

限制性空间内无底柱分段崩落法组合式放矿方案 及实验研究^①

谭宝会¹, 龙卫国², 龚臻², 张志贵¹, 陈星明¹, 朱强¹

(1.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 221116; 2.金川集团有限公司龙首矿, 甘肃 金昌 737100)

摘要:以金川龙首矿西二区上部中段由下向分层胶结充填法转无底柱分段崩落法开采为例,研究了限制性空间内无底柱分段崩落法采场各分段的矿石回采和回收特点,构建了一种以分段为放矿控制单元的组合式放矿方案:第一、二分段采用总量控制方式出矿以确保顶板安全冒落形成覆盖层;第三分段采用低贫化方式出矿以避免无效贫化,实现矿石的高质量回收;第四分段采用正常回采进路低贫化放矿+辅助回收进路截止品位放矿以实现矿石的充分、有效回收。设计并开展了 3 种不同放矿方案的物理实验,结果表明,本文设计的组合式放矿方案在限制性空间实现崩落法安全高效开采和损失贫化控制方面具有显著优势,可使矿山整体开采经济效益处于较优水平,为后期工程实践提供科学的理论和技术指导。

关键词:限制性回采空间;无底柱分段崩落法;放矿;损失贫化

中图分类号: TD853

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.003

文章编号: 0253-6099(2023)02-0010-06

Experimental Research of Combined Ore-Drawing Scheme for Orebody in Confined Space During Sublevel Caving Without Sill Pillar

TAN Baohui¹, LONG Weiguo², GONG Zhen², ZHANG Zhigui¹, CHEN Xingming¹, ZHU Qiang¹

(1.School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 221116, Sichuan, China; 2.Longshou Mine of Jinchuan Group Co Ltd, Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: The upper middle section in the West 2[#] Mining Area of Jinchuan Longshou Mine, with the mining method changed from underhand cut-and-fill mining to sublevel caving without sill pillar, was taken as an example for studying extraction of the orebody in a confined space from sublevels of stope. A combined scheme was prepared with different ore-drawing method for each sublevel. As for the first and second sublevels, the total amount of mined ore in the ore drawing is controlled to ensure the safe caving of roof and forming of overburden. And ore drawing by controlling ore dilution is adopted for the third sublevel for avoiding ineffective dilution, so as to achieve high-quality ore recovery. For the fourth sublevel, a scheme of ore drawing by controlling ore dilution in the normal stope drift plus ore-drawing by controlling cutoff grade in an auxiliary extraction drift is designed to achieve a full and effective ore recovery. Experiments were then performed with three groups of different ore-drawing schemes, and results show that a combined ore-drawing scheme can achieve safe and effective mining of orebody in a confined space, but also has a significant advantage in controlling loss and dilution of ores, which can bring the mine good economic benefit from mining. It is concluded that this research can provide scientific theory and technical guidance for the following engineering practice.

Key words: stoping of orebody in a confined space; sublevel caving without sill pillars; ore drawing; ore loss and dilution

无底柱分段崩落法自 20 世纪 50 年代在瑞典出现并基本定型后,因其具有结构简单、机械化程度高、采矿效率高、采矿成本低、安全性及灵活性好等诸多优

点,被广泛应用于急倾斜厚大稳固矿体的地下开采之中。近年来,随着采矿机械设备快速发展^[1]、放矿理论日臻完善^[2]、采场结构参数不断寻优^[3]以及智能采

① 收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 镍钴资源综合利用国家重点实验室开放课题(GZSYS-KY-2021-022);西南科技大学博士基金项目(21zx7157)

作者简介: 谭宝会(1988—),男,陕西宝鸡人,博士,讲师,主要从事地下采矿工程教学与科研工作。

矿技术的兴起^[4],无底柱分段崩落法的优势进一步凸显。

采用无底柱分段崩落法对一个急倾斜厚大且延深也较大的矿体进行回采时,采场中通常可以布置十数个甚至数十个回采分段,为矿石回采和回收创造了较为理想的条件,一般可获得较好的矿石回收指标。然而,采用无底柱分段崩落法回采某些在垂直方向上厚度十分有限(称之为限制性空间)的矿体,如目标矿体夹于上、下两个胶结充填体之间时,由于矿体垂向厚度较小,通常仅可布置3~5个回采分段。无底柱分段崩落法采用菱形采场结构,使得分段矿石具有转段回收的特点,一般来说分段数目越多,矿石回收效果越好,分段数目越少,也就越容易造成矿石的损失贫化,此外较少的分段数目也增加了覆盖层的形成难度。因此,有必要针对无底柱分段崩落法在限制性空间内回采急倾斜厚大矿体时的特殊性,寻求一个综合性的解决方案,以提升采矿效率、降低矿石损失贫化,提高矿山技术经济效益。

本文以金川龙首矿西二采区上部中段由下向分层胶结充填法转无底柱分段崩落法为工程背景,系统研究了限制性空间内无底柱分段崩落法采场各分段的矿石回采及回收特点,构建出一种以分段为放矿控制单元的组式放矿方案,并采用物理模拟实验对该方案的可行性和优越性进行了验证,为后期生产实践提供理论和技术指导。

1 工程背景

金川集团龙首矿西二采区矿体赋存标高为1 058~1 671 m,地表100 m以下见矿,矿体走向北27°西,倾向南西,倾角70°~80°,沿走向全长463 m,矿体平面上形似一平卧葫芦状,总体呈东厚西薄,东部6行勘探线附近最厚,近200 m,8号勘探线附近最薄,仅有28 m,矿体平面形态见图1。西二采区矿石品位较低,仅为金川矿区富矿品位的1/3左右,属于贫矿资源。西二采区于2010年投产,开始采用双中段同时回采的下向分层胶结充填法进行开采,但2016年,由于矿石产品价格大幅下跌,利用高成本的胶结充填法回采低品位矿石使得矿山濒临亏损,为扭转形式,矿山决定将上部中段胶结充填法转为生产成本较低的无底柱分段崩落法,此时上部中段矿体夹于上、下两个充填体之间,其垂向厚度不足70 m,如图2所示。

金川镍矿资源作为我国国防发展和经济发展的重要战略资源,在回采过程中必须严格控制其损失,尤其

是对于西二采区这样的贫矿资源,更应严格控制贫化指标。因此必须结合现场实际采矿需求,制定合理的矿石回收方案,力求在限制性回采空间内实现无底柱分段崩落法安全、高效、充分、高质量回收矿石的目的。在综合考虑了矿体垂向厚度、开采经济效益、设备能力、技术能力、矿岩特性等因素基础上,确定上部中段崩落法采场仅可布置4个回采分段。

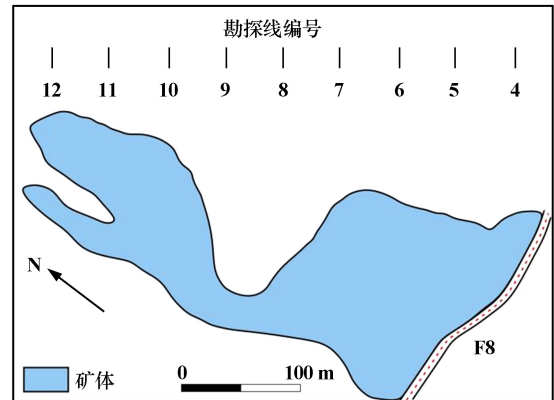


图1 金川龙首矿西二采区矿体平面形态

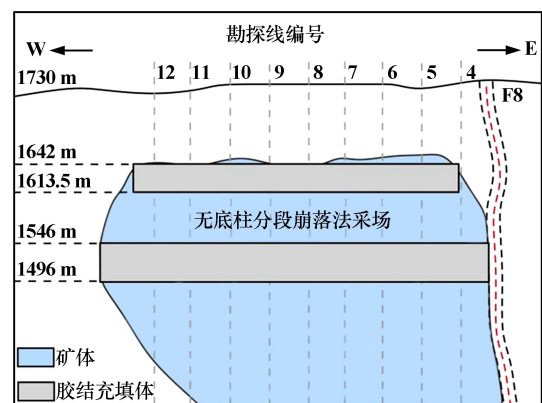


图2 金川龙首矿西二采区双中段开采方案示意

2 组合式放矿方案的构建

上、下胶结充填体的限制使得西二采区上部中段矿体的回采及回收条件变得十分复杂。分析可知,西二采区无底柱分段崩落法采场的4个回采分段各具有不同的矿石回采及回收条件,各分段的采矿目的和任务也不一样,因此必须结合各分段的矿石回采特点来制定相应的矿石回收方案。

2.1 首采分段总量控制放矿方案

为了进一步降低采矿成本,计划通过首采分段采矿,诱导顶板强度较小的胶结充填体自然冒落形成覆盖层。因此对于首采分段而言,其主要目的和任务是通过崩落矿石形成连续采空区,诱导顶板胶结充填体

及上部围岩及时冒落,从而安全、高效、低成本地为崩落法采场形成覆盖层。为了预防在回采过程中空区顶板突发大规模冒落带来的冲击危害,需要在空区底板预留一定厚度的矿石散体作为安全缓冲垫层。根据文献[5]中得到的安全垫层合理厚度计算公式,计算出西二采区首采分段至少需要在空区底板留下7.5 m左右的松散矿石作为安全垫层才可确保采矿作业的安全性。由此确定首采分段的步距出矿量需要控制在崩矿量的30%~40%,这样既可以满足顶板冒落到碎胀空间的需求,又可以确保出矿口始终处于封堵状态。因此,首采分段需要采取总量控制的方式进行出矿。

2.2 第二分段总量控制放矿方案

由于矿区水平构造应力相对较大,推断其可能对胶结充填体和上部围岩的冒落有一定限制作用^[6],此外考虑到矿山开采具有一定的复杂性及随机性,无法排除首采分段回采结束后仍有局部地段(如8~9号勘探线之间矿体厚度较小的部位)顶板没有完全冒落下来。因此从安全生产和延缓矿岩混杂的角度考虑,第二分段的崩落矿石也不全部放出,而是继续采用总量控制方式出矿,也就是说第二分段的回采既要使采场达到一定产能,同时也依旧要承担部分放顶任务。首采分段底板已经预留了部分矿石垫层,这部分矿石垫层在第二分段回采过程中会继续下移作为第二分段的安全垫层,因此从维持产量的角度考虑,第二分段的放出矿石比例可适当加大。经计算分析,第二分段放出矿石比例可以加大到步距崩落矿石的80%左右,此时既可以保证产量需求,又可在采场留下足够的松散矿石安全垫层。因此,第二分段依旧采取总量控制方式出矿,同时在第二分段采取总量控制放矿还可以有效降低冒落胶结充填体和崩落矿石的混杂程度,暂留于采场的矿石垫层通过下部分段进行回收。

2.3 第三分段低贫化放矿方案

在前两个分段回采结束后,基本可以保证顶板胶结充填体及上部围岩已经完全冒落,在采场中形成了预留崩落矿石+冒落胶结充填体+冒落围岩的散体覆盖层。因此,第三分段可以视作正常条件下的矿石回收,其主要任务就是充分、有效、高质量地实现矿石的回收。传统截止品位方式放矿的主要缺陷是放矿过程中矿石贫化较大,使原本可以不发生贫化就能被回收的矿石因为出矿管理不当而发生贫化,而低贫化方式放矿则很好地克服了这一缺点。西二采区矿体厚大陡立,为低贫化放矿的实施提供了优良条件,同时第一、二分段通过总量控制出矿后在采场中留下了相当数量

的崩落矿石隔离层,在放矿过程中可以有效阻隔覆盖层废石提前混入,这也为第三分段实施低贫化放矿创造了有利条件。采用低贫化方式出矿既有利于控制矿岩混杂,也可以防止强度较小的冒落胶结充填体在散体移动场中因受过度挤压、剪切等作用而大量破碎变成小块,提前穿流至放矿口引起贫化。

为有效降低放矿过程中的矿石贫化,第三分段采用低贫化方式放矿,一旦确认废石已正常到达出矿口,便可立即停止出矿,使原本需要贫化放出的矿石暂留于采场内,在下分段以纯矿石方式进行回收,从而减少无效贫化,实现矿石的高质量回收。西二采区冒落胶结充填体与矿石的色差及密度差异明显,很容易通过肉眼判别废石何时到达出矿口以及爆堆上废石的比例,因此矿石贫化问题能够较好地得到控制。

2.4 第四分段低贫化+截止品位放矿方案

第四分段是崩落采场中的最后一个回采分段,由于下部胶结充填体的阻隔,第四分段下部不再具有回收转段矿量的条件,因此在这一分段除了要充分回收正常进路范围内的崩落矿石,还必须考虑转段矿量的回收问题。第四分段的转段矿量主要包括两部分:一是进路间未崩落的桃形矿柱,二是桃形矿柱上部的脊部残留矿量。由理论计算可知,第四分段的桃形矿柱和脊部残留矿量可占分段矿量的30%~40%,显然,第四分段的转段矿量回收问题将在相当程度上影响到崩落法采场的总体矿石回收效果。为充分回收第四分段矿石,可以在该分段通过加密进路的方式回收转段矿量,即在相邻两条进路间柱上再增加一条辅助回收进路,如图3所示。

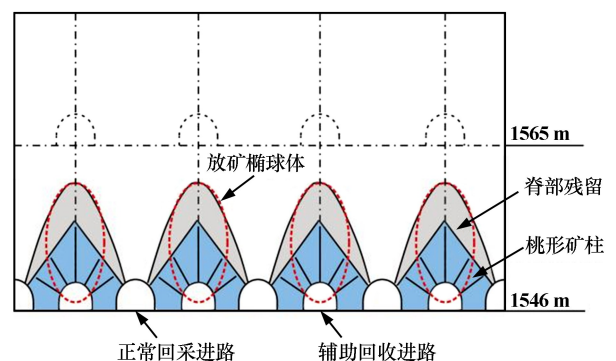


图3 第四分段转段矿量回收方法

由无贫化放矿理论可知,正常回采进路贫化后放出矿石主要来自脊部残留,可以通过辅助回收进路充分、高质量地回收这部分矿石。因此为了在第四分段进一步降低贫化,可以对正常回采进路采用低贫化方

式出矿，而辅助回收进路是矿石回收的最后机会，可以采用截止品位方式出矿，从而在第四分段形成正常回采进路低贫化放矿+辅助回收进路截止品位放矿的矿石回收方案。

2.5 组合式放矿方案

最终，根据西二采区上部中段崩落法采场 4 个分段各自所具有的矿石回采及回收条件，构建出一种以分段为回采单元的特殊组合式放矿方案，如图 4 所示，可以在限制性回采空间内实现无底柱分段崩落法安全放顶形成覆盖层以及减少废石混入、充分回收矿石的目标。

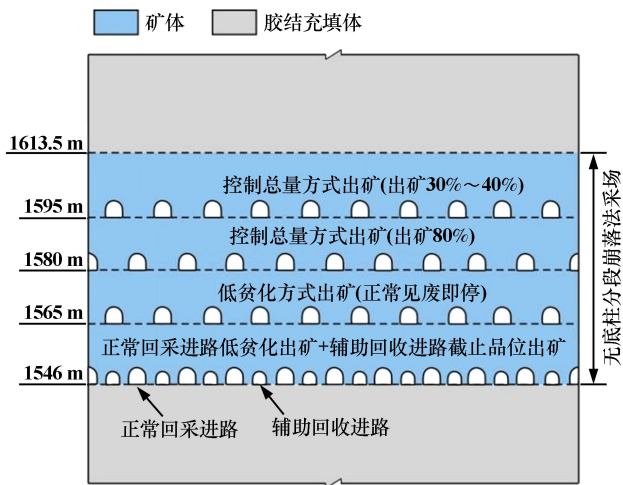


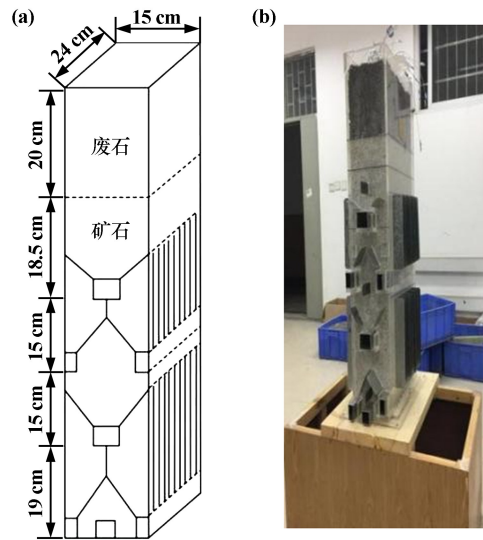
图 4 西二采区上部中段崩落法采场组合式放矿方案

3 组合式放矿方案实验研究

3.1 实验模型设计及实验参数

为了更加精准、可靠地验证所提出的组合式放矿方案在限制性空间内回采急倾斜厚大矿体时的可行性和优越性，通过物理模拟放矿的方法进行了实验研究。

按照西二采区上部中段无底柱分段崩落法采场结构参数制作了单分间、多步距的立体放矿模型，模型比例为 1:100。模型设计了 4 个放矿分段，分别对应实际的 4 个回采分段，每个分段包含 1~2 条回采进路，每条进路包含 10 个放矿步距，放矿步距 2.4 cm，回采进路高 4.3 cm、宽 4.6 cm，第一分段边孔角 40°，其余分段边孔角 55°。在模型第四分段的两条正常回采进路之间增设一条辅助回收进路，其尺寸与正常进路尺寸相同。为便于放矿过程中观察实验现象，模型四壁采用高强度的透明有机玻璃板制作，底板为木质材料，进路及步距挡片均采用厚 1 mm 的铁片制作。如图 5 所示。



(a) 模型设计图；(b) 模型实物图
图 5 放矿模型设计图及实物照

实验研究结果表明，放矿实验过程中矿岩颗粒的密度差异不会明显影响矿石回收结果，因此为了便于在实验过程中观察实验效果以及方便筛分放出的矿石和废石，本次实验选取黑色的磁铁矿颗粒来模拟冒落的胶结充填体覆盖层，采用白色的白云石颗粒模拟西二采区铜镍矿矿石。其中矿石（白云石）块度组成参照类似矿山无底柱分段崩落法爆堆的块度组成进行设置，废石（磁铁矿）块度组成按照西二采区胶结充填体冒落实测块度组成进行设置。实验散体物料块度组成见表 1。

表 1 实验散体物料块度组成

块体尺寸/cm	矿石比例/%	废石比例/%
>0.6	10	29
0.3~0.6	15	30
0.1~0.3	45	23
<0.1	30	18

3.2 实验方案制定

为验证本文提出的组合式放矿方案在限制性回采空间内降低崩落法矿石损失贫化的优越性，共设计了 3 种不同的放矿实验方案，各实验方案的放矿控制方式见表 2。

在实验过程中对于按照总量控制方式进行出矿的分段，各步距在出矿时达到设定出矿比例即可停止出矿，对于截止品位方式出矿和低贫化方式出矿，为了准确控制出矿量，分别计算出这两种出矿方式截止出矿时工作面上的矿-废体积，并将其转换为质量比，以便

于称重控制。需要说明的是,设定低贫化方式出矿截止品位的目的是为了准确判定废石是否已到达出矿口,同时需要放出那些在废石漏斗尖部超前运动的细小废石,以减少其在下部分段放矿时继续对矿石混杂^[7]。实验所用的放矿控制参数见表3。

表2 不同放矿方案控制方式

方案	各分段放矿控制方式			
	第一分段	第二分段	第三分段	第四分段
1	放出步距崩矿量的40%	放出步距崩矿量的80%	截止品位方式出矿	正常回采进路截止品位方式出矿+辅助回收进路截止品位方式出矿
2	放出步距崩矿量的40%	放出步距崩矿量的80%	低贫化方式出矿	正常回采进路截止品位方式出矿+辅助回收进路截止品位方式出矿
3	放出步距崩矿量的40%	放出步距崩矿量的80%	低贫化方式出矿	正常回采进路低贫化方式出矿+辅助回收进路截止品位方式出矿

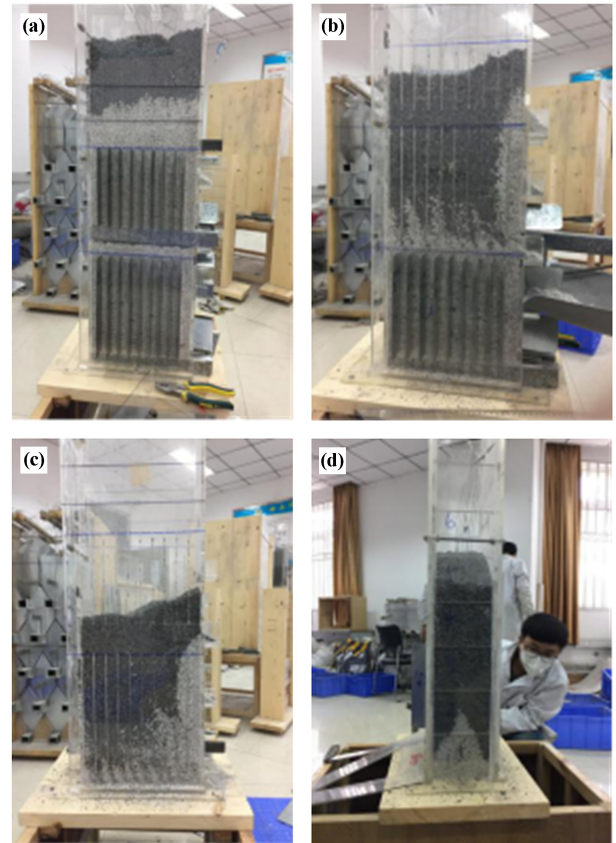
表3 放矿实验控制参数

放矿方式	截止品位/%	瞬时贫化率/%	截止矿-废体积比	截止矿-废质量比
截止品位方式出矿	0.26	60	34:66	23:77
低贫化方式出矿	0.56	16	80:20	70:30
总量控制方式出矿	按照设定比例控制出矿			

3.3 实验过程

模型在完成物料填装后,从上至下开始对每一分段严格按照设定的出矿控制参数进行放矿,放出矿石筛分称重后分别记录矿石、废石量。3种实验依次进行。以方案2为例给出了实验过程,如图6所示。实验过程中重点观察了放矿时的矿岩界面移动、矿岩混杂以及残留体等情况。

观察实验过程得知,3种实验方案的前两个分段回采结束后均在进路底板预留了足以封堵出矿口的矿石安全垫层,且均从第二个分段开始,矿岩界面轻微呈现出凹凸不平的波浪状,但矿岩掺混程度并不明显,表明前两个分段采用总量控制方式出矿有效控制了废石过早混入矿石。采用低贫化方式放矿时,正面残留通常在上分段进路以下是连在一起的,而采用截止品位放矿方式时,步距间留下的正面残留被废石隔开,表明采用低贫化方式放矿可以有效降低矿岩混杂程度。同时,无论采用何种放矿方式以及贫化多大,模型中都会有部分残留矿石(主要是正面残留、矿岩混杂层)无法放出,造成矿石损失。



(a) 第一分段回采结束; (b) 第二分段回采结束; (c) 第三分段回采结束; (d) 第四分段回采结束

图6 方案2放矿过程

3.4 实验结果

为确保获取的实验数据科学、可靠,每种实验方案均进行了2次实验,取2次实验的平均值作为最终结果。3种实验方案矿石回收指标见表4。

表4 各实验方案矿石回收指标

方案	矿石回收率/%	废石混入率/%
1	87.58	15.45
2	86.50	10.82
3	85.40	6.52

由表4可知,3种实验方案的矿石回收率在85.40%~87.58%之间,差异不大,废石混入率在6.52%~15.45%之间,出现明显差异。对比分析可知,尽管方案1获得了较高的矿石回收率,但所付出的代价是放出了大量的废石,方案2和方案3的矿石回收率仅比方案1分别低了1.08和2.18个百分点,但贫化率却比方案1分别降低了4.63和8.93个百分点,表明采取低贫化放矿可以在维持矿石回收率基本不变的基础上大幅降低废石混入率;方案3第四分段正常进路采取低贫化放矿

后, 矿石回收率较方案 2 仅下降 1.1 个百分点, 但废石混入率却下降了 4.3 个百分点, 证明在最末分段正常进路采用低贫化放矿方式是可行性的, 也是有效的。同时实验数据表明, 在最末分段通过辅助回收进路放出的矿量(主要是桃形矿柱及脊部残留)约占总回收率的 5%, 说明采用辅助回收进路可最大限度回收最末分段无法转段回收的矿量。

3.5 最佳方案选取

对比 3 种方案实验结果可知, 矿石回收率高的实验方案, 对应的岩石混入率也高, 很难直接判断各方案的优劣。为此, 可根据西二采区低品位矿石损失贫化指标改变引起的经济价值改变来判断实验方案的优劣, 计算公式如下^[8]:

$$\begin{cases} M_s = Q_0 m_s x \\ M_p = \left(\frac{\rho}{1-\rho} x + \frac{\eta}{(1-\rho)^2} y \right) Q_0 m_p \\ M_0 = M_s - M_p \end{cases} \quad (1)$$

式中 M_s 为回收率改变带来的经济价值; M_p 为岩石混入率改变带来的经济价值; M_0 为回收指标改变后的综合经济价值; m_s 为每损失 1 t 工业矿石造成的经济损失, 根据矿山实际资料, 取 $m_s = 422$ 元; m_p 为每多放出 1 t 无品位废石造成的经济损失, 取 $m_p = 616$ 元; x 为回收率的改变量; y 为岩石混入率的改变量; Q_0 为崩落工业矿量, 视为常数; η 为矿石回收率; ρ 为岩石混入率。

以方案 3 的 η 、 ρ 值作为参照值, 分别与方案 1 和方案 2 的 η 、 ρ 值进行差值运算, 便可得到方案 1 与方案 2 回收指标的改变量 x 及 y , 进而通过式(1)计算出方案 1 和方案 2 的 M_0 值, 结果见表 5。

表 5 3 种放矿方案经济性分析结果

实验方案	回收指标/%		回收指标改变量/%		M_0 值
	η	ρ	x	y	
3	85.40	6.52	—	—	—
2	86.50	10.82	1.10	4.30	-17.2 Q_0
1	87.58	15.45	2.18	8.93	-45.5 Q_0

由表 5 可知, 3 种实验方案的经济性优劣排序为: 方案 3>方案 2>方案 1, 即本文设计的组合式放矿方案最优。经济分析结果表明, 对于西二采区贫矿资源, 采用组合式放矿方案可以在获取较优回收率的同时大幅度降低岩石混入率, 从而使西二采区低品位矿石的整体开采经济效益处于较优水平, 此外还可大幅度减少矿山排废对环境造成的破坏和污染。但需要强调的是, 如果后期采矿成本及矿石价格发生显著变化, 可能需要重新评估各方案的经济性优劣。

4 结 论

1) 在限制性回采空间内使用无底柱分段崩落法进行矿体开采时, 由于所能布置的回采分段数目较少, 无底柱分段崩落法的矿石回采及回收条件变得十分复杂, 不仅增加了覆盖层的形成难度, 而且增大了矿石损失贫化的控制难度。

2) 龙首矿西二采区上部中段无底柱分段崩落法采场仅可布置 4 个回采分段, 可根据各分段的矿石回采及回收特点制定相应的矿石回收方案, 第一分段和第二分段采用控制总量方式出矿, 确保安全形成覆盖层, 第三分段采用低贫化放矿方式出矿, 提高矿石回收质量, 第四分段采用正常回采进路低贫化放矿+辅助回收进路截止品位放矿, 实现矿石充分回收, 由此构成一种以分段为放矿控制单元的组合式放矿方案。

3) 物理放矿实验结果表明, 在限制性回采空间内采用无底柱分段崩落法回采时, 采用本文设计的组合式放矿方案, 既可确保顶板安全冒落形成覆盖层, 也可在获取较优矿石回收率的同时大幅度降低岩石混入率, 从而使整体开采经济效益处于较优水平。

4) 最末分段辅助进路回采在桃形矿柱中进行, 工作空间极为有限, 掘进支护以及回采作业都比较困难, 且回收的矿量也不大(约占总回收矿量的 5%), 回采成本较高, 安全风险也较为突出, 在实际采矿中还应进一步深入研究采用辅助进路回收最末分段桃形矿柱及脊部残留矿量的具体方案。

参考文献:

- [1] 李志国, 李夕兵, 周梓荣, 等. 深部金属矿水压凿岩机关键技术[J]. 矿冶工程, 2010, 30(3): 27-31.
- [2] 吴宇轩, 陶干强, 张 淦. 改流体放矿技术实验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 141-144.
- [3] 杨官印, 陈玉明, 王小勇. 马鞍山 2# 矿体无底柱分段崩落法结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(2): 24-27.
- [4] 李国清, 王 浩, 侯 杰, 等. 地下金属矿山智能化技术进展[J]. 金属矿山, 2021, 50(11): 1-12.
- [5] 曹建立, 任凤玉. 诱导冒落法处理时采空区散体垫层的安全厚度[J]. 金属矿山, 2013, 42(3): 45-48.
- [6] HE L, ZHANG Q B. Numerical investigation of arching mechanism to underground excavation in jointed rock mass[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50(8): 54-67.
- [7] 任凤玉, 康培生. 无底柱分段崩落法出矿控制点与矿岩块度关系的实验研究[J]. 中国矿业, 1998, 6(6): 25-27.
- [8] 张志贵. 矿石损失贫化的经济评价与分析[J]. 中国矿业, 1992(11): 30-35.

引用本文: 谭宝会, 龙卫国, 龚 臻, 等. 限制性空间内无底柱分段崩落法组合式放矿方案及实验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 10-15.