急倾斜多矿脉岩移角的合理确定方法研究及应用*

刘亚雄[1,2,3,4]，张海云[5,6]

（1.希尔威矿业有限公司， 北京 100027；
2.河南省矿产资源高效智能利用装备技术产业研究院， 河南 洛阳市 471000；
3.河南省薄脉型矿产资源勘查开发利用工程技术研究中心， 河南 郑州 450003；
4.河南发恩德矿业有限公司， 河南 洛阳市 471700；
5.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
6.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对急倾斜多矿脉地质条件下传统岩移角确定方法的局限性，提出了一种基于临界散体柱理论与数值模拟的综合分析方法。以河南发恩德矿区沙沟采区为研究对象，通过工程类比、理论分析及数值模拟，深入研究了急倾斜多矿脉开采对岩移角的影响规律，揭示了岩移角与矿脉距离、矿脉数量及矿体倾角的非线性关系，并建立了相应的经验公式。结果表明，矿区岩移角范围为69°～78°，临界散体柱高度占比为15.8%～20.7%；结合临界散体柱高度与岩移角动态修正模型，优化保安矿柱的圈定方案，使得资源利用率提高至82.3%；基于理论计算及工程实践结果，提出了多矿脉耦合作用下岩移角的动态修正模型，突破了传统单矿脉类比法的适用边界，为类似复杂急倾斜多矿脉的安全开采提供了有力依据。

关键词：急倾斜多矿脉；岩移角；多元线性拟合；数值模拟

中图分类号：TD325^{+}.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)06-0103-08

Reasonable Determination Method for the Rock Movement Angle of Steeply Inclined Multiple Ore Veins and Its Application

LIU Yaxiong[1,2,3,4], *ZHANG Haiyun*[5,6]

(1.Silvercorp Metals Inc., Beijing 100027, China;
2.Henan Industrial Research Institute of High-efficiency and Intelligent Utilization Equipment Technology for Mineral Resources, Luoyang, Henan 471000, China;
3.Henan Engineering Technology Center for Exploration and Mining of Narrow Veins, Zhengzhou, Henan 450003, China;
4.Henan Faende Mining Co., Ltd., Luoyang, Henan 471700, China;
5.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
6.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the limitations of traditional methods for determining the rock movement angle under the geological conditions of steeply inclined multiple ore veins, a comprehensive analysis method based on the critical granular column theory and numerical simulation was proposed. Taking the Shagou stope of Faende mining area in Henan Province as the research object, through engineering analogy, theoretical analysis and numerical simulation, the influence law of the mining of steeply inclined multiple ore veins on the rock movement angle was deeply studied. The nonlinear relationships between rock movement angle and vein distance, vein quantity, as well as dip angle of ore body were revealed, and corresponding empirical formulas were established. The results show that the range of the rock movement angle in the mining area is from 69° to 78°, and the proportion of the height of the critical granular column ranges from 15.8% to 20.7%. By combining the height of the critical granular column with the dynamic correction model of the rock movement angle, the delineation scheme of the safety pillar was optimized, increasing the resource utilization rate to 82.3%. Based on the results of theoretical calculation and engineering practice, a dynamic correction model of the rock movement angle under the coupled action of multiple ore veins was proposed,

* **收稿日期**：2025-02-17
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2904001)
作者简介：刘亚雄(1989—)，男，陕西西安人，工程师，主要从事高效采矿技术研究。E-mail:liuyaxiong927@163.com

breaking through the applicable boundary of the traditional analog method for single ore veins, and providing a strong basis for the safe mining of similar complex steeply inclined multiple ore veins.

Key words: Steeply inclined multiple ore veins, Rock movement angle, Multiple linear fitting, Numerical simulation

0 引言

在矿产资源的勘探与开发过程中,合理界定岩移角对于保障资源高效开采与矿区安全稳定至关重要[1-3]。尤其是在多矿脉并存的复杂地质环境下,传统岩移角计算方法难以全面精准反映实际地质状况,致使其在指导矿区开采作业时存在局限性,进而对开采效率与安全产生不利影响[4-6]。针对这一关键问题,业内众多技术人员围绕不同开采技术条件,运用多种手段对多矿脉岩移角的合理确定以及采动影响范围展开了深入研究,并取得了一系列具有参考价值的成果[7-9]。郭晓强等[10]着眼于上下矿带的相对位置关系,深入探究下部矿带岩移角,精准圈定了上下矿带共采期间的相互扰动范围,为矿带开采规划提供了科学合理的依据。王润清等[11]通过对金山店铁矿现场的岩移角和陷落角数据进行细致分析,成功揭示了开采矿岩的变形运移规律,为陡倾结构金属矿山的规划布局提供了有益借鉴。侯俊旭等[12]借助微震监测技术构建岩体损伤模型并开展数值模拟,深入剖析露天-地下矿体联合开采时围岩的运移演化规律,基于随机放矿理论与实际塌陷情况,最终确定了实际矿体的岩移角及移动边界。马凯等[13]基于急倾斜矿体开采力学模型,建立了移动角与地表易开裂范围之间的力学联系,获取了地表最大易开裂范围的真实移动角。孙朝燚等[14]揭示了复杂矿体采动围岩的破坏机理,提出了用于矿体塑性区破坏角分析的不连续变形指标。尽管上述研究极大地丰富了金属矿山地表变形特征与岩层移动机理方面的研究成果,但鉴于地下矿体的高度复杂性与不确定性,急倾斜矿脉群与矿脉赋存参数之间的内在联系仍未完全明晰,多矿脉耦合效应的相关研究也相对匮乏。因此,开展系统深入的研究迫在眉睫,从实现复杂条件下急倾斜多矿脉的安全高效开采。

以河南发恩德典型复杂多矿脉矿区为研究对象,综合运用工程类比、理论分析及数值模拟等方法,深入剖析岩移角与矿脉间距、矿脉数量及矿体倾角之间的关系,力求实现对复杂多矿脉岩移角的精准合理确定,从而为矿山开采决策提供更为坚实可靠的依据。

1 工程背景

河南发恩德矿区沙沟采区作为较为典型的复杂多矿脉矿区,坐落于河南省洛宁县境内,其蕴藏着丰富的铅、锌和银等战略性金属矿产资源。该矿区开采标高为 0～+1 060 m,累计查明矿石量高达 1 122.4 万 t,保有资源量为 771.6 万 t,银平均品位 273.66 g/t,铅平均品位 4.91%,锌平均品位 2.08%。矿区内矿体大多为急倾斜薄矿体,倾角为 60°～85°,平均倾角为 75°,矿体规模宏大且空间分布极为密集,累计已发现 80 条矿脉,赋存 415 个矿体,含矿构造破碎带纵横交错、相互贯通,营造出极为复杂的地质环境场。

沙沟采区采用平硐+盲竖井+斜坡道进行联合开拓,浅孔留矿法和削壁充填法开采。矿区设置 CM101、CM105、PD16、CM105-2# 共 4 套平硐盲竖井系统,布置有 11 个中段。设计 400 m、210 m 双中段自上而下同时开采,计划产能达 42 万 t/a。截至 2024 年 6 月,开采标高在+94 m 以上,开采深度为 655 m,开采矿体涉及 59 个矿体,如图 1 所示。其中,最大的矿脉为 S16W 矿脉,位居矿脉群的核心区位,在开采过程中对周边岩体的稳定性态以及岩层移动演化进程具有重要影响。

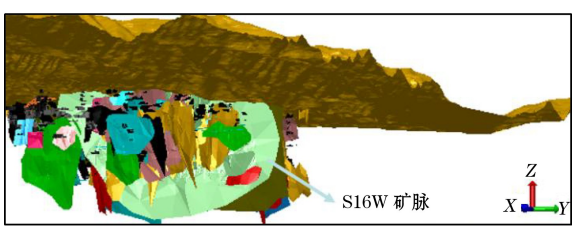


图 1 矿区地表及地下矿体模型

Fig.1 The model of surface and underground ore bodies in the mining area

沙沟采区大部分采场采用削壁充填法开采,每个矿块分层回采结束后会崩落围岩进行削壁充填,随采随充,不会形成生产采空区。但大量矿体逐渐被采出后,覆盖层岩层移动会对地表主要构、建筑物及共采的上部附近矿带造成一定的影响。为了保障深部开采的安全性和地表主要构、建筑物的稳定性,应对复杂多矿脉区域岩移角进行合理确定,进而圈

定采动区域的岩移范围,在保障安全的前提下尽可能地释放更多可采资源量。

2 岩移角初步计算与分析

为了界定深部开采工程在未来开采期间对上部矿岩的采动影响范围,并科学评价其影响程度,采用岩移角理论方法进行研究,从而对上盘岩移角进行初步计算。

2.1 工程类比法

工程类比法是当前金属矿山岩层移动参数预测常用且首选的方法。国内外存在急倾斜矿体的矿山较多,积累了丰富的数据经验,部分类似矿山的矿体倾角、移动角统计情况见表 1。河南发恩德沙沟采区急倾斜铅锌银矿体经单轴抗压强度折算公式计算得出的 f 值为 6～18,倾角为 60°～85°,采深为 655 m。经初步类比,其开采条件与上饶铅锌矿较为相似,岩层移动角为 70°。

表 1 国内外类似矿山岩移角统计情况

Table 1 Statistics of rock movement angles in similar mines at home and abroad

矿山名称	f 值	采深/m	倾角/(°)	岩移角/(°)
金山店铁矿	6～18	680	70～80	60
金川二矿区	7～14	1 000	70～80	65
鲁甸铅锌矿	5～15	800	70～80	65
上饶铅锌矿	6～16	800	60～70	70
塔斯亚锌矿	7～12	800	50～70	65
博杜铅锌矿	5～10	600	50～70	65

2.2 理论计算法

针对发恩德矿区沙沟采区以往开采活动引起的采动影响情况,依据急倾斜矿体采动诱发的岩层运移特征,以及削壁充填法在岩移理论方面的研究成果,选用较为适用的“三带”理论(概率积分法)与基于深部充填开采的临界散体柱理论,分别对采区岩移角进行初步理论计算。

2.2.1 概率积分法

由“三带”理论[15-17]可知,下沉系数 q 与地表最大下沉量 W_{max}、采厚 m 及矿体倾角 α 之间的关系为:

$$W_{max}=qm\cos\alpha \tag{1}$$

该采区大多为急倾斜薄矿脉,主要采用削壁充填法进行开采,综合考虑其沉降特性及以往工程实践经验,将 q 值确定为 0.6。

$$q=0.5(0.9+P) \tag{2}$$

将 q 值代入式(2)可知,综合评价系数 P 为 0.3,对应的岩性影响因子 D 为 1.21[18-19]。

主要影响角 β_0 与开采深度 H、矿体倾角 α 和岩性影响因子 D 之间存在如下关系:

$$\tan\beta_0=(1-0.003\,8\alpha)(D+0.003\,2H) \tag{3}$$

公式(3)中,α 为矿体平均倾角按度计的量值,采区开采深度为 655 m,矿体平均倾角为 75°,代入式(3),可得 $\tan\beta_0=2.36$。

由几何关系可知,采动影响半径 r 的计算公式为:

$$r=\frac{H}{\tan\beta_0} \tag{4}$$

将开采深度 H 和 $\tan\beta_0$ 代入式(4),得出 r 为 277.5 m。

由概率积分法推导移动边界 $f(x)$,可得:

$$f(x)=\frac{W}{\sqrt{\pi}}\int_{-\sqrt{\pi}\frac{x}{r}}^{\infty}e^{-x^2}\,dx \tag{5}$$

根据容许极限位移量判据,一般 50 mm 为稳定沉降位移临界值,由式(5)可计算得出移动边界 $X=2.3r=638$ m。矿体走向长度 L_X 为 423～1 900 m,平均为 720 m。位移影响区域边界位置与矿体底角之间的水平距离 L 为 278 m。

岩移角 β 为:

$$\beta=\arctan(\frac{H}{L})=67° \tag{6}$$

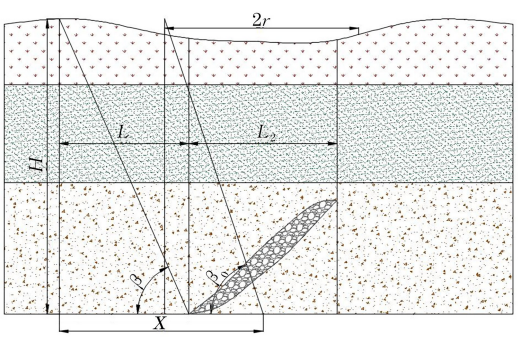


图 2 概率积分法岩移角计算模型

Fig.2 Calculation model of rock movement angle based on probability integral method

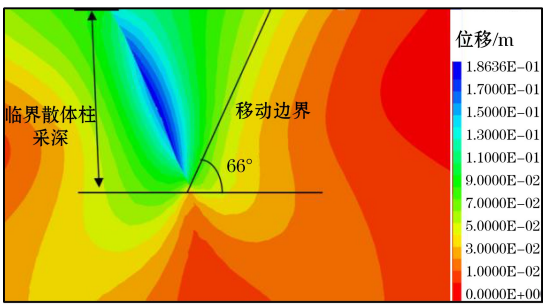
2.2.2 临界散体柱理论

金属矿山地下采动引起的变形按时空演化规律可分为连续性变形和非连续性变形,而非连续性变形主要发生在急倾斜矿体开采过程中,其覆岩变形特征较为复杂,可以通过临界散体柱支撑理论对岩移角进行初步计算[20-21]。

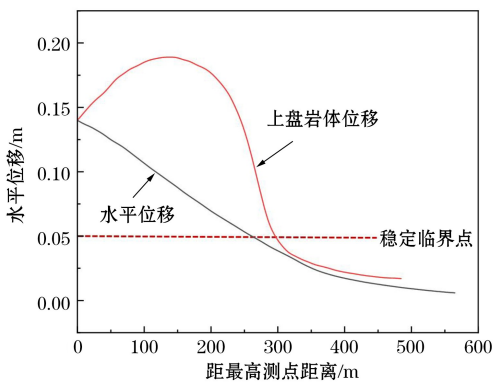
对单组矿脉进行开挖时,越往深部开挖,对地表塌陷影响越小,直到地表塌陷范围不再受深部采动

影响。此时,矿脉围岩与开采松散矿体共同维持着地表及覆岩的稳定性,该开采松散体即为临界散体柱。

S16W 号矿脉长度 1 900 m,垂直高度 1 450～1 900 m,为沙沟采区的主要矿脉之一。该矿脉资源较为丰富且大部分还没有开采,因此对该矿脉的岩移角进行深入研究,为后续矿区规划及开采提供理论依据。通过数值模拟对矿体自上而下进行逐中段开挖,待平衡后,对矿体上盘及水平方向位移数据进行整理汇总,结果如图 3 所示。



(a) 剖面岩移变化情况



(b) 观测线位移变化情况

图 3 临界散体柱数值计算模型

Fig.3 Numerical calculation model of critical granular column

以 50 mm 为稳定临界点,对上盘岩体及水平位移的失稳范围进行分析,在距最高测点约 260 m 时水平方向的位移达到稳定状态,在距最高测点约 300 m 时沿着上盘岩体方向的位移达到稳定状态,由此确定单主体矿脉岩移角为 66°,临界散体柱高度占比 15.8%～20.7%。

因此,根据工程类比法及理论计算法,初步判断沙沟矿区的岩移角为 66°～70°。

3 数值模拟计算与分析

为了进一步分析采区还原开采过程中岩移情况,收集采区工程地质相关资料,建立复杂条件下急倾斜多矿脉数值模拟分析模型,根据实际情况对矿体逐层开采,得到较为合理的真实岩移角。

3.1 模型建立

本次数值模拟采用 3DMine 建立地表三维模型,所建地表模型长×宽×高为 3 500 m×5 100 m×1 200 m,单元数为 1 595 101,节点数为7 949 091,内部矿体模型如图 4 所示。该模型的矿岩材料采用 Mohr-Coulomb 本构参数(见表 2),矿体用 null 单位开挖后再用低强度充填体进行充填,随采随充。

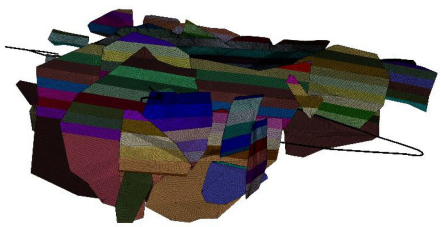


图 4 内部矿体数值模型

Fig.4 Numerical model of internal ore body

表 2 矿岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of ore-rock

名称	块体密度/(kg/m³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿体	2 800	7.78	16.0	0.25	14.2	56.66
片麻岩	2 800	4.80	8.2	0.25	11.2	34.24
蚀变岩	2 800	4.90	7.8	0.28	10.7	33.87
废石	1 600	0.05	0.2～0.4	0.28	0.05	32.00

3.2 模拟计算结果

将模型的各种矿脉根据不同中段分成多个组进行开采。矿体整体沿着模型走向布置,因此对矿体较多较大的区域进行剖面分析,如图 5 所示。岩移角的确定主要通过变形位移进行分析,因此对分组的逐个剖面主要进行位移分析,确定各个剖面下的岩移角变化情况。模型部分剖面位移云图如图 6 所示。

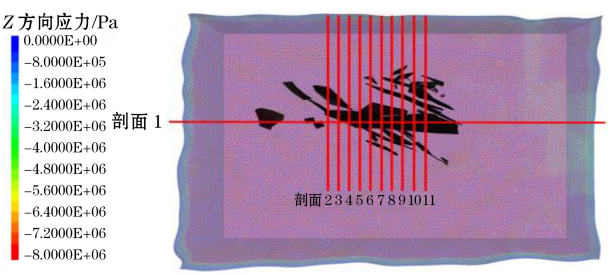


图 5 矿区剖面布置情况

Fig.5 Layout of mining section

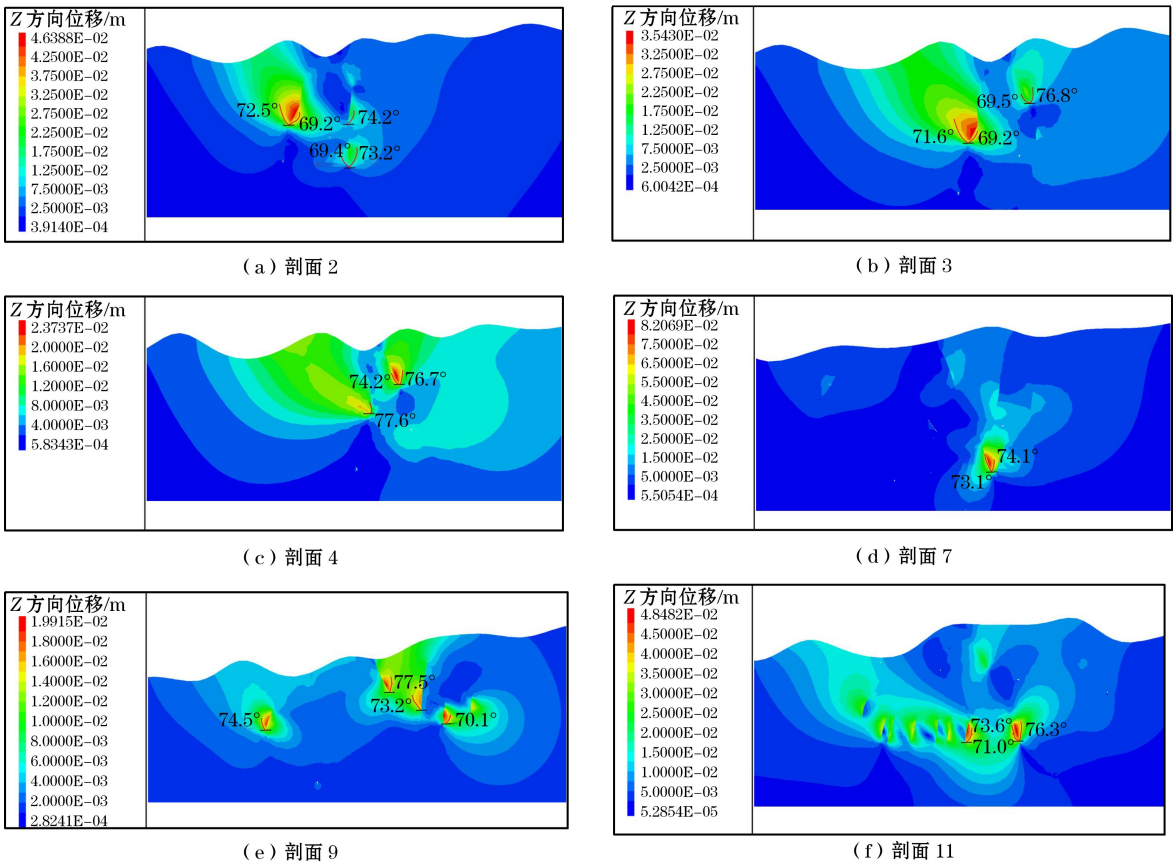


图 6 模型剖面位移云图

Fig.6 Displacement clound maps of model profile

由各个剖面位移云图最终确定,沙沟采区计划开采区域内岩移角为 69°～78°。位于剖面 7-S16W 矿体 0 m 中段附近区域,由于矿脉分布较为密集,位移达到了最大的 82 mm,具有一定的失稳风险。整体上看,西侧矿脉较为分散,岩移角普遍低于东侧,矿脉密集区位移梯度显著。

数值模拟得到的岩移角结果(69°～78°)与初步理论计算出来的岩移角结果(66°～70°)相比明显偏大。可见,在相关理论研究过程中未考虑相邻矿脉应力叠加效应,导致整体岩移角低估 12%～15%。鉴于此,有必要针对复杂条件下的急倾斜多矿脉各剖面的矿脉参数开展逐一统计,并深入探究岩移角与矿脉参数之间可能存在的关系。

3.3 多元线性拟合

为了探究岩移角与矿脉参数的可能性关系,建立岩移角影响因子量化模型。根据矿脉相关影响情况,对开采后各个剖面的矿脉参数进行简化处理,得到相关数据,见表 3。

表 3 各剖面矿脉参数统计

Table 3 Statistics of ore vein parameters in each profile

剖面编号	岩移角/(°)	矿脉数量/条	矿脉间距/m	矿体倾角/(°)
1	75.9	12	150	72.1
2	75.4	5	70	71.3
3	74.7	3	120	68.5
4	76.2	5	80	72.5
5	74.9	3	120	70.1
6	75.8	3	70	69.1
7	72.9	5	50	73.1
8	74.3	7	30	70.7
9	73.2	6	40	72.3
10	76.5	8	100	73.4
11	72.2	8	40	74.2

采区内大多数矿体规模中等,且近乎平行,矿体厚度及方向变化对该采区岩移角影响较小,因此仅记录矿脉主要参数:矿脉数量、矿脉间距和矿体倾角。基于研究成果,选择初步理论计算出来的岩移角结果作为固定数,对矿脉参数影响权重进行拟合赋值,使得矿脉参数对岩移角影响范围在 12%～15%之间。代入上述数据,进行多元线性拟合处理,根据拟合的完整性,得到最佳的多元回归方程为:

$$\beta=68.5+0.15n-0.02d+0.12\alpha \quad (7)$$

式中:n 为矿脉数量,条;d 为矿脉间距,m;α、β 均为按度计算的量值。

各剖面的矿脉数量及倾角变化不大,主要是矿脉间距上的变化。由拟合结果可知,岩移角与矿脉数量和矿体倾角成正比,与矿脉间距成反比。

对拟合结果及模拟数据进行汇总,如图 7 所示。由图 7 可知,多元回归方程计算结果与数值模拟结果基本相吻合,矿脉倾角、矿脉数量基本一致,而矿脉间距较小时,模拟中的岩移角与拟合值出现了一定的偏差,如剖面 7,8,9,11。对各个剖面数据进行计算可知,当矿脉间距大于 50 m 时,计算得出的岩移角与模拟数据拟合程度达 98%以上;当矿脉间距小于 50 m 时,计算得出的岩移角比实际值大 5%~8%。因此,矿脉密集区(间距<50 m)需将岩移角下调 5%~8%,以确保整体矿区的稳定性。而矿脉参数整体影响程度(12%~15%)大于矿脉间距造成的影响程度(5%~8%),可见矿脉数量及矿体倾角也对岩移角的大小存在一定的影响。

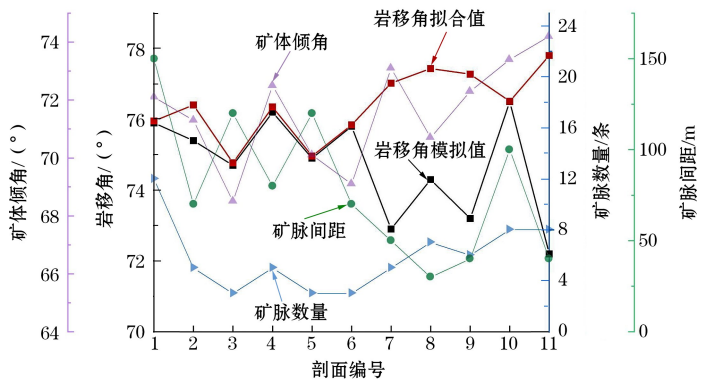


图 7 各剖面矿脉参数关系

Fig.7 Relationship of ore vein parameters in each section

4 工程应用

岩移角对于矿山设计、开采进程管控、生态环保与土地复垦等方面具有重要的作用。发恩德矿区沙沟采区过去都是根据岩移角大小对保安矿柱进行圈定,这种圈定方法忽略了散体支撑作用,矿柱尺寸冗余 20%~30%。因此,以竖井保安矿柱圈定为例,结合临界散体柱高度与岩移角动态修正模型对其进行重新圈定,如图 8 所示,H_1 为岩体深度,H_2 为临界散体柱深度,H_3 为剩余矿体深度,θ 为规定的移动角,β_1 为优化后的移动角。

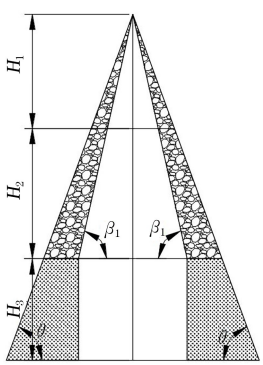


图 8 竖井保安矿柱圈定方法

Fig.8 Delineation method of shaft safety pillar

若 β_1 小于 θ,且当开采深度在 H_2 范围内时,两侧仍有少量多采的资源量。当开采深度到达开采资源临界值(H_1+H_2)时,保安矿柱优化后多采的资源量 S 才会出现。当开采深度大于(H_1+H_2)时,S 为保安矿柱优化后单个剖面真实多采的资源量。对 S 进行计算,计算公式如下:

$$S=\left[\frac{(H_1+H_2)^2}{\tan\beta_1}+\frac{(H_1+H_2)H_3}{\tan\beta_1}\right]-\frac{(H_1+H_2+H_3)^2}{\tan\theta}-H_1\left(\frac{H_1}{\tan\theta}-\frac{H_1}{\tan\beta_1}\right) \quad (8)$$

由式(8)可知,当 $\beta_1=\theta$ 时,$S=\frac{H_3^2}{\tan\beta_1}$,由于矿脉的不规则,部分区域存在多采资源量。

据相关规定可知,地表以下 50 m 内的矿脉暂不开采,因此真实条件下单个剖面的多采资源量可能大于 S 的范围。由此可见,优化后的保安矿柱更好地释放了资源可采量,大幅度提高了资源利用率,释放可采资源量为 18%~25%。

结合临界散体柱高度与岩移角动态修正模型,根据竖井附近矿脉分布情况及新保安矿柱划分方法,对保安矿柱圈定范围进行了重新调整优化,大大减少了复杂多脉带之前保安矿柱圈定的压矿量,释

放了竖井周边的可采资源量,使得矿区整体资源利用率提升至82.3%。优化结果如图9所示。

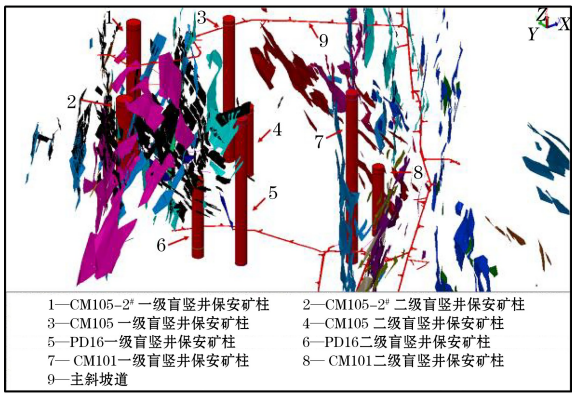


图9 竖井保安矿柱优化结果

Fig.9 Optimization results for shaft safety pillar

5 结论

(1) 本文基于临界散体柱理论,通过数值模拟的综合分析方法,得出矿区岩移角范围为69°~78°,临界散体柱高度占比为15.8%~20.7%。矿脉参数对整体岩移角影响程度为12%~15%。

(2) 急倾斜多矿脉开采导致岩移角非线性变化。基于理论分析及数值模拟研究成果,得到最佳的多元回归方程:$\beta=68.5+0.15n-0.02d+0.12\alpha$。该方程综合考量了多矿脉开采中的关键因素,为岩移角预测提供了可靠依据。矿脉密集区(间距<50 m)需将岩移角下调5%~8%以确保其稳定性。

(3) 以竖井保安矿柱为例,结合临界散体柱高度与岩移角动态修正模型,对竖井保安矿柱进行了重新圈定,使得资源利用率提高至82.3%,在保证安全的条件下较大可能地释放了可采资源量。

(4) 通过工程类比、理论分析及数值模拟,深入研究了急倾斜多矿脉开采对岩移角的影响规律,提出了多矿脉耦合作用下岩移角的动态修正模型,突破了传统单矿脉类比法的适用边界,为类似复杂急倾斜多矿脉的安全开采提供了有力依据。

参考文献(References):

[1] 唐忠义,王睿智,王桂峰,等.巨厚覆岩诱导的采动效应及冲击地压发生机制[J].采矿与安全工程学报,2025,42(1):117-125.
TANG Zhongyi, WANG Ruizhi, WANG Guifeng, et al. Ultra-thick overburden-induced mining effect and rock burst mechanism[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025,42(1):117-125.

[2] 张吉雄,巨峰,李猛,等.深部充填开采岩层控制理论与方法研究进展[J].中国科学基金,2024,38(6):1043-1051.
ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, et al. Research progress of strata control theory and method in deep backfilling mining[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2024,38(6):1043-1051.

[3] 左建平,徐丞谊,孙运江,等.采动岩层整体移动"类双曲线"理论模型及验证:从二维"类双曲线"到三维"类双曲面"模型[J].煤炭学报,2024,49(4):1731-1751.
ZUO Jianping, XU Chengyi, SUN Yunjiang, et al. Theoretical model and verification of "analogous hyperbola (hyperboloid)" for the overall movement of mining rock strata: from two-dimensional "analogous hyperbola" to three-dimensional "analogous hyperboloid" models [J]. Journal of China Coal Society,2024,49(4):1731-1751.

[4] 张玮,杨天鸿,侯俊旭,等.大红山铁矿露天-地下联合开采岩移发展规律研究[J].金属矿山,2024(2):232-238.
ZHANG Wei, YANG Tianhong, HOU Junxu, et al. Research on the development law of rock movement in the opencast underground combined mining of Dahongshan iron mine[J].Metal Mine,2024(2):232-238.

[5] 刘秀敏,范凯,王月,等.陡倾结构金属矿山岩移规律的模型试验研究[J].岩土力学,2024,45(5):1412-1422.
LIU Xiumin, FAN Kai, WANG Yue, et al. Model test research on ground movement law of steeply dipping discontinuities in metal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(5):1412-1422.

[6] 李俊平,王瑞瑶,刘先珊,等.阶段矿房法二步骤采场地压控制研究[J].安全与环境学报,2024,24(8):2981-2986.
LI Junping, WANG Ruiyao, LIU Xianshan, et al. Investigation into ground pressure control within the two-step stope of the staged mining method[J]. Journal of Safety and Environment,2024,24(8):2981-2986.

[7] 郭文彬.基于岩层移动理论的急倾斜煤层采后地表移动变形规律研究[J].金属矿山,2023(8):231-236.
GUO Wenbin. Study on the post-mining surface movement and deformation regularity of steep coal seam based on rock movement theory[J]. Metal Mine,2023(8):231-236.

[8] 朱卫兵,王晓振,谢建林,等.矿山采动覆岩内部岩移原位监测技术进展及应用[J].工矿自动化,2023,49(9):1-12.
ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, XIE Jianlin, et al. Advancements and applications: in-situ monitoring technology for overburden movement in mining[J]. Journal of Mine Automation,2023,49(9):1-12.

[9] 张姝婧.露天转地下连续干式充填开采及其对地表岩移影响[D].沈阳:东北大学,2022.
ZHANG Shujing. Study on continuous dry filling mining method and its influence on ground movement in transition open-pit to underground mine[D]. Shenyang: Northeastern University,2022.

[10] 郭晓强,王刚,黄敏,等.相邻矿体临界开采范围的确定方法研究[J].矿冶工程,2023,43(4):26-31.

GUO Xiaoqiang, WANG Gang, HUANG Min, et al. Determination of critical mining scope of adjacent orebody [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4): 26-31.

[11] 王润清,董文涛,刘秀敏,等.陡倾结构金属矿山岩层移动和地表变形的离散元模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(10):93-99.
WANG Runqing, DONG Wentao, LIU Xiumin, et al. Discrete element numerical study on strata movement and surface deformation in the iron mine with steep dip structure [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(10): 93-99.

[12] 侯俊旭,杨天鸿,赵永,等.基于微震监测及岩体损伤模型的露天-地下联合开采岩移过程数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊1):3243-3256.
HOU Junxu, YANG Tianhong, ZHAO Yong, et al. Numerical simulation of rock moving process of combined open-pit and underground mining based on microseismic monitoring and rock mass damage model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Suppl. 1): 3243-3256.

[13] 马凯,杨天鸿,赵永,等.金属矿急倾斜矿体开采地表移动范围理论分析初探[J].煤炭学报,2024,49(增刊1):1-11.
MA Kai, YANG Tianhong, ZHAO Yong, et al. Preliminary study on theoretical analysis of surface movement range in mining steeply inclined ore body in metal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(Suppl.1): 1-11.

[14] 孙朝燚,陈啸,刘秀敏,等.金属矿山地下开采引起围岩破坏及岩层移动的数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):77-83.
SUN Chaoyi, CHEN Xiao, LIU Xiumin, et al. Numerical study on surrounding rock failure and strata movement caused by underground mining in metal mine[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(4): 77-83.

[15] 覃敏,白继坤,宋阳,等.采空区对地表影响的多维角度分析研究[J].中国矿业,2024,33(9):80-87.
QIN Min, BAI Jikun, SONG Yang, et al. Multidimensional analysis and research on the impact of goaf on the surface [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(9): 80-87.

[16] 黄刚,李东伟,陆港.基于概率积分法和数值模拟的某铁矿地表沉降影响研究[J].武汉理工大学学报,2024,46(2):94-101.
HUANG Gang, LI Dongwei, LU Gang. Research on surface settlement impact of a certain iron mine based on probability integration method and numerical simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 46(2): 94-101.

[17] 林芳,冯晓九.基于概率积分法的济宁某矿地表位移规律研究[J].金属矿山,2023(11):198-204.
LIN Fang, FENG Xiaojiu. Study on surface displacement law of a mine in Jining based on probability integral method [J]. Metal Mine, 2023(11): 198-204.

[18] 王运敏.现代采矿手册[M].北京:冶金工业出版社,2012.
WANG Yunmin. Modern mining handbook[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

[19] 刘小平.我国建(构)筑物场地下伏煤矿采空区勘察技术进展[J].煤田地质与勘探,2022,52(4):139-146.
LIU Xiaoping. Progress in investigation technology for coal mine goafs under buildings and structures in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 52(4): 139-146.

[20] 刘洋,任凤玉,何荣兴,等.基于放矿下临界散体柱理论的地表塌陷范围预测[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(3):416-420.
LIU Yang, REN Fengyu, HE Rongxing, et al. Prediction of surface subsidence range based on the critical medium column's theory under ore drawing[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(3): 416-420.

[21] 郑建明,任凤玉,唐烈先.西石门铁矿散体临界深度预测与地表陷落范围控制[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):631-634.
ZHENG Jianming, REN Fengyu, TANG Liexian. Critical depth prediction and surface subsidence range controlling based on Xishimen mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 631-634.