

# 三维极限平衡法在露天矿边坡稳定性分析中的应用

Application of Three Dimensional Limit Equilibrium Method in Slope Stability Analysis of Open-pit Mine

李茂<sup>1</sup>, 王静<sup>2</sup>

(1. 招金矿业股份有限公司, 山东 招远 265400; 2. 烟台黄金职业学院地质与测量工程系, 山东 烟台 264000)

**摘要:**本文以某露天矿为研究背景,采用三维极限平衡法对该矿各区域边坡开展稳定性分析,通过 SLOPE2000 软件对实现对各区安全系数的求解,并进一步提出边坡角优化建议。同时,软件采用模拟退火算法对各区域边坡破坏的最危险滑动面进行搜索,利用建模软件建立得到三维滑动面模型并展开分析。通过应用研究表明:采用三维极限平衡法对露天矿边坡稳定性系数计算,结果更具真实性;通过模拟退火法搜索并模拟得到的最危险滑动面具有的一定适用性,便于正确指导边坡滑坡治理。

**关键词:**三维极限平衡法;模拟退火法;最危险滑动面

**中图分类号:** TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)04-0040-05

**Abstract:** This paper takes an open-pit mine as the research object, adopts the three dimensional limit equilibrium method to carry out the stability analysis of the slopes in each area of the mine, realizes the solution of the safety factors of each area through SLOPE2000 software, and further puts forward the suggestions of slope angle optimization. At the same time, the software uses the simulated annealing algorithm to search for the most dangerous sliding surface of slope failure in each area, and a three-dimensional sliding surface model is established by the modeling software and the analysis of it is conducted. The applied research shows that the results obtained by adopting three dimensional limit equilibrium method are more realistic in the calculation of slope stability coefficient of open-pit mine; and the results that the most dangerous sliding surface searched and simulated by the simulated annealing method have certain applicability, which is convenient to guide the correct landslide treatment of slope.

**Key words:** three dimensional limit equilibrium method; simulated annealing algorithm; most dangerous sliding surface

## 1 前言

露天矿山边坡稳定性分析是矿山开采活动中一项重要的工作内容,对于矿山开采设计和安全生产具有重要意义。极限平衡法是边坡稳定性分析中常用的分析方法<sup>[1]</sup>,随着科技进步和社会发展,多种三维极限平衡法逐渐在边坡稳定性分析中被推广使用。郑榕明<sup>[2]</sup>等在 Bishop 法的基础上推导出滑动面在不同破坏形式下的三维稳定性系数的计算方法。麻官亮<sup>[3]</sup>等建立了 Spencer 法的三维力学模型在渝昆高速公路高填路堤边坡稳定分析中得到了应用。张发明<sup>[4]</sup>等通过三维极限平衡法对江苏宜兴抽水蓄能电站上水库坝基进行了稳定性分析。基于

以上研究背景,本文采用三维极限平衡法对某露天矿展开边坡稳定性分析的应用研究。

## 2 边坡分区及破坏模式分析

某露天矿采场终了边坡高度为 +286 ~ +303 m,边坡岩体主要由云母片岩、石英岩、千枚岩、角闪岩、透闪岩等构成,矿区常年干旱缺水,受地下水影响较小。为开展边坡稳定性分析工作,需要对露天矿边坡进行分区评价。为保证相同的分区用单一的剖面 and 相同岩体计算参数来表征,因此将工程地质条件、边坡几何形状和边坡倾向基本相同的区段划为同一区,将露天矿边坡划分为六个边坡分区即 A、B、C、D、E、F 等分区。由于比边坡几何形状上的差异,又将 A 区分为两个亚区,即 A1、A2 亚区。D 分为两个亚区,即 D1、D2 亚区,具体如图 1 所示。

边坡稳定性计算是按一定潜在破坏模式进行的。边坡潜在的破坏模式通常采用赤平极射投影图解法进行初步分析,分析不连续面与边坡面的产状

[作者简介] 李茂(1989-),男,河南鹤壁人,硕士,主要从事金属矿山开采和安全管理等工作。

[引用格式] 李茂,王静. 三维极限平衡法在露天矿边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国矿山工程,2022,51(4):40-44.

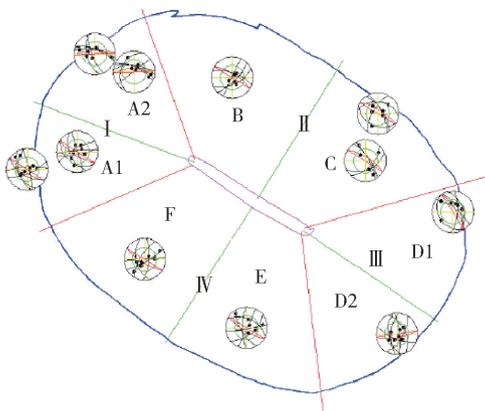


图1 采场工程地质分区

关系,用运动学的观点确定其可能构成的破坏模式,同时还要考虑总体边坡的岩体结构类型和大的不连续面的组合关系。本次采用上半球赤平极射投影,摩擦角取值 $30^\circ$ 。边坡破坏模式的分析是按边坡分区进行的,各边坡分区破坏模式分析如下。

(1) A1区位于采场西端帮南部区段,边坡面产状 $32.5^\circ \angle 47^\circ$ ,最终边坡高度240 m。边坡岩体由千枚岩岩组、云母石英片岩组和风化岩组构成。边坡岩体结构主要为薄层状结构,近地表为风化岩组构成的散体结构。通过结构面赤平投影分析,边坡潜在破坏模式为台阶规模的圆弧形破坏。

(2) A2区位于采场西端帮西北部,边坡面产状 $177^\circ \angle 47^\circ$ ,最终边坡高度240 m。边坡岩体为中千枚岩岩组、透闪石岩组等。整个边坡岩体属于倒转向斜的核部,岩层变形强烈、破碎,断层呈东西向穿过本区,边坡岩体较为破碎、工程质量较差。通过结构面赤平投影分析,边坡潜在破坏模式为台阶规模圆弧形破坏。

(3) B区位于采场北帮西段,边坡面产状该区南段为 $211^\circ \angle 46^\circ$ 最终边坡高度228 m。本区边坡岩体主要为千枚岩组构成,边坡岩体结构主要为薄层结构。通过结构面赤平投影分析,边坡潜在破坏模式为圆弧型破坏,但可能产生若干个台阶规模的平面型破坏。

(4) C区位于采场北帮东段,边坡面产状该区 $211.5^\circ \angle 46^\circ$ ,最终边坡高度240 m,边坡角为 $46^\circ$ 。本区边坡岩体主要为千枚岩组构成,边坡岩体结构主要为薄层结构。通过结构面赤平投影分析,边坡潜在破坏模式为台阶规模的圆弧形破坏。

(5) D1区位于东端帮东北部。边坡面产状该区 $237.5^\circ \angle 46^\circ$ ,最终边坡高度264 m。本区边坡岩体主要为千枚岩组构成,边坡岩体结构类型主要为薄

层状结构、薄层碎裂结构及近地表散体结构。通过结构面赤平投影分析,岩体破坏模式为圆弧破坏模式。

(6) D2区位于东端帮东南部,边坡面产状该区 $350.5^\circ \angle 46^\circ$ ,最终边坡高度264 m。本区边坡主要岩组主要为千枚岩岩组构成,边坡岩体结构主要为薄层状结构、薄层状碎裂结构、碎裂结构及近地表散体结构。通过结构面赤平投影分析,边坡破坏模式为圆弧破坏模式。

(7) E区位于南端帮东南部,边坡面产状该区 $31.5^\circ \angle 46^\circ$ ,最终边坡高度260 m。本区边坡岩体主要有云母石英片岩组构成。边坡岩体结构主要为薄层状结构、薄层状碎裂结构、碎裂结构。通过结构面赤平投影分析,边坡潜在破坏模式为台阶规模圆弧形破坏,但若干个台阶坡存在楔形体破坏。

(8) F区位于南端帮西南部,边坡面产状该区 $31.5^\circ \angle 46^\circ$ ,最终边坡高度254 m。本区边坡岩体主要有云母石英片岩组构成。边坡岩体结构主要为薄层状结构、薄层状碎裂结构、碎裂结构。通过结构面赤平投影分析,边坡潜在破坏模式为台阶规模圆弧形破坏,但若干个台阶坡存在楔形体破坏。

### 3 安全系数求解

#### 3.1 解算原理

考虑到露天矿主要破坏形式为圆弧形破坏,极限平衡法中 Bishop 法、Janbu 法都可用来解决圆弧形破坏问题。三维极限平衡分析法则是在传统的极限平衡分析法的基础上增加了垂直于滑动方向即切向力的作用建立力学模型进行分析的,在此基础上通过计算得到最危险滑动面的安全系数。将圆弧形破坏滑面绕中性面的中性线旋转,与旋转面切割得到边坡破坏的圆弧形滑动体,将圆弧形滑动体竖向分割成若干三维条柱体,对条柱体开展受力模型分析,具体如图2、图3所示。为方便推导公式,我们引入假设条件,忽略条柱间沿 $z$ 方向的所有剪力 $G$ 、 $V$ 和条柱底滑面上的剪力 $T_{xy}$ ,由此可以使得各条柱满足沿 $z$ 轴方向力的平衡,并根据滑块绕 $y$ 轴的整体力矩平衡计算得到坡体的安全系数<sup>[5]</sup>。

三维 Bishop 法是在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向上满足静力平衡推导出的方程式为

$$F = \frac{\sum [cA_2R + (N_z - \mu A_z)R \tan \varphi]}{\sum W_x - \sum N_z f_{n_z} / \cos \alpha_x + \sum kWe + Ed} \quad (1)$$

三维 Janbu 法是在 $x$ 方向上满足静力平衡推导出的方程式为

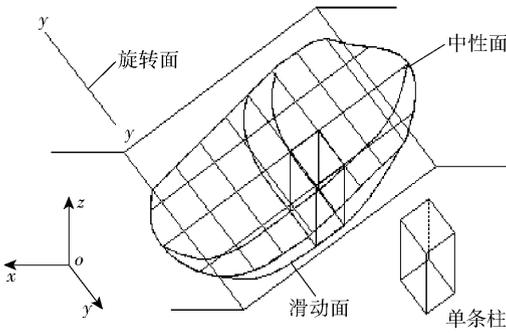


图2 三维边坡条柱划分示意图

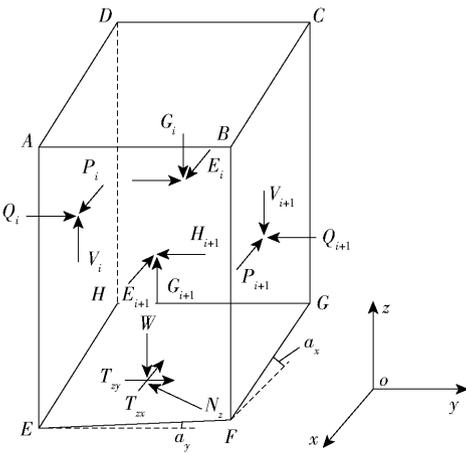


图3 条柱体受力情况

$$F = \frac{\sum [cA + (N_z - \mu A_z) \tan \varphi] \cos \alpha_x}{\sum N_z n_z \tan \alpha_x + \sum kW + E} \quad (2)$$

式中, \$N\_z\$ 可由 \$z\$ 轴方向上力的平衡得到

$$N_z = \frac{W + A_z(\mu f_\varphi - f_c) \sin \alpha_x}{n_z + f_\varphi \sin \alpha_x} \quad (3)$$

其中, \$F\$ 表示安全系数; \$A\_z\$ 表示条柱体底滑面的面积; \$c, \varphi\$ 表示滑动面的抗剪强度参数; \$R\$ 表示条柱体底滑面剪力 \$T\_{xy}\$ 的力臂; \$W\$ 表示条柱体的重力; \$\alpha\_x\$ 表示底端滑面主滑动方向与 \$x\$ 轴的夹角; \$n\_z\$ 表示条柱体底端滑面上法向力 \$N\_z\$ 与 \$z\$ 轴的夹角的余弦; \$f\$ 表示条柱底滑面正应力 \$N\_z\$ 的力臂; \$x\$ 表示条柱重力 \$W\$ 的力臂; \$E\$ 表示水平荷载, 力臂为 \$d\$; \$k\$ 表示水平地震力加速度系数, 力臂为 \$e\$; 垂直荷载记入重力。

### 3.2 系统介绍

为求解最危险滑动体的安全系数, 引入 SLOPE2000 软件进行计算。SLOPE2000 是一款广泛应用于教学、研究、重点工程中广泛使用的岩土边坡稳定性分析程序。其最显著的特点是实现极限平衡原理中的二维和三维计算方法求解边坡安全系数算法, 通过“模拟退火法”实现对圆弧或非

圆弧滑动面精确搜索, 提供二维分析的圆弧或非圆弧滑动面和三维对称圆球滑动体。其实现功能包括: (1) 对同一个计算模型, 进行不同计算方法的计算结果比较, 便于对各种满足仅力矩平衡、仅力平衡以及力和力矩平衡计算方法的计算结果的理解。(2) 根据各种计算方法的计算原理, 在程序中设置操作提示, 便于正确选择使用各种计算方法。(3) 分析不同条分数对边坡稳定计算结果的影响, 根据工程实践需要, 自行定义条分数, 获得更准确的结果。(4) 集成了简化詹布 (Janbu) 法的安全修正系数, 省去查找詹布 (Janbu) 图表确定该参数值的麻烦。

### 3.3 安全系数计算

安全系数计算模型建立需要对边坡坐标点、岩体力学参数等重要数据进行确定。边坡坐标点通过现场测量可获得; 各岩性岩体力学参数需要对露天矿各边坡岩石采样, 经岩石力学实验和数据转化得到, 各岩性岩体力学参数见表 1。以 A1 区为例将边坡台阶坐标和各岩体力学参数导入 SLOPE2000 软件建立该区边坡模型, 具体如图 4 所示。为便于对计算结果分析, 分别调用软件中 Bishop 法、3DBishop 法、Janbu 法和 3DJanbu 法四种方法作为本次应用的分析方法, 计算结果如图 5 所示。以此为例, 计算得到露天矿各区边坡安全系数见表 2。

表 1 岩体力学参数

岩体类型	千枚岩	云母片岩	石英岩	透闪岩
黏聚力/MPa	0.677	0.522	0.878	0.466
内摩擦角/(°)	34.782	34.054	38.563	33.283
容重/kN·m <sup>-3</sup>	28.048	31.382	27.46	28.538



图4 A1区边坡模型建立

### 3.4 求解结果分析

从安全系数求解结果可以看出: (1) 根据露天矿各区边坡安全系数的计算结果可以看出, 原设计各区边坡安全系数均符合最小安全标准, 边坡处于稳定状态, 露天矿部分区域边坡有提高边坡角的可能性。结合现场边坡实际, 对各区边坡开展边坡角

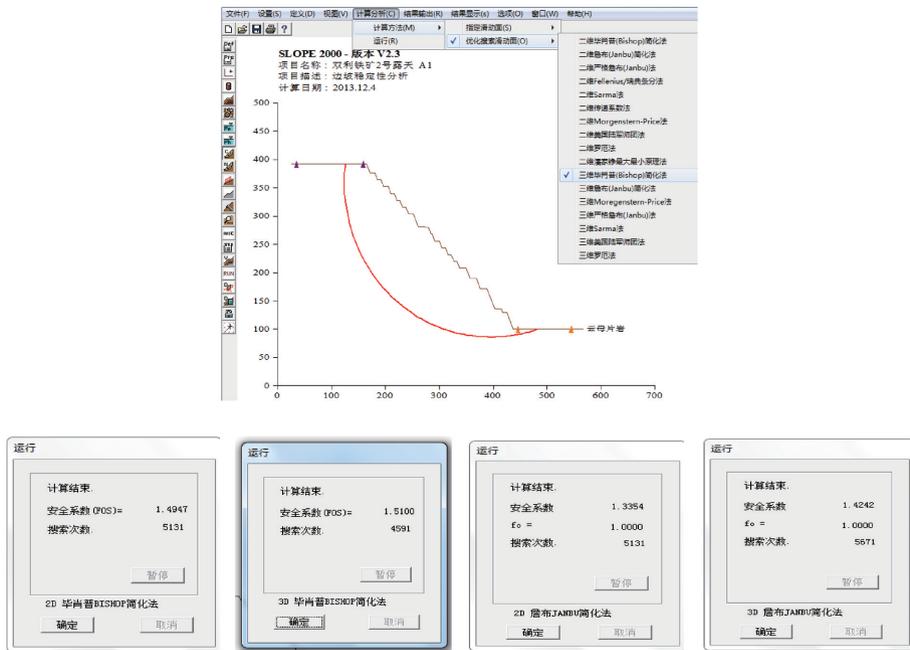


图5 A1区安全系数计算结果

表2 二维与三维极限平衡分析安全系数值

区域	Bishop 法	3DBishop 法	Janbu 法	3DJanbu 法
A1	1.495	1.51	1.34	1.424
A2	1.4	1.411	1.265	1.353
B	1.756	1.822	1.582	1.738
C	1.715	1.776	1.546	1.703
D1	1.693	1.739	1.517	1.67
D2	1.693	1.726	1.527	1.664
E	1.455	1.466	1.304	1.378
F	1.44	1.46	1.306	1.381

表3 边坡角敏感性分析结果

分区	计算剖面	坡高/m	坡角/(°)	安全系数	最大稳定坡角/(°)	可提高或减缓坡角/(°)	原设计坡角/(°)
A1	A1—A1'	296	49°	1.371	51°	↑4°	47°
			51.5°	1.294			
A2	A2—A2'	186	48.5°	1.311	46°	↑1.5°	47°
			50	1.269			
B	B—B'	292	57°	1.435	64°	↑17.5°	46.5°
			59°	1.414			
C	C—C'	288	64°	1.31	62.5°	↑16°	46.5°
			56.5°	1.461			
D1	D1—D1'	302	58°	1.403	61°	↑13.5°	47.5°
			62.5°	1.317			
D2	D2—D2'	295	59°	1.380	63°	↑15.5°	47.5°
			61°	1.314			
E	E—E'	311	55°	1.47	50°	↑3°	47°
			58°	1.417			
F	F—F'	303	63°	1.308	50°	↑3°	47°
			50°	1.359			
			51°	1.283			
			49°	1.359			
			51°	1.283			
			50°	1.314			

敏感性分析,分析结果和提高边坡角建议见表3。  
 (2) A2区边坡安全系数值较其他区域偏小,是由于该区现场有破碎带穿过,破碎带产状与边坡产状相近,该区岩性岩体力学参数偏小,因此应注意该区滑坡的风险;B、C、D1、D2区边坡安全系数普遍较大,原因该区现场不受破碎带、断层等地质构造的影响,边坡台阶完整性相对较好、岩性较好。(3)通过与二维极限平衡法计算结果比较,三维极限平衡分析法计算得到的安全系数的偏差在合理范围内,并且三维分析方法较二维分析方法计算值偏大,原因在于三维极限平衡理论力学模型的条柱体间受到横向摩擦力的影响,因此其计算结果更贴近真实值,三维极限平衡法可有效应用于实践中。(4)在计算过程中因为不同的假定条件对不同的计算结果有较大的影响,因此在实际应用中宜将二维极限平衡法和三维极限平衡法结合分析评价,同时还应充分考虑地

下水、地震载荷及外荷载等影响因子,确保计算值的

精确性。

为降低剥离成本,提高经济效益,矿山企业通常在满足安全要求的前提下适当提高边坡角角度。根据露天矿各区边坡安全系数的计算结果可以认定,各区边坡均处于稳定状态,露天矿部分区域边坡均有提高边坡角的可能性<sup>[6]</sup>。

## 4 危险滑面搜索

以A1区边坡为例,利用SLOPE2000软件的模拟退火法对最危险滑动面进行搜索,其计算模型如下:在温度 $t$ 下,一种能量状态 $E(i)$ 可以随机进入另一种能量状态 $E(j)$ ,即有状态 $i$ 向状态 $j$ 转移的概率为

$$P_{ij}(t_k) = \begin{cases} G_{ij}(t_k)A(t_k) & i \neq j \\ 1 - \sum_{l \in x, l \neq i} P_{il}(t_k) & i = j \end{cases} \quad (4)$$

式中, $G_{ij}(t_k)$ 表示由解 $i$ 产生解 $j$ 的产生概率; $A_{ij}(t_k)$ 表示解 $j$ 一旦产生后,其被接受的接受概率<sup>[7]</sup>。将搜索得到A1区最危险滑动面的图形格式输出,并利用建模软件模拟出最危险滑动面的三维边坡破坏形态,三维模型呈现为对称旋转的圆弧形滑动体,具体如图6所示。采用单纯形影射法搜索得到的最危险滑动面与三维模型滑面附和对比分析,具体如图7所示,可以看出:(1)两种算法搜索到的滑动面位置基本重合,区别在于坡体上、中部位置存在偏差,原因是两种算法得到原点位置及圆弧半径不同所呈现滑动面圆弧形式不同。使用软件搜索得到的最危险滑动面可以根据搜索结果建立滑动面的三维形态,可以更好的作为预测最危险滑动面发生的依据。(2)坡体滑动面虽倾角较大,但稳定性较好,主要原因是滑动面受外界影响较小,黏聚力较好。(3)坡脚位置滑动面倾角变缓主要起到阻滑作用。综上所述,通过模拟退火法搜索出的三维滑动体具有较高的准确率,在表现形式上更为直观,更便于指导预防滑坡和加固工作。

## 5 结论

通过三维极限平衡法应用研究得出结论:(1)三维极限平衡法在解决边坡稳定性问题时因考虑到了滑坡条柱体间横向切应力的空间因素,计算结果更接近真实值,因此,可用于实际边坡稳定性分析的应用中。(2)SLOPE2000软件可以实现极限平衡法的二维和三维多种方法的计算,并充分考虑到各种条件下的参数影响,在使用过程中应全面确定,确保计算结果的准确性。(3)运用模拟退火法搜索并模

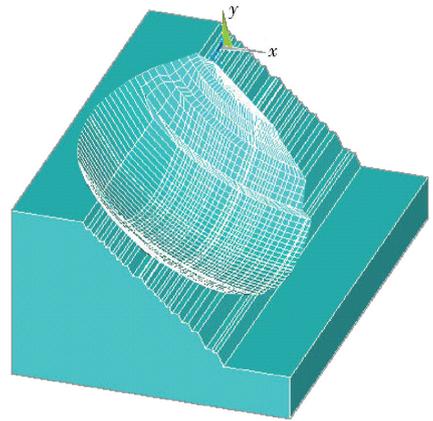


图6 危险滑动面三维模型

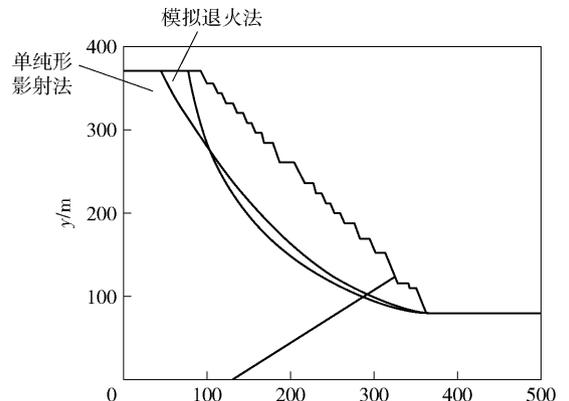


图7 危险滑动面搜索对比

拟建立的三维最危险滑动面能够更立体的展示滑坡破坏的空间位置和形态,有利于指导边坡加固措施,避免滑坡的发生。(4)经露天矿边坡稳定性分析得出,露天矿各区边坡均处于稳定状态,对于A2区域的边坡应加强日常的安全管理,对于安全系数偏大的区域,可以适当的提高边坡角。

### [参考文献]

- [1] 杨晟萱. 边坡稳定性分析 Janbu 法与 Sarma 法的有效应力形式[D]. 天津:天津大学,2019
- [2] 郑榕明,朱禄娟,谷兆祺. 非对称旋转破坏的三维 Bishop 边坡稳定算法[J]. 岩土工程学报,2002,24(6):706-709.
- [3] 麻官亮,邵玉刚. 基于 Spencer 法的三维极限平衡边坡稳定性研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(3):118-123.
- [4] 张发明,陈祖煜,弥宏亮. 三维极限平衡理论及其在块体稳定分析中的应用[J]. 水文地质工程地质,2002,4:33-35.
- [5] 李茂. 边坡三维极限平衡分析理论及研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2014.
- [6] 张常亮. 边坡稳定性三维极限平衡法研究[D]. 西安:长安大学,2008.

应用研究·煤矿·

# 近距离煤层群保护层开采底板卸压及效果考察

Study on Pressure Relief and Effect of Floor in Protective Layer Mining of Close Distance Coal Seam Group

黄 兴

(贵州安和永驻科技有限公司, 贵州 贵阳 550000)

**摘 要:**为了研究近距离煤层群开采中底板卸压及瓦斯治理等问题,通过分析底板岩层卸压和塑性区的发育机理,运用数值模拟分析上保护层开采后底板卸压增透效应,并通过工程实践验证近距离煤层群保护层开采瓦斯治理效果。结果表明:保护层开采后,其底板岩层破坏深度最大可达到17.8 m,大于5号煤层与9号煤层之间的最大垂直距离17 m,9号煤层处于保护范围内;通过数值模拟得出底板岩层破坏塑性区最大深度为23 m;5号煤层回采工作面推进并超过测压地点后,测压孔瓦斯压力下降46%~57.9%,说明5号煤层开采后区域有效保护范围内9号煤层的突出危险性已消除,卸压效果良好。

**关键词:**近距离煤层群;保护层开采;破坏深度;数值模拟;卸压效果

**中图分类号:** TD322      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2022)04-0045-06

**Abstract:** In order to study the problems of floor pressure relief and gas control in the mining of close-distance coal seam group, by analyzing the development mechanism of floor rock pressure relief and plastic zone, the numerical simulation was used to analyze the effect of floor pressure relief and permeability enhancement after the mining of upper protective layer. and the effect of gas control in the mining of protective layer of close-distance coal seam group was verified through engineering practice. The results show that after the mining of the protective layer. the maximum failure depth of the floor rock layer can reach 17.8 m, which is greater than the maximum vertical distance of 17 m between No.5 coal seam and No.9 coal seam, and No.9 coal seam is within the protection range. Through numerical simulation. the maximum depth of plastic zone of floor rock failure is 23 m; after the working face of No.5 coal seam advances and exceeds the pressure measuring location, the gas pressure of the pressure measuring hole decreases by 46%~57.9%. indicating that the outburst risk of No.9 coal seam within the effective protection range of No.5 coal seam after mining has been eliminated. and the pressure relief effect is good.

**Key words:** close distance coal seam group; protective layer mining; damage depth; numerical simulation; pressure relief effect

## 1 前言

近距离煤层群由于煤层层间距小、采动相互影响大等主要问题始终威胁着矿井安全生产。前人对近距离煤层群保护层开采做了大量研究<sup>[1-2]</sup>,其中,保护层开采作为区域性治理高瓦斯、突出矿井最有效的手段之一<sup>[3-5]</sup>,即通过开采作为保护层的煤层,使得被保护层的大量瓦斯经过受采动破坏的裂隙通道涌向保护层工作面,达到被保护层瓦斯压力、含量

受采动影响而降低目的<sup>[6-7]</sup>。

长期以来,国内外学者对近距离保护层开采做了大量研究,从现场试验、理论计算、数值模拟、相似模拟实验等方面开展大量研究并取得一系列研究成果。程志恒等<sup>[8]</sup>通过研究近距离煤层群叠加开采的应力-裂隙-瓦斯渗流规律,构建了近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系及动态评价模型;薛东杰等<sup>[9]</sup>研究保护层开采条件下,邻近煤层应力分布规律;江丽丽等<sup>[10]</sup>通过现场调研、理论分析、数值模拟和矿压观测等方法对上保护层不合理布置导致被保护层开采过程中巷道围岩严重变形破坏等问题进行研究。综上所述,尽管对保护层开采覆岩运移、裂隙场演化等做了大量研究,但是对近距离煤层群开

[作者简介] 黄兴(1989-),男,工程师,主要从事矿山工程咨询与设计研究工作。

[引用格式] 黄兴. 近距离煤层群保护层开采底板卸压及效果考察[J]. 中国矿山工程,2022,51(4):45-50.