某金矿井筒保安矿柱周边回采区域安全性评价*

王亚军[1,2],李向东[1,2],陈寅[3],张庆嵩[1,2],张云韦[3],龚永超[1,2],刘金海[3],曹港[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.新疆喀拉通克矿业有限责任公司, 新疆 阿勒泰地区 836100)

摘要:井筒保安矿柱的安全性是矿山安全开采的重要保障。对某金矿保安矿柱周边的回采区域地压活动的调查与分析,并结合主要风险因素,提出了一种综合考虑多个影响因素的安全性评价模型,对井筒保安矿柱周边回采区域的现状安全性进行了评估。研究表明,浅部地压活动由地质因素与采矿扰动共同作用引起的;深部局部变形破坏则由开采深度、地应力增大及地质因素综合影响所致。保安矿柱的安全性受自然条件、回采扰动和生产管理等3大类因素的影响,具体涉及11个影响因素。保安矿柱周边41个采场的安全评估结果显示,大多数采场的安全等级为Ⅱ级,整体安全状况较好。矿体赋存条件、地质构造、采矿方法及井筒保安矿柱位置是影响矿柱安全性的主要因素。矿体连续性好、围岩稳定性高的区域安全性较优,且离井筒保安矿柱较远的区域,回采扰动对井筒区域的影响较小,保安矿柱安全性较高。

关键词:井筒保安矿柱;地压活动;层次分析法;风险因素;安全性评价
中图分类号:TD325 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0133-08

Security Evaluation of the Surrounding Mining Area of the Shaft Safety Pillar in a Gold Mine

WANG Yajun[1,2], *LI Xiangdong*[1,2], *CHEN Yin*[3], *ZHANG Qingsong*[1,2], *ZHANG Yunwei*[3], *GONG Yongchao*[1,2], *LIU Jinhai*[3], *CAO Gang*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Xinjiang Kalatongke Mining Co., Ltd., Altay Prefecture, Xinjiang 836100, China)

Abstract: The security of shaft safety pillar is an important guarantee for safe mining in mines. The ground pressure activities in the mining area around the safety pillar of a gold mine were investigated and analyzed. Combined with the main risk factors, a security evaluation model considering multiple influencing factors was proposed, and the current safety evaluation of the mining area around the shaft safety pillar was evaluated. The research shows that the shallow ground pressure activity is caused by the combined action of geological factors and mining disturbance. The deep local deformation and failure are caused by the comprehensive influences of mining depth, in-situ stress increase and geological factors. The security of the safety pillar is affected by three types of factors, such as natural conditions, mining disturbance and production management, involving 11 influencing factors. The security evaluation of 41 stopes show that the safety level of most stopes is grade II, and the overall safety situation is good. The occurrence conditions of ore bodies, geological structure, mining methods and position of shaft safety pillars are the main factors affecting the security of pillars. In addition, stoping areas farther away from the shaft safety pillars exert less mining disturbance on the shaft zone, resulting in higher security of the safety pillars.

Key words: Shaft safety pillar, Ground pressure activity, Analytic hierarchy process, Risk factor, Security evaluation

0 引言

随着矿山开采深度和规模的不断扩大,回采过程中面临的地质环境的复杂性和不确定性逐渐增大,尤其是在保安矿柱周围区域进行开采时,在确保矿柱稳定性的同时有效回采矿产资源成为了安全生

* **收稿日期**:2025-01-17
基金项目:西藏自治区科技计划项目(XZ202502ZY0018-02);深地国家科技重大专项(2024ZD1003804);新疆"天山英才"第二批优秀工程师(陈寅)培养计划
作者简介:王亚军(1991—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail:648324460@qq.com
通信作者:张庆嵩(1998—),男,河北唐山人,硕士,助理工程师,从事金属矿山采矿方法及工艺研究工作。E-mail:qingsong_zhang0@163.com

产的难题[1-3]。因此,准确评估井筒保安矿柱周边回采区域的安全性,预测潜在的安全隐患,是保障矿山安全生产的工作内容[4]。

近年来,针对矿山回采过程中安全性评价的研究日益增多[5]。不同学者提出了多种安全性评价方法。郭晓强等[6]通过理论计算与数值模拟相结合的方式,研究了自然崩落法开采中岩层的变形规律及下部矿带岩移现象,实现了保安矿柱圈定范围的安全性评价。蔡鑫等[7]基于现场采空区矿柱强度分布调查,构建了矿柱强度的密度函数,并通过应力扩散公式计算矿柱的承载应力及失稳概率,为矿柱失稳的致灾性评估提供了更具实用性的计算方法。此外,还有学者通过机器学习的方式实现了矿柱稳定性的评价。张文革等[8]采用多种学习算法对数据进行训练与预测,并使用 Stacking 融合策略来提高预测的准确性与可靠性,为矿山安全性评价提供了智能化的新方向。在考虑多重环境因素方面,层次分析法的应用较为广泛。廖宝泉等[9]通过建立一个包含多个评价指标的采空区危险性识别体系,并结合熵权法与层次分析法,采用相对差异函数来确定各评价指标对安全性的贡献,得出采空区的危险性级别。郭庆彪等[10]结合云模型与模糊层次分析法,提出了区域稳定性评价模型,减少了主观因素对数据处理的干扰,提升了评估的可靠性,并利用构建的模型对武云高速采空区路段的建设场地稳定性进行了较准确的评价。杨森等[11]针对采空区容易发生失稳与塌陷的特点,构建了采空区稳定性综合评价指标体系,并采用模糊综合评价法对陕西哈拉沟矿区进行了稳定性评价,验证了这一方法的有效性。李炎峰等[12]结合模糊数学与层次分析法,通过三维有限元数值计算获取各因素的评判指标,为内蒙柴胡栏子金矿进行了采场结构参数的综合评判和优化,有效提升了矿山开采的安全性与效率。

本文结合某金矿山井筒保安矿柱及其周边区域宏观地压现象的现场调查结果,分析地压活动的主要原因,并采用层次分析法(AHP)对回采区域的安全性进行评估,进而为矿山安全管理提供理论支持和指导。

1 工程背景

某金矿 13 号矿脉是矿区的主要矿体之一。该矿体长 2 500 m,延深 1 030 m,标高+1 300～+188 m,开采深度接近 1 000 m;矿体厚度 0.43～8.36 m,平均厚度 2.48 m,厚度变化系数为 73.40%,厚度稳定;矿体呈大脉状—似层状产出,近东西向分布,矿体倾向 140°～204°,倾角 45°～85°。经过几十年的开采,1 118～1 258 m 矿体已经开采结束,平硐已经闭坑。818～1 118 m 之间的主要矿体基本开采完毕,目前正在开采的为 218～818 m 中段之间的矿体。13 号脉开拓系统见图 1。

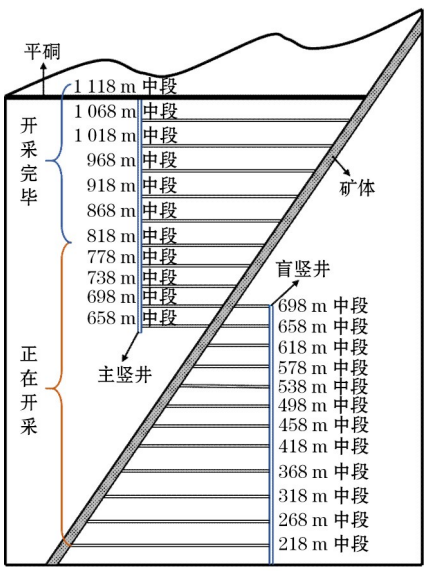


图 1 13 号脉开拓系统示意

Fig.1 Schematic diagram of development system for No.13 ore vein

该金矿近年来年产量均在 40 万 t 左右,生产规模较大,13 号矿体作为矿山主要供矿矿体,受薄矿脉矿体赋存条件影响,在当前产能情况下,井下需要同时布置的采场数量较多。同时受保安矿柱圈定范围影响,从 778 m 中段开始便有矿石资源在保安矿柱范围内而无法开采,13 号脉矿体在 318 m 水平以下全部在保安矿柱的圈定范围内,井下可采区域严重受限,大量资源无法有效回采。矿山可采矿量急剧下降,开采深度下降较快,对矿山的产能保持和持续发展造成不利影响。为此,需对井筒保安矿柱周边回采区域进行安全性评价,为后续优化矿柱圈定范围与改进开采工艺提供依据。根据该矿开采现状,对距离井筒保安矿柱圈定边界 100 m 内的采场生产现状进行了统计,统计结果如图 2 所示(颜色标识见电子版)。

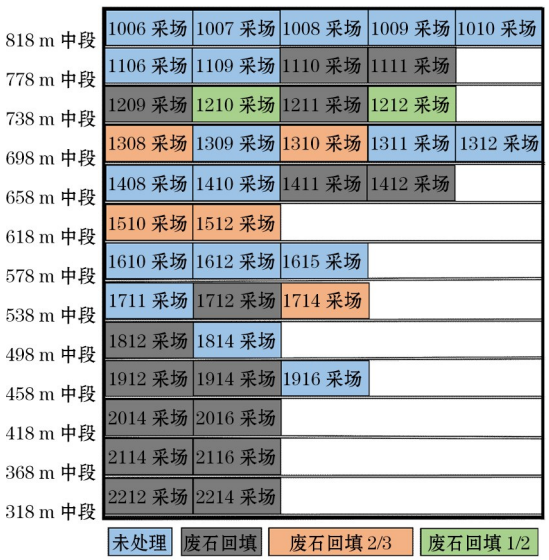


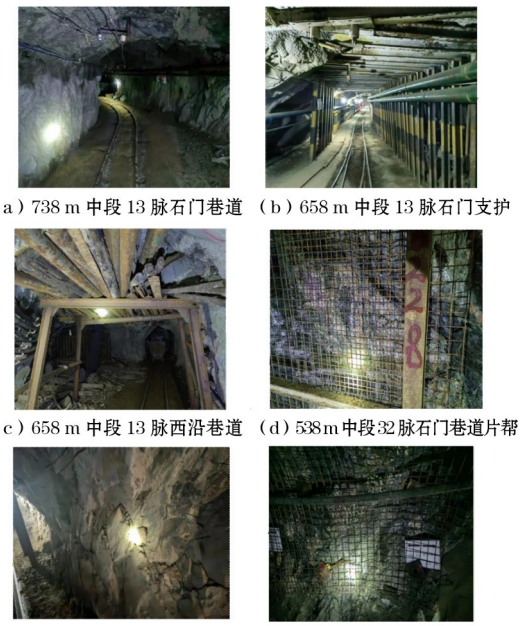
图 2 距离井筒保安矿柱边界 100 m 内的采场回采现状统计

Fig.2 Statistics on the mining status of stopes within 100 m of the boundary of shaft safety pillar

2 井筒周边区域地压活动调查与分析

2.1 宏观地压现象现场调查

通过现场踏勘,重点调查了井筒保安矿柱及其周边区域,涵盖了 738 m、658 m、538 m、498 m 等明竖井及盲竖井区域的多个中段水平。从图 3(a)可见,+738 m 中段局部巷道已出现整体下沉,其原因可能是巷道临近 F24 大断层,且位于断层下盘,岩体完整性差、强度低,局部节理发育,巷道施工后发生应力重分布,导致应力集中并引发下沉。图 3(b)和图 3(c)显示,+658 m 中段出现局部冒顶片帮与围岩破碎,初步分析认为该区域位于 F2 断层破碎带,岩体质量差、结构面发育,巷道爆破开挖后应力集中,岩体结构面开裂贯通,导致大量岩块脱落,进而产生片帮和冒顶。图 3(d)表明,+538 m 中段局部节理裂隙发育,岩体质量较差,开挖后围岩出现应力集中,结构面开裂贯通,导致片帮和冒顶。图 3(e)和图 3(f)展示了+498 m 中段巷道围岩发生岩爆、片帮与冒顶,主要原因是巷道围岩为钾长石化片麻岩,岩体完整性较好,抗压强度高且脆性强,同时两个平行脉之间构造应力较大,巷道岩体开挖后应力集中和卸荷变形,进而发生了岩爆、片帮和冒顶。



(a) 738 m 中段 13 脉石门巷道 (b) 658 m 中段 13 脉石门支护
(c) 658 m 中段 13 脉西沿巷道 (d) 538m 中段 32 脉石门巷道片帮
(e) 498m 中段 32 脉沿脉巷道片帮 (f) 498m 中段 32 脉石门巷道片帮

图 3 宏观地压现象现场调查照片

Fig.3 Field investigation photos of macroscopic ground pressure phenomenon

2.2 地压活动原因分析

2.2.1 658 m 以上浅部区域地压活动原因分析

658 m 以上浅部区域地压活动现象的成因可归结为自然因素与工程因素。自然因素主要为地质构造(如断层、破碎带等)与原岩应力,其中构造弱面不仅造成大范围破坏,还会促进局部地压活动[13]。工程因素则包括采矿扰动与工程质量问题。靠近采场的巷道易受回采扰动影响,导致围岩应力集中,引发变形破坏[14]。此外,钻爆法施工质量不佳、超欠挖、支护不当等因素也加剧了巷道围岩破坏[15]。因此,658 m 以上浅部区域地压活动是地质特征与采矿扰动双重作用的结果。

2.2.2 658 m 以下深部区域地压活动原因分析

658 m 以下深部区域地压活动的主要成因也可归为自然因素与工程因素。自然因素包括地质条件和高地应力,工程因素主要涉及施工质量。由于深部工程施工质量较好,局部变形破坏主要与开采深度增加及地应力增大有关,尤其在局部构造发育区域,掘进过程中易出现明显的变形破坏[16]。尽管岩石硬度较高,但局部区域受构造和结构面影响,导致稳定性差,出现顶板垮塌等问题。随着开拓深度增加,自重应力与构造应力增强,前者与深度相关,后者受控矿构造影响,在深部出现了复杂的高地应力。在高应力区,节理发育区易发生岩体掉块与小范围

垮塌,高强度脆性岩体则可能发生岩爆[17]。例如在498 m石门巷道发生过显著的岩爆现象。

3 井筒保安矿柱周边回采区域现状安全评价

3.1 影响保安矿柱稳定性的主要风险因素辨识

风险因素是指增加事故发生概率或严重程度的任何事件。对于保安矿柱而言,则是指影响井筒区域稳定性的各种影响因素,这些因素可能是突发性的,产生瞬间破坏作用,也可能是需要一定时间范围积累,进而对井筒区域稳定性产生不利影响。通过对保安矿柱周边回采现状调查,深入分析相关地质资料及图纸,参照相关设计规范和国家标准,采用专家咨询法、主成分分析法等方法,根据科学性、整体性、区域性和综合性及可比性等原则,对影响井筒保安矿柱稳定性的风险因素进行了辨识与分析,最终得出了影响保安矿柱稳定性的主要风险因素,具体包括:矿体赋存条件,地质构造,矿岩物理力学特性,地下水,风化作用,采矿方法,井筒保安矿柱位置,开采深度,爆破振动,施工质量管理,回采作业管理。

3.2 保安矿柱现状评价模型的建立

根据上述对影响保安矿柱稳定性的主要风险因素识别结果,保安矿柱的安全稳定性主要受到自然条件、回采扰动和生产管理等三大因素的影响,每一因素下又包含多个具体要素。基于综合分析并合理选择的评价因素,构建了层次分析模型,以客观反映保安矿柱的整体安全状况,模型结构如图4所示。

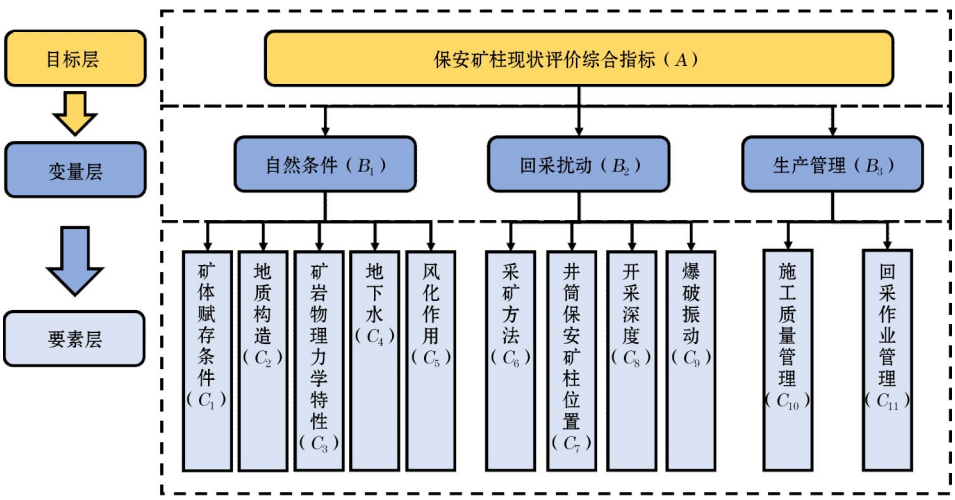


图4 保安矿柱现状评价层次分析模型

Fig.4 Analytic hierarchy process model for the status evaluation of safety pillar

3.3 基于AHP的保安矿柱周边回采区域安全现状初步评价

3.3.1 各因素指标权重值的确定

为了建立符合工程实际意义的判断矩阵,本文以《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)等规范为依据,通过综合分析与评价来确定各个指标的权重[18]。在AHP层次分析法中,每项指标均需依据重要性与标度对应关系进行两两对比的重要性评价,并得出模糊判断矩阵,重要性与标度对应关系见表1。

表1 重要性与标度的对应关系

Table 1 The correspondence between importance and scale

重要性	标度	含义
同等重要	1	两因素相比,同样重要。
稍微重要	3	两因素相比,一因素比另一因素稍微重要。
重要	5	两因素相比,一因素比另一因素明显重要。
强烈重要	7	两因素相比,一因素比另一因素强烈重要。
极端重要	9	两因素相比,一因素比另一因素极端重要。
介于两者之间	2、4、6、8	上述两相邻判断值的中间值。

根据保安矿柱现状评价层次分析模型建立判断矩阵。

(1) 要素层$C_1 \sim C_5$相对于变量层$\boldsymbol{B}_1$的权重判断矩阵。

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 & 6 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & 6 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 4 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/6 & 1/6 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 要素层$C_6 \sim C_9$相对于变量层$\boldsymbol{B}_2$的权重判断矩阵。

$$\boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 要素层$C_{10} \sim C_{11}$相对于变量层$\boldsymbol{B}_3$的权重判断矩阵。

$$\boldsymbol{B}_3=\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & 1\end{bmatrix}$$

(4) 变量层 $B_1\sim B_3$ 相对于目标层 $\boldsymbol{A}$ 的权重判断矩阵。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 3\\ 1 & 1 & 3\\ 1/3 & 1/3 & 1\end{bmatrix}$$

根据公式(1)采用方根法计算每层中各因素的权重值。

$$w_i=\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}(i,j=1,2,3,\cdots,n)\quad(1)$$

式中:w_i 为第 i 个评价指标的权重值;a_{ij} 为第 i 个评价指标相对第 j 个评价指标的重要度;n 为评价指标的个数。

通过公式(1)计算可得各层级因子相对权重值,计算结果见表 2。

表 2 各层级评价指标的权重值

Table 2 Weight values of evaluation indexes at all levels

目标层	变量层	权重值(B 层对 A 层)	要素层	权重值(C 层对 B 层)	权重值(C 层对 A 层)
保安矿柱现状评价综合指标(A)	自然条件(B_1)	0.429	矿体赋存条件(C_1)	0.363	0.155
			地质构造(C_2)	0.363	0.155
			矿岩物理力学特性(C_3)	0.156	0.067
			地下水(C_4)	0.071	0.031
			风化作用(C_5)	0.047	0.020
	回采扰动(B_2)	0.429	采矿方法(C_6)	0.391	0.167
			井筒保安矿柱位置(C_7)	0.391	0.167
			开采深度(C_8)	0.067	0.029
			爆破振动(C_9)	0.151	0.065
	生产管理(B_3)	0.143	施工质量管理(C_{10})	0.500	0.071
			回采作业管理(C_{11})	0.500	0.071

3.3.2 参照标准与评价指标的标准化

(1) 评价指标的标准化及标准化参数值。

在保安矿柱安全现状评价过程中,选取多个评价指标,这些评价指标的性质各不相同,不具有直接的可比性,因此就需要对这些评价指标进行标准化处理,使各个评价指标可以统一量化标准,形成统一的可评价数值。在保安矿柱安全现状评价中选择百分比标准化法对评价指标进行标准化处理,使各个评价指标数值在 0~1 的范围内,根据各个评价指标的影响方式不同,具体计算公式如公式(2)所示。

$$A=\begin{cases}\dfrac{S_i}{C_i}\\ 1-\dfrac{S_i}{C_i}\end{cases}\quad(2)$$

式中:A 为评价指标标准值;C_i 为参照值;S_i 为指标实际值。

根据公式(2)及合理的参照值对评价指标进行标准化。参照值根据大量的调查结果并结合专家意见来合理设计,井筒保安矿柱现状评价的指标标准化参照值见表 3。

表 3 保安矿柱现状评价指标的标准化值

Table 3 Standardized value of status evaluation factors of safety pillar

指标类型	评价指标	标准化参照值	备注
自然条件	矿体赋存条件	80%	最佳值
	地质构造	1	极限值
	矿岩物理力学特性	80%	最佳值
	地下水	0.5	极限值
	风化作用	0.5	极限值
回采扰动	采矿方法	90%	最佳值
	井筒保安矿柱位置	100	最佳值
	开采深度	950	极限值
	爆破振动	1	最佳值
生产管理	施工质量管理	95%	最佳值
	回采作业管理	95%	最佳值

(2) 现状评价计算公式。

将评价指标分为自然条件、回采扰动和生产管理 3 个类别,然后通过综合分析,得到各中段保安矿柱所在区域的各回采采场的安全评价综合指标值,计算公式见式(3)。

$$A=\sum_{i=j}^{m}w_i D_i\quad(3)$$

式中:A 为最终的评价指标值;D_i 为第 i 个指标的标准值;w_i 为第 i 个指标的权重值;j、m 分别代表相应

指标的序号。

(3) 现状评价标准的建立。

根据矿山现场调查情况,结合国家相关规定,将此井筒保安矿柱周边 100 m 范围内的回采采场安全现状评价分为好(Ⅰ级)、较好(Ⅱ级)、中等(Ⅲ级)、差(Ⅳ级)和极差(Ⅴ级)共 5 个等级,各评价等级与最终指标计算值的对应关系见表 4。

表 4 评价等级标准

Table 4 Standard of evaluation grade

等级	指标值	备注
Ⅰ	0.80～1	好
Ⅱ	0.60～0.80	较好
Ⅲ	0.40～0.60	中等
Ⅳ	0.20～0.40	差
Ⅴ	＜0.20	极差

3.3.3 保安矿柱现状安全评价结果

根据井筒保安矿柱周边采场分布及回采现状调查结果,对距离井筒保安矿柱圈定边界 100 m 范围内的 41 个采场安全状况进行了分析,并根据相应评价标准进行安全性评估,评估结果见图 5。由图 5 可知,这些采场的安全评价值在 0.559～0.761 之间,大部分采场的安全评价等级为Ⅱ级(较好),各采场的安全评价等级均在Ⅲ级及以上,表明井筒保安矿柱周边回采区域的安全现状总体较好。在所考虑的 11 个评价因素中,矿体赋存条件、地质构造、采矿方法及井筒保安矿柱位置对保安矿柱的安全稳定性影响最为显著。矿体连续性较好、上下盘围岩较少断层的区域,更有利于整体稳定性。此外,距离井筒保安矿柱边界较远的采场,其回采对井筒区域的采动影响较小,安全性相对较高。

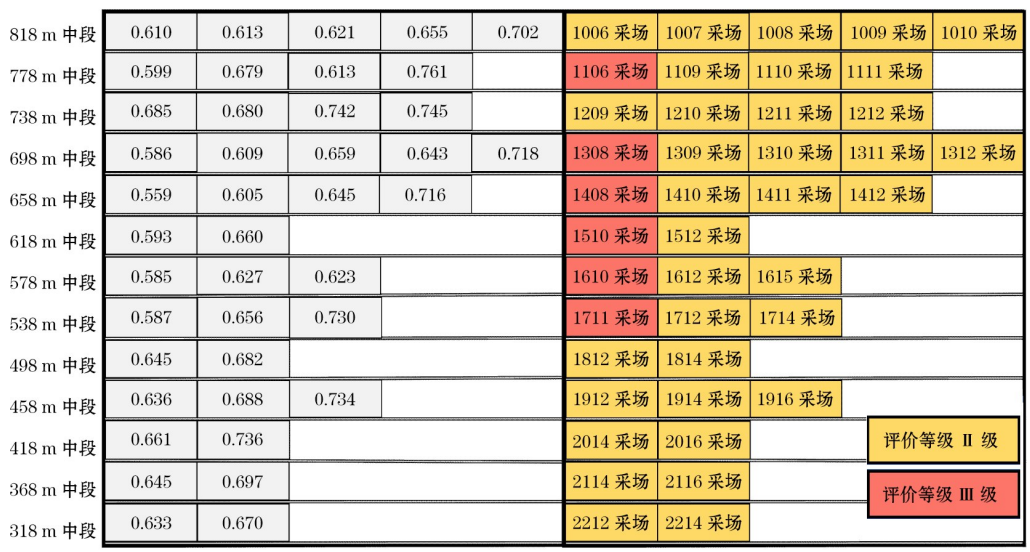


图 5 井筒保安矿柱周边区域的现状安全评价结果

Fig.5 The evaluation results of the present safety situation of the surrounding area of shaft safety pillar

4 保安矿柱周边区域安全回采建议及措施

基于对井筒保安矿柱周边区域采矿作业潜在危险因素的深入分析,结合国家法律法规及行业标准,为确保井筒及周边区域的安全,从安全管理和安全技术两个维度提出了一系列针对性对策,旨在降低事故发生概率,确保矿山安全生产的可持续性。相关安全回采问题及建议措施见表 5。

表 5 安全回采问题及建议措施

Table 5 The problems and recommended measures for safety mining

安全回采问题	具体措施
冒顶片帮	严格按照采矿许可证圈定的开采范围和深度进行作业,遵守安全规程,禁止超标生产;按规程组织生产,确保采场有单体设计并合理确定开采顺序;爆破后及时检查顶板,处理松石,遇危险迹象立即撤离并报警;强化工人安全教育,减轻爆破振动影响,进入采场前进行敲帮问顶;设立专职人员负责地压管理,建立顶板管理制度,并进行技术培训;及时密闭废弃巷道,封闭通往采空区的井巷,监测处理采空区;按设计要求封闭或充填采空区,加强巷道支护,防止事故;遇断裂带时采取清除和支护措施,控制采场跨度。
透水事故	设置并定期清理排水沟,保证水流畅通,管理排水设备;进行超前探放水,遵循“有疑必探”的原则,禁止放炮放水;泵房确保 24 h 值班,保持通讯畅通,并记录泵运行情况;对接近水体的地区编制探水设计,制定预防涌水的安全措施;主要排水设备应由三台同类型泵组成,确保排水能力;井下电源电缆应有两条独立线路,保证供电安全;定期演练透水应急预案,加强对涌水情况的观察和分析。
地压事故	加强地压监测系统建设,实时监测采场的位移和应力,根据监测数据分析地压分布规律,及时预测预报地压活动,防止地压事故发生。

5 结论

通过对某金矿井筒保安矿柱及其周边区域地压现象的现场调查,分析了浅部与深部地压活动的成因,并结合保安矿柱稳定性的主要风险因素,构建了保安矿柱周边区域的现状安全评价模型,运用 AHP 层次分析法对保安矿柱周边区域的现状安全进行评价,具体结论如下。

(1) 浅部区域的地压活动主要由地质因素与采矿扰动共同作用引起;而深部区域局部变形破坏则主要由开采深度、地应力增大及地质因素的综合影响所致。

(2) 保安矿柱及周边区域的安全稳定性受自然条件、回采扰动和生产管理三大类因素的影响,具体包括:矿体赋存条件、地质构造、矿岩物理力学特性、地下水和风化作用等 5 个自然条件因素;采矿方法、井筒保安矿柱位置、开采深度和爆破振动等 4 个回采扰动因素;施工质量管理与回采作业管理等两个生产管理方面的因素。

(3) 在距离井筒保安矿柱边界 100 m 的范围内共有 41 个采场,其安全评价值介于 0.559～0.761 之间。绝大多数采场的安全等级为Ⅱ级,总体安全评价等级和结果都在Ⅲ级以上,井筒保安矿柱周边回采区域安全现状总体较好。

(4) 在自然条件、回采扰动和生产管理中的 11 个评价因素中,矿体赋存条件、地质构造、采矿方法及井筒保安矿柱位置对矿柱安全性的影响最为显著。具体而言,矿体连续性较好、围岩较少断层的区域更加稳定;且距离井筒保安矿柱越远,回采对井筒区域的影响越小,保安矿柱的安全性越高。

参考文献(References):

[1] 张超,宋卫东,付建新,等.充填法开采井筒保安矿柱圈定及回采优化模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):136-145.
ZHANG Chao, SONG Weidong, FU Jianxin, et al. Shaft safety pillar delineation and optimization simulation of filling mining method [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(1):136-145.

[2] 廖俊钰.某矿山保安矿柱回收方案与地压活动规律研究[D].赣州:江西理工大学,2024.
LIAO Junyu. Study on the recovery program of security pillar and the pattern of ground pressure activity in a mine [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2024.

[3] 江文武,廖俊钰,钟海,等.多因素影响复杂空区群下残留矿柱回收模拟研究[J].金属矿山,2024(6):71-78.
JIANG Wenwu, LIAO Junyu, ZHONG Hai, et al. Simulation study on the recovery of residual ore pillars under a complex mining cavity cluster influenced by multiple factors[J]. Metal Mine,2024(6):71-78.

[4] 刘海林,李鹏程,王雨波.硬岩矿床组合型井筒保安矿柱圈定与压覆资源回采技术[J].金属矿山,2023(7):168-175.
LIU Hailin, LI Pengcheng, WANG Yubo. Delineation of safety pillars and overlying resource recovery technique in combined type shafts of hard rock deposits[J]. Metal Mine, 2023(7):168-175.

[5] 张东杰,刘树新,任凤玉,等.基于 AHP-FUZZY 的采空区治理方法优选研究[J].金属矿山,2021(4):183-190.
ZHANG Dongjie, LIU Shuxin, REN Fengyu, et al. Research on optimization of goaf management method based on AHP-FUZZY[J]. Metal Mine,2021(4):183-190.

[6] 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.

[7] 蔡鑫,黄涯帅,周子龙,等.基于矿柱失稳风险分析的采空区关键矿柱重定义与辨识[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):216-225.
CAI Xin, HUANG Yashuai, ZHOU Zilong, et al. Redefinition and identification of critical pillars in goaf based on the risk analysis of pillar instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(1):216-225.

[8] 张文革,董陇军,王加闯,等.基于机器学习算法及 Stacking 融合集成模型的矿柱稳定性分析[J].金属矿山,2023(10):67-74.
ZHANG Wen'ge, DONG Longjun, WANG Jiachuang, et al. Ore pillar stability analysis based on machine learning algorithms and Stacking fusion ensemble models[J]. Metal Mine, 2023(10):67-74.

[9] 廖宝泉,柯愈贤,卿琛,等.基于相对差异函数的金属矿采空区危险性识别[J].黄金科学技术,2021,29(3):440-448.
LIAO Baoquan, KE Yuxian, QING Chen, et al. Risk recognition of metal mine goaf based on relative difference function[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(3): 440-448.

[10] 郭庆彪,王亮,吕鑫,等.基于云模型与模糊层次分析的老采空区建设场地稳定性评价[J].金属矿山,2019(11):43-48.
GUO Qingbiao, WANG Liang, LYU Xin, et al. Stability evaluation of the construction site above a goaf based on cloud model and fuzzy hierarchy analysis[J]. Metal Mine, 2019(11):43-48.

[11] 杨森,张文志,杜梦豪.基于 AHP－模糊综合评价的采空区场地稳定性研究[J].现代矿业,2023,39(6):213-217.

YANG Sen, ZHANG Wenzhi, DU Menghao. Study on the stability of goaf site based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Modern Mining,2023,39(6):213-217.

[12] 李炎峰,刘志祥,闵晨笛.金属矿深部采场结构参数的模糊层次分析综合评判优化[J].矿冶工程,2022,42(1):24-29.
LI Yanfeng, LIU Zhixiang, MIN Chendi. Comprehensive evaluation and optimization with F-AHP for structural parameters of stope at deeps of metal mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(1):24-29.

[13] 刘银,张晶,周宗红,等.浅孔留矿法采场结构参数综合评价体系构建及应用[J].矿业研究与开发,2024,44(9):18-25.
LIU Yin, ZHANG Jing, ZHOU Zonghong, et al. Construction and application of comprehensive evaluation system of stope structural parameters in shallow hole retaining method[J]. Mining Research and Development, 2024,44(9):18-25.

[14] 王宏伟,李涛,王晴,等.开采扰动诱发断层应力影响范围的上行机制研究[J/OL].工程力学:1-10[2024-12-30]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20240930.1631.005.
WANG Hongwei, LI Tao, WANG Qing, et al. Study on upward mechanism of influence range of fault stress induced by mining disturbance[J/OL]. Engineering Mechanics:1-10 [2024-12-30]. https://link. cnki. net/urlid/11. 2595. O3. 20240930.1631.005.

[15] 王庆.破碎围岩巷道稳定性分析及支护效果研究[D].赣州:江西理工大学,2020.
WANG Qing. Study on the stability analysis and supporting effect of broken surrounding rock roadway[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2020.

[16] 张世瑞,江权,邱士利,等.深部碎裂岩体巷道变形破坏机制与支护效应连续-非连续分析[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(1):86-97.
ZHANG Shirui, JIANG Quan, QIU Shili, et al. Continuous-discontinuous analysis of deformation failure mechanism and supporting effect of roadway in deep fractured rock masses[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering,2025,7(1):86-97.

[17] 盛佳,万文,江飞飞,等.深部双中段卸荷连续开采相似模拟试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):1-12.
SHENG Jia, WAN Wen, JIANG Feifei, et al. Similar simulation test study of unloading continuous mining in deep double middle sections [J]. Mining Research and Development,2024,44(12):1-12.

[18] 郝国栋,王晨,杨振,等.基于层次分析法的重金属污染土固化效果评价[J/OL].太原理工大学学报:1-10[2024-12-30]. https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20241224.0842.002.
HAO Guodong, WANG Chen, YANG Zhen, et al. Assessment of the stabilization effect on heavy metal-contaminated soil using the analytic hierarchy process[J/OL]. Journal of Taiyuan University of Technology: 1-10 [2024-12-30]. https://link. cnki. net/urlid/14. 1220. N. 20241224.0842.002.