

基于灰色关联度的露天矿山边坡最终边坡角的确定

文文明¹ 马智^{2*}

1. 昆明冶金高等专科学校冶金与矿业学院 云南 昆明 650033

2. 昊龙实业集团乐红铅锌矿采选有限公司 云南 鲁甸 657100

摘要: 边坡角是露天矿山设计中的关键结构参数,其设定对矿山的安全稳定性和经济效益具有重要影响。为确定最终边坡角,本研究采用灰色关联分析法,结合FLAC3D软件模拟,探讨了台阶高度、清扫平台宽度、安全平台宽度及台阶坡面角四个关键因素对边坡稳定性的影响。研究表明:对边坡稳定性影响的敏感程度由高至低依次为:台阶高度、台阶坡面角、清扫平台宽度和安全平台宽度。基于敏感程度结果,并考虑到规范规定的安全系数,最终确定了最优边坡角为46.3°,较设计值提高了6.3°。

关键词: 露天矿山边坡; 坡角优化; 灰色关联分析; 敏感性分析; 数值模拟

1 引言

露天开采的矿产资源相较于地下开采具有显著优势,包括高度机械化、更安全的工作环境及较低的运输成本,这使得我国采用露天开采的矿山比重持续增大^[1-2]。但露天开采受边坡高度影响极大,这对露天矿边坡角设计提出了更高的要求。在此背景下,露天矿边坡设计、最终边坡角的确定、边坡稳定性评估成为了一个专门的研究领域。

近年来,关于露天矿山边坡角的研究成果不断涌现。在这些研究中,通过极限平衡法计算边坡稳定性以确定最优边坡角成为常见方法^[3-7]。丁鑫品^[8]等基于极限平衡法,分析了安太堡煤矿边坡稳定性,并根据稳定性确定了最终边坡角。王瑞^[9]等在研究中指出,当边坡高度固定时,最优边坡角与排土量之间存在相关关系;刘远林^[10]等基于极限平衡法分析了煤矿采场的稳定性,根据边坡稳定性与边坡角的函数关系优化了坡角。随着计算机技术的发展,利用数值模拟软件来研究边坡角已逐渐成为主流。孙志彬等运用FLAC3D软件模拟,确定了非均质坡的坡高;熊爽等采用3DEC软件模拟了在结构面影响下的边坡稳定性,并根据其优化了边坡角;

露天矿边坡角的优化设计受多种因素控制,不同因素对边坡稳定性的影响程度各异,因此确定合适的边坡角需要对这些影响因素进行敏感性分析。基于此,本文通过结合灰色关联法与FLAC3D软件进行数值模拟,不仅分析了台阶高度、清扫平台宽度、安全平台宽度及台阶坡面角等关键因素对边坡稳定性的影响,还对这些因素进行了系统的敏感性分析,揭示了各因素对边坡角确定的相对重要性。与传统研究相比,本研究在多因素综合分析的基础上,提出一种更加科学、合理的边坡角确定

方法,以期露天矿山边坡设计提供更具实用价值的理论指导,从而提高矿山开采的安全性和经济效益。

2 工程概况

根据资料,设计开采方式为斜坡自上而下分台阶露天开采,设计最低开采台阶标高990m,最高开采台阶标高1170m,最大边坡高度约180m。本研究选择了一区I-I'剖面作为分析对象。该剖面为东北帮顺倾边坡,最高高度180m(标高1170m)。该剖面边坡角为40°,台阶坡面角为60°,每个台阶高12m,安全平台宽为6m,清扫平台为12m(每隔2个台阶设置一个清扫平台)。

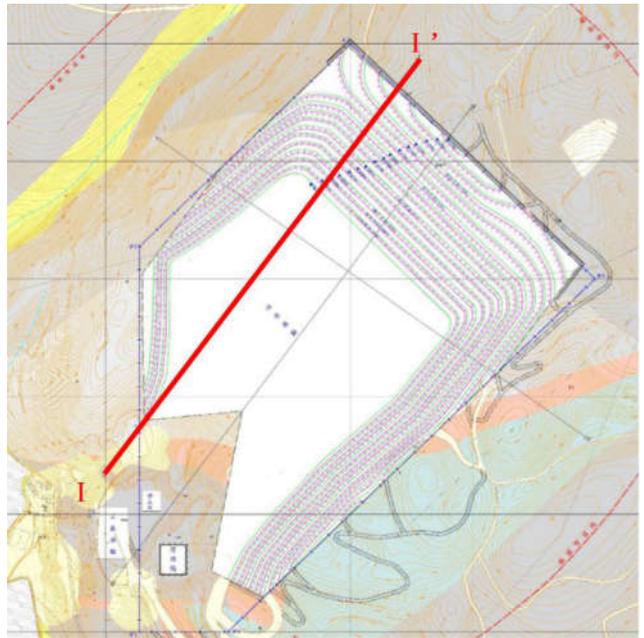


图1 云南某露天矿山现状平面图

3 模型建立

为研究边坡稳定性,结合典型的工程地质剖面图,

利用FLAC3D软件构建了边坡模型。边坡岩土体物理力学参数参见表1。为模拟实际工程中地基的约束条件，模型

底面和侧面边界均进行了严格限制，确保其固定，从而准确反映岩土体的真实响应。

表1 矿山边坡岩土体的物理力学参数

岩土名称	泊松比 μ	天然重度 γ (kN/m ³)	饱和重度 γ (kN/m ³)	天然粘聚力 c (MPa)	饱和粘聚力 c (MPa)	天然内摩擦角 φ (°)	饱和内摩擦角 φ (°)
白云岩	0.28	26.6	27.1	6.0	6.0	33.3	33.3

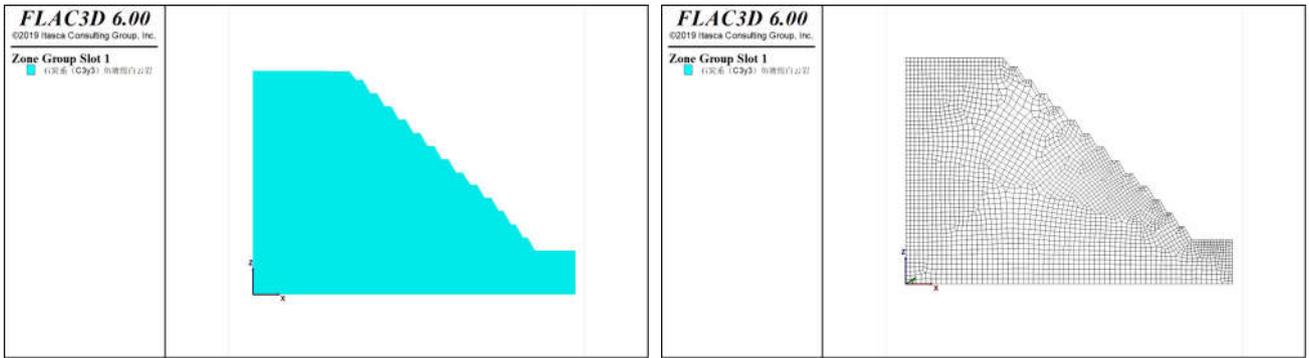


图2 FLAC3D三维数值计算边坡模型

4 影响因素分析

4.1 影响因子选取

最终边坡形态由台阶高度、台阶宽度及台阶坡面角组合而成。所以本研究选取了以下因素：安全平台宽度、清扫平台宽度、台阶坡面角和台阶高度。

4.2 灰色关联分析方法

灰色关联分析是一种不确定性分析方法。通过计算因素之间的关联度，最终得到不同因子的影响程度，最终说明因素之间的相互联系。步骤如下：

(1) 本研究首先建立了参考序列矩阵 X (关键变量) 和比较序列矩阵 Y (稳定性系数)。在此框架下，露天矿山边坡稳定性的五个主要影响因子，包括单位重度、内摩擦角、黏聚力、坡顶荷载和坡度，构成了参考序列 X 。对应的边坡稳定性系数则形成比较序列 Y ，每个影响因子均对应多个值，进而构成矩阵结构。

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1j} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \dots & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， i 是影响因子的数目； j 是影响因子变化时目标值的个数。

(2) 为了解决各影响因子指标数据不统一、量纲不

同且数值差异较大的问题，需对参考序列矩阵 X 和比较序列矩阵 Y 进行无量纲化处理。这一过程的目的是使得不同量纲的数值可以进行直接比较，具体方法如下：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (3)$$

$$y'_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad (4)$$

将得到的参考序列和比较序列进行如下处理，以形成新的差异序列矩阵 Δ 。在这个新序列中，首先分别计算出每个影响因子和稳定性系数的最大值和最小值，即：

$$\Delta_{ij} = |x'_{ij} - y'_{ij}| \quad (5)$$

$$\Delta_{\max} = \max \Delta_{ij} \quad (6)$$

$$\Delta_{\min} = \min \Delta_{ij} \quad (7)$$

(3) 根据上述差异序列矩阵 Δ ，可以计算出关联系数矩阵 L 。关联系数的计算公式为：

$$L_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \eta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \eta \Delta_{\max}} \quad (8)$$

其中， η 是分辨系数，取 $\eta = 0.5$ 。当值较小时，关联系数的分别越大，区分能力更强。

由于关联系数较多，导致信息分散且难以直接比较，因此需计算 X 与 Y 的关联系数均值，用来判断相关关系。其相关度计算公式为：

$$Q_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{ij} \quad (9)$$

关联度的大小说明各因子相互关联程度，取值范围

为[0, 1], 当 Q_i 越小, 则关联程度越小, 反之则越大。关联度 Q_i 的大小排序即为露天矿边坡稳定性影响因素敏感性程度的影响。

4.3 数据分析

(1) 正交试验设计

根据第二章描述的典型工程地质剖面, 本研究在固定边坡高度的前提下, 对台阶高度、清扫平台宽度、安全平台宽度及台阶坡面角四个因素进行了正交试验设计。每个因素都包含多个水平, 根据实际工程需求设定具体取值, 以确保实验覆盖全面且具备代表性。

为有效减少实验次数, 本文采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验设计。通过该正交表, 本研究在保持多因素多水平组合完整性的同时, 确保了实验的高效性, 减少了不必要的实验次数。正交表中的各个组合点代表了实验设计中的典型配置, 具有均匀分散、齐整可比的特点, 从而可以有效评估每个因素和其水平对边坡稳定性的影响, 其中, 边坡稳定性采用FLAC3D软件进行计算。部分正交试验结果详见表1。

结果显示, 在该工况下, 露天矿边坡未产生明显滑动面, 稳定系数为1.293, 满足规范要求的安全储备。

表2 边坡影响因素正交试验结果(部分)

试验编号	台阶高度(m)	台阶坡面角(°)	安全平台宽度(m)	清扫平台宽度(m)	稳定性系数 天然工况
1	11	60	4	12	1.293
2	12	60	5	8	1.316
3	13	60	6	10	1.400
4	12	65	5	8	1.144
5	11	65	4	10	1.231
6	13	65	6	12	1.311
7	13	70	6	10	1.066
8	11	70	5	8	1.158
9	12	70	4	12	1.234

正交试验结果显示, 台阶坡面角与最终坡面角呈负相关关系, 而安全平台宽度和清扫平台宽度则与最终坡面角呈正相关关系。同时, 台阶高度与稳定性系数呈反比关

系。为了简化分析过程, 根据不同因素参数取值, 计算并汇总了边坡稳定性系数的平均值, 详见表2。该表提供了一个定量基础, 用于评估各因素对边坡稳定性的具体影响。

表3 边坡稳定性系数的平均值

影响因素	参数取值	稳定性系数	参数取值	稳定性系数	参数取值	稳定性系数
台阶高度(m)	11	1.227	12	1.231	13	1.259
台阶坡面角(°)	60	1.336	65	1.229	70	1.153
安全平台宽度(m)	4	1.316	5	1.253	6	1.259
清扫平台宽度(m)	8	1.206	10	1.232	12	1.279

根据灰色关联度法结合正交试验得到的敏感度分别为: 台阶高度为0.857, 台阶坡面角为0.507, 安全平台宽度为0.273, 清扫平台宽度为0.287。则这影响因子的敏感度大小为: 台阶高度 > 台阶坡面角 > 清扫平台宽度 > 安全平台宽度。

5 结果分析

本文通过灰色关联度法结合正交试验, 分析了各影响因子的敏感程度。结果表明, 台阶高度对矿山边坡角的影响最为显著, 其次为台阶坡面角、清扫平台宽度和安全平台宽度。因此, 在边坡角优化过程中, 应优先考虑台阶高度, 将其作为主要优化参数。结合实际矿山地质条件和工程要求, 最终确定的边坡角应在确保安全

和稳定性的前提下, 尽量减小台阶高度, 合理控制台阶坡面角, 以达到最优的边坡稳定性和经济性。因此, 在满足规范要求的安全系数的条件下, 研究选择台阶高度11m、台阶坡面角65°、安全平台宽度4m、清扫平台宽度10m的方案5, 此时的最终边坡角为46.3°, 比设计工况角度40°提高了6.3°。

6 结论

本文以云南某露天矿山项目为研究对象, 利用FLAC3D软件结合灰色关联分析法, 系统地研究了影响边坡稳定性的关键因素, 并基于这些因素的敏感度分析, 确定了最优边坡角。研究结果支持以下结论:

(1) 通过FLAC3D模拟, 在设计工况下(边坡角为

40°), 边坡的稳定性系数为1.293, 未出现明显滑动面。这表明在现有设计条件下, 边坡具备足够的安全性并满足规范要求的安全储备。然而, 稳定性系数虽然达标, 但仍进一步优化潜力, 以提升矿山的安全性和经济效益。

(2) 通过灰色关联度法计算, 台阶高度、台阶坡面角、清扫平台宽度和安全平台宽度四个因素对边坡稳定性的敏感度依次为0.857、0.507、0.287和0.273。台阶高度对边坡稳定性的影响最为显著, 其次为台阶坡面角。这一发现强调了在边坡设计优化过程中, 台阶高度应作为首要优化参数, 而台阶坡面角也应予以重点关注。清扫平台和安全平台宽度虽对边坡稳定性影响较小, 但在特定条件下仍不可忽视。

(3) 基于敏感度分析结果, 并结合实际工程的地质条件和安全要求, 本研究将边坡角优化为46.3°, 较原设计的40°提高了15.75%。这种优化不仅在确保边坡安全性的同时, 充分利用了关键参数对边坡稳定性的影响, 还为露天矿山设计提供了更科学的依据, 有助于进一步降低运营风险, 提高经济效益。

参考文献

[1] 孙玉科, 杨志法, 丁恩保, 等. 中国露天矿边坡稳定性

研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.

[2] 王丽丽, 虞列沛. 顾及指标权重变化的露天矿边坡稳定性评价系统的设计与实现[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(5): 101-107.

[3] 幸文宸. 先锋煤矿采场北帮边坡滑坡分析与研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.

[4] 聂颖. 地灾治理中岩质高边坡的稳定性分析[J]. 低碳技术. 2018, 02(2): 59-60

[5] 段宏波. 高陡岩质边坡稳定性评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.

[6] 杜时贵, 雍睿, 陈咭扞, 等. 大型露天矿山边坡岩体稳定性分级分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 11(36): 2601-2611.

[7] 丁鑫品. 安太堡露天矿排土场增高扩容边坡参数优化研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(01): 11-14.

[8] 王瑞, 王永增, 陆占国. 齐大山排土场边坡参数优化及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2013, 42(2): 41-43.

[9] 刘远林, 王孟雨, 冯禹凡. 渝南煤矿地下转露天采场边坡角优化研究[J]. 露天采矿技术, 2023, 38(5): 32-35, 39.