深部硬岩地下矿山大规模回采并行充填及连续出矿工艺研究*

龚永超[1,2]，欧任泽[1,2]，林卫星[1,2]，陆锦涛[1,2]，廖敦霞[1,2]，梁巨理[1,2]，王玉丁[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012）

摘要：深部矿体规模化连续开采是未来矿山开采“深地化”的前沿研究方向。针对深部硬岩矿床传统的间断式采矿作业模式与深部智能化高效开采形成相互制约的问题，提出一种并行式采出充连续采矿作业模式，利用柔性隔离层实现采充并行的充填与连续出矿工艺流程。借助理论计算并结合FLAC3D数值计算软件分析了高阶段大采场并行充填工艺中的充填体强度分布，确定了高阶段采场不同高度的充填体强度需求。利用PFC离散元软件分析并行充填与连续出矿中“矿-充”散体流动规律及隔离层变形损伤特性。结果表明：并行充填与连续出矿工艺中，采场顶部及底部充填体28 d固结承压强度应大于8 MPa，随着充填和放矿的进行，在接近放矿漏斗口时，隔离层最大载荷为57 kPa，此时隔离层出现明显的下凹变形，靠近两侧矿柱区域损伤增加，产生明显的拉压破坏。研究可为深部矿体开采连续作业提供参考。

关键词：深部矿体；连续开采；同步充填工艺；柔性隔离层；数值模拟

中图分类号：TD853 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)03-0001-09

Study on Large-Scale Mining Parallel Filling and Continuous Ore Drawing Technology in Deep Hard Rock Underground Mine

GONG Yongchao[1,2], *OU Renze*[1,2], *LIN Weixing*[1,2], *LU Jintao*[1,2], *LIAO Dunxia*[1,2], *LIANG Juli*[1,2], *WANG Yuding*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Large-scale continuous mining of deep ore bodies is the frontier research direction of deep mining in the future. Aiming at the problem of mutual restriction between the traditional intermittent mining operation mode and the deep intelligent and efficient mining of deep hard rock deposits, a continuous mining operation mode of parallel mining and filling was proposed, which used flexible isolation layer to realize the parallel filling and continuous mining process. The strength distribution of filling body in parallel filling process of high-stage large stope was analyzed by means of theoretical calculation formula and FLAC3D numerical software, and the strength requirements of filling body at different heights of high-stage stope were determined. PFC discrete element software was used to analyze the flow law of ore-filling granular and the deformation damage characteristics of isolation layer in parallel filling and continuous ore drawing. The results show that in the parallel filling and continuous ore drawing process, the 28 d consolidation bearing strength of the filling body at the top and bottom of the stope should be greater than 8 MPa. With the filling and ore drawing, the maximum load of the isolation layer is 57 kPa when it is close to the funnel mouth of the ore drawing. At this time, the isolation layer has obvious concave deformation, and the damage near the pillar area on both sides increases, resulting in obvious tensile and compressive damage. The study can provide reference for the continuous operation of deep ore body mining.

Key words: Deep ore body, Continuous mining, Simultaneous backfilling process, Flexible isolation layer, Numerical simulation

0 引言

矿产资源开发向深地化、大型化、智能化发展是必然趋势[1]。国外矿山在深井和智能化方面发展日趋成熟，超过1 000 m的金属矿山有90多座，南非卡里顿维尔金矿采深达3 800 m，竖井延深达4 164 m[2-3]。

连续采矿技术可以实现采场作业连续化和智能化，有利于深部开采过程中地压的控制和管理，实现大规模的集中强化开采，是解决深部资源安全高效

* **收稿日期**：2024-07-09
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC2907201)；中国五矿科技专项项目(2023ZXB01)；长沙矿山研究院有限责任公司科创项目(ZX24J074)
作者简介：龚永超(1989—)，男，湖南娄底人，硕士，高级工程师，主要从事金属矿山采矿方法及工艺研究工作。E-mail:1145233051@qq.com

开采的有效途径[4-6]。自20世纪80年代以来,国际矿业界对实现连续强化开采问题予以极大关注。我国专门组织了多次“连续采矿技术及装备”的科技攻关。在硬岩矿床领域,迄今以连续切割设备来取代传统采矿工艺的非爆破开采,面临采矿机作业受金属矿床形态多变及复杂地质条件的限制、切割头寿命及费用等问题,硬岩采矿机要投入工业应用尚需时日[7]。目前国内硬岩矿床的开采普遍采用采切、落矿、出矿、充填的开采模式,作业工序多,人员组织复杂,生产周期长;非连续或半连续的作业工艺,非常不利于智能高效采矿和自动控制装备系统的使用,采矿效率严重受限,难以满足矿山日益扩大的需求[8]。

连续采矿工艺是采矿技术向高层次模式发展的必然,由于矿岩软硬程度的不同,一般采用两种形式的连续开采方式[9-13]。一种是矿岩硬度不大的矿体,采掘工艺全过程(切割、落矿、装载、运搬)同时连续进行,如综合机械化采煤工艺和一体化切割机掘进工艺等,这种连续开采方式仅限于软岩开采,主要用于煤矿、钾盐矿、砂岩类矿床的回采和巷道的掘进。另一种是针对无法采用机械切割或流体破岩的开采,需要爆破破岩的硬岩矿床。

对于地下硬岩矿床开采,鉴于在连续出矿、运矿技术和设备得到迅速发展,为提高矿体的回采效率与生产能力,不少学者对连续化开采工艺进行了相关研究与实践。多数学者主要针对传统的急倾斜厚大矿体空场嗣后充填采矿法、分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法、中厚矿体留矿全面采矿法、上向高分层充填采矿法进行相应的工艺技术及采场结构参数的改进。赵兴东等[14]以三山岛金矿无人采矿示范区为工程背景,研发了连续规模化智能开采工艺,即采用连续分段空场嗣后充填采矿法对矿石进行回采,从开采工序连续性、地压调控及时性、采矿设备适配性3个方面设计了开拓方案、采矿工艺及铲装运输环节;张天航等[15]在阶段空场法分段凿岩、落矿的基础上,提出了长矿房连续开采干式充填采矿法,通过现场工业试验表明,该方法能较好地实现高强度和大规模集中开采,提高了矿块的回采率,降低了矿产资源损失量。

综上所述,现有的大规模连续开采工艺,主要采用阶段空场嗣后充填采矿法作为基础来进行工艺革新,主要原因是该方法能较好地适应各种矿体的形态,能适用各种大型机械装备,且能通过充填工艺实现采空区的控制,但上述方法并未改变传统的工序作业模式,出矿、充填等工序之间的衔接仍与非连续开采工艺相同,并未实现真正意义上的连续开采。为此,针对深部硬岩矿床开采存在的非连续采矿作业,以突破传统顺序式非连续性的作业模式,创新开发并行式采出充连续作业工艺,利用数值分析手段获取并行采充式连续作业工艺中的充填体力学特征、“矿-充”散体流动规律及隔离层的变形损伤特征,为实现地下硬岩矿床智能连续开采提供技术支撑。

1 硬岩深部地下矿山并行充填连续回采工艺研究

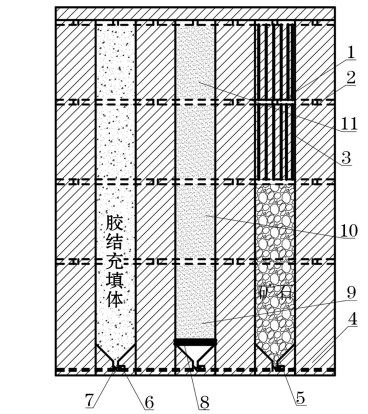
1.1 深部地下矿山并行采出充工艺参数

为了解决深部硬岩矿床地压大、资源禀赋差,提高采矿作业的智能化水平和生产能力,提出一种并行式采出充连续采矿作业模式,通过构建超级大采场,以提高规模来降低生产成本。该工艺适用于急倾斜中厚以上矿体,矿岩稳固完整,层理、节理不发育。采场阶段高度为150~200 m,采场宽度为30~40 m,采场长度为100~150 m。采场采用多分段凿岩,分段高度为40~50 m,底部阶段出矿;完成采准切割后,进行大量落矿,为了提供足够的补偿空间,出矿量约为落矿量的30%~40%,在下部出矿的同时上部装药爆破,采场落矿全部结束后,其崩落矿石在采场下部连续放矿,上部暴露一定空间后上部采矿与下部出矿同步进行,上部充填与下部出矿同步进行,采矿与出矿并行作业,充填与出矿并行作业;采场在落矿和充填过程中,底部始终可以连续出矿,实现采矿的全面连续作业。典型方案如图1所示。

1.2 深部地下矿山并行充填回采工艺参数

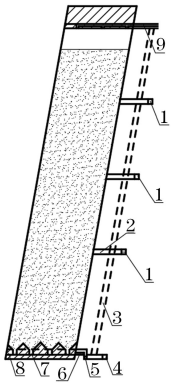
并行充填与连续出矿工艺如图2所示。崩落后的矿石在采场顶部具有一定的暴露空间,即可在松散矿石上部覆盖充气气囊或者柔性碳纤维层形成柔性隔离层,实现充填体与崩落矿石的隔离。

在采矿落矿结束后,采场底部开始连续放矿,上部进行同步膏体充填,充填采用多点下料的方式,充填工程布置在最上分段水平,膏体充填料既要保持一定的流动性又有一定的强度,充填料与矿石间有柔性隔离层,柔性隔离层能抵抗上覆充填体破坏,避免隔离材料的破坏使得充填体混入造成矿石的贫化,通过调整充填速率和放矿速率,控制采场两帮的暴露面积,充分发挥充填料的维护作用来控制地压,实现上部充填与下部出矿同步进行。采场回采分步骤进行,采用“隔一采一”开采方式,当邻近采场回采充填完后可迅速进行中间采场的回采。



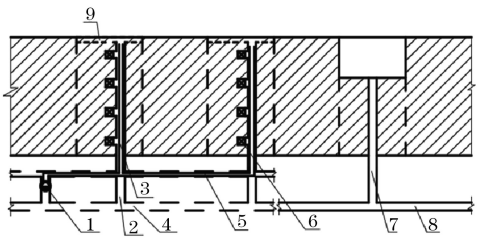
1—凿岩硐室 2—分段运输巷 3—大直径深孔 4—未采矿石 5—崩落矿石 6—穿脉受矿巷 7—采场溜井 8—隔离层 9—高强度缓凝膏体充填料 10—中等强度缓凝膏体充填料 11—低强度缓凝膏体充填料

(a) 正视图



1—分段运输巷 2—分段穿脉巷 3—阶段溜井 4—脉外阶段运输巷 5—脉外出矿巷 6—皮带运输机 7—采场溜井 8—穿脉受矿巷 9—充填管

(b) 侧视图



1—阶段溜井 2—穿脉受矿巷 3—皮带 4—脉外阶段运输巷 5—脉外出矿巷 6—采场溜井 7—分段穿脉巷 8—分段运输巷 9—切割横巷

(c) 俯视图

图 1 并行采出充作业连续采矿典型方案

Fig.1 Typical scheme of concurrent backfilling and continuous mining operations

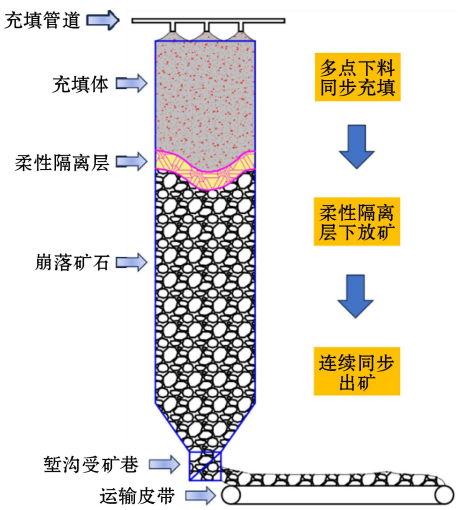


图 2 并行充填与连续出矿工艺

Fig.2 Schematic diagram of concurrent backfilling and continuous ore extraction technique

采矿落矿结束后,崩落后的矿石进入漏斗溜井后,由溜井口的振动放矿机控制矿石的流动。在穿脉受矿巷和脉外出矿巷中安装皮带运输机,采场矿石直接通过皮带运输机运输至阶段溜井,采场底部通过皮带运输机连续出矿,上部充填料连续充填,实现上部充填与下部出矿同步进行。

2 并行充填工艺充填体强度分布研究

基于前述深部矿体并行充填连续回采工艺的研究,为了确保深部矿体高阶段采场的围岩稳定性及地压控制,充填时有必要采用分段充填。一是更好地控制深部矿体开采形成的高阶段采空区不同高度的应力显现差异性。二是满足充填体与岩体的合理匹配,节省充填的成本,即在采场的不同高度位置,采用不同的充填体强度与配比。因此,确定阶段内不同高度的充填体强度,是保障地下矿山并行同步充填稳定性的关键。

2.1 不同高度充填承压特性理论分析

对于充填体强度的设计,主要是用经验类比法进行确定,在对充填体与围岩相互作用机理的研究基础上,国内外学者通过不断的探索,提出了一些对充填体强度设计具有重要参考作用的计算方法。

采场充填体的强度值以满足自立为计算要求，分别采用托马斯(Thomas)模型法[16]、安庆铜矿经验公式法[17]、覆岩承重计算法[18]、蔡嗣经经验公式法[19]4 种理论方法，对充填体内的应力情况进行了计算分析。不同的计算方法，其假设条件不同，因而，对安全系数的选用也存在差异。这 4 种计算方法是根据各具体方法的要求选用不同的安全系数 k。各种方法的计算结果汇总于表 1 中，表 1 中的应力值可理解为充填体需要的强度值，可以看出，计算得到所需强度最大的为覆岩承重计算法，在充填体顶部至少需要 4.86 MPa 的充填体抗压强度，但以上 4 种方法只考虑了充填体的自立因素，未考虑地下开采环境对充填体强度的影响。

2.2　不同高度充填体承压特性数值分析

(1) 数值模型构建。为进一步分析不同高度充填承压特性，通过 FLAC3D 构建单个开采采场的数值模型进行充填后的应力强度分析[20]，如图 3 所示。设计整体数值模型边界尺寸为 500 m×240 m×550 m，采场模型尺寸为 200 m×40 m×100 m。同时，考虑并行充填与连续出矿工艺，设置矿石崩落—底部出矿同步充填—充填完毕 3 个工况，分析充填支撑完成后不同采场高度下充填体内的垂直应力。

表 1　不同方法计算充填体内垂直应力的结果汇总

Table 1　Results of different methods to calculate the vertical stress in the backfill　MPa

距充填体顶面的高度 H/m	Thomas 模型法 $k=2.0$	安庆铜矿经验公式法 $k=2.0$	覆岩承重计算法 $k=1.5$	蔡嗣经经验公式法 $k=1.2$
20	0.62	0.65	0.486	1.05
40	1.06	1.15	0.972	1.66
60	1.40	1.56	1.458	2.07
80	1.65	2.27	1.944	2.40
100	1.86	2.60	2.43	2.68
120	2.03	2.88	2.916	2.92
140	2.17	3.12	3.402	3.24
160	2.29	3.33	3.888	3.54
180	2.39	3.51	4.374	3.83
200	2.48	3.67	4.860	4.10

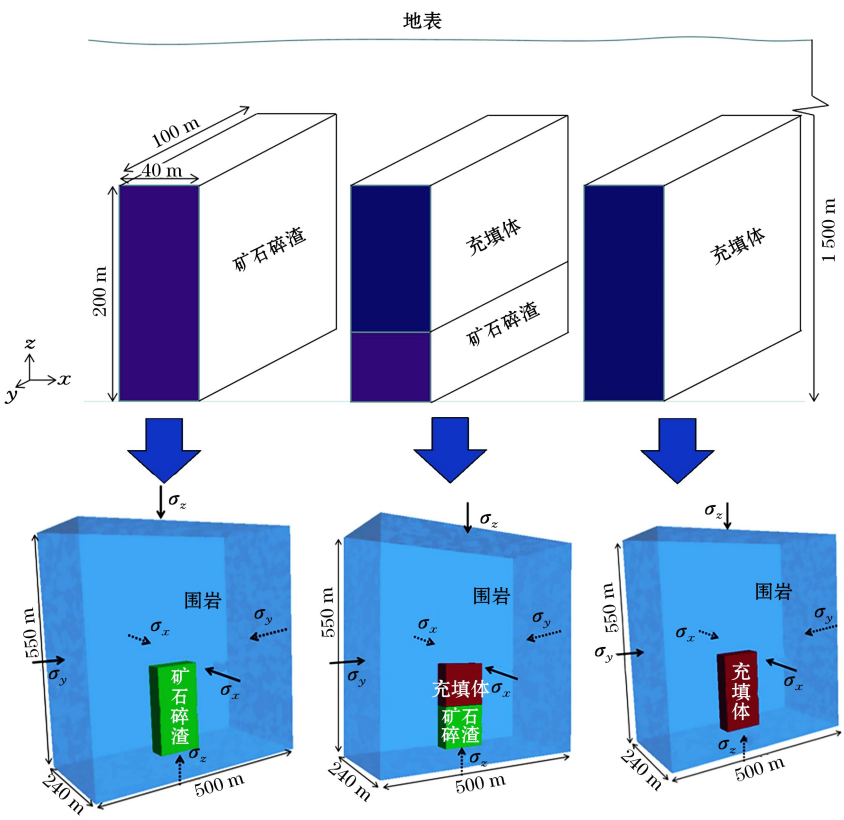


图 3　充填体强度数值计算模型

Fig.3　Numerical calculation model for backfill strength

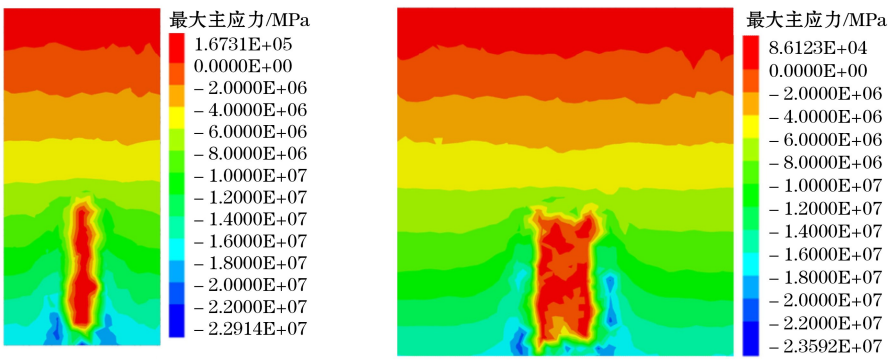
矿体及围岩选用文献[5]中稳定性分析时选用的 1 486.5～1 550 m 深度矿体、混合花岗岩岩体(围岩)以及充填体参数，同时，为模拟深部开采的应力环境，应力边界设置 1 500 m 地下开采的应力分布：$\sigma_x=0.039H+1.264$，$\sigma_y=0.028H+1.246$，$\sigma_z=\gamma H$(γ 为岩体容重，H 为垂直高度)，岩体物理力学参数见表 2。

表 2 岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters

岩体名称	密度/(kg/cm³)	弹性模量/GPa	泊松比 μ	黏聚力 c/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
矿体	2.84	17.88	0.21	3.07	37.42	0.25
围岩	2.70	15.07	0.23	3.61	37.31	0.93
充填体	1.86	16.60	0.19	0.60	28.80	0.56

（2）数值分析结果。采用数值分析手段分析不同采场高度的充填体承压特性，如图 4 所示。由模拟结果可知，充填体内部受力较小，除矿体底板外并未出现明显的应力集中现象，这说明充填体能有效缓解围岩、顶板的应力集中状态。充填体较大应力主要出现在顶板及与围岩接触处，顶板局部最大主应力为 9.8 MPa，平均最大主应力在 8 MPa 左右，可知充填体顶部若满足 8 MPa 的强度即可保障阶段下向并行充填采矿法采矿安全生产要求。但需要注意的是，针对采场底板最大主应力过大现象还应采取相应措施，如加大底板充填体强度，采取一定支护等方式。



（a）正视图　　（b）侧视图

图 4 充填体强度数值计算结果

Fig.4 Results of numerical calculation of backfill strength

2.3 不同高度充填体强度设计

结合理论计算与数值分析结果，设计在采场顶部及底部采用高强度的缓凝膏体充填料，在采场中间选用适当强度的膏体充填料。充填作业跟随下部放矿，待采场出矿完成后膏体充填料完全凝固达到一定强度。同时考虑现场施工、安全等因素，最终推荐深部开采并行充填连续回采工艺充填体 28 d 固结强度 R_{28} 见表 3。

表 3 采场不同高度充填体强度设计值

Table 3 Design values of backfill strength at various heights in stope

距充填体顶面的高度 H/m	充填体强度推荐值 R_{28}/MPa
0～20	≥8.0
20～60	≥3.5
60～100	≥4.5
100～140	≥5.5
140～160	≥6.0
160～180	≥7.0
180～200	≥8.0

3 并行充填与连续出矿规律及隔离层损伤特性研究

3.1 离散元数值模型构建

使用柔性隔离层进行同步充填过程中，由于隔离层在充填和放矿的过程中运动复杂，在上覆充填体和下部流动矿石的多重因素影响下，隔离层的损伤也是极其复杂的[22]。借助 PFC 离散元分析软件，对充填放矿过程进行数值模拟，研究柔性隔离层在放矿和充填过程中移动和损伤的规律[22-23]，为柔性隔离层的布设工艺提供可靠依据。

首先，建立整体模型，如图 5 所示，其中包括充填体、隔离层和矿石、矿房及充填站。

（1）矿房及充填站。上部的 5 个墙体组合成充填站，为保证能够完全充填下部矿房，设置矿房及充填站的宽度为 20 m，高度为 100 m，为保证充填和放矿协同，放矿口参数与放矿漏斗口参数一致。

（2）矿石及充填体。在矿房及充填站中按照一定的级配和粒径生成一定数量的颗粒。为减少颗粒之间的重叠量，颗粒之间的接触预先使用较大的刚度，循环 5 000 步，每 10 步对颗粒的速度进行清零。最终得到稳定的充填体。

（3）隔离层。在矿石的顶部，取坐标轴负方向一定范围内的颗粒进行重新分组，作为隔离层。

由于充填体在凝结前同样可以视为散体物质，因此矿石及充填体均使用线性接触模型，使其可以进行物理性下降及滚动。同时，为分析隔离层的力学性能，隔离层采用线性平行黏结模型，矿石、充填

体及隔离层使用试错法进微观参数的标定,模型微观力学参数见表 4。

表 4 颗粒物理力学微观参数

Table 4 Microscopic parameters of granular physics

参数类型	细观参数	数值
颗粒微观力学参数	颗粒密度 ρ/(kg·m^{-3})	2 800(矿石)、2 500(充填体、隔离层)
	最小颗粒半径 R_{min}/m	0.6
	最大颗粒半径 R_{max}/m	0.75
	颗粒接触模量 E_c/GPa	21
	颗粒刚度比 k_n/k_s	2.1
平行黏结微观力学参数	平行黏结模量 E_c/GPa	21
	平行黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c$/MPa	180
	平行黏结抗剪强度 $\bar{\tau}_c$/MPa	158

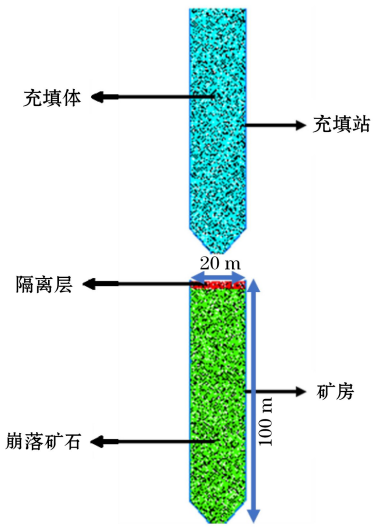


图 5 整体模型

Fig.5 Overall model

3.2 并行充填与连续出矿规律分析

利用 PFC 离散元模型分析并行充填与连续出矿过程,用 Fish 语言修改充填颗粒的质量来模拟充填过程,如图 6 所示。

(1) 放矿和充填初期(见图 6(a))。在充填和放矿协同进行的过程中,隔离层在前期远离放矿漏斗口时,隔离层基本为水平下降,隔离层整体接近平行下滑。隔离层被压密,但并未出现破裂。矿石和充填材料之间没有接触,隔离效果较好。

(2) 柔性隔离层的运用。放矿过程中分隔矿石与废石,放矿前期隔离效果最好,在放矿过程中没有发生损破现象,且水平均匀下降,矿岩不发生接触,下降一定高度到过渡期后,隔离层发生凹凸变形(见图 6(b)、图 6(c)),靠近矿柱的位置,隔离层发生破损现象。

(3) 随着充填和放矿进行,隔离层下降,在接近放矿漏斗口时,隔离层出现明显的下凹变形(见图 6(d))。在接近放矿漏斗口的位置(即漏斗口上方),隔离层出现明显的下凹。

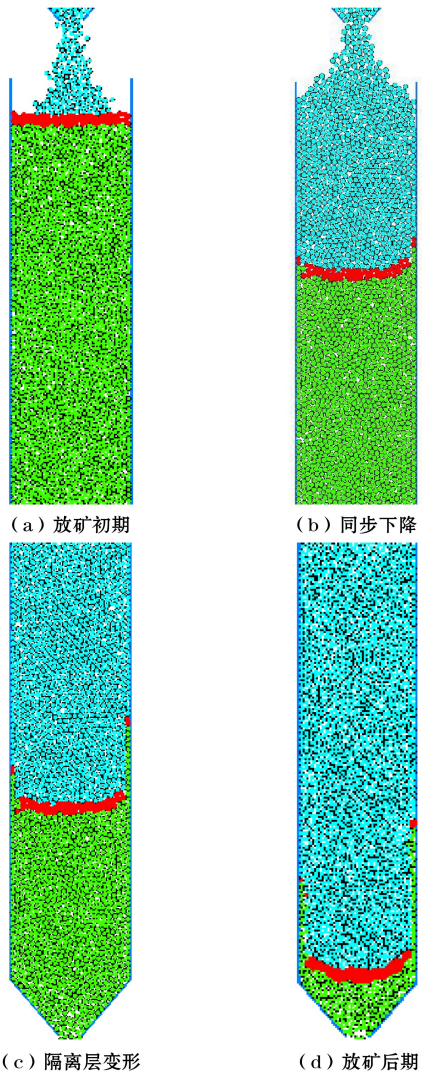


图 6 并行充填与连续出矿过程

Fig.6 Parallel backfilling and continuous ore extraction patterns

在充填过程中,对隔离层左侧、中部和右侧 A、B、C、D、E 5 个测点的位移进行监测,监测点位置和位移监测结果如图 7 所示。

如图 7(a)所示,在隔离层初始的下降 40 m 以内,隔离层测点的各监测点位移近似相等。说明隔离层在最初的放矿和充填过程中,保持平行下降,在这个阶段,隔离层为水平状态,变形的程度较小。隔离层的位移超过 40 m 后,测点 A 和测点 E 处的位移相对其他测点较小。表明隔离层在靠近矿柱的位置发生了弯曲,随着放矿的进行,靠近矿柱的隔离层位移依旧会增加,但增加的速度比其他测点滞后,说明隔离层位移超过 40 m 后,隔离层发生严重变形,隔离层失去了与矿柱之间的黏结,矿柱和隔离层之间出现间隙,矿石成了隔离层的直接接触物。当位移达到 60 m 时,隔离层靠近矿柱的测点不在移动,说明在 40 m 到 60 m 区间内,隔离层在靠近矿柱的位置发生了断裂,此时测点 B、C 和 D 的位移仍然保持均匀增加。D 测点由于位于放矿漏斗的漏斗口位置,其增加的速率较大。当隔离层位移增加到 85 m 左右时,由于隔离层的隔离作用,矿石无法再靠重力自然掉落,隔离层中部的 3 个测点以及边缘的两个测点的位移均不变。

如图 7(b)所示,在充填和放矿同时进行的过程中,由于充填程度增加,充填体的覆重引起隔离层上面压力增加,压力最大值达到 57 kPa。由于放矿和充填同时进行,矿石颗粒放出,充填材料颗粒也同时掉落在隔离层上方,诸多因素,隔离层上的压力变化不均匀,为典型的动态载荷。由于隔离层的中心位置较容易出现下凹,充填材料的自重应力在下凹部位集中,隔离层靠近矿柱边缘的两个边缘测点的应力水平会比中部测点 B、C 低。测点 C 处于隔离层的相对中心位置,也是放矿漏斗的漏斗口的位置,在隔离层位移达到 90 m 左右时,会有一个较为明显的突变。这是由于靠近漏斗口处,矿石颗粒放出,在漏斗口上方的位置形成松动区域,隔离层向松动区域变形,上覆充填材料的自重应力重新分布,在松动区域上方形成应力集中,导致隔离层中心位置发生应力突变。

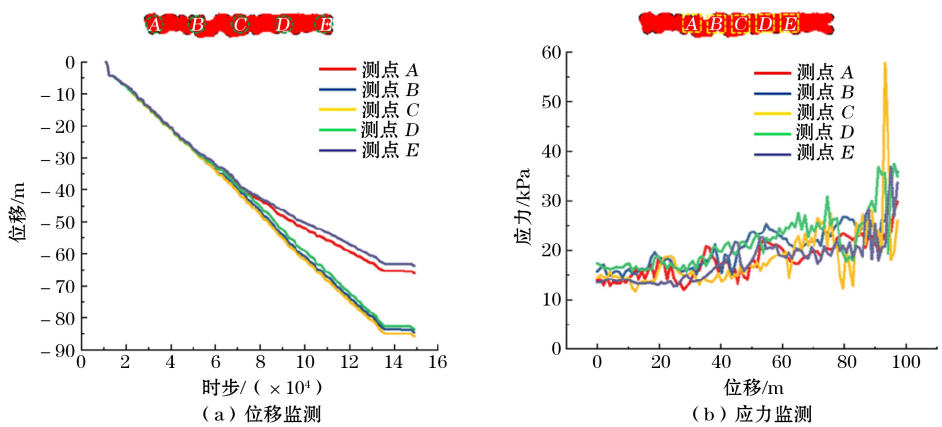


图 7 并行充填与连续出矿位移监测和应力监测

Fig.7 Monitoring displacement during parallel backfilling and continuous ore extraction

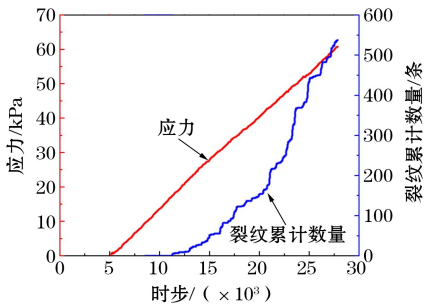
3.3 隔离层损伤规律分析

在充填和放矿协同进行的过程中,隔离层上部的应力逐渐增加,在模型中将该过程视为隔离层和充填体上界限向隔离层加压的过程。通过 Fish 语言,根据颗粒位置和受力得到与隔离层上界限接触颗粒与界限之间的应力,当颗粒之间的应力超过黏结的承载极限,黏结断裂,在两个颗粒中心连线的垂直方向上生成裂纹。记录加载过程中隔离层上部应力与裂纹的累计变化,如图 8(a)所示。

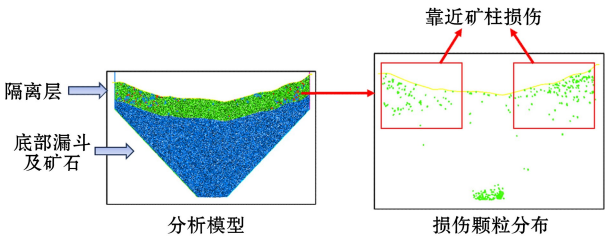
随着并行放矿连续出矿的时间步增加,隔离层上部压力增大,当压力增加到约 15 kPa 时,隔离层上部产生裂纹。随着压力逐渐增大,隔离层中的裂纹数量也不断增加。在整个放矿和充填协同作业接近底部放矿漏斗颈部时,隔离层处动载荷的最大值为 57 kPa,根据并行充填与连续出矿规律分析可知,当隔离层下沉移动到放矿漏斗的漏斗颈部时,隔离层上部覆盖的充填体质量最大,由充填体质量引起的上覆压力也达到最大。

为此,选取隔离层易损位置进行损伤规律分析,如图 8(b)所示。由图 8 可知,当隔离层下滑时发生变形,充填材料的增加会在充填体上形成压应力。隔离层上的压应力增加,隔离层上首先会形成拉裂

纹,拉裂纹首先萌生的位置为靠近矿柱的位置。随着充填和放矿的进行,隔离层上覆压力增加,裂纹不断萌生,新裂纹萌生区域也在靠近矿柱的位置。结合隔离层的位移规律可知,隔离层的易损伤区域在靠近矿柱的位置。靠近矿柱区域损伤增加,隔离层断裂失效,导致该区域的隔离层混入矿柱,下降速率减小,直到脱离隔离层主体。



(a) 隔离层应力与裂纹累计数量



(b) 隔离层损伤分布

图 8 损伤规律分析

Fig.8 Analysis of damage laws

4 结论

(1) 提出一种并行式采充式连续采矿作业模式,通过构建高阶段大采场,以提高规模来降低生产成本。利用柔性隔离层分隔矿石散体与充填散体,通过顶部多点下料及底部连续出矿,实现充填工序与出矿工序的连续并行,在提高规模化产能的同时,较好的深部高应力环境下大规模连续出矿的围岩稳定性控制问题。

(2) 基于所提出的高阶段大采场并行充填工艺,开展高分段充填体强度分布研究,结合上述理论计算以及数值模拟分析,分析高阶段采场不同开采高度的充填体强度,最终考虑现场施工、安全等因素,得到充填体顶部及底部 28 d 固结强度不应小于 8 MPa。

(3) 基于离散元分析软件,还原采出充连续采矿作业动态过程,研究“矿-充”散体流动规律及隔离层变形损伤特性,在充填材料自重的作用下,隔离层上的应力在充填过程中不断变化,为明显的动态变化载荷,动态载荷的趋势为逐渐增大,最大载荷为 57 kPa。随着上覆应力增大,隔离层中裂纹萌生、扩展和连接。由于靠近矿柱区域为拉压复合应力区域,裂纹萌生和发展的位置为靠近矿柱区域。

(4) 针对深部硬岩地下矿山开采所提出的大规模回采并行充填及连续出矿工艺,能够减少传统工艺中回采与充填工序的断续不衔接,减少采场出矿及充填工序作业时间,并通过同步充填工艺较好地控制大规模采场的暴露面积,实现采场连续出矿并行充填的规模化开采工艺流程。同时,该工艺能较好适配智能化开采的大型采矿设备,有助于实现矿山智能化发展。

参考文献(References):

[1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research progress of deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1283-1305.

[2] 刘焕新,王剑波,赵杰,等.深井开采关键技术难题与解决途径初探[J].矿业研究与开发,2018,38(5):1-5.
LIU Huanxin, WANG Jianbo, ZHAO Jie, et al. Key technical problems and solutions for deep well mining[J]. Mining Research and Development,2018,38(5):1-5.

[3] 余诗刚,林鹏.中国岩石工程若干进展与挑战[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3):433-457.
SHE Shigang, LIN Peng. Advances and challenges in rock engineering in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(3):433-457.

[4] GUO Y H, MIAO Y C. Study on stope stability in continuous mining of long-dip, thin orebody by room-pillar method[J]. Sustainability,2022,14(15):101-112.

[5] 黄麟淇,陈江湛,周健,等.未来有色金属采矿可持续发展实践与思考[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3436-3449.
HUANG Linqi, CHEN Jiangzhan, ZHOU Jian, et al. Practice and thinking on sustainable development of non-ferrous metal mining in the future[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3436-3449.

[6] ZHAO Kang, WANG Qing, GU Shuijie, et al. Mining scheme optimization and stope structural mechanic characteristics for a deep and large ore body[J]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society(TMS),2019,71(11):4180-4190.

[7] 张要贺,盛佳,尹旭岩.深部大矿段连续开采工序与装备时空协同系统[J].采矿技术,2019,19(04):96-104.
ZHANG Yaohe, SHENG Jia, YIN Xuyan. Time-space collaborative system of continuous mining process and equipment in deep large ore section[J]. Mining Technology,2019,19(04):96-104.

[8] 黄明发.大型矿山低成本胶结充填关键技术研究与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(1):20-25.
HUANG Mingfa. Research and application of key technologies of low-cost cemented filling in large mines[J]. Mining Research and Development,2023,43(1):20-25.

[9] 柏杨,周亚博,崔越,等.急倾斜薄矿体脉外采准上向水平分层充填采矿法研究[J].矿业研究与开发,2023,43(5):1-6.
BAI Yang, ZHOU Yabo, CUI Yue, et al. Study on upward horizontal cutand fill mining method with mining preparation out of veinsin steeply inclined thin ore body[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(5): 1-6.

[10] 张丽生.地下金属矿山开采中连续开采关键技术的应用探讨[J].世界有色金属,2018(6):75-77.
ZHANG Lisheng. Application of key technologies of continuous mining in underground metal mine[J]. World Nonferrous Metals, 2018(6): 75-77.

[11] YANG Zhiqiang. Key Technology research on the efficient exploitation and comprehensive utilization of resources in the deep jinchuan nickel deposi[J]. Engineering, 2017, 3(4): 276-291.

[12] 杨志强,高谦,陈得信,等.大型镍矿深部高应力矿体充填法开采关键技术与对策[J].中国工程科学,2014,16(8):38-44.
YANG Zhiqiang, GAO Qian, CHEN Dexin, et al. Key technologies and countermeasures of filling mining of deep high stress ore body in large nickel mine[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(8): 38-44.

[13] 李晓东,胡亚军,陈彦亭,等.某金属矿山地下安全绿色开采的关键技术[J].矿业研究与开发,2021,41(10):22-26.
LI Xiaodong, HU Yajun, CHEN Yanting, et al. Key technologies of underground safe and green mining in a metal mine[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10): 22-26.

[14] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等.三山岛金矿连续规模化智能开采工艺研究及应用[J].金属矿山,2022(5):45-49.
ZHAO Xingdong, ZHOU Xin, ZHAO Yifan, et al. Research and application of continuous scale intelligent mining technology in Sanshandao Gold Mine[J]. Metal Mine, 2022(5): 45-49.

[15] 张天航,赵兴东,李怀宾,等.急倾斜中厚矿体长矿房连续开采干式充填采矿法[J].黄金科学技术,2019,27(5):704-711.
ZHANG Tianhang, ZHAO Xingdong, LI Huaibin, et al. Dry filling mining method for long room continuous mining of steeply inclined medium thick orebody[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(5): 704-711.

[16] 刘志祥.深部开采高阶段尾砂充填体力学与非线性优化设计[D].长沙:中南大学,2006.
LIU Zhixiang. Mechanics and nonlinear optimization design of high stage tailings filling in deep mining[D]. Changsha: Central South University, 2006.

[17] 占飞,付玉华,杨世兴.某铜矿胶结充填体的强度值设计[J].有色金属科学与工程,2018,9(2):75-80.
ZHAN Fei, FU Yuhua, YANG Shixing. Strength design of cemented backfill in a copper mine[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(2): 75-80.

[18] 魏晓明.高阶段全尾砂胶结充填体强度特性及充填体配比设计研究[D].北京:北京科技大学,2018.
WEI Xiaoming. Study on strength characteristics and filling ratio design of high stage all-tailings consolidated backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.

[19] 谭伟,高忠,黄明清,等.废石胶结充填相似模拟试验及其强度异质分布[J].矿业研究与开发,2023,43(6):45-50.
TAN Wei, GAO Zhong, HUANG Mingqing, et al. Similar simulation test of cemented waste filling and its heterogeneous strength distribution[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 45-50.

[20] 李文臣,郭利杰,陈鑫政,等.尾砂胶结充填体三维空间强度分布相似模拟试验研究[J].黄金科学技术,2018,26(4):528-534.
LI Wenchen, GUO Lijie, CHEN Xinzheng, et al. Research on similar simulation test of three-dimensional spatial strength distribution of tailings consolidated backfill[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(4): 528-534.

[21] 陈庆发,刘军,龙恩林.隔离层下单漏斗放矿力链演变的参数敏感性分析[J].中国有色金属学报,2024,34(1):344-356.
CHEN Qingfa, LIU Jun, LONG Enlin. Parameter sensitivity analysis of drawing force chain evolution of single funnel in isolation layer[J]. The China Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(1): 344-356.

[22] 陈庆发,秦世康,杨承业.柔性隔离层下单漏斗散体矿岩力链演化特征模拟[J].中国有色金属学报,2021,31(6):1694-1705.
CHEN Qingfa, QIN Shikang, YANG Chengye. Simulation of rock force chain evolution of single funnel in flexible isolation layer[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(6): 1694-1705.

[23] 陈庆发,王少平,秦世康.柔性隔离层下多漏斗散体矿岩力链演化特征的离散元模拟[J].工程科学学报,2020,42(9):1119-1129.
CHEN Qingfa, WANG Shaoping, QIN Shikang. Discrete element simulation of ore-rock force chain evolution of multi-funnel granular under flexible isolation layer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(9): 1119-1129.