司家营露天转地下开采盘区采场回采顺序优化*

荣辉[1],陈彦亭[2],赵凯[3],李万涛[1],张杰[4],马强英[5],路增祥[5]

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

摘要:以司家营铁矿露天转地下开采阶段空场嗣后充填采矿法盘区开采为背景,提出了"一侧推向另一侧""中央推向两侧"和"两侧推向中央"3种采场回采顺序方案。采用数值模拟方法,研究了不同回采顺序下盘区采场围岩的应力场分布特征、位移变化与塑性区扩展规律,确定"中央推向两侧"为该矿的最优回采顺序方案。结果表明:3种回采顺序方案下,盘区采场围岩应力释放后的压应力值、围岩的拉应力和围岩内部产生的最大位移值,均呈现出"中央推向两侧"<"两侧推向中央"<"一侧推向另一侧"的变化规律;在"中央推向两侧"回采顺序下,围岩应力释放后的压应力值为1.58 MPa、最大拉应力为0.35 MPa,围岩内部产生的最大位移值为37.65 mm,均优于其他方案;盘区开采后,围岩内总塑性区体积、张拉塑性区与总塑性区的体积比,表现出了与围岩应力场和位移场相同的变化规律,其中"中央推向两侧"方案下,围岩塑性破坏区的总体积为34.73×10^4 m^3,张拉塑性区体积占比为60.60%,均优于其他方案。研究结果对指导矿山露天转地下开采设计及生产具有重要意义。

关键词:露天转地下开采;阶段空场嗣后充填采矿法;盘区采场;回采顺序;中央推向两侧

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0074-08

Optimization of Stope Mining Sequence in Panel Mining During the Transition from Open-Pit to Underground Mining at Sijiaying Mine

RONG Hui[1], *CHEN Yanting*[2], *ZHAO Kai*[3], *LI Wantao*[1], *ZHANG Jie*[4], *MA Qiangying*[5], *LU Zengxiang*[5]

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

Abstract: Against the backdrop of panel mining utilizing the stage open stoping with subsequent backfill method during the transition from open-pit to underground mining at Sijiaying Iron Mine, three stope mining sequence schemes were proposed: "from one side to the other""from the center to both sides", and "from both sides to the center". A numerical simulation approach was employed to investigate the stress field distribution characteristics, displacement variations, and plastic zone propagation laws of the surrounding rock in the panel stope under different mining sequences. Ultimately, the "from the center to both sides" sequence was determined to be the optimal mining scheme for this mine. The results are shown as follows. Firstly, across the three mining schemes, the compressive stress following stress release, the tensile stress, and the maximum internal displacement within the surrounding rock consistently exhibit a trend of "from the center to both sides"<"from both sides to the center"<"from one side to the other". Secondly, under the "from the center to both sides" scheme, the

* **收稿日期**:2025-04-02
基金项目:河钢集团有限公司重点科技项目(HG2023215)
作者简介:荣辉(1988—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事采矿技术研究与管理工作。E-mail:1015143666@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

compressive stress and maximum tensile stress of the surrounding rock following stress release are 1.58 MPa and 0.35 MPa, respectively, with a maximum internal displacement of 37.765 mm; these values are universally superior to those of the other two schemes. Finally, following panel extraction, the total volume of the plastic zone in the surrounding rock, and the volume ratio between the tensile plastic zone and the total plastic zone, exhibit the same variation law as the surrounding rock stress field and displacement field. Specifically, the "from the center to both sides" scheme yields a total plastic failure volume of 34.73×10^4 m^3 and a tensile plastic zone ratio of 60.60%, both of which outperform the alternative schemes. These findings hold significant implications for guiding the design and future production of the mine during its transition from open-pit to underground operations.

Key words: Transition from open-pit to underground mining, Stage open stoping with subsequent backfill, Panel stope, Mining sequence, From the center to both sides

0 引言

目前,空场嗣后充填采矿法因其回采强度大、生产能力高、回采作业安全,且能有效处理空区、控制岩层移动变形等优势,在金属矿地下开采中应用广泛[1-2]。然而,受诸多因素影响,该方法在实施过程中仍暴露出一些问题,影响了其应用效果,如采场结构参数和回采顺序对回采过程和围岩稳定性的影响[3-4];充填体结构和稳定性对控制围岩变形和地表沉降的影响[5-7];爆破作业对采场底部结构和一步骤采充填体的破坏[8-9]等。这些问题引发了国内外矿山科技工作者的广泛关注[10-11]。

在地下矿床开采过程中,合理的采场构参数与回采顺序有利于控制采场地压、约束围岩变形、保障回采安全、抑制地表沉降,从而实现资源的绿色、安全、高效开采[12-13]。目前,关于采场结构参数与回采顺序的优化研究,主要通过数值模拟方法,分析围岩的应力场演变特征、位移场的变化特征和塑性区的扩展规律,从而评估采场围岩的稳定性,确定合理的采场结构参数与回采顺序。例如,张瑞明等[3]采用 FLAC3D 数值模拟,研究了某矿在阶段空场嗣后充填采矿法开采中,4 种采场跨度(16 m、18 m、20 m、22 m)和两种回采顺序("隔一采一"和"隔二采一")对采场稳定性的影响,得到了最优的一、二步骤采场跨度和回采顺序。龚永林等[13]以高寒高海拔地区地下矿山为背景,研究了"隔五采二、随采随充、采场内从一侧向另一侧依次回采"原则下,3 种盘区整体回采顺序方案对采场稳定性的影响,提出了同中段相邻盘区、上下中段盘区的回采顺序方案,为矿山安全高效开采提供了理论依据。楚长青等[14]采用数值模拟方法,研究了眼前山铁矿在露天转地下开采过程中,4 种回采顺序(从左向右、从右向左、从中间向两端和从两端向中间)下围岩的稳定性问题,得出了不同回采顺序下采场围岩的应力演变特征与采场顶板沉降规律,为预测该矿露天转地下过渡期地下开采的潜在灾害提供了参考。任卫东等[15]研究了某矿山采用分段空场嗣后充填采矿法回采时,不同中段开采顺序下采场的围岩应力与位移的变化情况,为该矿实现集约化和规模化开采提供了依据。王超佩等[16]采用数值模拟方法,研究了某铜多金属矿分段嗣后充填采矿法开采时,盘区内采场在 4 种采场结构参数及 3 种回采顺序(从南向北、从北向南和从中间到两边)下的稳定性,为解决采场顶板及侧帮垮落等问题提出了技术方案。邹平等[17]采用理论计算与数值模拟相结合的方法,研究了某铁矿缓倾斜矿床开采的采场结构参数与开采顺序,提出了有利于控制地压、回采矿柱和保护地表建(构)筑物的"棋盘式"矿房、矿柱布置方案。

诸多研究表明,合理的回采顺序是深部矿体安全高效回采的关键,可以最大限度地降低高地应力的集中,有利于提高采场稳定性,保证矿体回采的安全[18-19]。因此,研究盘区和采场的结构参数与回采顺序,确保回采安全和有效控制地表变形与沉降,是空场嗣后充填采矿法采矿研究的重要内容之一[1]。司家营铁矿区因地表地形条件限制,不具备平面扩界的条件,且对地表沉降有着严格的限制,目前正处于露天转地下开采关键技术的研究阶段。矿区未来转入地下开采后,将主要以阶段空场嗣后充填采矿法开采深部资源。由于盘区内采场数量较多,探索合理的盘区采场回采顺序,对有效控制地表沉降和确保安全高效生产具有重要意义。因此,本文拟采用数值模拟方法,研究不同盘区采场回采顺序下围

岩应力场分布特征、位移场演化规律和塑性区的扩展规律,进而确定盘区采场的最优回采顺序,为矿山露天转地下开采设计和未来采矿生产提供理论依据。

1 采矿方法设计概况

司家营铁矿区经过十几年的露天开采,现已进入深凹露天开采阶段。由于该矿露天采场东侧(下盘)邻新滦河,西侧(下盘)邻平青乐公路,不具备平面扩界的条件。因此,露天转地下开采的设计与研究工作迫在眉睫。

根据矿区矿床赋存特征、开采技术条件、开采环境,以及目前司家营露天开采尾矿排放面临的难题,设计单位推荐了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 4 种采矿方案,分别用于回采极厚大矿体、厚矿体、中厚矿体和薄矿体。依据矿区露天转地下开采可行性研究报告,4 种采矿方法的应用占比分别为 59.83%、23.29%、15.82% 和 1.06%,可见,阶段空场嗣后充填采矿法为该矿转地下开采后的主要采矿方法。因此,以阶段空场嗣后充填采矿法的盘区开采为研究对象,对该矿采场回采顺序进行优化研究,对确保该矿转地下开采后的盘区围岩稳定性,并进一步实现对地表变形与沉降的有效控制[20-22],具有重要指导意义。

该矿的阶段空场嗣后充填采矿法以盘区为生产单元,盘区垂直矿体走向布置,长度为 120 m,宽度为矿体厚度,回采高度为 60 m。沿矿体走向每隔 240 m 在矿体下盘设一条矿石溜井,同时在上盘设一条回风天井。盘区内垂直矿体走向间隔布置一步骤采场和二步骤采场,一步骤采场和二步骤采场的矿块尺寸相同,矿块长为矿体厚度,矿块宽度为 20 m,矿块高度 60 m(即中段高度)。

回采时,一步骤采场按“隔一采一”、二步骤采场按“隔三采一”的方式进行回采。

2 盘区采场回采顺序优化

根据盘区采场的布置情况和可能存在的采场回采顺序,盘区采场的回采顺序可分为“一侧推向另一侧”“中央推向两侧”和“两侧推向中央”。具体方案如图 1 所示。

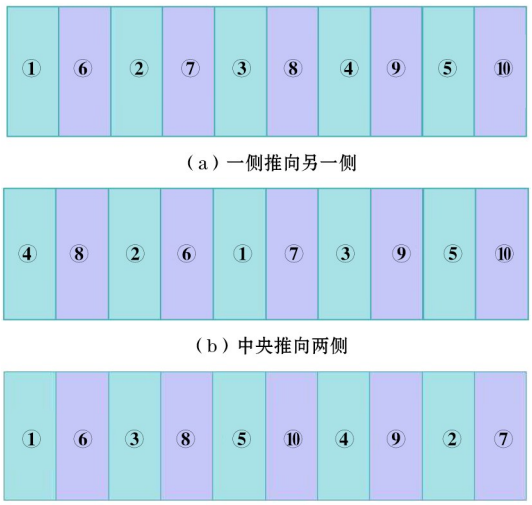


图 1 盘区采场回采顺序

Fig.1 Stoping sequence of the panel stopes

对于图 1 所示盘区采场回采顺序,盘区内的一步骤采场仍按“隔一采一”、二步骤采场仍按“隔三采一”的方式进行回采。

3 盘区采场稳定状态分析

3.1 盘区采场结构模型

为了研究盘区内各采场在不同回采顺序下的稳定性特征,建立了如图 2 所示的盘区采场结构模型。

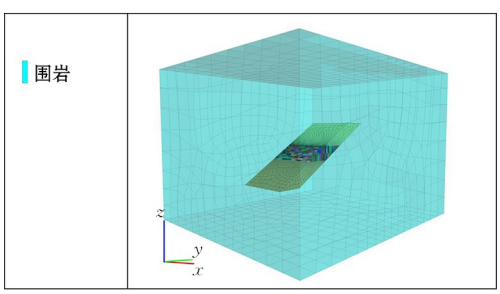


图 2 矿山开采三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of mining

计算模型范围:x 方向(矿体走向)长 1 725 m,y 方向(矿体倾向)宽 1 928 m,z 方向(重力方向)为 1 310 m,模型划分单元网格 283 735 个、节点 144 780 个。

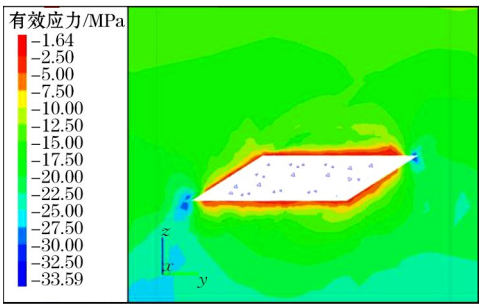
模型边界条件设置为:约束 x、y 方向及模型底部不发生任何位移,并对模型整体施加重力场。假设围岩为理想弹塑性材料,采用 Mohr-Coulomb 本构模型,充填体亦采用 Mohr-Coulomb 本构模型。

3.2 盘区采场围岩的应力场分布特征

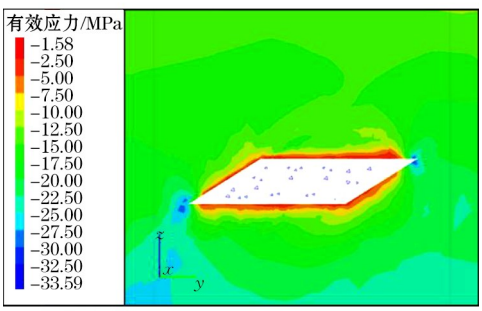
3.2.1 不同回采顺序下的最大主应力分布

对图 2 所示的模型进行模拟计算,得到了“一侧

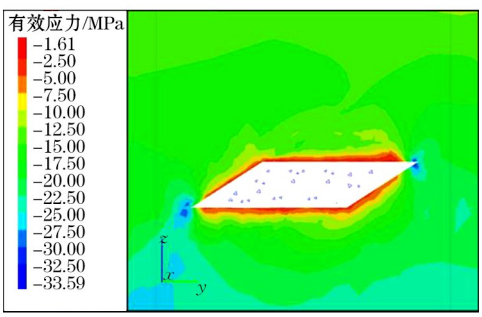
推向另一侧”“中央推向两侧”和“两侧推向中央”3种回采顺序下,盘区采场围岩的最大主应力分布特征,如图3所示。



(a) 一侧推向另一侧



(b) 中央推向两侧



(c) 两侧推向中央

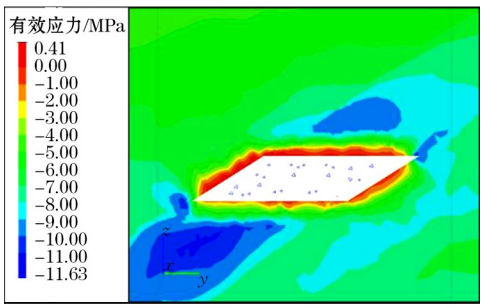
图3 不同回采顺序下盘区采场的最大主应力分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of maximum principal stress in the panel stope under different stoping sequences

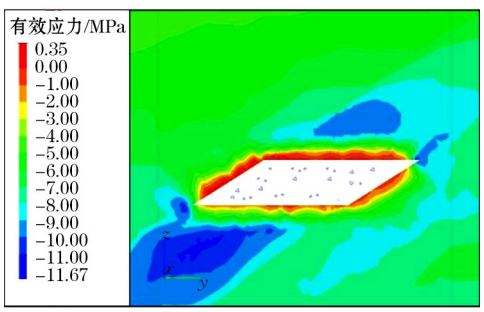
分析图3可知,在3种回采顺序下,盘区采场的围岩最大主应力均分布在盘区的上盘和下盘采场,应力值约为33.5 MPa。但开采区域采场围岩应力释放后的压应力值有所不同,其中“一侧推向另一侧”为1.64 MPa,“中央推向两侧”为1.58 MPa,而“两侧推向中央”为1.61 MPa,表现出“中央推向两侧”<“两侧推向中央”<“一侧推向另一侧”的变化规律。

3.2.2 不同回采顺序下的最小主应力分布

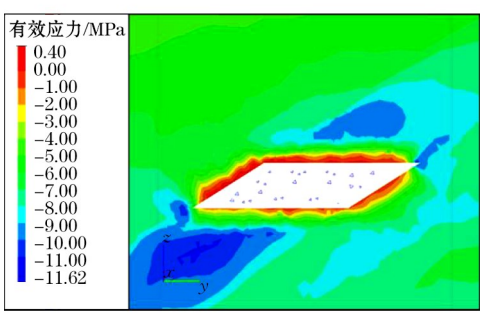
图4给出了3种回采顺序下,盘区采场围岩的最小主应力分布特征。



(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采场的最小主应力分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of minimum principal stress in the panel stope under different stoping sequences

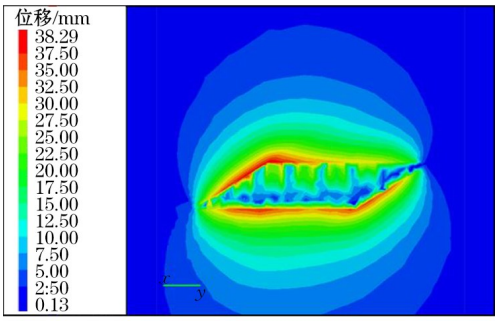
分析图4可知,在3种回采顺序下,盘区采场的围岩拉应力主要分布在盘区采场的顶板和底板,但最大拉应力的值各不相同,其中“一侧推向另一侧”为0.41 MPa,“中央推向两侧”为0.35 MPa,而“两侧推向中央”为0.40 MPa。最大拉应力值的变化也表现出了“中央推向两侧”<“两侧推向中央”<“一侧推向另一侧”的规律。在3种回采顺序下,盘区采场顶板和底板附近围岩产生的最大拉应力值均未超过该矿矿体的抗拉强度(2 MPa)。若拉应力超过矿体的抗拉强度,则采场顶板将很容易出现冒落现象。

3.3 盘区采场围岩变形破坏特征

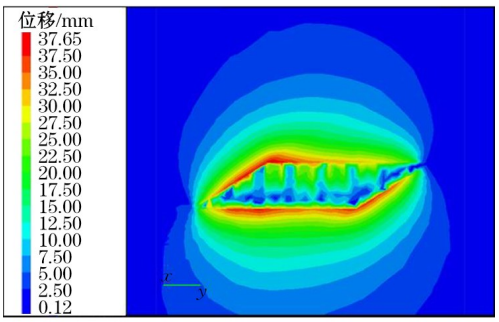
3.3.1 盘区采场围岩的位移变化特征

通过数值模拟,得到了在“一侧推向另一侧”“中央推向两侧”和“两侧推向中央”3种回采顺序下,盘

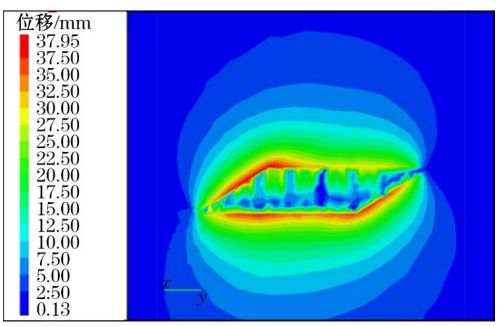
区采场围岩的位移变化情况,如图 5 所示。



(a) 一侧推向另一侧



(b) 中央推向两侧



(c) 两侧推向中央

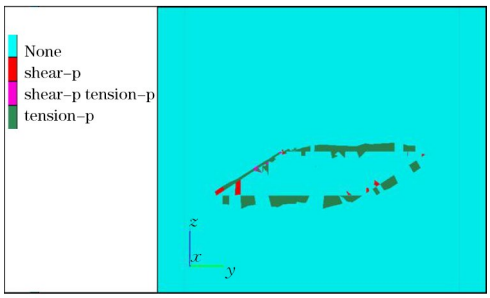
图 5 不同回采顺序下盘区围岩的位移变化特征

Fig.5 Displacement variation characteristics of surrounding rock in the panel under different stoping sequences

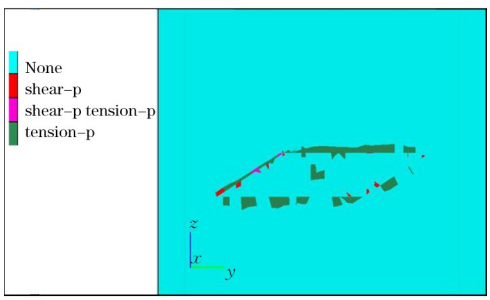
分析图 5 可知,在不同的回采顺序下,采场围岩最大位移均分布在靠近盘区上盘的采场顶板和靠近盘区下盘的采场底板处,且分布范围逐渐向采场边帮扩展,最大位移发生在上盘位置。其中,采用“一侧推向另一侧”的回采顺序时,最大位移值为 38.29 mm“中央推向两侧”时的最大位移值在 37.65 mm,而“两侧推向中央”时为 37.95 mm。可以看出,在 3 种回采顺序下,盘区采场围岩内部产生的最大位移值的变化,也呈现出“中央推向两侧”<“两侧推向中央”<“一侧推向另一侧”的变化规律。

3.3.2 盘区围岩的塑性区扩展规律

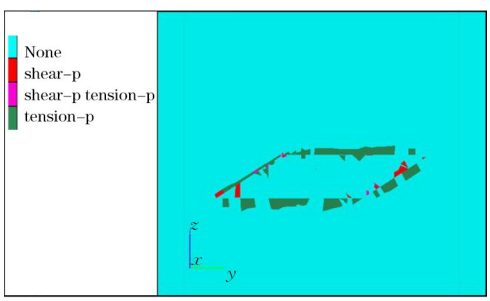
塑性区的扩展对盘区围岩的稳定性产生着重要影响。通过数值模拟,获得了 3 种回采顺序下盘区围岩的塑性区的分布特征,如图 6 所示。



(a) 一侧推向另一侧



(b) 中央推向两侧



(c) 两侧推向中央

图 6 不同回采顺序下塑性区扩展规律

Fig.6 Propagation laws of the plastic zone under different stoping sequences

分析不同回采顺序下盘区采场的围岩塑性区分布情况(见图 6)可知:在 3 种回采顺序下,盘区开采区域四周边缘的围岩主要以张拉塑性破坏为主。其中,上盘和下盘边缘位置出现了一定范围的张拉和剪切共同作用下的破坏区域。在二步骤矿房回采过程中,一步骤采场内的充填体在上覆岩层荷载作用下,其内部也出现一定的剪切塑性破坏。相比之下,张拉塑性区的分布范围大小呈现出“中央推向两侧”<“一侧推向另一侧”<“两侧推向中央”的特征。这一变化规律与主应力分布特征和位移变化特征存在一定的差异。但三者中“中央推向两侧”回采顺序的张拉塑性区分布范围最小,仍体现出较好的围岩控制效果。

4 盘区采场最优回采顺序

岩体的破坏形式,主要有拉伸破坏和剪切破坏两种。通过模拟分析围岩塑性区分布与体积,可以大致判断围岩的基本破坏情况,有助于确定盘区采场的最优回采顺序。

考虑到不同回采顺序下,采场围岩及采场内部充填体塑性破坏范围存在显著差异,在统计分析塑性破坏区域时,主要考虑回采顺序对盘区及采场稳定性的影响。因此,在采用 FLAC3D 内置 FISH 语言编写塑性破坏区域统计代码时,仅统计了采场周边围岩的塑性破坏体积,而忽略采场内充填体的影响。

根据采场开挖充填后采场围岩整体塑性区的分布情况(见图 7),统计了“一侧推向另一侧”“中央推向两侧”和“两侧推向中央”3 种不同回采顺序下,盘区围岩的塑性区破坏体积,结果如图 7 所示。

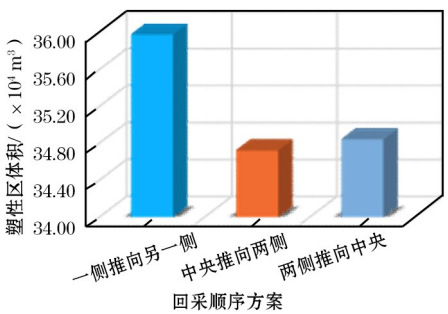


图 7 不同回采顺序下塑性区破坏体积

Fig.7 Failure volume of the plastic zone under different stoping sequences

从图 7 可以看出,盘区采场的回采顺序对围岩塑性破坏区的规模具有显著影响。在采场宽度为 20 m 的条件下,塑性破坏区体积表现为“中央推向两侧”<“两侧推向中央”<“一侧推向另一侧”的规律。这一排序也从侧面反映了盘区采场稳定性的优劣顺序。具体而言,采用“一侧推向另一侧”方案时,围岩塑性破坏区的体积最大,为 35.98×10^4 m³;“中央推向两侧”时最小,为 34.73×10^4 m³;而采用“两侧推向中央”时,塑性破坏区的体积为 34.85×10^4 m³。

由于自然界岩石具有抗压而不抗拉的特性,且工程岩体抗拉能力又远小于抗压能力,当盘区采场的围岩受到采场应力作用后,发生的张拉破坏对采场的稳定性最为不利,更容易诱发采场围岩发生冒落事故。

为进一步分析回采顺序对盘区围岩塑性区扩展的影响,分别对剪切破坏和张拉破坏的体积进行累加求和,计算得到 3 种不同回采顺序下总张拉破坏体积占总塑性破坏体积的比例,如图 8 所示。

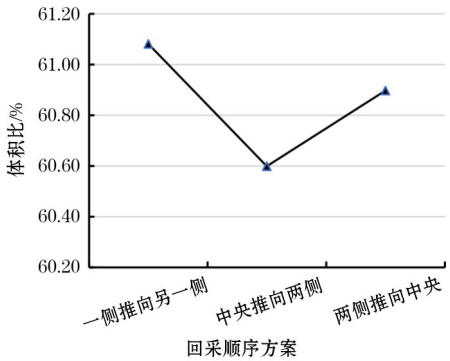


图 8 不同回采顺序下围岩张拉塑性区占总塑性区体积比

Fig.8 Volume ratio of the tensile plastic zone to the total plastic zone in surrounding rock under different stoping sequences

采场围岩张拉塑性区体积占总塑性区体积的比越大,表明该回采顺序下围岩更易发生张拉破坏。从图 8 可以看出,在 3 种不同回采顺序下,采用“一侧推向另一侧”时,产生的张拉塑性区体积占比最大,为 61.08%;采用“中央推向两侧”时最小,为 60.60%;采用“两侧推向中央”时,张拉塑性区体积占比为 60.90%。因此,基于不同回采顺序下产生的张拉塑性区体积占比分析,同样呈现“中央推向两侧”<“两侧推向中央”<“一侧推向另一侧”的规律。对比图 7 所示的塑性区总体积变化趋势,张拉塑性区体积占比和塑性区破坏体积大小变化具有完全一致的变化规律。

综上所述,基于司家营矿露天转地下阶段空场嗣后充填采矿方案,在采场宽度为 20 m 的条件下,盘区采场采取“中央推向两侧”的回采顺序时,采场围岩破坏范围最小,围岩稳定状态最佳。因此,“中央推向两侧”为该矿盘区开采的最优采场回采顺序。

5 结论

(1) 基于司家营矿露天转地下开采的阶段空场嗣后充填采矿方案及采场结构参数,研究了该矿盘区开采时不同采场回采顺序下的围岩应力场分布特征、位移变化与塑性区扩展规律,确定了“中央推向两侧”为该矿盘区采场的最优回采顺序。

(2) 研究发现,不同回采顺序下,盘区采场围岩

应力释放后的压应力值、围岩内部的拉应力值和产生的最大位移值,均呈现出“中央推向两侧”<“两侧推向中央”<“一侧推向另一侧”的变化规律。其中,采用“中央推向两侧”回采顺序方案时,围岩应力释放后的压应力值为 1.58 MPa、最大拉应力为 0.35 MPa,围岩内部产生的最大位移值在 37.65 mm,均优于“两侧推向中央”和“一侧推向另一侧”两种方案。

(3) 盘区采场的回采顺序对盘区及采场的围岩塑性区扩展具有重要影响。通过对 3 种不同回采顺序下围岩内总塑性区体积和张拉塑性区与总塑性区的体积占比进行分析,发现其变化规律与应力场、位移场结果一致。采用“中央推向两侧”方案时,围岩塑性破坏区的总体积为 34.73×10^4 m^3,张拉塑性区体积占比为 60.60%,均优于“两侧推向中央”和“一侧推向另一侧”两种回采顺序。

(4) 影响阶段空场嗣后充填采矿法盘区采场回采顺序的因素较多,本文基于围岩的稳定状态和变形破坏特征,研究盘区采场的回采顺序,未综合考虑采场宽度、充填质量、空区暴露时间等因素的影响,是本文研究存在的不足之处。尽管如此,研究得到的结果对矿山生产仍具有重要的指导意义。

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] 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.

[3] 张瑞明,魏丁一,杜翠凤,等.阶段空场嗣后充填采矿法采场跨度及回采顺序优化研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):10-14.
ZHANG Ruiming, WEI Dingyi, DU Cuifeng, et al. Optimization study on stope span and mining sequence of stage open stoping method with subsequent filling [J]. Mining Research and Development,2022,42(3):10-14.

[4] LIU Xiaosheng, WANG Weijun, LUO Yizhong, et al. Study on the allowable exposure time of temporary goaf in the open stope and backfill mining method with large structure parameters [J]. Advances in Civil Engineering, 2020,2020(9):853410.

[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/OL].金属矿山:1-11[2025-03-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20250213.0915.002.html.
GONG Ruijie, YE Huishi, ZHANG Jie, et al. Effect of backfill quality on deformation low of surrounding rock in open stoping with subsequent backfill mining[J/OL]. Metal MineL:1-11[2025-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20250213.0915.002.html.

[6] 刘光生,杨小聪,郭利杰.基于采充时序的空场嗣后充填体强度要求优化研究[J].有色金属工程,2019,9(10):85-94.
LIU Guangsheng, YANG Xiaocong, GUO Lijie. Optimization research on backfill strength requirement of open stoping with subsequent backfill mining based on excavating and filling sequences [J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(10):85-94.

[7] LU Hongjian, ZHANG Songlin. Design of roof-contacted filling ratio and filling holes in the sublevel open stoping with subsequent filling method [J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering,2017,8(4):265-279.

[8] 张洪海,路文智,江宁.大直径深孔(高)阶段空场嗣后充填采矿方法改进实践[J].中国矿山工程,2020,49(6):25-28.
ZHANG Honghai, LU Wenzhi, JIANG Ning. Improvement and practice of the large-diameter long-hole (high) level open-stoping with filling[J]. China Mine Engineering,2020,49(6):25-28.

[9] 曹聪,秦秀山,于世波,等.某铜镍矿两步骤嗣后充填回采地压分布与采场稳定性研究[J].中国矿业,2024,33(增刊 1):297-303.
CAO Cong, QIN Xiushan, YU Shibo, et al. Investigation on the distribution of ground pressure and stope stability under two-step subsequent filling mining in a copper-nickel mine [J]. China Mining Magazine, 2024, 33 (Suppl. 1): 297-303.

[10] 孟慧媚,柴衡山.基于 MIDAS-NX 的矿山三维建模在采场布置方案优选中的应用[J].采矿技术,2024,24(3):302-307.
MENG Huimei, CHAI Hengshan. Application of 3D modeling of mines based on MIDAS-NX in optimization of stope layout schemes[J]. Mining Technology,2024,24(3):302-307.

[11] SHAHÉ Shnorhokian, HANI S Mitri, LINDSAY Moreau-Verlaan. Stability assessment of stope sequence scenarios in a diminishing ore pillar[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2015,74:103-118.

[12] 高雄,陈旭,孙德宁.缓倾斜中厚矿体回采效果优化以及矿废运移规律研究[J].矿业研究与开发,2025,45(1):55-62.
GAO Xiong, CHEN Xu, SUN Dening. Study on the optimization of mining effect and the migration law of ore and waste rock in gently inclined medium-thick orebody[J]. Mining Research and Development,2025,45(1):55-62.

[13] 龚永林,王亚军,廖敦霞,等.高寒高海拔地区地下大规模矿山盘区回采顺序优化[J].采矿技术,2025,25(2):29-33.
GONG Yonglin, WANG Yajun, LIAO Dunxia, et al. Optimization of the mining sequence in large-scale underground mining areas in cold and high-altitude regions [J]. Mining Technology,2025,25(2):29-33.

[14] 楚长青,冯旻,李云涛.露天转地下不同开采顺序对采场围岩稳定性的影响[J].黑龙江科技大学学报,2022,32(5):593-597+604.
CHU Changqing, FENG Min, LI Yuntao. Influence of different mining sequences from open-pit to underground on stability of surrounding rock[J], Journal of Heilongjiang University of Science & Technology,2022,32(5):593-597+604.

[15] 任卫东,范玉乾.分段空场嗣后充填采矿法集约化开采顺序优化研究[J].金属矿山,2020,528(6):167-171.
REN Weidong, FAN Yuqian. Study on optimization of mining sequence in intensive mining with sublevel open stope and subsequent filling[J]. Metal Mine, 2020, 528(6): 167-171.

[16] 王超佩,王亚军,赵海洋,等.某铜多金属矿盘区内采场回采顺序和结构参数优化研究[J].采矿技术,2025,25(2):18-22.
WANG Chaopei, WANGYajun, ZHAO Haiyang, et al. Research on optimization of stoping sequence and structural parameters of stopes in panel of a certain copper polymetallic mine[J]. Mining Technology,2025,25(2):18-22.

[17] 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.

[18] 李鹏程,叶义成,姚团,等.宜昌晒旗河磷矿条带充填法采场结构及回采顺序研究[J].金属矿山,2019,519(9):34-40.
LI Pengcheng, YE Yicheng, YAO Nan, et al. Study on the optimization of mining scheme for gently inclined thin orebody of Shaiqi River Phosphorite Mine in Yichang City [J]. Metal Mine,2019,519(9):34-40.

[19] 史章良,刘国强,朱龙胤.朱兰铁矿露天转地下协同开采方案探索[J].矿业工程,2023,21(2):11-14.
SHI Zhangliang, LIU Guoqiang, ZHU Longyin. Exploration on cooperative mining scheme of transition from open-pit mining to underground mining in Zhulan Iron Mine[J]. Mining Engineering,2023,21(2):11-14.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.