

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20240082

缓倾斜薄矿脉连续开采地压控制机理试验研究

李坤蒙^{1,2,3}, 李峥嵘^{1,2,3}, 熊志朋⁴, 李元辉^{1,2,3}

(1. 东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 深部工程与智能技术研究院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 4. 昆明冶金研究院有限公司, 云南 昆明 650021)

摘要: 针对传统房柱法及全面法开采缓倾斜薄矿脉时存在的产能低、矿石损失大、地压灾害频发等问题,以三道沟金矿为背景,基于新型预应力膨胀支柱技术,开展缓倾斜薄矿脉多采场开采室内相似试验. 通过对比无支护与预应力膨胀支柱支护条件,揭示了围岩变形、应力分布及破裂演化规律,并分析了顶板破坏模式. 研究表明:相较无支护工况,预应力膨胀支柱可使顶板变形量降低约44%,显著缓解浅部采空区应力释放及深部岩体、底柱的应力集中;围岩仅发生局部失稳,有效避免了顶板突发性垮塌灾害,为缓倾斜薄矿脉连续开采的围岩稳定性控制提供了理论支撑.

关键词: 缓倾斜薄矿脉;连续开采;地压控制;膨胀支柱;室内相似试验

中图分类号: TD 355 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)10-0143-08

Experimental Study on Ground Pressure Control Mechanism in Continuous Mining of Gently Inclined Thin Veins

LI Kun-meng^{1,2,3}, LI Zheng-rong^{1,2,3}, XIONG Zhi-peng⁴, LI Yuan-hui^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Institute of Deep Engineering and Intelligent, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 4. Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming 650021, China. Corresponding author: LI Kun-meng, E-mail: likunmeng@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To address low productivity, high ore loss, and frequent rock hazards in traditional room-and-pillar and breasting mining methods for gently inclined thin veins, laboratory similarity experiments were conducted for multi-stope mining of gently inclined thin veins at Sandaogou gold mine using novel pre-stressed expandable pillars technology. Surrounding rock deformation, stress distribution, fracture evolution, and roof failure modes were analyzed under unsupported and pre-stressed expandable pillar-supported conditions. Results show that compared with the unsupported condition, the pre-stressed expandable pillars can reduce the roof deformation by approximately 44%, relieve stress release in shallow goafs, and mitigate stress concentration in deep strata/floor pillars. The surrounding rock only experiences local instability, effectively avoiding the sudden collapse of the roof. This provides theoretical support for the stability control of the surrounding rock during the continuous mining of gently inclined thin veins.

Key words: gently inclined thin vein; continuous mining; ground pressure control; expandable pillar; laboratory similarity experiment

缓倾斜薄矿脉占贵金属和有色金属矿产资源30%以上.受矿体赋存条件制约,矿山长期采用全面法和房柱法开采此类矿体.在矿体回采过程中,通常留设圆形、矩形点柱以及连续的矿柱,

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2903801); 国家自然科学基金资助项目(52004054, 52274115); 辽宁省科学技术计划项目(2023JH1/10400004).

作者简介: 李坤蒙(1990—),男,陕西西安人,东北大学副教授; 李元辉(1968—),男,辽宁营口人,东北大学教授,博士生导师.

旨在承载采区覆岩荷载、保证采区稳定性,为人员提供安全的作业条件^[1-3].原岩矿柱在提高采场安全性的同时,所造成的损失会使企业的经济效益降低.开采到达深部后,地压在高应力(30~50 MPa)作用下显著增大,导致原岩矿柱的应力集中程度加深,极大可能发生脆性破坏甚至岩爆,无法长久支护采场顶板^[4].在矿柱群中,一旦单个矿柱承载超过其极限荷载发生破坏,会诱发荷载转移,从而产生“多米诺骨牌”效应造成采区大面积失稳^[5].深部高应力条件下,现场需要增加留设的原岩矿柱的尺寸、数量和减小采场跨度,造成更严重的矿石损失和更低的生产能力(30~50 t/d)^[6].

针对原岩矿柱损失和高应力脆性劈裂等难题,国内外学者和矿山研发和推广应用了 50 多种类型的人工支柱^[7-8].人工支柱可分为 4 类.第 1 类为脆性支柱,如人工胶结支柱^[9]和砂柱^[10],此类支柱的承载特点是承载力达到其承载极限后迅速减弱乃至消失.第 2 类为弹塑性支柱,如 Can support 和 Rocprops^[7],与第 1 类脆性支柱相比,其特点在于此类支柱承载力达到其极限后仍能保持恒定.第 3 类为应变软化支柱,如 Pumpable^[11],此类支柱支撑能力达到极限后,短时间内会迅速降低,但支柱能够保持一定的残余强度.第 4 类为应变硬化支柱,如 Omni Props^[7],此类支柱的优点在于其承载力在顶板后期变形过程中表现为增长趋势.前 3 类人工支柱在国内外矿山应用较多,第 4 类仍处于试验研发阶段,第 4 类支柱的应变硬化承载性能是“让压支护”理念实施的基础,是一种理想的采场和巷道围岩支护体^[12-14].为实现第 4 类应变硬化支护效果,文献^[15-16]研发了一种新型预应力膨胀支柱并成功应用在房柱法采场中.传统支护体的预应力通过嵌入木楔、机械辅助装置、充气气囊或者注浆填充袋和水膨胀钢隔膜等方式来施加,可达到 100~500 kN^[17],而预应力膨胀支柱主动支撑力可达到 1 600 kN,承载能力可达到 2 700 kN 以上,预应力膨胀支柱

在达到屈服阶段前发生弹性变形,加载超过膨胀支柱极限承载力后,膨胀支柱发生弯曲屈曲,变形随应力的增大而增大,达到一定程度后失效^[18].除了主动支撑性能外,预应力膨胀支柱支撑力在承载过程中不断增大,具有应变硬化特点.

基于新型预应力膨胀支柱支护技术,研发了缓倾斜薄矿脉无矿柱连续采矿法^[15-16].回采过程取消矿房间柱和采场矿石点柱,利用自主研发的新型预应力膨胀支柱支撑顶板荷载,以提高缓倾斜薄矿脉回采过程中矿石的回收率,同时有效控制采场顶板的稳定性.本文设计并开展无支护与预应力膨胀支柱支护两种条件下缓倾斜薄矿脉多采场开采室内相似试验,分析采场顶板围岩位移、应力和破裂演化规律,揭示预应力膨胀支柱支护对缓倾斜薄矿脉连续开采的地压控制机理.

1 工程背景

三道沟金矿位于辽宁省丹东市,开采深度为 200~700 m.矿体倾角 20°,采用空场采场法回采矿体.单个采场沿走向长度大于沿倾斜长度,故沿倾斜方向取剖面进行二维分析,单个采场倾斜长度为 24 m,高 4 m,采场间预留 4 m 连续原岩矿柱.矿体以含金硅化蚀变岩和蚀变煌斑岩为主,上盘和下盘岩体为黑云母片岩,岩体基本质量级别为 III 级,层状结构明显,易掉块坍塌.为了控制上盘围岩稳定,采场内留设不规则的原岩矿柱支撑顶板,保证工作环境安全.现场调查表明,不规则的原岩矿柱极易发生高应力劈裂破坏,房柱法存在较大的安全隐患^[19-20].针对以上技术难题,2018 年 10 月至今,在三道沟金矿开展了无矿柱连续开采工业性试验,试验采场距地表深度为 330 m,如图 1 所示.试验结果显示,新型采矿方法在提高采场回收率(从 71% 提高到 93%)、生产能力(从 35 t/d 提高到 90 t/d)及控制采场地压灾害(包括冒顶和片帮)等方面具有较好的效果^[21].

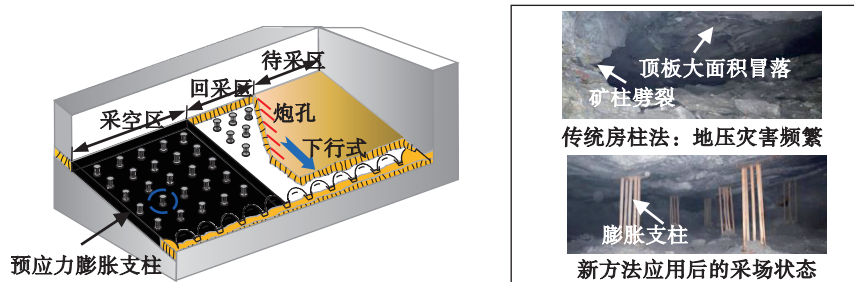


图 1 缓倾斜薄矿脉无矿柱连续开采设计与现场应用效果

Fig. 1 Design and field application effect of continuous mining without ore pillar in gently inclined thin vein

2 室内相似试验条件

室内相似试验能够较好地再现力学断裂机理,在相似条件下,采场围岩的变形、破裂以及稳定性等特点能够直观、真实、准确地反映出来^[22].为了揭示缓倾斜薄矿脉连续开采地压控制机理,

设计并开展无支护与预应力膨胀支柱支护两种条件下的缓倾斜薄矿脉连续开采室内相似试验.

2.1 试验相似比

如图 2 所示,采用电液伺服多通道加载系统物理模型试验台,尺寸为 2.4 m×1.2 m×0.2 m,模型顶部最大施加垂直载荷为 3.0 MPa.

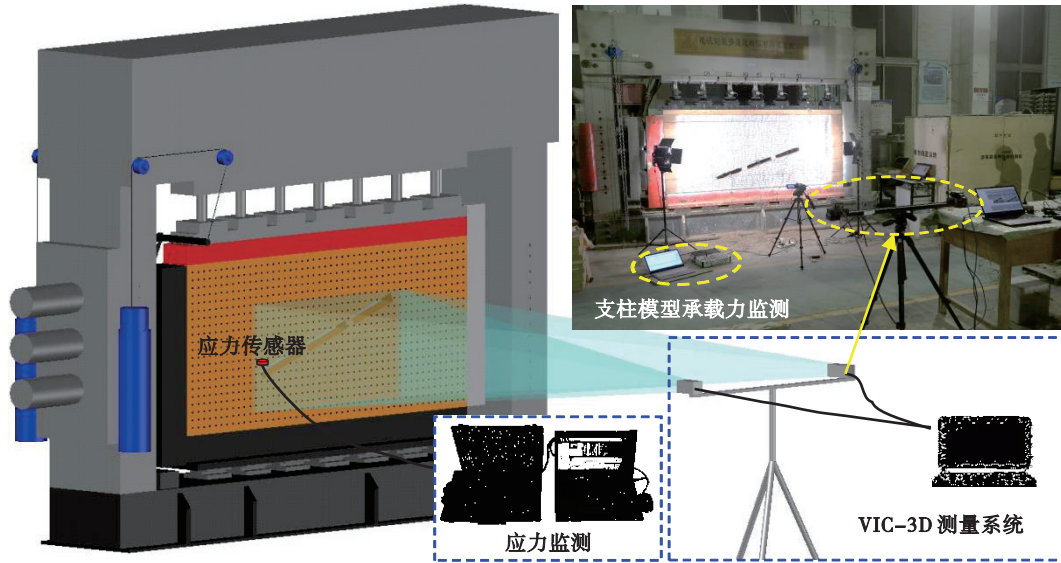


图 2 数值模型与监测设计

Fig. 2 Numerical model and monitoring design

根据相似原理,物理模型应在几何尺寸、材料密度和应力条件方面与现场条件类似^[23].现场原型和室内相似模型之间的相似比应满足公式

$$C_\sigma = C_L C_\rho$$

其中: C_L , C_ρ 和 C_σ 分别是几何尺寸、材料密度和应力的相似系数.

室内相似试验模型的几何相似系数和容重相似系数分别为 67 和 1.5,应力、弹性模量和材料强度相似系数均为 100.

为了模拟未构筑的覆岩,模型顶部施加补偿应力为

$$q = (H - H_L \times C_L) \times \gamma / C_\sigma = 0.078 \text{ MPa.}$$

其中: H 为矿体埋深,330 m; H_L 为模型顶板距矿体的高度,0.6 m; γ 为原岩容重,27 N/cm³.

2.2 相似材料

如表 1 所示,基于现场岩体的力学参数,借助应力相似比,计算相似材料岩样的力学参数目标值,包括密度、抗压强度、弹性模量、抗拉强度,并开展相似材料配比试验,如图 3 所示.相似材料配比材料主要包括骨料和胶结材料,选择细河沙作骨料,硅酸盐水泥、石膏粉和饱和酒精松香溶液作胶结材料^[24].共计开展 15 组相似材料配比试验,优选并获取达到目标的相似材料岩样力学参数如表 1 所示,对应相似材料质量配比为河砂:石膏粉:硅酸盐水泥:饱和酒精松香溶液=10:0.7:0.3:0.22.

表 1 相似材料岩样的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock samples with similarity materials

岩样	密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
现场岩体	2 700	10. 190	17. 500	0. 500
相似材料岩样目标值	1 800	0. 102	0. 175	0. 005
相似材料岩样	1 800	0. 116	0. 165	0. 008

2.3 预应力膨胀支柱的相似性

膨胀支柱相似结构亦是室内相似试验顺利实施的基础.膨胀支柱由接顶结构、支撑结构和

膨胀结构组成,如图 4a 所示.为实现结构相似^[25],膨胀支柱模型采用铝制细管作为支撑结构、小型螺旋千斤顶作为底部预应力施加装置,如图 4b 所

示;为实现力学性能相似,根据膨胀支柱的承载特性曲线,缩放获得的膨胀支柱模型的目标力-位移曲线如图 4d 所示.开展不同尺寸和数量铝制细管所组成支柱模型的承载性能测试试验,标定室内相似试验所需膨胀支柱模型参数,如图 4c 所示(其中,5×0.4 mm×0.1 mm(5-0.4-0.1)代表 5 根直径 0.4 mm,壁厚 0.1 mm 的铝制细管.下同).最终确定高度分别为 20 mm 的 4×0.3 mm×0.1 mm(4-0.3-0.1-20)铝制细管和高度为 30 mm 的 4×0.4 mm×0.1 mm(4-0.4-0.1-30)铝制细管为最优的模型结构规格.高度较小的膨胀支柱模型底部布置重力传感器,用于设置初始预应力和监测其荷载演化规律.

2.4 开挖和监测设计

设计并开展无支护与膨胀支柱支护两种条件下的缓倾斜薄矿脉多采场开采室内相似试验.相似试验过程中,无支护与膨胀支柱支护两种工况开采顺序均按序号由采场#1 至#3.采场#1 和#2 之间的底柱记为 P₁,采场#2 和#3 之间的底柱记为 P₂.室内相似试验分为 4 个阶段:第 1 阶段开挖采场#1,并在开挖三分之二区域时安装支柱 A,利用膨胀支柱模型底部布置的重力传感器调整初始预应力约 12 N;第 2 阶段开挖采场#2,上半部分区域开采完毕时安装支柱 B,初始预应力设置约 12 N;第 3 阶段开挖采场#3,开采三分之二区域时安装支柱 C,初始预应力设置约 12 N;为揭示支护条件下最终采场围岩的破坏特征,第 4 阶段继续增

加模型顶部荷载,每次加载量为预估极限值的 10%,直至整个模型发生失稳破坏.

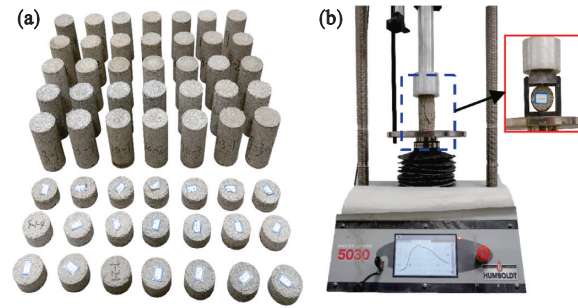


图 3 相似材料配比试验

Fig. 3 Similar material proportioning experiment
(a)—相似材料试样; (b)—试样力学试验.

室内相似试验的监测系统亦包括围岩位移、应力及破裂监测,监测装置如图 5 所示.每个采场中央位置的支柱底部布设有重力传感器,如图 5c 所示蓝色支柱 A、B 和 C.为获得不同开挖阶段围岩的位移场,采用 VIC-3D 测量系统对模型变形进行监测.试验前在模型表面喷涂黑色位移监测点,在模型开挖过程中,利用高速摄像机拍摄变形图像,然后利用后处理软件跟踪位移监测点的位移变化,同时采集室内相似试验过程模型照片,分析采场围岩失稳破裂演化规律.室内相似试验模型构建过程中,在模型内部距采场顶板 40 mm 层位埋设应力传感器共 13 个,其布置位置如图 5 所示,利用应变仪采集围岩垂直应力.

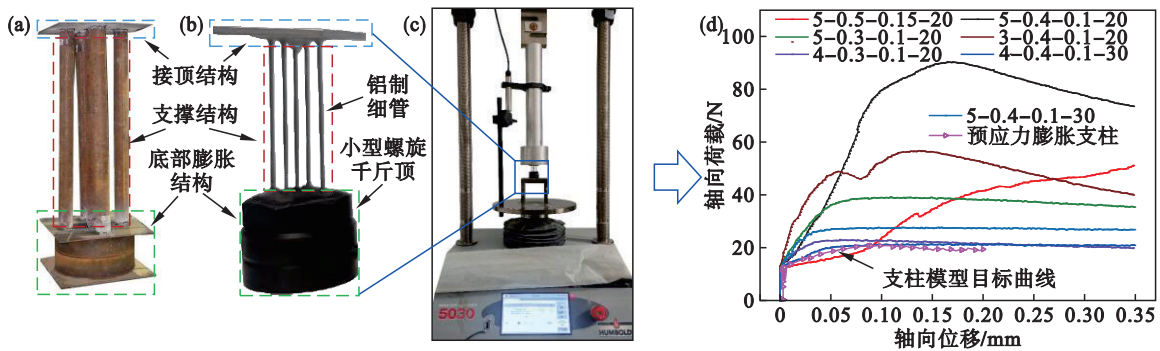
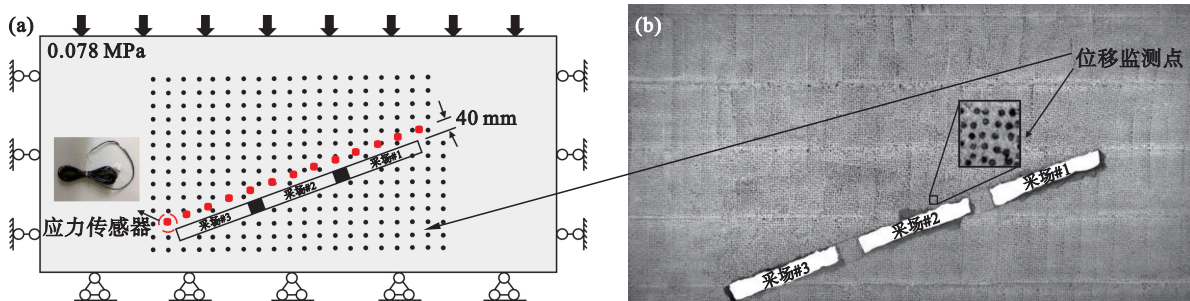


图 4 膨胀支柱模型的相似结构设计和承载性能测试

Fig. 4 Similarity structure design and load-bearing tests of expandable pillar models
(a)—膨胀支柱; (b)—模型; (c)—模型加载; (d)—性能测定.



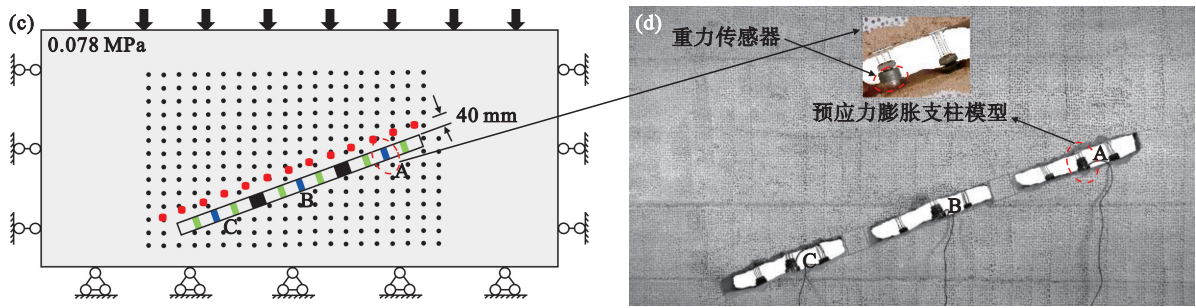


图 5 室内相似模型开挖及监测设计

Fig. 5 Laboratory similar model excavation and monitoring design

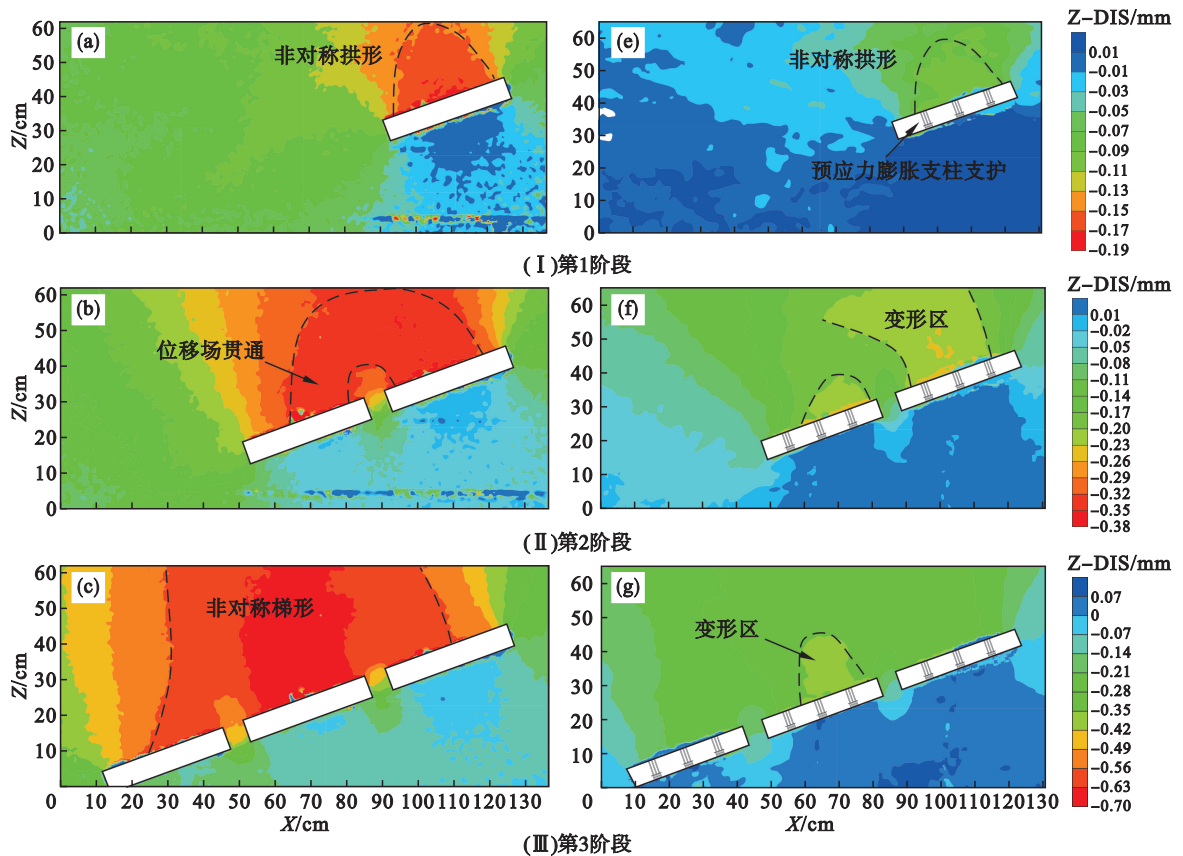
(a), (b)一无支护; (c), (d)一膨胀支柱支护.

3 试验结果

3.1 监测设计采场顶板垂直位移

将室内相似试验不同开采阶段围岩位移数据进行差分处理,绘制无支护和膨胀支柱支护条件下围岩位移场分布云图,如图 6 所示.由图 6a 和 6e 可以看出,采场#1 开采后,两种支护条件下采场顶板的位移分布特征基本一致,均沿采场中央呈非对称的拱形分布特征,膨胀支柱支护条件下采场顶板的最大下沉量较无支护条件降低约 42%.由图 6b 和 6f 可以看出,采场#2 开采后,无支护条件下采场#1 和#2 顶板位移场在顶板深部贯通.在膨胀支柱支护作用下 2 个采场顶板的位移

并未发生贯通现象,采场#1 和#2 顶板的最大下沉量分别降低 38.5% 和 39.5%.由图 6c 和 6g 可以看出,无支护条件下 3 个采场顶板的位移场在顶板深部岩体中贯通.在膨胀支柱支护作用下围岩位移场仅在采场#2 顶板位置出现显著变形区,顶板下沉量降低了约 48%.第 4 阶段,如图 6d 和 6h 所示,在增加室内相似模型顶部荷载的过程中,无支护条件下采场顶板位移场逐渐向深部围岩转移,整个采空区顶板出现了大变形区.在膨胀支柱支护作用下,仅在采场#1 和#2 顶板区域产生了位移场的贯通现象,顶板最大沉降量较无支护条件下减少了 46%.整体而言,在缓倾斜薄矿脉多采场开采过程中,预应力膨胀支柱的支护作用能够显著降低围岩的位移值.



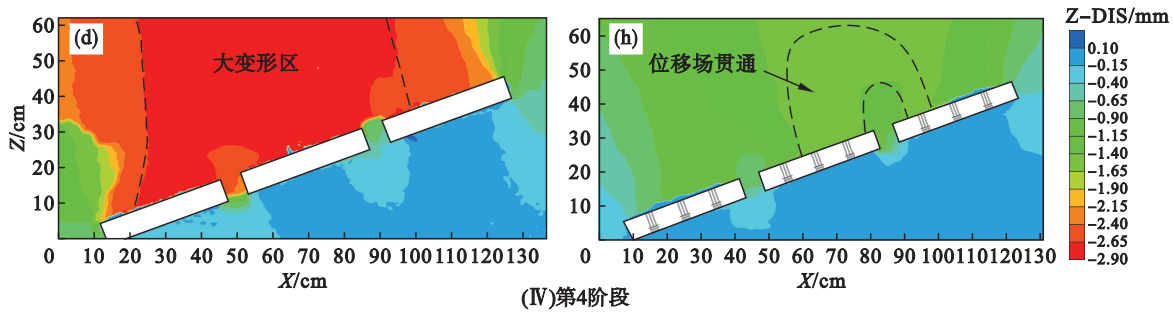


图6 不同开采阶段采场顶板垂直位移

Fig. 6 Vertical displacement of stope roof at different mining stages

(a)~(d)—无支护; (e)~(h)—膨胀支柱支护.

3.2 采场顶板垂直应力

在不同开采阶段,提取无支护和膨胀支柱支

护条件下室内相似模型内部的应力传感器数据,绘制如图7所示的垂直应力分布曲线.

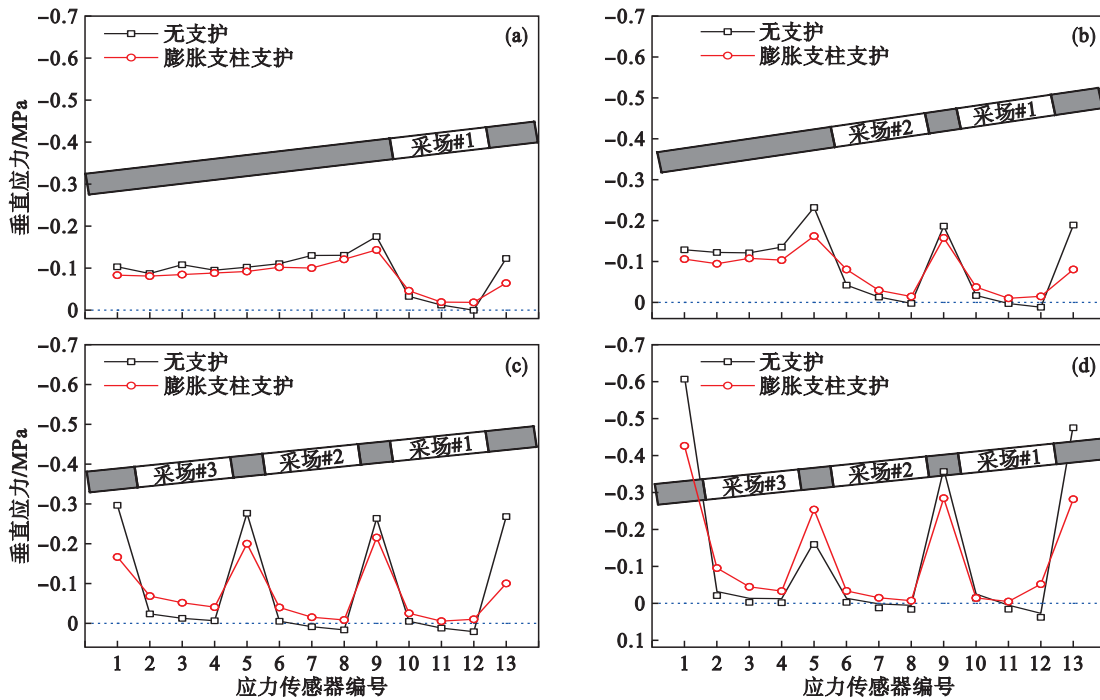


图7 不同开采阶段采场顶板垂直应力

Fig. 7 Vertical stress of stope roof at different mining stages

(a)—第1阶段; (b)—第2阶段; (c)—第3阶段; (d)—第4阶段.

如图7a所示,采场#1开采后,两种支护条件下采场顶板均出现偏对称分布的应力释放现象,膨胀支柱的支护作用降低了采场顶板的应力释放程度,采场#1两侧岩体的峰值应力较无支护条件下分别降低了0.03和0.06 MPa.如图7b所示,采场#2开采后,无支护条件下采场顶板中产生拉应力,其最大值约为0.012 MPa,膨胀支柱作用下避免了顶板拉应力的显现.在膨胀支柱支护条件下,采空区两侧和底柱P₁的垂直应力较无支护条件分别降低了0.07,0.03,0.11 MPa,表明膨胀支柱分担了部分顶板荷载.如图7c所示,采场#3开采后,在无支护条件下,采场#1和#2顶板表现出

显著的拉应力.在膨胀支柱支护作用下,3个采场顶板并未产生拉应力,降低了采场顶板发生拉伸垮塌灾害的风险.受顶板荷载转移影响,膨胀支柱支护作用下采空区围岩垂直应力峰值较无支护条件下均有所降低.对于第4阶段,无支护和膨胀支柱支护两种条件下,采场顶板应力分布特征与前3个阶段差别不大.如图7d所示,因上覆荷载增加,采空区周围岩体和底柱垂直应力急剧增大.无支护条件下底柱P₂由于已经发生了剪切破坏,垂直应力峰值较上一阶段降低了0.12 MPa.受膨胀支柱的主动支撑作用,采空区左侧岩体、底柱P₁和右侧岩体应力峰值较无支护条件分别降低了

0.28, 0.06 和 0.29 MPa, 且采场底柱未发生剪切破坏.

3.3 采场围岩破坏

相似试验中,第3阶段开采完毕时,无支护与膨胀支柱支护条件下采场顶板均未发生失稳破坏.为了揭示顶板失稳特征,第4阶段增加室内相似试验模型顶部荷载,当荷载增加到 0.153 MPa 时,无支护条件下,采场#3 左侧岩体和底柱区域的应力集中程度急剧增加诱发剪切破坏发生.受采场#1 和#2 顶板拉应力的影响,采场#1 的右上角出现明显的拉伸贯穿裂缝,最终导致上覆岩层大规模坍塌.因此,在无支护条件下,采场开采过程中上覆岩层的最终破坏特征是深埋岩体的高应力剪切破坏和浅埋岩层的卸压坍塌,如图 8a 所示.如图 9 中 *i-j* 段所示,在相同应力环境下,顶板载荷转移至膨胀支柱,导致其承载力增大.支柱支护作用下,采场顶板和底柱未出现拉伸或剪切破坏,如图 8b 所示,膨胀支柱达到极限承载后,发生屈服致其承载力降低,支撑杆件发生弯曲变形.

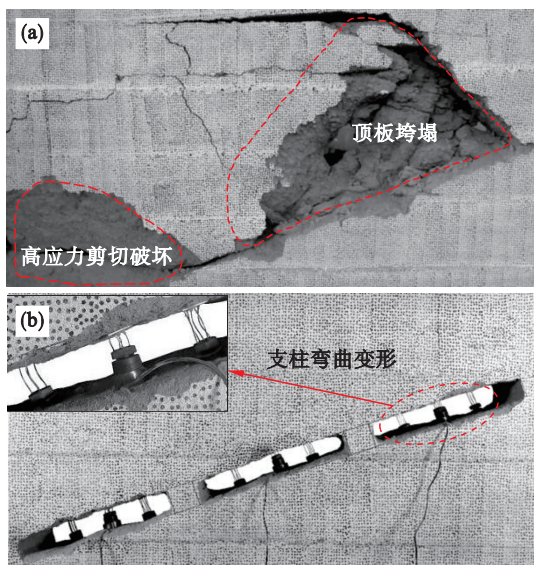


图 8 采场顶板的稳定性特性

Fig. 8 Stability characteristics of stope roof

(a)—无支护; (b)—膨胀支柱支护.

为了揭示膨胀支柱支护条件下围岩的最终破坏特征,进一步增加膨胀支柱支护作用下的相似模拟模型试验,并对膨胀支柱的承载特性进行监测分析.如图 9 所示,顶板来压下,膨胀支柱 B, C 在屈曲状态下承载力不断降低(*j~k* 段),当荷载增加至 0.193 MPa 时覆岩发生局部失稳破坏,如图 10 所示,采场#2 和#3 顶板发生了大面积垮塌,同时采场#1 右上角出现了竖直的拉伸裂缝,但是整个顶板围岩并未发生整体失稳垮塌,膨胀支柱

模型仍具有控制采场顶板的残余承载力(*k* 段后).整体而言,无支护和膨胀支柱支护条件下采场顶板最终的破坏特征存在差异,膨胀支柱支护作用下围岩仅发生了局部的失稳破坏,避免了覆岩整体突然性的垮塌灾害发生.

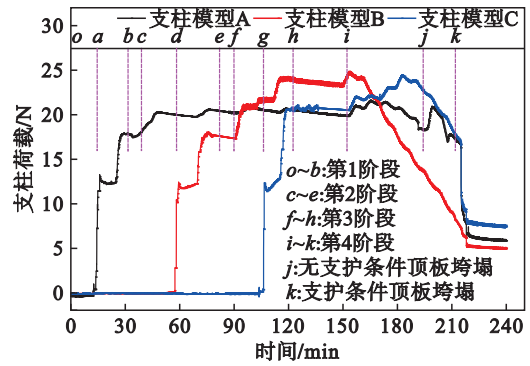


图 9 膨胀支柱承载力变化曲线

Fig. 9 Load-bearing capacity curves of expandable pillar

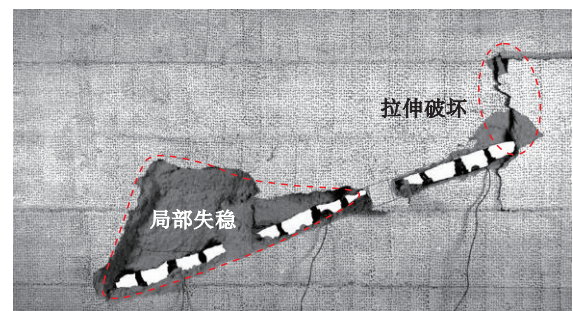


图 10 膨胀支柱支护作用下覆岩的最终破坏特征

Fig. 10 Final failure characteristics of overlying rock with expandable pillar support

4 结 论

1) 在无支护条件下,覆岩出现了明显的大变形区.预应力膨胀支柱支护作用下,围岩的位移量显著降低,膨胀支柱支护比无支护条件下的覆岩位移降低约 44%.

2) 在无支护条件下,浅埋采空区顶板应力释放程度和深埋岩体应力集中较大,膨胀支柱支护改善了采场围岩的应力环境,降低了浅埋采空区顶板的应力释放程度、深埋岩体及底柱区域的应力集中程度.

3) 无支护和膨胀支护条件下覆岩的破坏特征存在差异.在无支护的情况下,采场开采过程中上覆岩层的破坏特征是深埋岩体的高应力剪切破坏和浅埋岩层的卸压垮塌;膨胀支柱支护作用下围岩仅发生了局部的失稳破坏,避免了采场

覆岩突然性的整体垮塌灾害发生.

参考文献:

- [1] Maybee W G. Pillar design in hard brittle rocks [D]. Sudbury: Laurentian University, 2000.
- [2] Malli T, Yetkin M E, Özfirat M K, et al. Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 134: 365–372.
- [3] Ghasemi E, Shahriar K, Sharifzadeh M. A new method for risk assessment of pillar recovery operation [J]. *Safety Science*, 2010, 48 (10): 1304–1312.
- [4] Xie P S, Luo Y, Wu Y P, et al. Roof deformation associated with mining of two panels in steeply dipping coal seam using subsurface subsidence prediction model and physical simulation experiment [J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020, 37: 581–591.
- [5] 周子龙,王亦凡,柯昌涛. “多米诺骨牌”破坏现象下的矿柱群系统可靠度评价 [J]. *黄金科学技术*, 2018, 26 (6): 729–735.
(Zhou Zi-long, Wang Yi-fan, Ke Chang-tao. Reliability evaluation of pillars system based on Domino failure effect [J]. *Gold Science and Technology*, 2018, 26 (6): 729–735.)
- [6] Esterhuizen G S, Dolinar D R, Ellenberger J L. Pillar strength in underground stone mines in the United States [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48 (1): 42–50.
- [7] Barczak T M. An overview of standing roof support practices and developments in the United States [C]// *Proceedings of the Third South African Rock Engineering Symposium*. Johannesburg, 2005: 301–334.
- [8] Cao S, Xue G L, Yilmaz E, et al. Utilizing concrete pillars as an environmental mining practice in underground mines [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123433.
- [9] Meng F B, Wen Z J, Shen B T, et al. Applicability of yielding-resisting sand column and three-dimensional coordination support in stopes [J]. *Materials*, 2019, 12 (16): 2635.
- [10] Mesgari S, Akbarnezhad A, Xiao J Z. Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: effects on mechanical properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236: 117571.
- [11] Barczak T M, Tadolini S C. Pumpable roof supports: an evolution in longwall roof support technology [J]. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, 2008, 324: 19–31.
- [12] Li K M, Li Y H, Jing H D. Evaluation of the active support and yielding bearing properties of artificial pillars supporting a stope roof using 3DEC numerical simulation [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 5934360.
- [13] Barrientos G, Parker J. Use of the pressure arch in mine design at White Pine [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1974, 11(10): 203–203.
- [14] Mark C, Listak J, Bieniawski Z. Yielding coal pillars-field measurements and analysis of design methods [C]// *The 29th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. Alexandria, 1988: 102.
- [15] Li Y H, Li K M, Feng X T, et al. Development and evaluation of artificial expandable pillars for hard rock mining [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110(8): 68–75.
- [16] 李坤蒙,李元辉,王者超,等. 硬岩采场新型预应力膨胀支柱的研发及应用 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(2): 213–219.
(Li Kun-meng, Li Yuan-hui, Wang Zhe-chao, et al. Development and application of a new pre-stressed expandable pillar in hard rock stope [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(2): 213–219.)
- [17] Barczak T M, Tadolini S C, McKelvey P. Hydraulic prestressing units: an innovation in roof support technology [C]// *Proceedings of 23rd International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, 2009: 286–294.
- [18] 李坤蒙. 硬岩采场人工膨胀矿柱承载机制及应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
(Li Kun-meng. Research on load bearing mechanism and application of artificial expandable pillars in hard rock stope [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.)
- [19] Suorineni F T, Mgumbwa J J, Kaiser P K, et al. Mining of orebodies under shear loading. Part 2: failure modes and mechanisms [J]. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 2014, 123 (4): 240–249.
- [20] Rashed G, Slaker B, Sears M M, et al. A parametric study for the effect of dip on stone mine pillar stability using a simplified model geometry [J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2021, 38(2): 967–977.
- [21] Li K M, Li Y H, Wang Z C, et al. Research on the enlargement of stope span based on the pre-stressed expandable pillar support technology [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 4663–4675.
- [22] 崔希民,缪协兴,苏德国,等. 岩层与地表移动相似材料模拟试验的误差分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21 (12): 1827–1830.
(Cui Xi-min, Miao Xie-xing, Su De-guo, et al. Error analysis in similar material simulation test of the movement of rocks strata and surface [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(12): 1827–1830.)
- [23] Ghabraie B, Ren G, Zhang X Y, et al. Physical modelling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 140: 71–83.
- [24] 曹建立. 多空区菱镁矿岩岩冒落规律及其应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
(Cao Jian-li. Study on faulling law and its application of magnesite orebody and rock with multi-mined-out areas [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.)
- [25] Cao J C, Zhang N, Wang S Y, et al. Physical model test study on support of super pre-stressed anchor in the mining engineering [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 118: 104833.