

阶段空场嗣后充填法凿岩硐室矿柱对顶板稳定性的影响^①

向伟华^{1,2}, 路燕泽^{1,2,3}, 刘志义^{3,4,5}, 王社光^{1,2}, 王立杰^{1,2}, 甘德清^{3,4,5}, 陈彦亭^{1,2}, 杨志强^{1,2}

(1.河北钢铁集团沙河中关铁矿有限公司, 河北 邢台 054100; 2.河北省复杂铁矿低碳智能高效开采技术创新中心, 河北 邢台 054100; 3.华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 4.华北理工大学矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山 063210; 5.华北理工大学河北省矿业开发与安全技术实验室, 河北 唐山 063210)

摘要:以河北钢铁集团沙河中关铁矿南区为研究对象,基于普氏地压理论和卡斯特纳方程构建凿岩硐室矿柱稳定性计算模型,探讨阶段空场嗣后充填法凿岩硐室各因素对顶板稳定性的影响,采用数值模拟分析了凿岩硐室内不留矿柱(方案1)与先留设矿柱后与矿体一起崩落(方案2)条件下的顶板稳定性。结果表明:采场开采长度27~45 m时,方案2的凿岩硐室顶板失稳风险较大;采场开采长度大于45 m时,2种方案顶板均存在失稳风险;方案2会使凿岩硐室内应力集中,顶板和侧帮出现应力加速释放现象;方案1的凿岩硐室应力释放和分布较为稳定,破坏时间相对滞后;矿岩稳固性较差时,选择方案1更利于顶板稳定。

关键词:阶段空场嗣后充填法; 凿岩硐室; 矿柱; 顶板稳定性; 敏感性分析; 采场结构; 顶板应力

中图分类号: TD853

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.011

文章编号: 0253-6099(2025)03-0069-08

Influence of Pillars in Drifting Chamber on Roof Stability During Sublevel Open Stopping with Backfill

XIANG Weihua^{1,2}, LU Yanze^{1,2,3}, LIU Zhiyi^{3,4,5}, WANG Sheguang^{1,2}, WANG Lijie^{1,2},
GAN Deqing^{3,4,5}, CHEN Yanting^{1,2}, YANG Zhiqiang^{1,2}

(1. Shahe Zhongguan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group, Xingtai 054100, Hebei, China; 2. Hebei Technology Innovation Center for Intelligent and Efficient Low-Carbon Mining of Complex Iron Ore, Xingtai 054100, Hebei, China; 3. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 4. Collaborative Innovation Center of Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 5. Hebei Laboratory of Mining Development and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: For the southern area of the Shahe Zhongguan Iron Mine of Hebei Iron and Steel Group in the study, a stability calculation model for the drifting chamber pillars was constructed based on Platts theory of ground pressure and the Kastner Formula. The influence of various factors on the roof stability of the drifting chamber during sublevel open stopping with backfill was discussed, and the roof stability in two options: no pillars retained in the drifting chamber (Option 1) and pillars initially retained and subsequently caved along with the orebody (Option 2) were analyzed by numerical simulations. The results show that when the stope length ranges from 27 m to 45 m, the drifting chamber roof in Option 2 faces a higher risk of instability. With a stope length over 45 m, the roofs in both options are at risk of instability. Option 2 leads to stress concentration within the drifting chamber, with accelerated stress release observed in the roof and side walls. In contrast, Option 1 demonstrates more stable stress release and distribution in the drifting chamber, with a relatively delayed failure time. When the ore rock exhibits poor stability, Option 1 is more conducive to maintaining roof stability.

Key words: sublevel open stopping with backfill; drifting chamber; pillar; roof stability; sensitivity analysis; stope structure; roof stress

深部矿产资源开采顶板冒落、矿柱破坏等问题严重,对采场内工作人员及设备财产安全造成威胁,因

① 收稿日期: 2024-12-11

作者简介: 向伟华(1983—),男,湖南邵阳人,硕士,正高级工程师,主要从事采矿技术研究。E-mail: xwh570623@163.com

通信作者: 路燕泽(1984—),男,河北衡水人,博士,正高级工程师,主要从事矿山管理工作。E-mail: mwssbwzh2011@126.com

此,稳定的采场是矿山连续回采的前提^[1-3]。大直径深孔凿岩阶段空场嗣后充填采矿法因其生产能力大、采准切割工程少、安全性高等优点在矿山广泛应用^[4-7]。为了提高该采矿方法的采场稳定性,通常在凿岩硐室留设一定的矿柱,以控制顶板稳定性,并在落矿过程中和矿体一并回收留设的矿柱,而回收矿柱会对顶板稳定性产生较大影响。

诸多学者^[8-12]围绕采场结构参数对采场顶板稳定性的影响和采场之间留设间柱的稳定性开展了大量研究。基于这些研究成果,本文根据河北钢铁集团沙河中铁关铁矿南区开采技术条件,对阶段空场嗣后充填采矿法中凿岩硐室回采矿柱过程中的顶板稳定性开展研究。首先,采用普氏地压理论和卡斯特纳方程构建凿岩硐室矿柱稳定性计算模型,理论计算不同方案在采场全部开挖结束后各因素对顶板压力的影响,并分析影响凿岩硐室安全的各因素敏感性和交互作用,明确关键影响因素;最后,采用数值模拟方法对2个不同方案下的凿岩硐室顶板稳定性进行对比分析,验证理论计算的正确性,为矿山安全高效开采提出合理建议。

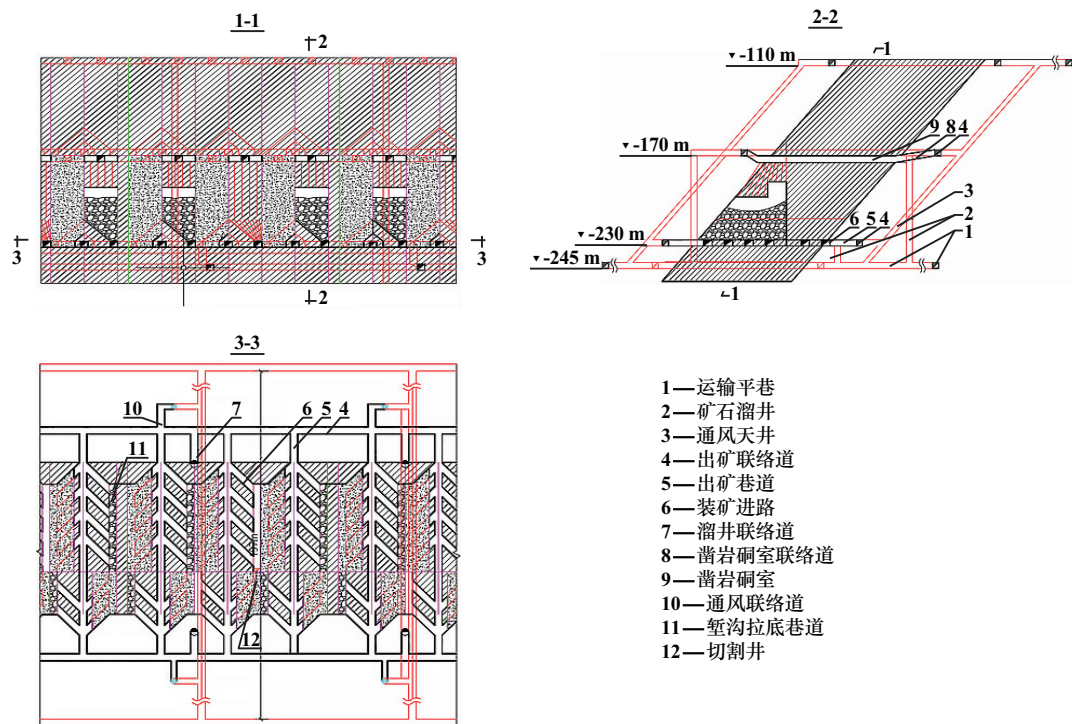


图1 中关铁矿南区首采矿段采矿方法

Fig.1 Mining method for the first mining section in southern area of Zhongguan Iron Mine

2 凿岩硐室稳定性理论分析

2.1 凿岩硐室矿柱稳定性分析

2.1.1 凿岩硐室矿柱承载机理分析

凿岩硐室形成过程中,顶板应力重新分布,硐室内

1 工程概况

中关铁矿矿体属于缓倾斜极厚矿体,厚度变化大,主要赋存在岩浆岩与中奥陶系灰岩的接触带及其附近灰岩裂隙中,属于典型的接触交代矽卡岩型磁铁矿床。通过调研可知,矿岩岩性变化较大,大部分矿岩节理裂隙发育,软弱夹层较多且多为泥质灰岩,同时夹有碳质片岩,形成多个弱面,致使矿岩较为破碎,整体稳固性差。局部出露蚀变闪长岩,硬度较小,遇水泥化不稳定。

中关铁矿南区为矿山首采矿段,采用大直径深孔凿岩阶段空场嗣后充填采矿法(见图1)进行开采,矿块垂直矿体走向布置,矿块高60 m,宽15~18 m,长50~60 m。出矿巷道垂直矿体走向布置,2个矿块共用1条出矿巷道,出矿巷道间距36 m,出矿联络道沿走向在上下盘脉外布置,分别距矿体16、22 m,每个中段布置2条出矿联络道,出矿联络道和采区斜坡道相通,从出矿联络道掘进出矿巷道,从出矿巷道施工装矿进路。凿岩硐室内矿柱留设宽度3~4 m(见图2),完成凿岩和装药工作后,矿柱随矿体一并崩落进行回采。

留设的矿柱受到上覆岩层所施加的压力,起到主要承载作用,与硐室两侧的矿岩共同作用使硐室顶板应力达到平衡,形成一个小的免压拱,保障顶板稳定。当硐室内留设的矿柱随着矿体一并崩落时,打破了原有的应力平衡系统,免压拱范围逐渐合并、扩大,形成一体,

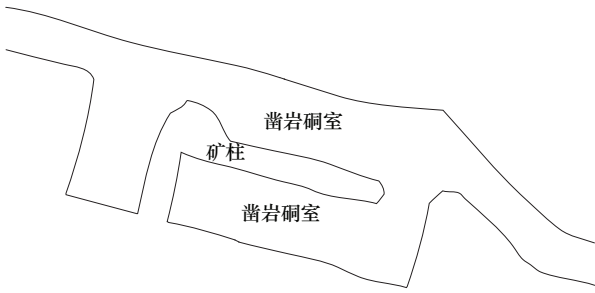


图2 采场内凿岩洞室

Fig.2 Drilling chamber in stope

呈现塑性区结构。当留设的矿柱随着矿体崩落结束后,洞室顶板围岩依靠其两侧矿岩再次达到应力平衡,形成较大面积的普氏拱,从而起到承载塑性区内围岩应力的作用。洞室矿柱承载机理如图3所示。

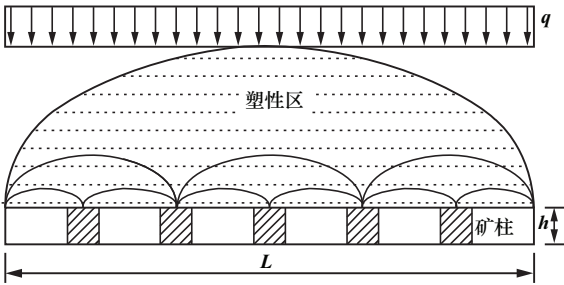


图3 洞室矿柱承载机理

Fig.3 Bearing mechanism of chamber pillars

影响矿柱承载能力的因素主要为上覆岩层类型、基本物理力学参数性质以及凿岩洞室尺寸等。另外,由于围岩与矿体内部含有微裂隙与节理,爆破载荷等因素也会对矿柱稳定性产生影响。

2.1.2 凿岩洞室矿柱稳定性模型

根据矿柱承载机理可知,开挖过程中,矿柱两侧分别受到岩石移动界限内围岩侧向应力,顶部受到顶板覆盖岩层的重力。凿岩洞室顶板与矿柱受力特征如图4所示。

设采场长度方向上两侧围岩的内摩擦角为 φ , 围岩移动角 $\theta=45^\circ+\varphi/2$ 。顶板岩石自然平衡拱的跨度 B_1 为:

$$B_1 = B + 2H \cdot \cot\theta \quad (1)$$

式中: B_1 为采场顶板岩石自然平衡拱的跨度,m; B 为采场凿岩洞室宽度,m; H 为采场高度,m; θ 为围岩移动角,($^\circ$)。

自然平衡拱高度 b_1 为:

$$b_1 = \frac{B_1}{2f} = \frac{0.5B + H \cdot \cot\theta}{f} \quad (2)$$

式中: b_1 为自然平衡拱高度,m; f 为顶板岩石的坚固系数。

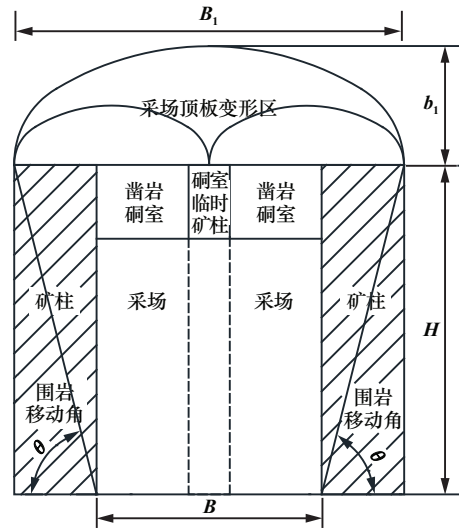


图4 凿岩洞室顶板与矿柱受力特征

Fig.4 Stress characteristics of roof and pillars in drilling chamber

综上所述,矿柱主要受到顶板岩体重力的作用,与塑性区以外的岩体关系不大。因此,可将上部塑性区的岩体压力分布近似看成均匀状态。由此可得顶板压力集度为:

$$q_d = \gamma g b_1 \quad (3)$$

式中: q_d 为顶板压力集度, kN/m^2 ; γ 为矿石密度,取 $3.9 \text{ t}/\text{m}^3$; g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

整个开采空间跨度上的顶板应力为:

$$\sigma_d = q_d \cdot K_0 \quad (4)$$

式中: σ_d 为顶板应力,MPa; K_0 静止侧压力系数^[13-14],取值范围一般为 $0.1 \sim 0.7$,依据凿岩洞室的宽度变化而不同,两者成正比关系。凿岩洞室宽度 6 m 时, K_0 取 0.1 ;凿岩洞室宽度 15 m 时, K_0 取 0.5 。

2.2 凿岩洞室顶板稳定性分析

2.2.1 不同因素对凿岩洞室顶板稳定性的影响

根据式(1)~(4),分析凿岩洞室宽度、高度、围岩内摩擦角及顶板岩石坚固系数对凿岩洞室顶板压力集度的影响^[15-16]。

1) 凿岩洞室宽度。图5为凿岩洞室顶板压力集度与凿岩洞室宽度的关系曲线。顶板压力集度随着凿岩洞室宽度增加而逐渐增加。根据凿岩洞室设计尺寸可知,洞室内留设宽 3 m 的矿柱时,凿岩洞室宽 6 m ,此时顶板压力集度为 $1313.96 \text{ kN}/\text{m}^2$,顶板应力约为 0.13 MPa 。矿柱随矿体一起崩落后,凿岩洞室宽变为 15 m ,此时顶板压力集度为 $4674.22 \text{ kN}/\text{m}^2$,顶板应力约为 0.24 MPa 。

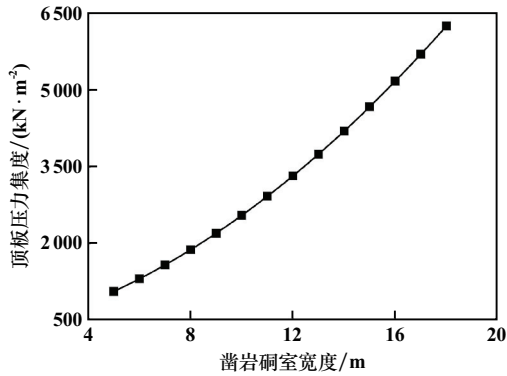


图5 凿岩硐室顶板压力集度与凿岩硐室宽度的关系曲线

Fig.5 Relationship between roof pressure intensity and width of drilling chamber

2) 凿岩硐室高度。图6为凿岩硐室顶板压力集度与凿岩硐室高度的关系曲线。顶板压力集度随着凿岩硐室高度增加逐渐增加;凿岩硐室宽6 m时,凿岩硐室高度由2.5 m增大到4.0 m,对应的顶板压力集度由1 000 kN/m²增大至1 500 kN/m²,顶板应力由0.10 MPa增大至0.15 MPa;凿岩硐室宽度为15 m时,凿岩硐室高度由2.5 m增大到4.0 m,对应的顶板压力集度由4 000 kN/m²增大至5 000 kN/m²,顶板应力由0.20 MPa增大至0.25 MPa。

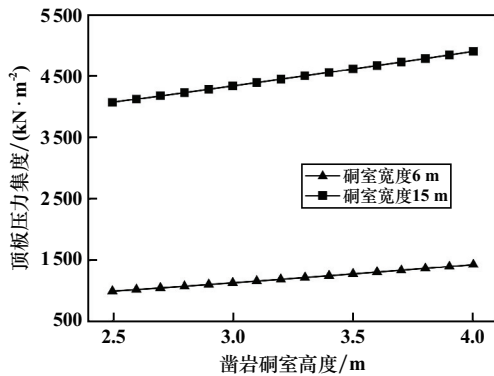


图6 凿岩硐室顶板压力集度与凿岩硐室高度的关系曲线

Fig.6 Relationship between roof pressure intensity and height of drilling chamber

3) 凿岩硐室两侧围岩内摩擦角。图7为凿岩硐室顶板压力集度与凿岩硐室两侧围岩内摩擦角的关系曲线。顶板压力集度随着内摩擦角增加逐渐减小;凿岩硐室宽6 m时,内摩擦角从30°增大到60°,对应的顶板压力集度由1 400 kN/m²减少至800 kN/m²,顶板应力由0.13 MPa减少至0.08 MPa;凿岩硐室宽15 m时,内摩擦角从30°增大到60°,对应的顶板压力集度由4 700 kN/m²减少至3 500 kN/m²,顶板应力由0.24 MPa减少至0.17 MPa。

4) 凿岩硐室顶板岩石坚固系数。图8为顶板压力集度与顶板岩石坚固系数的关系曲线。顶板压力集度随着顶板岩石坚固系数增加逐渐减小,凿岩硐室宽6 m时,顶板岩石坚固系数由1增大到5,对应的顶板压力集度由2 000 kN/m²减少至394 kN/m²,顶板应力由0.2 MPa减少至0.04 MPa;凿岩硐室宽15 m时,顶板岩石坚固系数由1增大到5,对应的顶板压力集度由7 000 kN/m²减少至1 400 kN/m²,顶板应力由0.35 MPa减少至0.07 MPa。

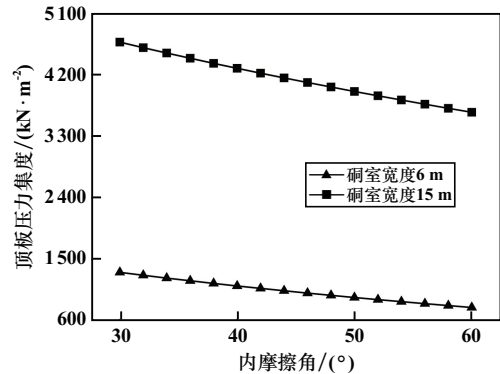


图7 凿岩硐室顶板压力集度与围岩内摩擦角的关系曲线

Fig.7 Relationship between roof pressure intensity of drilling chamber and friction angle of surrounding rock

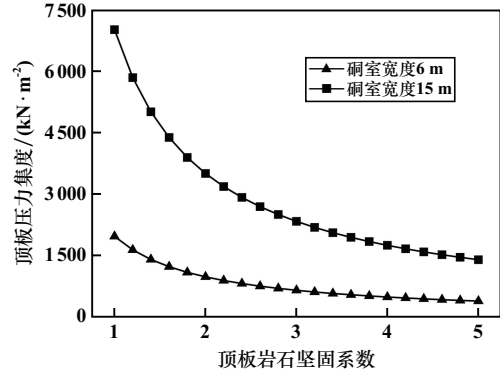


图8 凿岩硐室顶板压力集度与顶板岩石坚固系数的关系曲线

Fig.8 Relationship between pressure intensity and firmness coefficient of roof in drilling chamber

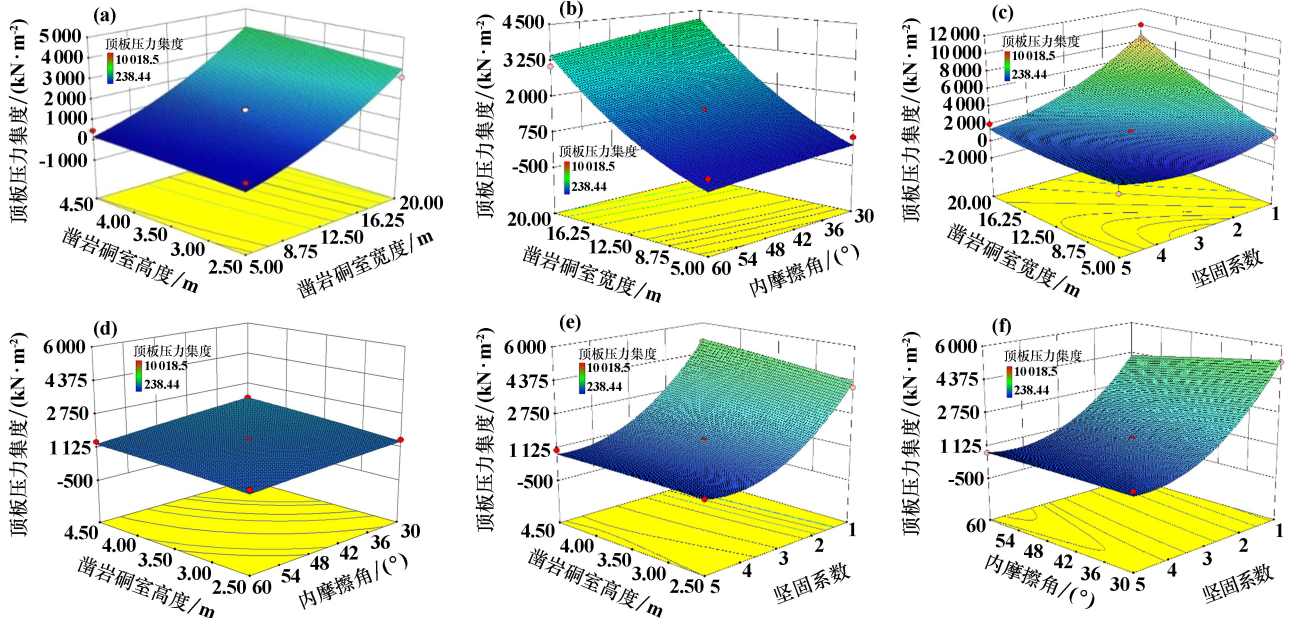
综上所述,凿岩硐室宽度和顶板岩石坚固系数对顶板压力集度影响显著。宽度15 m的凿岩硐室顶板压力集度约为宽度6 m的凿岩硐室顶板压力集度的3.56倍,即方案2会造成顶板压力在矿柱开采后迅速增大,引起顶板应力加速释放,顶板岩石坚固性系数较小时,顶板应力释放现象更显著。

2.2.2 影响因素敏感性及其交互作用分析

采用响应曲面法中的BOX-BEHNKEN响应曲面设计探究凿岩硐室宽度、凿岩硐室高度、凿岩硐室两侧

围岩内摩擦角及顶板岩石坚固系数对顶板压力集度的综合影响,各因素之间的交互作用如图9所示。由图9可知,顶板岩石坚固系数由1增至5时,引起顶板压力集度随另一变量的变化趋势更显著,因此顶板岩石坚固系数敏感性更大。各因素对顶板压力集度的敏

感度顺序为:顶板岩石坚固系数>凿岩硐室宽度>凿岩硐室两侧围岩内摩擦角>凿岩硐室高度。由此可知,顶板岩石坚固系数和凿岩硐室宽度对顶板压力集度的影响显著,而凿岩硐室两侧围岩内摩擦角和凿岩硐室高度对顶板压力集度的影响不显著。



(a) 凿岩硐室宽度-凿岩硐室高度; (b) 凿岩硐室宽度-内摩擦角; (c) 凿岩硐室宽度-坚固系数; (d) 凿岩硐室高度-内摩擦角; (e) 凿岩硐室高度-坚固系数; (f) 内摩擦角-坚固系数

图9 各影响因素间的交互作用

Fig.9 Interaction of influencing factors

3 数值模拟分析

为分析上述凿岩硐室稳定性承载机理的合理性与可靠性,采用FLAC^{3D}数值模拟软件,建立长60 m、高60 m、宽15 m的采场模型,对凿岩硐室内不留矿柱(方案1)、凿岩硐室先留设矿柱后与矿体一并崩落(方案2)2种方案下的凿岩硐室顶板稳定性进行对比分析。

3.1 应力分析

3.1.1 顶板应力对比

图10为方案1、方案2顶板应力变化图。方案1随着采场开采长度增加,顶板压应力下降幅度逐渐增大,顶板拉应力先减小后增大,但整体变化范围不大。采场开采长度小于45 m时,顶板压应力下降幅度较小;采场开采长度大于45 m时,顶板压应力骤然减小,此时压应力分布于整个顶板,导致顶板稳定性大幅降低,冒落垮塌概率增大。因此,不留设矿柱时,凿岩硐室顶板在采场开采长度小于45 m条件下可保持相对稳定。方案2随着采场开采长度增加,顶板拉应力、压应力均先增大后减小。采场开采长度小于27 m时,拉、压应

力增大,顶板稳定性良好;开采长度超过27 m时,拉、压应力均减小,表明凿岩硐室顶板在所留设矿柱支撑前、后有较大的应力集中与释放现象,即矿柱开挖后,顶板稳定性无法继续保持,应力重新分布,顶板失稳冒落风险显著提高。

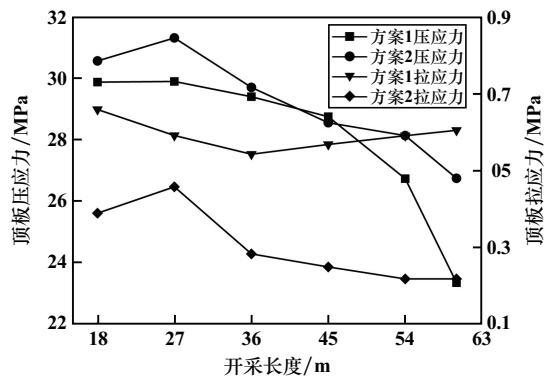


图10 方案1和方案2顶板应力变化

Fig.10 Roof stress variation in Option 1 and Option 2

综上所述可知,采场开采长度小于27 m时,方案1和方案2顶板稳定性均较好;采场开采长度27~45 m

时,方案2的顶板失稳风险较大;采场开采长度超过45 m时,方案1和方案2顶板均有失稳风险,且方案2的风险更大。

3.1.2 侧帮应力对比

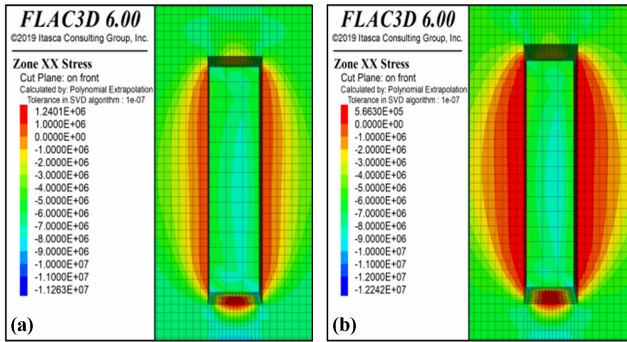
图11、图12分别为方案1、方案2采场开采后侧帮应力云图,图13为方案1、方案2侧帮拉应力变化特征,由于篇幅有限,仅选取2种方案变化比较显著的图片展示(下同)。由图11~13可知:方案1侧帮拉应力分布随着开采长度增加逐渐向两侧延伸,开采长度

超过27 m后,侧帮拉应力变化幅度减小,说明此时侧帮应力重新分布且达到较为稳定的状态;随着开采长度增加,方案2侧帮拉应力持续增大,开采长度由18 m增加至45 m时,侧帮拉应力变化幅度持续变大,说明侧帮应力集中现象显著,侧帮可能发生剪切垮塌破坏的风险。综合以上结果可知,方案2侧帮稳定性出现较大隐患,应力集中现象显著,侧帮失稳破坏风险高于方案1。

3.2 塑性区分析

3.2.1 顶板塑性区对比

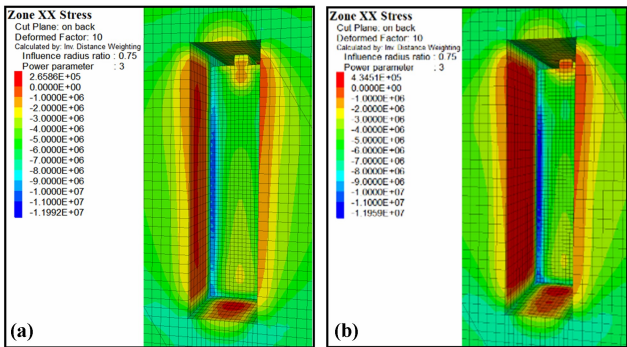
图14、图15分别为方案1、方案2顶板塑性区云图。由图14可知,开采长度36 m时,方案1顶板塑性区变化不大,主要以自由面处剪切破坏为主;开采长度达到45 m时,方案1顶板剪切破坏区域增大,并有贯通趋势,同时出现拉伸破坏,顶板稳定性降低。图15表明,开采长度27 m时,方案2顶板出现剪切拉伸混合破坏,此时部分矿柱开采完毕后,受应力集中影响,诱发顶板失稳垮塌,顶板存在较大失稳风险。



(a) 开采长度 27 m; (b) 开采长度 36 m

图 11 方案 1 侧帮应力云图

Fig. 11 Side wall stress distribution plot of Option 1



(a) 开采长度 18 m; (b) 开采长度 27 m

图 12 方案 2 侧帮应力云图

Fig. 12 Side wall stress distribution plot of Option 2

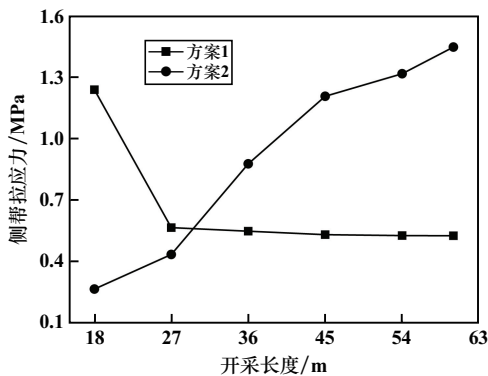
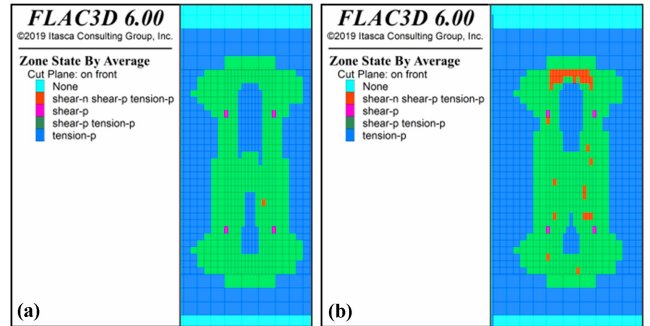


图 13 方案 1 和方案 2 侧帮拉应力变化

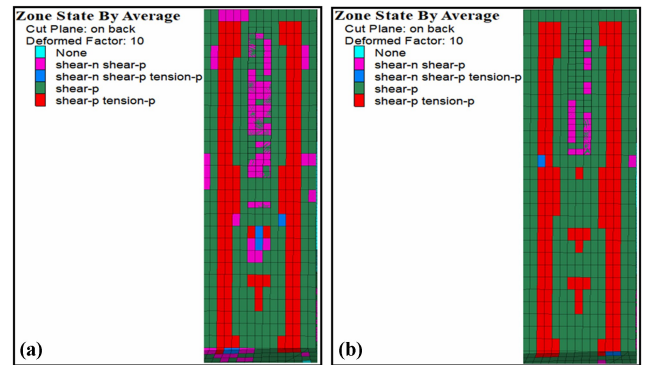
Fig. 13 Variation of side wall stress in Option 1 and Option 2



(a) 开采长度 36 m; (b) 开采长度 45 m

图 14 方案 1 顶板塑性区云图

Fig. 14 Roof plastic zone distribution plot in Option 1



(a) 开采长度 27 m; (b) 开采长度 36 m

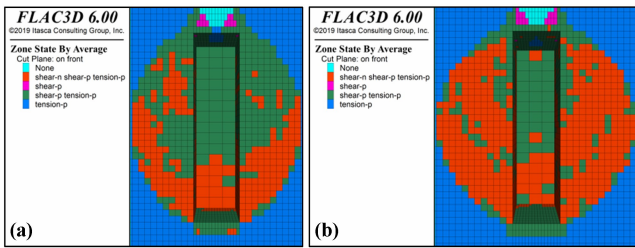
图 15 方案 2 顶板塑性区云图

Fig. 15 Roof plastic zone distribution plot in Option 2

3.2.2 侧帮塑性区对比

图16、图17分别为方案1、方案2侧帮塑性区云图

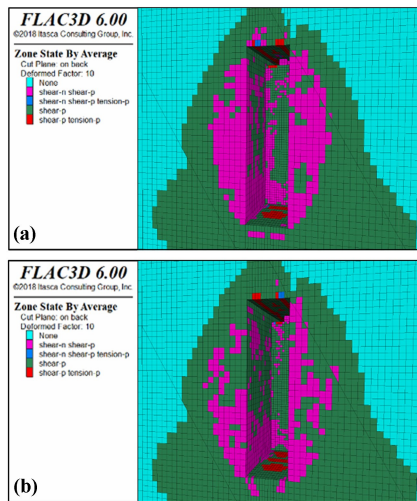
图。由图 16 可知,开采长度大于 36 m 时,方案 1 侧帮主要以剪切破坏为主,且随着开采长度增加,剪切面积逐渐增大,表明开挖后侧帮暴露面积增大,侧帮在剪切作用下无法继续保持稳定性,侧帮出现贯穿式剪切滑移失稳现象。由图 17 可以看出,开采长度 27 m 时,方案 2 侧帮出现大规模剪切破坏区域,开采长度继续增加至 36 m 时,侧帮因剪切作用发生破坏,剪切区域骤然减小,表明初期留设的矿柱在一定程度上提高了侧帮稳定性,但当矿柱被崩落后,侧帮应力骤然增加,导致采场继续开挖后出现大面积剪切破坏,侧帮失稳严重。



(a) 开采长度 36 m; (b) 开采长度 45 m

图 16 方案 1 侧帮塑性区云图

Fig. 16 Side wall plastic zone distribution plot in Option 1



(a) 开采长度 27 m; (b) 开采长度 36 m

图 17 方案 2 侧帮塑性区云图

Fig. 17 Side wall plastic zone distribution plot in Option 2

4 结论

1) 凿岩硐室先留设矿柱后随矿体一并崩落(方案 2)会造成凿岩硐室顶板压力迅速增大,且增幅较大,对顶板稳定性具有较大影响。

2) 各因素对凿岩硐室顶板压力集度影响的敏感程度顺序为:顶板岩石坚固系数>凿岩硐室宽度>凿岩硐室两侧围岩内摩擦角>凿岩硐室高度;顶板岩石坚固系数和凿岩硐室宽度对顶板压力集度的影响显著,而

凿岩硐室两侧围岩内摩擦角和凿岩硐室高度对顶板压力集度的影响不显著。

3) 方案 2 会造成凿岩硐室顶板和侧帮应力集中及多次应力重新分布,凿岩硐室顶板和侧帮存在应力加速释放过程,凿岩硐室顶板和侧帮失稳风险较大;采用凿岩硐室内不留矿柱(方案 1)时,采场开采过程中凿岩硐室顶板和侧帮应力释放和重新分布较为稳定,破坏时间相对滞后。矿岩稳固性较差时,选择方案 1 更利于顶板稳定。

参考文献(References):

- [1] 甘德清,孟岐,刘志义,等. 缓倾斜极厚矿体高阶段采场开采顺序优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):28-34.
GAN Deqing, MENG Qi, LIU Zhiyi, et al. Optimization of mining sequence for high-level stope with gently-dipping and extra-thick orebody[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):28-34.
- [2] 孙杨,罗黎明,邓红卫. 金属矿山深部采场稳定性分析与结构参数优化[J]. 黄金科学技术, 2017,25(1):99-105.
SUN Yang, LUO Liming, DENG Hongwei. Stability analysis and parameter optimization of stope in deep metal mines[J]. Gold Science and Technology, 2017,25(1):99-105.
- [3] 李彦龙,余龙哲,陈仲杰,等. 复杂应力环境下胶结充填采场进路开采顺序优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):144-149.
LI Yanlong, YU Longzhe, CHEN Zhongjie, et al. Optimization of sequence of drift stoping by cemented backfilling under complex stress conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):144-149.
- [4] 苏成哲,纪帅杰,张殿明. 基于单元安全度理论的采场隔离矿柱厚度优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):155-158.
SU Chengzhe, JI Shuaijie, ZHANG Dianming. Optimization of barrier pillar thickness in stope mining based on zone safety[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):155-158.
- [5] 柴红,郭俊超,杨淑慧,等. 缓倾斜厚大矿体采场结构参数优化研究与应用[J]. 金属矿山, 2023(11):142-147.
CHAI Hong, GUO Junchao, YANG Shuhui, et al. Study and application on the optimization of stope structural parameters of gently inclined thick orebody[J]. Metal Mine, 2023(11):142-147.
- [6] 罗来和,夏国进,王沉,等. 基于 FLAC^{3D}的采矿方法优选及采场结构参数优化[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):129-133.
LUO Laihe, XIA Guojin, WANG Chen, et al. Optimization of mining method and stope structure parameters based on FLAC^{3D}[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):129-133.
- [7] 魏可心,徐振洋,王雪松,等. 填塞长度对岩体爆破损伤效果的影响研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):16-21.
WAI Kexin, XU Zhenyang, WANG Xuesong, et al. Influence of stemming length on damage effect of rock blasting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):16-21.
- [8] 蒋江晨,叶永飞,柳小胜. 胶结充填体拱效应作用下的水平矿柱回采安全厚度研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):39-43.

- JIANG Jiangchen, YE Yongfei, LIU Xiaosheng. Thickness of horizontal pillar for safe extraction under arching effect of cemented backfill [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(1): 39-43.
- [9] 陶干强,任青云,罗辉,等. 无底柱分段崩落法采场稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3768-3772.
- TAO Ganqiang, REN Qingyun, LUO Hui, et al. Stability analysis of stope in pillarless sublevel caving [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3768-3772.
- [10] 赵兴东,周鑫,田斌,等. 西藏帮中锌铜矿采场结构参数优化[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 12-15.
- ZHAO Xingdong, ZHOU Xin, TIAN Bin, et al. Optimization of stope structure parameters for Bangzhong Zinc-Copper Mine in Xizang [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4): 12-15.
- [11] 毛文杰,赵国彦,王玺,等. 基于围岩应力监测和振动监测的采场稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 1-4.
- MAO Wenjie, ZHAO Guoyan, WANG Xi, et al. Stope stability analysis based on monitoring of surrounding rock stress and vibration [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(2): 1-4.
- [12] 李鹏飞,王帆,聂雄,等. 深埋非对称连拱隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1625-1629.
- LI Pengfei, WANG Fan, NIE Xiong, et al. Methods for calculating rock pressure of symmetrical multi-arch deep tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1625-1629.
- [13] 蒋明杰,朱俊高,张小勇,等. 缩尺效应对粗颗粒土静止侧压力系数影响规律试验[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 259-266.
- JIANG Mingjie, ZHU Jungao, ZHANG Xiaoyong, et al. Experimental investigation on scale effect of the at-rest earth pressure coefficient of coarse-grained soil [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 259-266.
- [14] 李顺群,刘继承,刘小兰,等. 基于三维应力状态的静止侧压力系数研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(5): 193-201.
- LI Shunqun, LIU Jicheng, LIU Xiaolan, et al. Study on static lateral pressure coefficient based on three-dimensional stress state [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 193-201.
- [15] 王少林,黄敏,方偏桃. 矿柱稳定性关键影响因素敏感性分析[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(8): 31-35.
- WANG Shaolin, HUANG Min, FANG Piantao. Sensitivity analysis on key influence factors of pillars stability [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(8): 31-35.
- [16] 王孟来,李小双,王运敏,等. 露天转地下房柱法开采扰动下采场稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(2): 32-37.
- WANG Menglai, LI Xiaoshuang, WANG Yunmin, et al. Stope stability under disturbance in transition of open-pit to underground room and pillar mining [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(2): 32-37.
- 引用本文: 向伟华,路燕泽,刘志义,等. 阶段空场嗣后充填法凿岩硐室矿柱对顶板稳定性的影响[J]. 矿冶工程, 2025, 45(3): 69-76.
- XIANG Weihua, LU Yanze, LIU Zhiyi, et al. Influence of pillars in drifting chamber on roof stability during sublevel open stoping with backfill [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3): 69-76.

(上接第 68 页)

- [10] LIU S H, YANG J M, LU H N, et al. A numerical investigation of the dynamic interaction between the deep-sea mining vehicle and sediment plumes based on a small-scale analysis [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(7): 1458.
- [11] MA W B, SCHOTT D, RHEE C V. Numerical calculations of environmental impacts for deep sea mining activities [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 996-1012.
- [12] BAI T B, ZHAO Y, ZHOU Y Q, et al. Numerical simulation and analysis of initial plume discharge of deep-sea mining [J]. Ocean Engineering, 2024, 310: 118794.
- [13] GILLARD B, PURKIANI K, CHATZIEVANGELOU D, et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific) [J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2019, 7: 5.
- [14] MUÑOZ-ROYO C, OUILLOU R, EL MOUSADIK S, et al. An in situ study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle [J]. Science Advances, 2022, 8(38): eabn1219.
- [15] MOTT R W, WOODS A W. On the mixing of a confined stratified fluid by a turbulent buoyant plume [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 623: 149-165.
- [16] BAINES W D. Entrainment by a plume or jet at a density interface [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 68(2): 309-320.
- [17] 李慧君,王业库,张久意. 基于鼓泡流化床的新型曳力模型的验证分析[J]. 动力工程学报, 2022, 42(8): 715-721.
- LI Huijun, WANG Yeku, ZHANG Jiuyi. Verification and analysis of a new drag model based on bubbling fluidized bed [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(8): 715-721.
- [18] SHANMUGAM G. 密度羽流构型特征、控制因素及其对深水沉积的启示: 对河口和其他环境中密度羽流进行的全球卫星调查 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 608-625.
- SHANMUGAM G. A global satellite survey of density plumes at river mouths and at other environments: Plume configurations, external controls, and implications for deep-water sedimentation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 608-625.
- [19] 范智涵,贾永刚,滕秀英,等. 深海多金属结核开采潜在工程地质环境影响研究进展 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1676-1691.
- FAN Zhihan, JIA Yonggang, TENG Xiuying, et al. Review on potential engineering geological environment impacts of deep-sea polymetallic nodules mining [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1676-1691.
- 引用本文: 刘泽霖,陈时平,郑皓,等. 深海采矿沉积物羽流静水扩散特性试验研究 [J]. 矿冶工程, 2025, 45(3): 63-68.
- LIU Zelin, CHEN Shiping, ZHENG Hao, et al. Experimental study on diffusion characteristics of sediment plumes in still water during deep-sea mining [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3): 63-68.