

某磷矿房柱法开采地压规律及矿柱宽度研究

陈爽¹, 陈胜伦¹, 王沉², 文小松², 李程², 龙绍亮², 王威²

1. 瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 贵阳 550002;
2. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025



摘要:为研究房柱法采场稳定条件下矿柱合理宽度,以贵州某磷矿为例,采用理论分析、数值模拟和现场监测对矿柱承载机理及其宽度进行分析,揭示矿柱宽度对采场稳定性的影响规律,并通过工程实践进行验证。数值模拟结果表明:随着采场推进,顶板最大位移分布形态与采场中心线基本对称,向两侧逐级递减,且顶板位移变化与采场暴露面积呈正相关关系,最终位移云图呈现出“拱”形;矿体开挖完毕后矿柱处于屈服状态,顶板垂直应力远小于矿柱,而拉应力主要出现在采空区两侧,采场最大位移沉降值和最大垂直应力值分别为41.48 mm和76.17 MPa,采场矿柱没有发生明显塑性破坏。现场监测结果表明,采场矿柱最大位移为13.37 mm,最大应力值为3.45 MPa,矿柱处于稳定状态。

关键词:磷矿;房柱法;矿柱宽度;采场稳定性;数值模拟

中图分类号:TD879 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-1063-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.022
引用格式:陈爽,陈胜伦,王沉,等.某磷矿房柱法开采地压规律及矿柱宽度研究[J].黄金科学技术,2025,33(5):1063-1073.
CHEN Shuang, CHEN Shenglun, WANG Chen, et al. Study on Ground Pressure Law and Pillar Width of Room-and-Pillar Mining in a Phosphate Mine[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 1063-1073.

在矿产资源需求扩张与采矿技术创新的双重驱动下,深部开采已成为矿山领域的发展趋势(何满潮等,2005;谢和平等,2015;李夕兵等,2017;蔡美峰等,2019)。矿柱是地下矿床开采时为了支撑采场顶板或采空区围岩而留设的暂时或永久性岩柱,矿柱的失稳破坏会严重影响地表建筑物的稳定性和采矿作业的安全性(周子龙等,2017;高峰等,2023)。支撑体系的稳定性主要由采场结构参数决定。目前,多数非煤矿山仍依赖经验公式来优化采场结构参数(刘武团等,2015),但该方法往往存在明显局限:一方面,凭经验选取的参数可能无法满足实际生产要求;另一方面,过于保守的设计容易引发采场失稳或导致矿柱损失率升高。因此,有必要系统开展基于合理矿柱宽度的房柱法采场稳定

性研究,以期有效提高复杂地质条件下难采矿体的回收率,并为类似矿山的安全高效开采提供理论依据和技术支持。

以往主要从矿柱尺寸设计(王在泉等,2010; Guo et al, 2022)、矿柱失稳机制及地压控制(谷惠棠等,2011; Qiu et al, 2022)等方面对房柱法采场稳定性进行了大量研究。目前表征采场矿柱稳定性的方法主要有 Mathews 稳定图法、尖点突变理论,以及通过数值软件建立采场空间力学模型,如 FLAC^{3D}(Zhao et al, 2018)、ANSYS(Li et al, 2014)和 3Dmine(Heidarzadth et al, 2019)等。在矿柱宽度设计方面,众多学者通过理论分析和数值模拟方法,构建了采场矿柱失稳突变力学模型,对采场不同矿柱宽度下矿柱岩体变形破坏规律进行了深入探讨

收稿日期:2024-12-24;修订日期:2025-05-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目“岩溶山区重复采动下岩层运动机理研究”(编号:52174072)、“磷石膏基胶凝充填体内掘进巷道围岩稳定性控制机理研究”(编号:52364010)和贵州省科技创新人才团队建设(定向)“贵州省磷矿开矿科技创新人才团队建设(贵州省磷矿开矿顶尖专家团队)”(编号:黔科合人才CXTD(2025)011)联合资助

作者简介:陈爽(1992—),男,湖北仙桃人,工程师,从事采矿与充填领域方面的研究工作。E-mail:875056011@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

(徐中华等, 2023; 文小松等, 2024)。研究表明, 当矿柱安全系数小于 1 时, 采场矿柱发生开裂和片帮现象, 极易发生矿柱连续破坏(徐文彬等, 2015; 王作鹏等, 2023), 而矿柱裂隙发育程度与矿柱宽度呈正比关系(刘建东等, 2018)。通过构建矿柱岩拱内力模型, 推导出矿柱宽度与拱轴系数及拱高之间的数学表达式。结果表明, 矿柱宽度随拱轴系数的增大而增加, 但其变化曲率逐渐减小。这一变化特征有助于增强采场矿柱的稳定性(姜立春等, 2018)。在矿柱失稳机制及地压控制方面, 周宗红等(2012)提出矿柱的应变软化特性和刚度比是导致系统失稳的主要因素。当矿柱岩体内部积累的变形能和势能达到矿柱所能承受的极限, 采场矿柱极有可能发生失稳破坏(张钦礼等, 2011; 方偏桃等, 2018), 主要失稳形式表现为剪切破坏、扭曲破坏和劈裂破坏(Gao et al, 2016)。此外, 一些学者认为在矿柱发生塑性变形过程中, 矿柱损伤破裂失稳演化过程可划分为 3 个阶段(谢学斌等, 2019; Ren et al, 2020), 采场矿柱在突变过程中会导致能量释放, 进一步加剧矿柱破裂失稳。

由此可见, 国内外学者在采场结构参数优化和采场稳定性控制方面取得了重大研究进展, 但大部分是针对采场矿柱稳定性影响因素分析, 对于采场矿柱宽度的稳定性分析和矿柱承载机理研究还不够全面, 而矿柱宽度合理设计对于采场稳定性分析及地压控制也至关重要。因此, 本文以贵州某磷矿作

为工程背景, 综合考虑采场结构参数、矿柱形态和采矿方法等因素及其相互作用, 在分析采场矿柱承载机理的基础上, 通过数值模拟构建矿柱简化力学模型, 系统揭示特定宽度条件下矿柱的应力分布、位移规律和塑性区特征, 并结合现场试验对矿柱宽度设计方案进行验证, 以期对贵州地区矿山房柱法开采中的矿柱合理设计与安全施工提供科学依据。

1 工程概况

研究区域位于贵州某磷矿二盘区 I 矿体+785~+814 m 标高的西翼矿体, 矿体平均倾角为 8° , 走向长度为 1.80 km, 倾向宽度为 650 m, 矿体平均厚度为 2.5 m。该矿山开采深度已达 320 m 以上, 采用房柱法进行开采, 矿房宽度为 12.0 m, 矿柱形态为规则的矩形, 宽度为 6 m, 平均高度为 2.5 m。在采场内留设点柱, 作为永久矿柱支撑采空区, 点柱宽度为 3.0~5.0 m, 间距为 8.0 m。通过对现场监测结果进行分析可知, 采场内多数矿柱发生不同程度的变形破坏, 矿柱被上覆围岩逐渐压实, 多处位置发生破碎、开裂及垮落现象, 其形状变得不规则, 如图 1 所示。随着采空区面积的不断增大, 采场失稳风险日渐凸显, 若继续采用原有的矿柱留设方案, 采场的稳定性将难以保障。现行的矿柱留设方案已无法满足安全开采要求, 需重新设计合理的矿柱宽度, 确保采场的稳定性, 为矿井的安全生产提供保障。

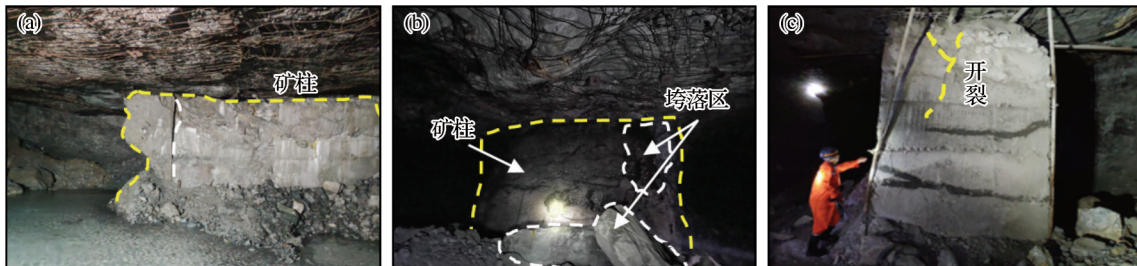


图 1 采场矿柱失稳破坏

Fig. 1 Instability and failure of slope pillars

2 采场矿柱承载机理分析

根据普氏拱理论, 可认为作用在矿柱上的载荷即为拱内岩体自重。围岩应力重新分布后形成一个半径为 R_p 的拱形塑性区域。假设矿柱宽度为

W_p , 矿房宽度为 W_0 , 采场高度为 h , 矿柱间距相等, 则矿柱的力学模型如图 2 所示。

矿体回采后, 忽略矿柱对采场顶板中塑性区范围的影响。根据卡斯特纳方程可得到顶板塑性区半径(Zhang et al, 2024):

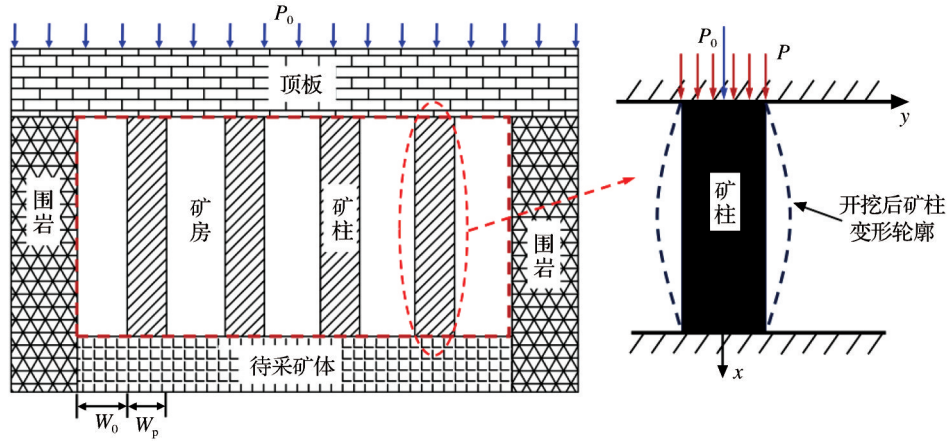


图2 矿柱承载机理分析

Fig. 2 Analysis of pillar load-bearing mechanism

$$R_p = R_0 \left[\frac{(P_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: R_p 为顶板塑性区半径; R_0 为开挖半径(m); P_0 为开挖处的垂直自重应力; c 为岩石内聚力(MPa); φ 为岩石内摩擦角($^\circ$)。

开挖处的垂直自重应力 P_0 表示为

$$P_0 = \gamma H \quad (2)$$

式中: γ 为上覆岩层的平均容重(kN/m^3), 本文取 2500 kN/m^3 ; H 为矿体埋深(m)。

对于矿体, 开挖半径可近似采用不同断面形状的外接圆半径代替, 即:

$$R_0 = \sqrt{(L/2)^2 + (h/2)^2} \quad (3)$$

式中: L 为矿块走向长度(m); h 为开采空间高度(m)。

为方便计算作用在矿柱上的荷载, 将塑性区围岩顶压近似处理成高度为 R_p 的矩形均布顶压(赵国彦等, 2014), 此时, 顶压集度 q_d 表示为

$$q_d = \gamma(R_p - h/2) \quad (4)$$

由于该矿山矿体倾角近似水平, 且矿柱均匀布置。因此, 塑性区半径 R_p 范围内岩体重力由开采范

围内矿柱均匀承担(赵国彦等, 2014)。对于方形矿柱, 则有:

$$MNW_p^2 \sigma = \gamma L s (R_p - h/2) \quad (5)$$

式中: M 为矿柱布置排数; N 为单排矿柱个数; L 为矿块走向长度(m), 基于现场情况取 1800 m ; s 为矿块倾向斜长(m), 取 650 m 。

基于普氏拱理论(黄敏等, 2020)和 Bieniawski 矿柱强度公式(Ren et al, 2020), 可得矿柱的安全系数, 联立式(1)~式(5)可得方形矿柱的安全系数为

$$K = \frac{W_p^2 \sigma_c \left| 0.64 + 0.34 \frac{W_p}{h} \right|}{(W_0 + W_p)^2 \gamma R_p} \quad (6)$$

矿柱不发生失稳破坏的充分条件为

$$\sigma \leq \frac{[\sigma]}{K} \quad (7)$$

式中: $[\sigma]$ 为矿柱的抗压强度; K 为矿柱安全系数, 为了确保矿柱的稳定性, 本文中取 $K=1.5$ (陈顺满等, 2018)。联立式(1)~式(7), 可得矿柱宽度 W_p 的计算公式为

$$W_p = \sqrt{\frac{KLs\gamma \left\{ \sqrt{(L/2)^2 + (h/2)^2} \times \left[\frac{(\gamma H + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} - h/2 \right\}}{NM[\sigma]}} \quad (8)$$

将 $K=1.5$ 代入式(8)中, 计算可得 $W_p=8 \text{ m}$ 。当矿柱宽度取 8 m 时, 不仅能够保证采场稳定性, 而且能够避免因矿柱宽度设计过大而造成资源浪费。

3 开采方案优化及数值模型建立

3.1 三维建模及模型开采方案

为验证矿柱宽度为 8 m 时采场的稳定性, 采用

FLAC^{3D}软件建立了尺寸为150 m×150 m×200 m(长×宽×高)的三维开采计算模型,如图3所示。模型共计275 700个单元,300 652个节点,限制模型边界的水平位移,固定模型下边界,在模型上边界施加垂直方向载荷。在模型两侧边界各留50 m区域用来消除边界效应,限制x、y方向上的位移和初速度,模拟采用基于弹塑性理论的摩尔-库仑准则,在开挖区附近划分较为细密的单元,外部单元较为稀疏。

模拟开挖时采用浅孔凿岩分段房柱法开采,沿矿体倾向划分高度为18 m的3个分段(I、II和III),采场长度为100 m,采场高度为15 m,采场结构参数与现场一致,在采场中部沿矿体走向每隔12 m布置一个矿柱,在采场底部沿矿体走向每隔8 m布

置一个矿柱,矿柱宽度均为8 m,每个分段内布置15个矿柱。沿矿体走向每隔28 m布置一个矿房,每个分段内布置4个矿房,每开挖一个矿房记为一次开挖步,开采高度为矿体厚度。

3.2 岩体力学参数

根据现场实际情况,矿区内广泛分布且影响采场稳定性的矿岩有白云岩、细晶砂岩和砂质页岩。选取相应的岩样,通过室内基础力学试验获得5种矿岩的物理力学参数。为了能够使试验结果具有更好的普遍性,利用广义的Hoek-Brown破坏准则对矿岩室内试验结果进行折减处理,折减系数一般为0.50~0.85(叶海旺等,2021),得到矿山岩体力学参数(表1)。

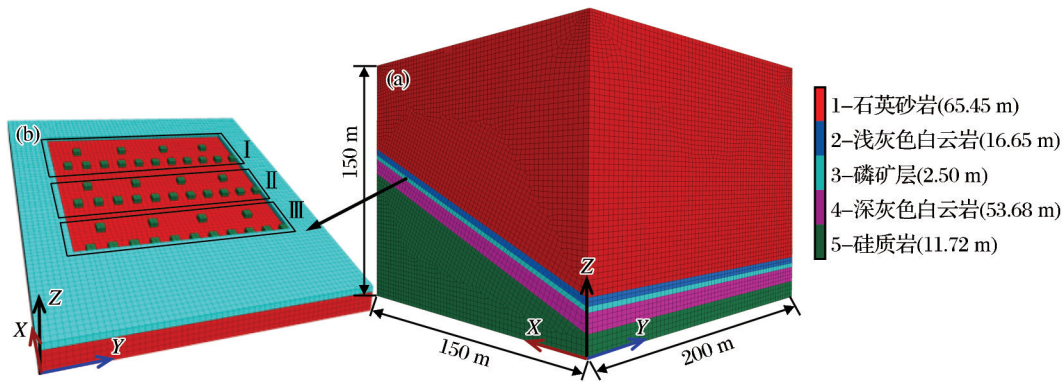


图3 数值模拟模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of numerical simulation model

表1 数值模型岩体力学参数

Table 1 Rock mechanical parameters of numerical model

岩性	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
石英砂岩	45.68	24.32	4.65	0.17	18.63	32.12
浅灰色白云岩	47.50	32.54	11.59	0.16	14.69	57.14
磷矿岩	29.99	49.12	12.73	0.21	28.70	36.00
深灰色白云岩	55.62	38.06	10.61	0.13	16.80	58.73
硅质岩	63.71	45.72	11.79	0.15	18.62	63.48

4 数值模拟结果分析

4.1 采场位移场演化规律

开采不同分段采场时位移场变化规律如图4所示。由图4可知,第一分段矿体开挖后,采场中部的顶板发生较大沉降,沉降的分布形态与采场中心线基本对称,最大沉降量为25.00 mm,并依次向

采场侧帮逐渐递减;顶板沿走向的最大沉降量为21.00 mm,出现在矿房中部矿柱近采空区一侧。第二分段矿体开挖后,发生沉降的顶板范围有所扩大,沉降量相较于第一分段呈一定幅度的增加,最大值为35.29 mm,且出现最大沉降量的位置沿矿体倾向有所前移,采场底板底鼓量相较第一分段也有所增加。第三分段矿体开挖后,第一分段和第二分

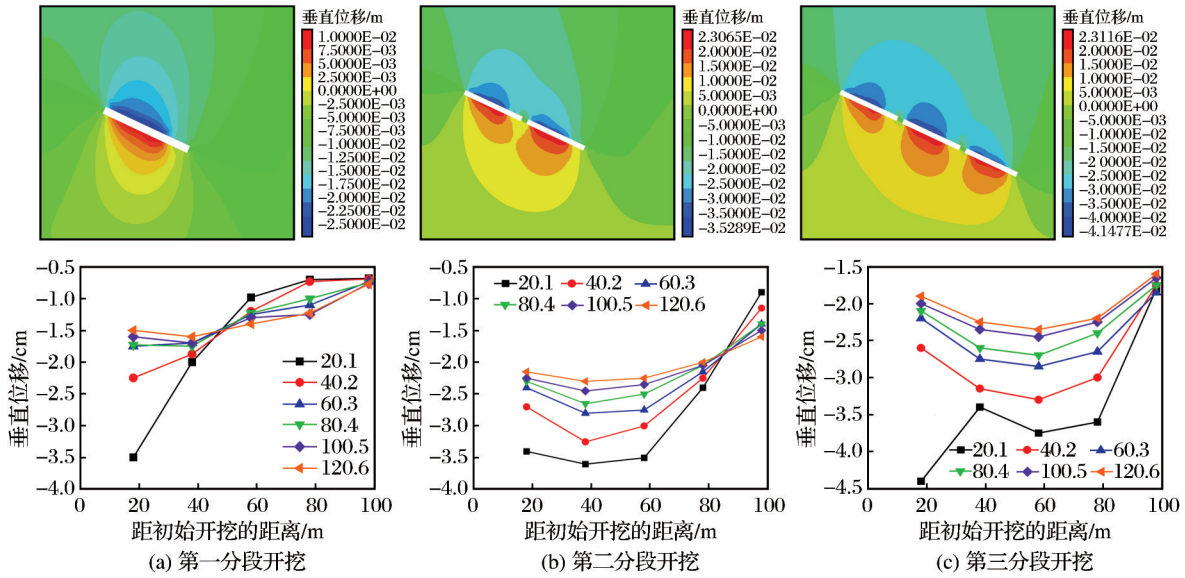


图4 各分段开挖后顶板位移变化矢量图

Fig. 4 Vector diagram of stope roof displacement change after excavation in each stage

段的矿房受到开挖扰动,采场顶板沉降量的增长率进一步增大,最大沉降量为41.48 mm。在各分段采场顶板距初始开挖处不同距离布设4个监测点,随着采场开挖持续推进,各分段采场顶板的最大沉降量也随之发生变化,沉降分布形态大致沿采场中心线对称,并由中心向两侧逐级递减。此外,随着各分段采场的开挖,顶板的沉降量与采场暴露面积呈正相关关系。

4.2 采场应力场演化规律

开采不同分段采场的应力场演化规律如图5所示。由图5可知,第一分段矿体开挖后,沿矿体倾向的压应力主要集中在第一分段两端的矿柱上,最大值为23.94 MPa;沿矿体走向上,采场中部矿柱近表面应力集中程度较为严重,采场中部点柱的局部最大主应力值达到58.69 MPa。第二分段矿体开挖后,采场矿柱最大压应力出现在第一分段和第二分段矿房中部点柱和相邻两分段的连续矿柱上,采场应力沿矿体倾向主要集中在第一分段与第二分段之间的连续矿柱上,最大应力值为33.92 MPa,采场范围扩大导致采空区顶板应力进一步释放,应力降低区域的范围也进一步扩大;沿矿体走向,应力主要集中在2个分段间中部点柱上,其应力值为68.13 MPa。第三分段矿体开挖后,采空区顶板应力相较第一分段和第二分段得到进一步释放,应力

降低范围相较第一分段和第二分段也进一步扩大,沿矿体倾向,采场应力主要集中在3个分段之间的连续矿柱上,其应力值为36.49 MPa;沿矿体走向,采场应力主要集中在各分段采场中部点柱上,最大值为76.17 MPa。从采场应力场演化规律来看,采场应力随着各分段矿体开挖而不断增大,主要集中在采场留设的矿柱上,根据现场监测结果,矿柱表面未发生开裂和破碎现象,说明矿柱宽度为8 m时,在一定程度上能够确保采场的稳定性。

4.3 采场矿柱塑性区分布特征

采场矿柱塑性区分布如图6所示,各分段矿体开挖后,由于采场留设的矿柱承载上覆岩层的重量,发生不同程度的塑性破坏,破坏形式主要表现为正向、反向拉伸破坏和反向剪切破坏。在采场中部和底部矿柱的塑性区分布表现出明显差异,主要原因是采场中部矿柱间距大于采场底部矿柱间距,但破坏形式均表现一致。矿柱塑性破坏程度相较矿柱宽度优化前更小,主要集中在矿层底板处,矿柱表面塑性破坏程度较小;现场监测结果表明矿柱仅发生局部的变形破坏,基本处于稳定状态。

5 现场工业性应用

5.1 现场监测结果

在试验采场矿体回采过程中,将矿柱宽度留设

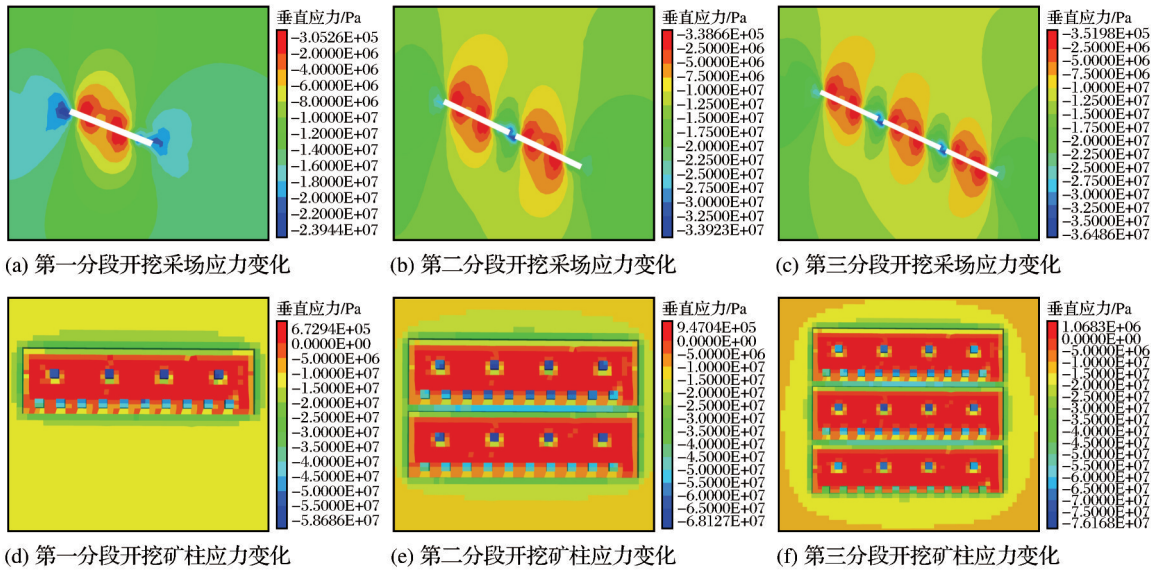


图5 各分段开挖采场和矿柱应力变化

Fig. 5 Stress changes of stope and pillar in each stage of excavation

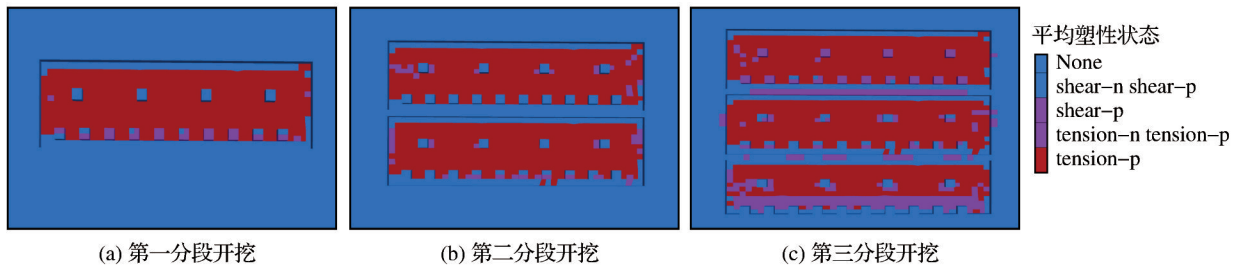


图6 各分段开挖矿柱塑性区变化

Fig. 6 Plastic zones changes of pillar in each stage of excavation

为8 m,现场布置如图7(a)所示。在采场内选择1#~8#矿柱进行监测,采场顶板上安装位移及应力监测设备(位移监测仪型号为YHW300,应力计型号为HCZ-2),对采场矿柱位移沉降量和应力值进行监测。设备安装过程如图7(b)和图7(c)所示。

采场顶板现场监测结果如图8所示。当矿柱宽

度为8 m时,采场顶板最大位移沉降值为13.37 mm,最大应力值为3.45 MPa,未达到矿柱极限承载能力,采场矿柱处于稳定状态。采场内3#、4#和6#矿柱的位移沉降和矿柱所受垂直应力是最明显的,这也说明矿房开挖后矿柱发生非均匀性变形。经过现场观测,矿柱表面没有发生明显的剥落、开裂和

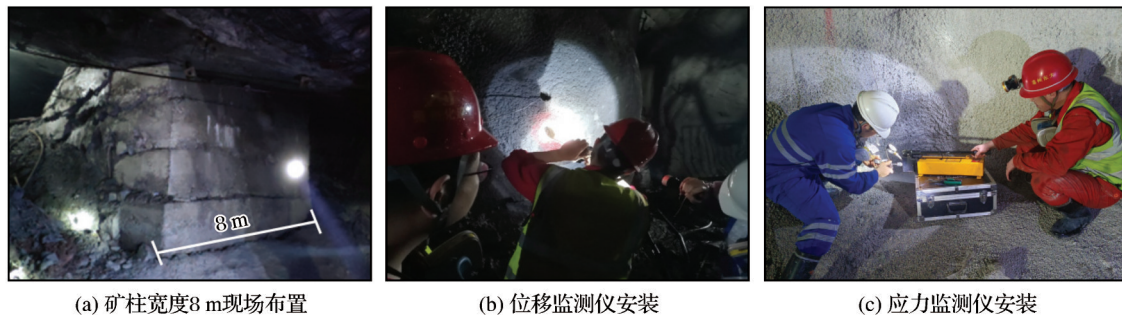


图7 矿柱宽度8 m现场应用

Fig. 7 Field application of pillar width of 8 m

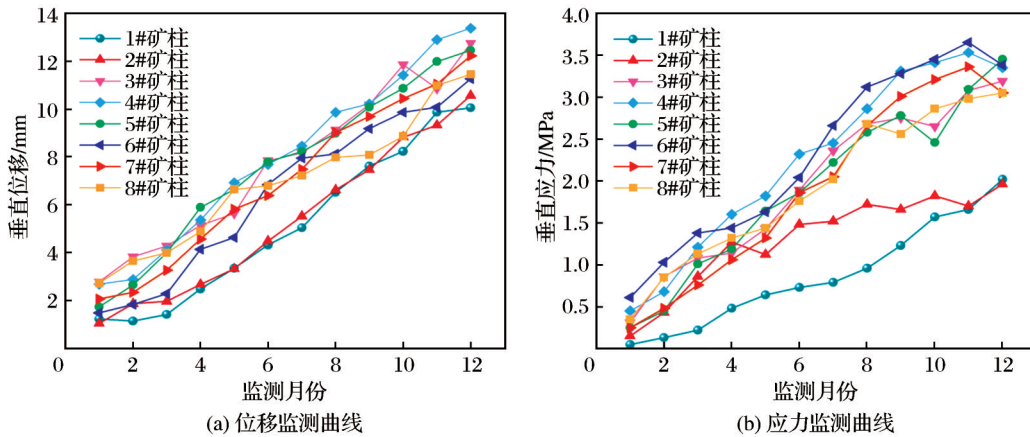


图8 矿柱宽度为8 m时采场顶板变形及应力监测结果

Fig. 8 Monitoring results of deformation and stress of stope roof when pillar width is 8 m

破裂现象,说明矿柱宽度取8 m是合理可行的。

5.2 钻孔窥视结果

为进一步验证采场内矿柱的稳定性,采用CXK12型矿用本安型钻孔窥视仪对矿柱内部变形情况进行观测,试验设备及试验过程如图9所示。首先把窥视镜头、深度仪和主机进行组装,打开主机,设置钻孔编号,把探头放在孔口,观察主机钻孔界面;然后,待设备运行正常开始记录,并缓慢推动

钻杆,用窥视仪摄像头拍摄并记录孔内不同孔深处矿柱岩层情况;最后通过钻孔窥视仪自带软件可得到各钻孔不同深度岩层裂隙、节理和离层等情况。由现场窥视结果可知,当矿柱宽度为6 m时,矿柱内部岩层呈现破碎状态,孔壁破碎不规则,同时裂隙较为发育,如图10(a)所示;当矿柱宽度为8 m时,矿柱内部未发生开裂现象,孔壁较为光滑和平整,如图10(b)所示。



图9 钻孔窥视设备及试验过程

Fig. 9 Borehole peeping equipment and experimental process

6 结论

通过对房柱法开采采场矿柱宽度合理的条件下采场稳定性进行分析,综合考虑采场结构参数、矿柱形态和采矿方法等因素及其相关性,采用数值模拟、理论分析方法和现场监测等综合手段对采场稳定性进行研究,并通过现场试验进行验证,得到以下结论:

(1)基于矿柱承载机理分析,结合普氏拱理论,确定了采场矿柱合理宽度。模拟结果表明,随着采

场开挖持续推进,各阶段采场顶板位移也随之发生变化,位移分布形态与采场中心线基本对称,且随着采场中心线向两侧逐级递减,最终位移云图呈现出“拱”形。采场位移变化与采场暴露面积呈正相关关系,根据现场监测结果,矿柱表面并没有发生开裂和破碎现象,说明矿柱宽度设为8 m,在一定程度上能够确保采场的稳定性。

(2)随着各阶段矿体开挖后,采场内部应力重新分布,并沿矿体倾向逐渐向前动态移动,最终在各阶段留设的矿柱中形成新的应力增压区,采场垂

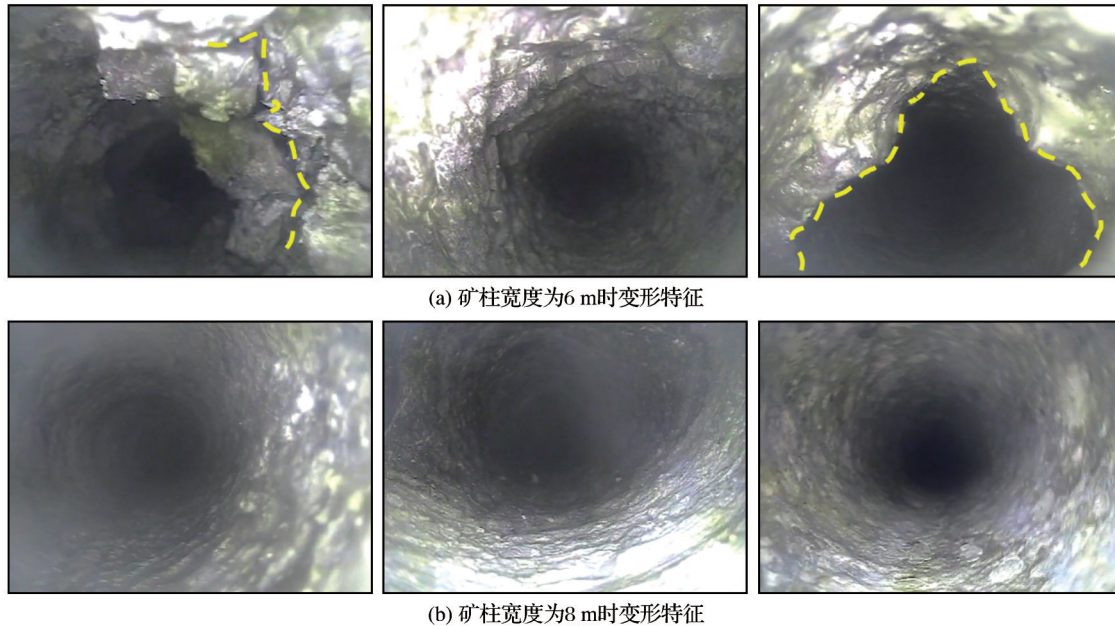


图 10 矿柱内部变形破坏特征

Fig. 10 Characteristics of pillar internal deformation and failure

直应力主要由各阶段的矿柱承担。在各阶段矿柱和采空区内形成高应力区,采场矿柱处于屈服状态,采场顶板所受垂直应力远小于矿柱,而拉应力主要出现在采空区周围。各阶段矿体开挖完毕后,采场最大垂直位移沉降值和最大垂直应力值分别为 41.5 mm 和 76.17 MPa。

(3) 监测结果表明:当矿柱宽度为 6 m 时,矿柱发生不同程度的开裂、破碎和垮落现象,而当矿柱宽度为 8 m 时,矿柱形状基本完整,采场稳定性较好;在各阶段矿体回采过程中,采场矿柱位移沉降并不明显,最大位移为 13.37 mm,最大应力为 3.45 MPa,均集中在采场中部的矿柱上。现场工业性试验表明,矿柱在回采过程中保持稳定,证明矿柱宽度取 8 m 是合理可行的。

参考文献 (References):

Gao W, Ge M M, 2016. Stability of a coal pillar for strip mining based on an elastic-plastic analysis [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 87(5): 23-28.

Guo Y H, Miao Y C, 2022. Study on stope stability in continuous mining of long-dip, thin orebody by room-pillar method [J]. *Sustainability*, 14(15): 9601.

Heidarzadeh S, Saecidi A, Rouleau A, 2019. Evaluation of the

effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stoping method using numerical modeling [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(3): 399-408.

Li X X, Li K G, 2014. Optimization of stope structural parameters in phosphorite mine and its stability analysis [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 36(12): 1268-1272.

Qiu H Y, Huang M Q, Weng Y J, 2022. Stability evaluation and structural parameters optimization of stope based on area bearing theory [J]. *Minerals*, 12(7): 808.

Ren Q Y, Wang F F, Chen B, et al, 2020. Study on stability prediction of pillars based on bieniawski pillar strength formula: a case of a phosphate mine [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(4): 4033-4044.

Zhang Q L, Zhang P, Chen Q S, et al, 2024. Study of the critical safe height of goaf in underground metal mines [J]. *Minerals*, 14(3): 227.

Zhao K, Gu S J, Yan Y J, et al, 2018. Rock mechanics characteristics test and optimization of high-efficiency mining in Dajishan tungsten mine [J]. *Geofluids*, 40(6): 1-11.

蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华, 2019. 金属矿深部开采现状与发展战略 [J]. *工程科学学报*, 41(4): 417-426. Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua, 2019. Current status and development strategy of metal mines [J]. *Chinese Journal of Engineer-*

- ing, 41(4):417-426.
- 陈顺满, 吴爱祥, 王贻明, 等, 2018. 深部回采矿柱稳定性影响因素分析及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 49(8):2050-2057. Chen Shunman, Wu Aixiang, Wang Yiming, et al, 2018. Analysis of influencing factors of pillar stability and its application in deep mining [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 49(8):2050-2057.
- 方偏桃, 徐必根, 袁梅芳, 2018. 留矿法大尺度采场稳定性数值模拟分析[J]. 矿业研究与开发, 38(12):41-45. Fang Piantao, Xu Bigen, Yuan Meifang, 2018. Numerical simulation analysis on the stability of large-scale mining stope mined by shrinkage method [J]. Mining Research and Development, 38(12):41-45.
- 高峰, 李成成, 覃庆韩, 等, 2023. 基于RG-BN理论的破碎盘区矿柱群稳定性分析[J]. 黄金科学技术, 31(6):900-910. Gao Feng, Li Chengcheng, Qin Qinghan, et al, 2023. Stability analysis of broken ore pillars group based on RG-BN theory [J]. Gold Science and Technology, 31(6):900-910.
- 谷惠棠, 胡慧明, 2011. 基于突变理论的矿柱失稳破坏研究[J]. 金属矿山, 40(8):15-18. Gu Huitang, Hu Huiming, 2011. Study on instability and failure of the mine pillar based on catastrophe theory [J]. Metal Mine, 40(8):15-18.
- 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等, 2005. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 24(16):2803-2813. He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al, 2005. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(16):2803-2813.
- 黄敏, Kulatilake P H S W, 罗嗣海, 等, 2020. 传统矿柱安全系数计算公式优化研究[J]. 矿冶工程, 40(4):32-37. Huang Min, Kulatilake P H S W, Luo Sihai, et al, 2020. Optimization of traditional calculation formula for safety factor of pillars [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 40(4):32-37.
- 姜立春, 王玉丹, 温勇, 2018. 采场空区拱架效应与矿柱宽度及间距相依性分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 57(6):1-7. Jiang Lichun, Wang Yudan, Wen Yong, 2018. The analysis of dependence of goaf arching effect on pillar width and spacing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 57(6):1-7.
- 李夕兵, 周健, 王少锋, 等, 2017. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 27(6):1236-1262. Li Xibing, Zhou Jian, Wang Shaofeng, et al, 2017. Review and practice of deep mining for solid mineral resources [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 27(6):1236-1262.
- 刘建东, 解联库, 曹辉, 2018. 大规模充填采矿采场稳定性研究与结构参数优化[J]. 金属矿山, 47(12):10-13. Liu Jiandong, Xie Lianku, Cao Hui, 2018. Study on structural parameters optimization and stability of stope for large-scale backfill mining [J]. Metal Mine, 47(12):10-13.
- 刘武团, 张海磊, 王成财, 等, 2015. 李家沟矿区超前开采安全技术要素分析[J]. 金属矿山, 44(3):169-172. Liu Wutuan, Zhang Hailei, Wang Chengcai, et al, 2015. Analysis of safety technology factor of advanced mining in Lijiagou mine area [J]. Metal Mine, 44(3):169-172.
- 王在泉, 李华峰, 2010. 矿柱抗剪安全系数的数值计算方法及分析[J]. 采矿与安全工程学报, 27(2):277-280. Wang Zaiquan, Li Huaifeng, 2010. Numerical calculation method for shear safty coefficient of mine pillar [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 27(2):277-280.
- 王作鹏, 金爱兵, 庞如顺, 等, 2023. 基于主成分分析法的嗣后充填采场矿柱及充填体强度研究[J]. 矿业研究与开发, 43(3):45-52. Wang Zuopeng, Jin Aibing, Pang Rushun, et al, 2023. Study on pillar width and backfill strength of subsequent filling stope based on principal component analysis [J]. Mining Research and Development, 43(3):45-52.
- 文小松, 王沉, 黄欣欣, 等, 2024. 基于尖点突变理论的采场矿柱稳定性分析[J]. 矿业科学学报, 9(6):897-908. Wen Xiaosong, Wang Chen, Huang Xinxin, et al, 2024. Stability of mining pillars in stopes based on cusp catastrophe theory [J]. Journal of Mining Science and Technology, 9(6):897-908.
- 谢和平, 高峰, 鞠杨, 2015. 深部岩体力学研究及探索[J]. 岩石力学与工程学报, 34(11):2161-2178. Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, 2015. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(11):2161-2178.
- 谢学斌, 谢和荣, 田听雨, 等, 2019. 开挖扰动下矿柱损伤破裂失稳细观机制研究[J]. 矿冶工程, 39(2):30-36. Xie Xuebin, Xie Herong, Tian Tingyu, et al, 2019. Meso-mechanism of damage and failure of pillars by excavation disturbance [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 39(2):30-36.
- 徐文彬, 宋卫东, 曹帅, 等, 2015. 地下矿山采场群稳定性分析及其控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 32(4):658-664. Xu Wenbin, Song Weidong, Cao Shuai, et al, 2015. Stopes stability in underground mine and its control technique [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 32(4):658-664.

- 徐中华, 李金星, 付信凯, 等, 2023. 隔离矿柱参数优化与监测分析[J]. 中国矿业, 32(增刊2): 87-91. Xu Zhonghua, Li Jinxing, Fu Xinkai, et al, 2023. Parameter optimization and monitoring analysis of isolated pillar[J]. China Mining Magazine, 32(Suppl.2): 87-91.
- 叶海旺, 龙贵川, 王其洲, 等, 2021. 层状倾斜矿体矿柱稳定性特征及矿房参数优化[J]. 金属矿山, 51(5): 25-35. Ye Haiwang, Long Guichuan, Wang Qizhou, et al, 2021. Stability characteristics of the ore-pillars of layered inclined orebody and optimization of mine room parameters [J]. Metal Mine, 51(5): 25-35.
- 张钦礼, 曹小刚, 王艳利, 等, 2011. 基于尖点突变模型的采场顶板—矿柱稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 21(10): 52-57. Zhang Qinli, Cao Xiaogang, Wang Yanli, et al, 2011. Stability analysis of stope roof-pillar based on cusp catastrophe model[J]. China Safety Science Journal, 21(10): 52-57.
- 赵国彦, 周礼, 李金跃, 等, 2014. 房柱法矿柱合理尺寸设计及矿块结构参数优选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 45(11): 3943-3948. Zhao Guoyan, Zhou Li, Li Jinyue, et al, 2014. Reasonable pillar size design and nugget structural parameters optimization in room-and-pillar mining [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 45(11): 3943-3948.
- 周子龙, 陈璐, 赵源, 等, 2017. 双矿柱体系变形破坏及承载特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 36(2): 420-428. Zhou Zilong, Chen Lu, Zhao Yuan, et al, 2017. Experimental study on failure mechanism and bearing characteristic of double-pillar system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(2): 420-428.
- 周宗红, 侯克鹏, 任凤玉, 2012. 分段空场崩落采矿法顶板稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 29(4): 538-542. Zhou Zonghong, Hou Kepeng, Ren Fengyu, 2012. Roof stability analysis of sublevel open stope and caving mining method [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 29(4): 538-542.

Study on Ground Pressure Law and Pillar Width of Room-and-Pillar Mining in a Phosphate Mine

CHEN Shuang¹, CHEN Shenglun¹, WANG Chen², WEN Xiaosong², LI Cheng², LONG Shaoliang², WANG Wei²

1. *Wengfu (Group) Co., Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China;*

2. *School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China*

Abstract: The aim of this study is to determine the optimal width of mine pillars that ensure stability under room-and-pillar mining conditions. A phosphorus mine in Guizhou serves as a case study for this investigation. The research integrates theoretical analysis, numerical simulation, and on-site monitoring to examine the load-bearing mechanisms of mine pillars and their appropriate widths within the context of room-and-pillar mining. Additionally, the study explores the impact of pillar width on quarry stability and validates the proposed optimization plan for pillar dimensions through simulation tests and practical engineering applications. The findings indicate that, following the initial excavation of the quarry, the maximum vertical displacement of the quarry's roof plate varies at each stage. The displacement distribution is predominantly symmetrical along the quarry's center line and decreases progressively towards the sides of the center line. As the excavation of the mining pillar advances through each phase of the quarrying process, a positive correlation is discerned between the displacement changes within the quarry and the exposed quarry area. Simultaneously, the displacement of the peripheral rock overlying the quarry demonstrates a gradual reduction along the left and right sides of the quarry's center line. The displacement and settlement values of the surrounding overlying rock progressively decrease along these sides, culminating in a final displacement pattern that resembles an 'arch' shape. Following the excavation of each stage of the ore body, a high-stress region emerges within each stage of the

mine pillar and the mining airspace. The quarry's mine pillar enters a yield state, with the vertical stress on the quarry's roof plate being significantly lower than that on the mine pillar. Tensile stress predominantly occurs around the mining airspace. The maximum vertical displacement and settlement value, as well as the maximum vertical stress value of the quarry, are recorded at 41.5 mm and 76.17 MPa, respectively. Notably, there is no significant plastic damage to the mine pillar, with damage being confined to localized areas. Empirical evidence from field engineering practice indicates that the theoretical analysis supporting an 8-meter pillar width is justified. Throughout the various phases of the ore body re-mining process, the displacement and settlement of the mine pillar remain minimal, with a recorded maximum displacement of 13.37 mm and a peak stress of 3.45 MPa, thereby confirming the pillar's stability. These findings offer valuable theoretical insights and technical support for the safe and efficient extraction of phosphorus mines under analogous conditions.

Key words: phosphate mine; room-and-pillar mining; pillar width; stope stability; numerical simulation

美国新版关键矿产清单草案,铜首次被纳入其中

彭博社9月25日披露,美国内政部下屬的地质调查局当天公布了新版关键矿产清单草案,共建议了54种关键矿产,铜首次进入清单——这为获得更广泛政策支持进一步扫清了道路。

根据该草案,铜与钾盐、铅、铌、硅、银等6种矿产被增补为关键矿产,而砷和碲被移出关键矿产清单。此外,美国地质调查局还表示,将考虑是否把冶金煤和核电站燃料铀列为关键矿产。上述清单草案现已进入30天的征求公众意见期,此后美国内政部将公布最终清单。

列入美国关键矿产清单的矿物将获得美国政府的资金支持,有关勘探、开采和精炼处理项目也能获得审批便利。国际矿产新闻权威网站“矿业网”认为,美国最新关键矿产清单草案的发布是2018年该清单出台以来最重要的一次修订调整。根据2020年美国《能源法》要求,关键矿产清单每3年更新一次,上次更新时间为2022年。在新版清单草案发布前,美国对有关矿产资源供应风险做了全面评估,共涉及84种矿产大宗商品、402个行业以及1200多种情境。

美国地质调查局代理局长莎拉·莱克直言,矿产相关行业去年为美国经济贡献超4万亿美元,新的风险评估方法有助于当局精准定位哪些行业最易受到供应链中断的冲击。该局披露,铜和硅被纳入清单是因为精炼产品供应链存在中断风险,进而造成严重经济影响。钾盐被纳入是因为主要供应方、特别是加拿大可能发生贸易壁垒风险;银被纳

入则是防范墨西哥虽概率较低但影响重大的供应中断情形。

美国铜储量占全球储量的5%,但统计显示,过去10年,美国铜产量下跌了20%。2023年美国的铜产量下降11%,2024年继续下降3%。据美国地质勘探局2024年估算,美国每年的铜消费有约45%依靠进口。智利、加拿大、秘鲁和墨西哥是美国主要的铜进口来源国。荷兰国际集团指出,美国铜产量下降与该国的复杂而漫长的手续申请有关。在美国建新矿场,从勘探到实际生产平均需要花费29年时间,仅各种许可证申请和等待发放就要耗费7~10年。

铜的导电特性使其成为全球电气化进程的关键材料。国际铜业协会主席胡安·伊格纳西奥·迪亚兹指出:“铜完全符合关键矿产定义:它支撑着电气化、国防和清洁能源发展,而其供应链正面临日益严峻的压力。”

为了扩大本土生产,美国目前对含铜制品征收50%的关税,但对未加工精炼铜免税。专家分析认为,美国在铜生产方面也面临和钢铝同样的挑战。特许金融分析师、ITR Economics 经济学家劳伦·赛德尔在给加拿大投资新闻网(INN)的邮件中表示:“美国并不具备生产我们所需全部铜的产能。尽管已有新增采矿能力的投资,但这些设施需要数年才能投产,这意味着至少短期内美国企业仍将依赖铜进口。”“而关税将提高美国进口商和消费者购买铜及相关产品的成本,并对潜在经济增长构成下行压力。”

(来源:环球时报)