $P(V)$ 的线性预估关系, 将该矿山贫化管理目标换算为允许最大放出体积 V_{lim} , 近而对该矿山的进路宽度以及放矿高度进行优化。且由实验结果表明, 当 $H/W < 4$ 时, 放矿体积波动大、稳定性差。因此为保证放矿体积预测的准确性, 在进行进路宽度以及放矿高度优化时, 应该规避 $H/W < 4$ 。为提高放矿体积预测的准确性, 该矿山在生产过程中对 $(V_{实}, H_{实}, W_{实})$ 进行月度汇总, 计算现场等效 k 。与实验 k 的均值进行对比, 若偏差大于 15%, 则用现场 k 更新式(12)在该采区的预测参数。现场试验数据充分验证, 采用该优化方案后, 矿山贫化率成功控制在 25% 以内, 损失率严格管控于 20% 以内, 有效降低了资源浪费与生产成本, 显著提升了开采作业的经济性与资源利用效率, 对矿山实际生产运营发挥了关键支撑作用。

4 结论

实验研究明确了单进路放矿条件下放出体的特征及相关参数关系, 在实际应用中有较大的参考价值, 有助于优化放矿工艺参数, 降低贫化率。主要结论如下:

(1) 传统椭球体模型无法准确表征放出体上粗下细的特征, 而双半旋转椭球体对接模型通过 LM 算法拟合相关系数 $> 95\%$, 显著提升拟合精度。

(2) 放出体积随放矿高度呈幂函数增长, 但需警惕临界点 $h/w = 4$ 以下标准差扩大至 0.18; 放矿高度 (h) 主导纵向扩展; h 每增加 1 cm, 长半轴 a 延伸 0.51 cm (横向扩展强度 5.7 倍于短半轴); 贫化

率与放出体体积线性正相关 ($p = 0.0001V - 0.41$), 可通过控制 V 有效管理贫化。

(3) 依据几何相似准则, 引入无量纲体积 V^* 。达到实验结果与矿山现场尺度转换的目的, 使得实验室数据能够有效指导现场生产。将实验结果纳入现场生产框架, 矿山现场可以更准确地预测和控制放矿体积, 优化矿石回收过程, 降低贫化率。

[参考文献]

- [1] 王少勇, 冯兴隆, 吴爱祥, 等. 自然崩落法放矿中覆盖层块状物穿流特征与控制试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(4): 40-45.
- [2] 柳蕴洋, 任崇阁, 张治强. 超高分段放矿体内部应力演化规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(3): 32-38.
- [3] 郭进平, 刘东, 李荣福. 椭球体放矿理论移动过渡方程的重构[J]. 金属矿山, 2015(10): 37-40.
- [4] 张治强, 杨建东, 于志宏, 等. 多分段多进路矩形放矿口尺寸对出矿效果的影响[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 107-111.
- [5] 李海亮. 无底柱分段崩落法采场结构参数优化研究[J]. 中国矿山工程, 2017, 46(1): 50-52.
- [6] 张慧芳. 针对无底柱崩落法放矿的回采效率模拟研究[J]. 煤, 2024, 33(10): 64-68.
- [7] 齐一嘉, 李楠, 赵丽楠, 等. 采场放矿条件下散体粒径对自然安息角的影响[J]. 能源技术与管理, 2024, 49(4): 17-18+29.
- [8] 陈晓云, 范文录, 夏长念, 等. 自然崩落法矿岩崩落块度研究现状与趋势[J]. 中国矿山工程, 2020, 49(3): 17-19+25.
- [9] 万串串, 周玉成, 刘立顺, 等. 松湖铁矿深部矿体无底柱分段崩落法放矿参数优化研究[J]. 有色金属工程, 2023, 13(1): 99-105.
- [10] 李强, 程文文. 长山壕金矿自然崩落采矿法矿岩崩落块度预测研究[J]. 黄金, 2019, 40(11): 36-38.
- [11] 黄欣, 尹硕辉, 唐旭海. 崩落法采矿放矿口堵塞规律及仿真方法[J]. 地质与勘探, 2025, 61(1): 172-184.
- [12] 宋德林, 王春旺, 李少普, 等. 无底柱分段崩落法矿石残留体物理模拟实验研究[J]. 金属矿山, 2024(4): 1-6.
- [13] 陈庆发, 刘军, 龙恩林. 隔离层下单漏斗放矿力链演变的参数敏感性分析[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(1): 344-356.
- [14] 张文志, 任筱芳, 郭文兵. 基于相似理论的厚松散层岩移参数规律[J]. 煤矿开采, 2016, 21(2): 18-21.
- [15] 鞠明和, 姚宝山, 窦林名, 等. 冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 2940-2955.