采场宽度及回采顺序对盘区间柱稳定性的影响*

叶会师[1],赵振兴[1],周咏[1],张文铎[1],张杰[2],马强英[3],路增祥[3]

(1.河北钢铁集团司家营研山铁矿有限公司, 河北 唐山市 063009;
2.中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
3.辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山市 114051)

摘要:为探究采场宽度与回采顺序对盘区间柱承载能力的影响,以司家营铁矿阶段空场嗣后充填采矿法盘区开采为工程背景,分析了不同盘区采场宽度和回采顺序下盘区间柱的应力响应与变形破坏特征,并选出最优回采方案。研究结果表明:采场宽度与盘区回采顺序共同影响着盘区间柱的应力响应特征,不同回采顺序下,随采场宽度增大,间柱内部最大主应力和最小压应力均呈现出增长趋势;采场宽度与盘区采场回采顺序共同影响着盘区间柱的变形破坏特征,相同回采顺序下,间柱位移量与塑性区体积均随采场宽度的增大而增大;相同的采场宽度下,间柱位移量和塑性区体积从高到低依次为"一侧推向另一侧""两侧推向中央""中央推向两侧"。综合考虑安全性与采场生产能力,最终确定该矿最优盘区采场回采方案为采场宽度为20 m、回采顺序为"中央推向两侧"。

关键词:阶段空场嗣后充填采矿法;采场宽度;回采顺序;应力响应;变形破坏
中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0021-07

Influence of Stope Width and Stoping Sequence on the Stability of Panel Pillars

Ye Huishi[1], *Zhao Zhenxing*[1], *Zhou Yong*[1], *Zhang Wenduo*[1], *Zhang Jie*[2], *Ma Qiangying*[3], *Lu Zengxiang*[3]

(1.Sijiaying Yanshan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron & Steel Group, Tangshan, Hebei 063009, China;
2.China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;
3.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: To investigate the influence of stope width and stoping sequence on the bearing capacity of panel pillars, this study takes the panel mining using the stage open-stope with subsequent backfill mining method in Sijiaying Iron Mine as the engineering background. The stress response and deformation failure characteristics of panel pillars under different stope widths and stoping sequences were analyzed, and the optimal mining scheme was selected. The research results are as follows. Firstly, stope width and panel stoping sequence jointly influence the stress response characteristics of panel pillars. Under different stoping sequences, both the maximum principal stress and the minimum compressive stress within the pillars exhibit an increasing trend as the stope width increases. Secondly, stope width and panel stoping sequence jointly influence the deformation failure characteristics of panel pillars. Under the same stoping sequence, both the displacement of the pillars and the volume of the plastic zone increase with the increase in stope width. Finally, under the same stope width, the displacement of the pillars and the volume of the plastic zone rank from high to low in the order of "from one side to the other" "from both sides to the center", and "from the center to both sides". Taking into account safety and production capacity of the stope, the optimal mining scheme for this mine has been determined to be a mining width of 20 meters and a mining sequence of "from the center to both sides".

Key words: Stage open-stope with subsequent backfill mining method, Stope width, Stoping sequence, Stress response, Deformation failure

0 引言

随着我国矿产资源绿色开采深入推进,空场嗣后充填采矿法在金属矿床地下开采中的应用日益广泛[1-2]。空场嗣后充填采矿法实施过程中,多以盘区为单元组织生产,盘区间柱是维护盘区围岩稳定性

* **收稿日期**:2025-06-01
基金项目:河钢集团重点科技项目(HG2023215)
作者简介:叶会师(1985—),男,辽宁辽阳人,高级工程师,主要从事采矿技术研究与管理工作。E-mail:381701261@qq.com
通信作者:路增祥(1965—),男,陕西富平人,博士,教授,主要从事金属矿床地下开采方面的教学与研究。E-mail:zengxiang_lu@sohu.com

的重要支撑结构[3-4],其与一步骤采场胶结充填体的协同作用在调控地压、控制围岩变形及预防地表沉陷方面发挥着重要作用[5-7]。矿柱失稳破坏极易诱发采空区失稳与地表沉陷[8],研究盘区间柱稳定性问题及其影响因素,可进一步提升空场嗣后充填采矿法的应用效果。

矿床地下开采过程中,盘区采场围岩的应力集中程度与位移变化是判断盘区及采场回采顺序合理性的重要依据[9]。基于这一依据,为提高采场稳定性,有效控制岩层移动,保障矿山生产安全,学者们从采动影响[10-11]、采场结构参数[12-13]及回采顺序[14-15]合理性等方面,对采场稳定性问题开展了大量研究。张亚伟等[16]以某铜矿盘区房柱法开采为例,研究了采场结构及回采顺序等因素对地表沉降、矿体顶板及围岩扰动的影响,确定了该矿地下开采的矿柱、矿房尺寸及矿体的回采顺序方案。甘德清等[17]针对河北某铁矿采用阶段空场嗣后充填采矿法开采,基于间柱承压机理分析间柱宽度,探究了 3 种不同开采顺序下 2 个矿房开挖时采场间柱最大主应力分布特征与变形破坏特征,确定了该矿盘区采场“隔一采一”的开采顺序方案,工业试验结果表明,采用该回采顺序,采场顶板与间柱稳定性良好。巩瑞杰等[5]探究了不同充填接顶率对空场嗣后充填采矿法盘区间柱承载特性的影响,认为充填接顶率越高,越有利于改善盘区间柱的应力分布状态与变形破坏特征。关士良等[18]针对甲玛铜多金属矿复杂厚大矿体盘区开采,通过研究 2 种盘区回采顺序下围岩应力与位移的动态响应特性,明确了盘区间隔回采的安全性优于连续回采。

盘区间柱的稳定性对于保障空场嗣后充填法采矿安全、控制地表变形与沉降具有重要意义[19-20]。国内外学者从不同角度进行了大量研究,并取得了诸多研究成果,但鲜有学者关注到盘区采场回采顺序对盘区间柱稳定性的影响。目前,司家营铁矿正处于露天转地下开采的前期研究阶段,盘区采场的合理回采顺序亟待明确。因此,本文以司家营铁矿露天转地下采用阶段空场嗣后充填采矿法开采为背景,设计盘区采场回采顺序方案,探究不同采场宽度及回采顺序下盘区间柱的应力、位移响应特征与塑性区扩展规律,评判盘区采场回采顺序对间柱稳定性的影响,最终确定合理的盘区采场回采顺序方案,为矿山生产提供指导。

1 盘区采场回采方案

1.1 回采方案

司家营铁矿区露天转地下开采设计中,针对极厚大矿体、厚矿体、中厚矿体及薄矿体开采,采用的采矿方法主要包括阶段空场嗣后充填采矿法、分段空场嗣后充填采矿法、分段充填采矿法和留矿全面嗣后充填采矿法,各采矿方法的应用占比分别为 59.83%、23.29%、15.82%和 1.06%。因此,基于阶段空场嗣后充填采矿法的盘区开采,研究采场宽度与回采顺序对盘区间柱稳定性的影响,对于保障该矿开采过程中盘区围岩稳定、控制地表变形与沉陷[21-23]具有重要意义。

该矿阶段空场嗣后充填采矿法开采设计以盘区为单元,盘区内采场分两步骤开采:一步骤采场按“隔一采一”的方式回采,二步骤采场按“隔三采一”的方式回采。盘区垂直矿体走向布置,长度为 120 m,宽度为矿体厚度,中段高度为 60 m,盘区间柱厚度为 20 m。盘区内一、二步骤矿块垂直矿体走向间隔布置,矿块尺寸一致,宽度为 20 m,长度为矿体厚度,回采高度为 60 m。

1.2 盘区采场回采顺序

盘区间柱是维护盘区围岩稳定的主要承载结构,地下采场回采过程中,采矿扰动引起的原岩应力重分布是随开挖空间变化而不断发生变化的动态过程。由于开采盘区由多个采场组成,采场回采顺序会对原岩应力重分布产生不同影响,进而影响盘区间柱的受力与破坏特征。

根据司家营铁矿盘区采场可能的回采顺序,将其划分为三种方案:采场从盘区“一侧推向另一侧”、从“中央推向两侧”,以及“两侧推向中央”,如图 1 所示,图中 1~10 代表盘区内各采场回采顺序。

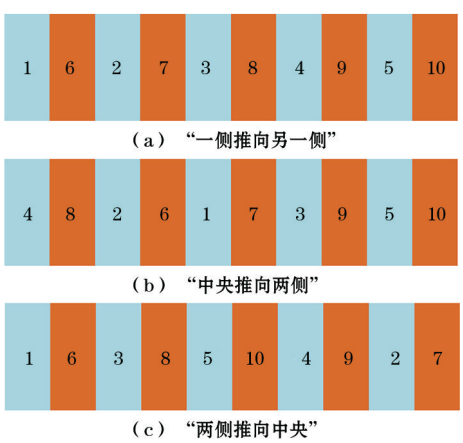


图 1 盘区采场回采顺序方案

Fig.1 Mining sequence schemes of stopes in the panel

2　盘区间柱稳定性分析

2.1　计算模型

根据司家营铁矿开采技术条件及空场嗣后充填采矿法盘区开采方案，建立矿山开采三维数值模型，如图 2 所示。模型 X 方向(沿矿体走向)长度为 1 725 m，Y 方向(沿矿体倾向)长度为 1 928 m，Z 方向(重力方向)长度为 1 310 m。模型共划分单元网格 240 616 个、节点 126 410 个。

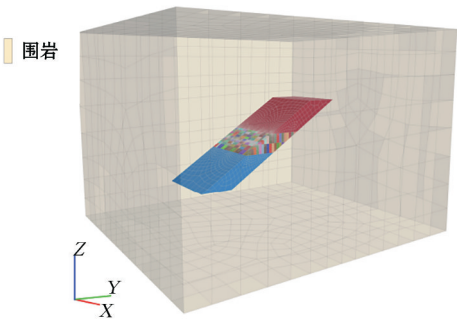


图 2　矿山开采三维模型

Fig.2　Three dimensional model of mine mining

计算模型采用固定边界条件，约束 X、Y 方向以及模型底部位移，并对模型整体施加重力场。充填体采用理想弹塑性材料，围岩和矿体均采用摩尔-库仑屈服准则，表达式为：

$$f_s=\sigma_1-\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\sigma_3-2c\frac{\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{1}$$

式中：f_s 为材料发生破坏的临界值，MPa；σ_1 和 σ_3 分别为材料内部的最大、最小主应力，MPa；φ 为内摩擦角，(°)；c 为黏聚力，MPa。

当 $f_s\geqslant 0$ 时，材料发生剪切破坏。在拉应力状态下，若拉应力值超过材料的抗拉强度，则材料发生拉伸破坏。

模拟计算采用的矿岩与充填体力学性质参数[5]见表 1。

表 1　矿岩与充填体力学性质参数

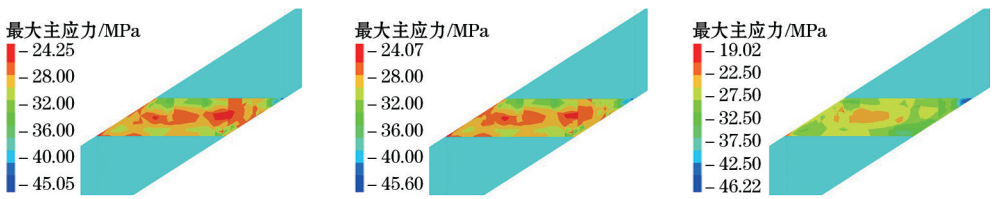
Table 1　Parameters of mechanical properties of ore-rock mass and backfill body

材料	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg/m³)
矿体	12.80	23.0	2.00	12.00	46.68	3 163
围岩	9.40	15.7	2.10	6.00	34.48	2 700
充填体	0.23	0.3	0.23	0.27	36.87	1 450

为研究采场宽度与回采顺序对盘区间柱稳定性的影响，基于图 2 所示的模型，构建全因子组合模拟方案：采场宽度为 18 m、20 m 和 22 m，回采顺序为“一侧推向另一侧”“中央推向两侧”“两侧推向中央”，共 9 组模拟方案，系统分析了盘区间柱的应力响应、变形破坏及塑性区演化特征。

2.2　盘区间柱应力场响应特征

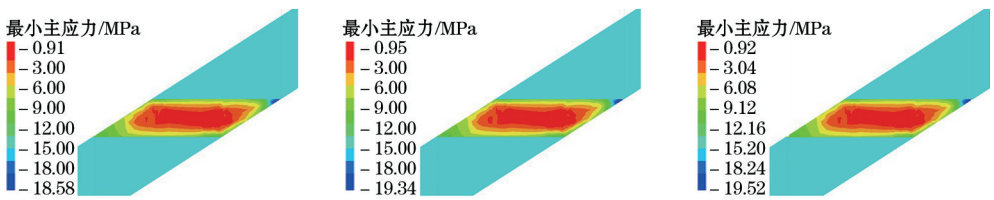
对图 2 所示的模型进行模拟计算，得到了不同条件下盘区间柱内部的最大主应力和最小主应力分布特征。为节省篇幅，仅给出采场宽度为 20 m 时，3 种回采顺序下的盘区间柱应力场分布特征，如图 3、图 4 所示。



(a)　“一侧推向另一侧”　(b)　“中央推向两侧”　(c)　“两侧推向中央”

图 3　不同回采顺序下盘区间柱的最大主应力分布特征

Fig.3　Distribution characteristics of maximum principal stress of panel pillars under different stoping sequences



(a)　“一侧推向另一侧”　(b)　“中央推向两侧”　(c)　“两侧推向中央”

图 4　不同回采顺序下盘区间柱的最小主应力分布特征

Fig.4　Distribution characteristics of minimum principal stress of panel pillars under different stoping sequences

由数值模拟结果可知,不同的采场宽度条件及3种回采顺序组合下,盘区间柱的应力响应主要表现出以下特征。

(1) 不同盘区采场回采顺序下,随着采场宽度增大,盘区间柱内部最大主应力均呈增长态势,其分布范围主要集中在盘区间柱上盘顶角和下盘底角部位。采场宽度从18 m增大到22 m的条件下,盘区采场按“一侧推向另一侧”的顺序回采时,盘区间柱内部最大主应力为44.4～49.9 MPa。盘区采场按“中央推向两侧”的顺序回采时,盘区间柱内部最大主应力为45.5～49.8 MPa;盘区采场按“两侧推向中央”的顺序回采时,盘区间柱内部最大主应力为45.9～49.4 MPa。

(2) 不同盘区采场回采顺序下,随着采场宽度增大及间柱内部应力释放,盘区间柱内部最小压应力均呈现出增大的趋势,其分布范围主要位于盘区间柱中部。采场宽度从18 m增大到22 m的条件下,盘区采场按“一侧推向另一侧”的顺序回采时,间柱内部的最小压应力从0.36 MPa增大到了1.33 MPa;盘区采场按“中央推向两侧”的顺序回采时,最小压应力从0.34 MPa增大到了1.36 MPa;盘区采场按“两侧推向中央”的顺序回采时,最小压应力从0.34 MPa增大到1.35 MPa。

(3) 当采场宽度为20 m时,3种盘区采场回采顺序下,盘区间柱内部的最大主应力分别为45.05 MPa(“一侧推向另一侧”)、45.60 MPa(“中央推向两侧”)、46.22 MPa(“两侧推向中央”);应力释放后的最小压应力分别为0.91 MPa、0.95 MPa和0.92 MPa。

对比不同回采顺序下间柱应力分布情况可知,盘区采场回采及充填完成后,间柱内部最终应力分布情况基本一致。因盘区采场回采顺序的差异,采用“两侧推向中央”顺序回采时,盘区间柱的应力集中程度较小;采场宽度越大,盘区间柱内部产生的局部集中应力越大,越不利于盘区间柱保持稳定。

2.3 盘区间柱变形破坏特征

基于上述9种模拟方案,分析了3种采场宽度与3种回采顺序下盘区间柱的位移变化情况和塑性区扩展特征。采场宽度为20 m时的典型位移分布与塑性区扩展特征如图5、图6所示。

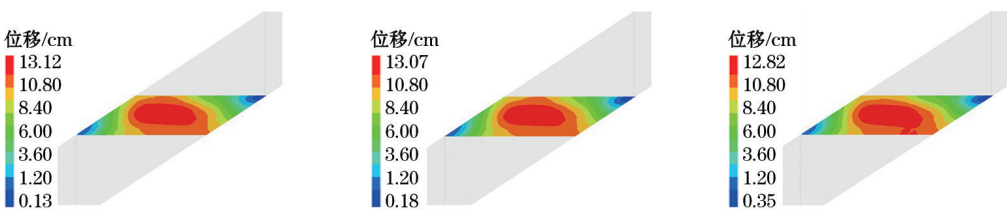


图5 不同回采顺序下盘区间柱位移变形特征

Fig.5 Displacement and defoemation characteristics of panel pillars under different stoping sequences

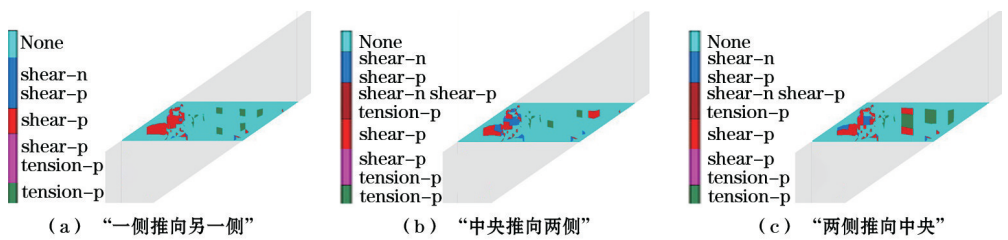


图6 不同回采顺序下盘区间柱塑性区破坏特征

Fig.6 Failure characteristics of plastic zone of panel pillars under different stoping sequences

由数值模拟结果可知,不同的采场宽度条件及3种回采顺序组合下,盘区间柱的变形破坏主要表现出以下特征。

(1) 不同的盘区采场回采顺序下,盘区间柱位移呈现“中部最大”的特征,随着采场宽度增大位移量递增,但分布范围基本不变。采场宽度从18 m增大到22 m的条件下,盘区采场按“一侧推向另一侧”顺序回采时,位移增量最大,从113.9 mm增至143.7 mm;“两侧推向中央”次之,位移量从111.0 mm增至139.8 mm;“中央推向两侧”位移增量最小,从113.4 mm增至142.0 mm。

当采场宽度为20 m时,3种盘区采场回采顺序

下，盘区间柱的最大位移量分别为 131.2 mm(“一侧推向另一侧”)、130.7 mm(“中央推向两侧”)、128.2 mm(“两侧推向中央”)。

(2) 从盘区间柱的塑性区分布情况来看，不同盘区采场回采顺序下间柱内部均存在一定范围的塑性破坏区域，且破坏范围随采场宽度的增加而增大。

“一侧推向另一侧”回采顺序下，采场宽度为 18 m 时，间柱内部出现少量的张拉和剪切塑性破坏区，主要分布于间柱中部；采场宽度为 20 m 时，张拉与剪切塑性破坏区进一步增大，并在靠近上盘位置形成大面积剪切塑性区，该区域破坏风险极高；采场宽度为 22 m 时，塑性破坏区向间柱中部转移，且间柱下部也出现一定范围的塑性破坏，但未形成贯通，表明间柱整体基本稳定。

“中央推向两侧”回采顺序下，采场宽度为 18 m 时，间柱内部出现一定范围的塑性破坏区域；采场宽度增至 20 m 时，张拉和剪切塑性破坏区进一步扩大；采场宽度增至 22 m 时，塑性破坏区域向间柱中部转移并持续扩展，盘区间柱破坏风险增大。

“两侧推向中央”回采顺序下，盘区间柱内部塑性破坏区域的范围及其扩展规律，与“中央推向两侧”回采顺序基本一致。

对比不同回采顺序下间柱应力、位移和塑性区发展情况可知：3 种回采顺序下，间柱最大集中应力均超过 45 MPa；“中央推向两侧”回采顺序的塑性破坏范围最小，“一侧推向另一侧”回采顺序下间柱位移量和塑性破坏区范围均最大。

2.4　盘区间柱塑性破坏区体积变化规律

为进一步研究不同采场宽度与回采顺序下盘区间柱的塑性区扩展规律，采用 FLAC3D 内置的 FISH 语言，编制盘区间柱塑性破坏区域统计代码，提取盘区间柱内部塑性破坏区体积。

基于采场开挖及充填后盘区间柱塑性区分布，统计采场宽度分别为 18 m、20 m 和 22 m，以及 3 种回采顺序条件下的盘区间柱塑性区破坏体积，如图 7 所示。

由图 7 可以看出，同一中段回采时，盘区间柱塑性破坏范围与回采顺序、采场宽度均相关，具体表现为：随着采场宽度的逐渐增大，盘区间柱破坏区域呈扩大趋势；采用“一侧推向另一侧”的回采顺序时，盘区间柱塑性破坏范围最大，“两侧推向中央”次之，“中央推向两侧”最小。

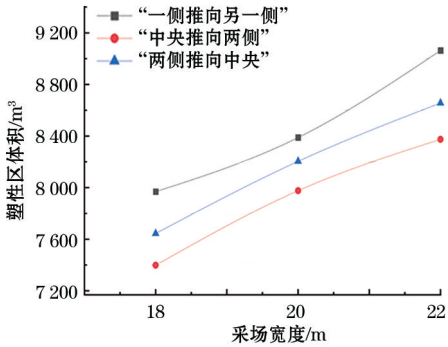


图 7　盘区间柱塑性区体积变化规律

Fig.7　Variation law of plastic zone volume in panel pillars

自然界岩石具有抗压能力强而抗拉能力弱的特性，工程岩体的抗拉强度远低于抗压强度，因此，当外界应力作用于盘区间柱时，张拉破坏对盘区间柱的稳定性最为不利，更易引发矿柱失稳。为分析采场宽度对盘区间柱塑性区演化的影响，分别统计剪切破坏区和张拉破坏区体积，得到 9 种工况下张拉破坏占总塑性破坏体积的比例，如图 8 所示。

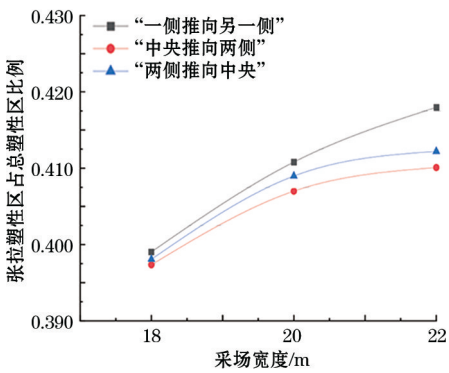


图 8　盘区间柱张拉塑性破坏体积占比

Fig.8　Proportion of tensile plastic failure volume of panel pillars

由图 8 可以看出，3 种回采顺序下，盘区间柱张拉塑性破坏区域占比随采场宽度的增大而增大，表明采场宽度的增大更易导致盘区间柱产生张拉破坏。其中“一侧推向另一侧”开采顺序下，采场宽度为 22 m 时，张拉塑性区占比最大。在相同采场宽度下，盘区间柱张拉塑性区占总塑性区的比例从高到低依次为：“一侧推向另一侧”“两侧推向中央”“中央推向两侧”。

综上所述，基于司家营铁矿阶段空场嗣后充填采矿法盘区开采方案，采用“中央推向两侧”的盘区采场回采顺序、采场宽度为 18 m 时，盘区间柱内部产生的塑性破坏体积最小，且张拉塑性破坏区体积

的占比最低。但综合考虑采场结构参数对矿山生产能力的影响,在保障安全生产的前提下,采场宽度可增加至 20 m。

3 结论

(1) 以司家营铁矿露天转地下阶段空场嗣后充填采矿法盘区开采方案为背景,基于盘区内采场宽度变化及 3 种回采顺序,明确了盘区开采时盘区间柱的应力场响应与变形破坏特征,确定了该矿最优开采方案:盘区采场宽度为 20 m,回采顺序为"中央推向两侧"。该方案能有效发挥盘区间柱的承载能力。

(2) 采场宽度与盘区采场回采顺序共同影响盘区间柱内部的应力响应特征。不同盘区采场回采顺序下,随采场宽度的增大,盘区间柱内部最大主应力主要集中于间柱的上盘顶角和下盘底角,并呈增长趋势;间柱内部应力释放后,最小压应力主要分布于盘区间柱的中部,其值亦随采场宽度增大呈增长趋势。

(3) 采场宽度与盘区采场回采顺序共同影响盘区间柱的变形破坏特征。相同盘区采场回采顺序下,随采场宽度的增大,盘区间柱位移量也增大,最大位移量位于间柱中上部;相同的采场宽度下,盘区间柱内位移量与塑性区体积从高到低依次为:"一侧推向另一侧""两侧推向中央""中央推向两侧"。

(4) 阶段空场嗣后充填采矿法盘区开采过程中,一步骤胶结充填体与盘区间柱协同作用,可对盘区围岩变形起到控制作用。本研究的局限性在于仅研究了盘区采场宽度与回采顺序对盘区间柱应力场响应特征和变形破坏特征的影响,尚未深入考虑一步骤胶结充填体的协同支撑作用,但研究结果仍对矿山实际生产具有重要的指导价值。

参考文献(References):

[1] 路增祥,李角群,马强英.中国空场嗣后充填采矿法研究进展与展望[J].金属矿山,2026(1):22-41.
Lu Zengxiang, Li Jiaoqun, Ma Qiangying. Research progress and prospects of open-stope mining with subsequent filling method in China[J]. Metal Mine, 2026(1):22-41.

[2] 刘志义,李国斌,甘德清,等.阶段空场嗣后充填采矿法采场长度优化及工程应用[J].矿业研究与开发,2023,43(11):12-17.
Liu Zhiyi, Li Guobin, Gan Deqing, et al. Stope length optimization and engineering application of stage open stope with subsequent filling mining method[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(11):12-17.

[3] 张少杰,刘育明,张爱民.深井超大面积开采盘区矿柱承载作用研究[J].中国矿山工程,2021,50(6):7-10+15.
Zhang Shaojie, Liu Yuming, Zhang Aimin. Study on the load-bearing function of pillars in super large mining panels of deep shafts[J]. China Mine Engineering, 2021, 50(6):7-10+15.

[4] 付建新,曹帅,宋卫东,等.考虑初始缺陷的超高矿柱蠕变分析及失稳滞后时间研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(2):279-284.
Fu Jianxin, Cao Shuai, Song Weidong, et al. Creep analysis and delay time of instability of ultrahigh pillar considering initial imperfections[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2):279-284.

[5] 巩瑞杰,叶会师,张杰,等.充填接顶率对空场嗣后充填法开采围岩变形规律的影响[J].金属矿山,2026(3):55-62.
Gong Ruijie, Ye Huishi, Zhang Jie, et al. Effect of backfill quality on deformation law of surrounding rock in open stoping with subsequent backfill mining[J]. Metal Mine, 2026(3):55-62.

[6] 邹平,贺超,李爱兵,等.某缓倾斜铁矿采场结构参数与开采顺序优化研究[J].矿冶工程,2020,40(2):37-42.
Zou Ping, He Chao, Li Aibing, et al. Optimization of stope structural parameters and mining sequence of a slightly inclined iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(2):37-42.

[7] 张中信,吴顺川,程海勇,等.高应力环境水平矿柱稳定性对回采顺序响应特征[J].矿业研究与开发,2021,41(2):14-19.
Zhang Zhongxin, Wu Shunchuan, Cheng Haiyong, et al. Response characteristics of horizontal pillar stability to stoping sequence in high stress environment[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(2):14-19.

[8] 朱万成,董航宇,刘溪鸽,等.金属矿山多矿柱承载与失稳破坏研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(4):5-31.
Zhu Wancheng, Dong Hangyu, Liu Xige, et al. Review of bearing and instability of multi-pillar in metal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4):5-31.

[9] 安龙,徐帅,任少峰,等.深部厚大矿体回采顺序设计及优化研究[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(11):1642-1646.
An Long, Xu Shuai, Ren Shaofeng, et al. Study on design and optimization of mining sequence for deep and large ore body[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(11):1642-1646.

[10] 贾尚伟,王海洋,徐壮飞,等.采动扰动下阶段嗣后充填采场失稳模式综合分析[J].矿冶,2024,33(3):371-377+408.
Jia Shangwei, Wang Haiyang, Xu Zhuangfei, et al. Comprehensive analysis of failure modes in sublevel backfill stopes under mining disturbance[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3):371-377+408.

[11] 张飞,杨天鸿,胡高建.复杂应力扰动下围岩稳定性评价与采场参数优化[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(5):699-704.
Zhang Fei, Yang Tianhong, Hu Gaojian. Stability evaluation of surrounding rock and parameter optimization of stope under complex stress disturbance [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2018,39(5):699-704.

[12] Li Chuanyu, Liu Guangsheng, Guo Lijie, et al. A new CRITIC-GRA model for stope dimension optimization considering open stoping stability, mining capacity and costs [J]. Applied Sciences,2024,14(12):5249.

[13] 刘大可,张浩强,郭翔,等.帕鲁特金矿破碎矿体嗣后充填采矿法采场结构参数优化[J].矿业研究与开发,2025,45(1):32-40.
Liu Dake, Zhang Haoqiang, Guo Xiang, et al. Optimization of stope structure parameters of subsequent filling mining method for broken ore body in Pakrut Gold Mine[J]. Mining Research and Development,2025,45(1):32-40.

[14] 黄聪,魏超城,丘永富.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC3D 的阿舍勒铜矿深部回采方案优化研究[J].中国矿业,2023,32(11):168-177.
Huang Cong, Wei Chaocheng, Qiu Yongfu. Optimization of deep stoping scheme in Ashele Copper Mine based on modified Mathews stability graph method and FLAC3D[J]. China Mining Magazine,2023,32(11):168-177.

[15] 张良兵,毛德华,李杰林,等.朱兰铁矿深部急倾斜厚大矿体回采顺序优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(3):26-31.
Zhang Liangbing, Mao Dehua, Li Jielin, et al. Study on mining sequence optimization of deep steeply inclined large and thick ore body in Zhulan Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(3):26-31.

[16] 张亚伟,郭进平.缓倾斜极薄矿体空场法开采方案优化分析[J].化工矿物与加工,2016,45(6):37-40.
Zhang Yawei, Guo Jinping. Optimization analysis of mining scheme with open-stope method for gently inclined ultrathin ore body[J]. Industrial Minerals & Processing,2016,45(6):37-40.

[17] 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.

[18] 关士良,陈国良,王志修,等.甲玛铜多金属矿盘区合理回采顺序动态模拟研究[J].有色金属(矿山部分),2019,71(1):5-9.
Guan Shiliang, Chen Guoliang, Wang Zhixiu, et al. Study on dynamic simulation of reasonable stoping sequence in panel of Jiama copper-polymetallic deposit[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2019,71(1):5-9.

[19] Bahuquna P P. Subsidence studies in Indian coalfields by a semi-empirical approach[J]. LAHS-AISH Publication,1995 (234):127-133.

[20] Wu Hai, Zhang Nong, Wang Weijun, et al. Characteristics of deformation and stress distribution of small coal pillars under leading abutment pressure[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2015,25(6):921-926.

[21] 徐钊.某矿山地下开采对地表河流安全性影响的研究[J].黄金,2023,44(3):20-25.
Xu Zhao. Research on the influence of underground mining of a mine on the safety of the rivers on the surface[J]. Gold, 2023,44(3):20-25.

[22] 张超,宋卫东,付建新,等.深部复杂金矿体充填开采对地表建筑物稳定性影响[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(8):1143-1151+1158.
Zhang Chao, Song Weidong, Fu Jianxin, et al. Impact on the stability of surface construction by filling method of deep complex gold ore body [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(8): 1143-1151+1158.

[23] 张宝,李永辉,盛佳.深部高应力破碎矿床下向进路充填采矿法盘区卸荷回采应用研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):6-11.
Zhang Bao, Li Yonghui, Sheng Jia. Application research on panel unloading mining of downward drift filling mining method in deep broken deposit under high stress[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):6-11.