

复杂金属矿床高效低贫损上向水平分层充填采矿方法*

胡松涛¹, 朱明德^{1,2,3}

(1. 山东黄金矿业科技有限公司, 山东 济南 250100;

2. 山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 莱州市 261442;

3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:针对复杂金属矿床在开采时存在矿石贫化和损失大、采场稳定性差等难题,提出了脉内“之”字形低废采准工艺与气囊预占位成巷方法,并在此基础上研发了高效低贫损上向水平分层充填采矿方法。依托内蒙某金矿,采用现场调查和室内试验的手段开展了该采矿方法分层采场结构参数、预占位气囊整体结构与尺寸等方面的研究。研究结果表明,该矿山试验矿段的岩体质量指标 RMR 值为 51~63,对应分层采场极限跨度为 5.5~10.5 m。设计确定了预占位充气式气囊的整体结构,计算得到了充气式气囊的工作压力为 0.2 MPa,承载能力为 0.5 MPa;获得了爆破补偿空间与岩石膨胀系数的关系,确定了合理的预占位充气式气囊的跨度为 2.5 m。在此基础上开展了现场工业试验,工业试验采场高 4 m,宽 5.5 m,长 20 m。试验采场的回采结果表明,该方法二步骤采场生产能力达到 150 t/d,矿石的回采率为 94%,矿石贫化率为 4.8%,实现了复杂金属矿床的高效低贫损开采。

关键词:复杂金属矿床;分层充填法;低废采准;预占位气囊;贫化率;损失率

中图分类号:TD853.34

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)06-0001-09

0 引言

金属矿床的形成与大型断裂构造密切相关。因此,在金属矿床的上盘、下盘或矿体内部常常赋存有大型的断裂构造,断裂构造的存在为矿床的形成创造了有利条件,但断层构造带附近岩体受到区域构造运动以及热液蚀变作用的影响,节理裂隙发育,岩体破碎,稳定性差。当矿山开采活动遇到断层时极易发生塌方与冒顶灾害,严重威胁人员和设备安全,也造成了部分资源的损失和浪费。针对该类复杂条件的金属矿床,通常采用加强支护与减小采场尺寸

的方式控制断层附近采场围岩的稳定性,上向水平分层充填法得到了较为广泛的应用^[1-5]。上向水平分层充填法虽然在一定程度上解决了断层影响下的复杂金属矿床安全开采难题,但是该方法工艺复杂、生产能力和效率低、生产成本高等问题制约了矿山的高效、低成本开采。近年来,国内外学者与工程技术人员针对以上工艺技术难题开展了大量研究,从矿岩体稳定性控制、开采工艺变革以及设备的机械化配套等 3 个方面进行分层充填法的改进与优化。通过准确评价岩体质量指标,采用 UBC 极限跨度法进行分层充填法结构参数优化^[6-8]。采用锚杆支护的手段提高分层采场围岩的稳定性,进而增大分层采场的高度和跨度^[9-10]。提出脉外采准工艺,引入掘进台车和无轨铲运机,提高了开采工艺的灵活性与采场的生产效率^[11-12]。通过优化充填材料的力学性能,减少充填体的初凝时间,提高充填体的初凝强度,缩短工艺循环时间,降低爆破引起的充填体破坏体积,进而提高分层充填法的开采效率,降低矿石贫损指标^[13-17]。通过改变分层充填法盘区开采顺序,降低局部应力集中,提高采场围岩的稳定性^[18]。以上技术与工艺的研发改善了传统上向水平分层充填法的机械化水平,提高了采场的生产效率与能力,但是未解决该方法各回采工艺间不连续、二步骤开采难度大、工艺复杂的问题。

为此,以内蒙某金矿为工程背景,针对该金矿断层构造带下急倾斜薄及中厚矿体的复杂赋存条件,从降低采准工程量、减少废石产出、提高工艺的连续性、简化工艺的复杂性角度出发,研发高效低贫损上向水平分层充填采矿方法,设计确定分层采场的结

* 收稿日期:2023-10-11

作者简介:胡松涛(1981—),男,四川大英人,硕士,高级工程师,主要从事矿山地质科研工作,E-mail:hstdkjt@qq.com。

通信作者:朱明德(1988—),男,河南开封人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿深部开采、深部岩石力学、矿山安全等方面的研究工作,E-mail:zhumingde@sd-gold.com。

构参数,研发分层采场气囊预占位成巷与连续开采新工艺,确定该方法的采切工艺及回采工艺,实现断层影响下复杂难采矿体的安全、高效、经济回采。

1 工程背景

内蒙古某金矿的矿体为含金强硅化大理岩及闪长玢岩,矿体的走向和倾向连续但形态变异性大,矿体蚀变强烈,硫化物呈细脉状分布于硅化大理岩中,闪长玢岩脉可见点状硫化物,矿体矿化不均匀,局部厚大。矿体呈急倾斜中厚矿体产出,矿体走向 303° ,倾向 113° ,平均倾角 68° ,矿体厚度变异性大,变化范围为 $6\sim 33\text{ m}$,在矿体上盘赋存一条大型断裂构造,该构造与矿体斜交,属于典型的断层构造带影响下的急倾斜中厚矿体。该类矿体的形态和厚度变异性大,如采用大结构参数中深孔开采工艺,势必会增大矿石的贫化或损失,同时与矿体斜交的大型断裂构造也严重影响了采场围岩的稳定性,制约了采场参数的扩大。为此,如何实现该类矿体的安全、高效、低废开采是该金矿亟待解决的技术问题。

2 高效低贫损上向水平分层充填采矿方法

针对该金矿矿体的复杂赋存条件,围绕安全、高效、低贫损、低废开采的目标,提出一种高效低贫损上向水平分层充填采矿方法,采矿方法的三视图如图1所示。

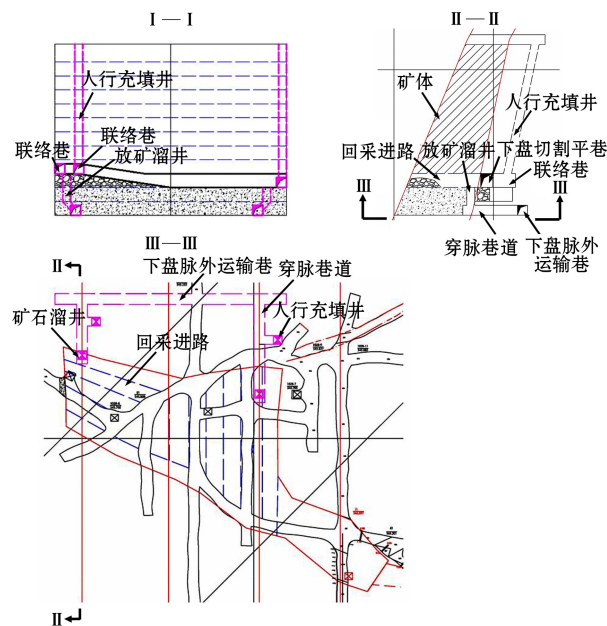


图1 高效低贫损上向水平分层充填采矿方法三视图

Fig.1 Three views of upward horizontal cut and fill mining method with high efficiency and low ore loss and dilution rates

该方法采用浅孔落矿分层充填的方式,使采场的形态能够与矿体形态相适应,减少由于开采设计难以适应矿体的变异性所引起的矿石损失和贫化;采用脉内采准方式,进一步探明矿体沿走向和倾向方向的边界,减少采准工程施工所产生的废石量;优化分层采场尺寸,联合应用支护手段控制断层附近采场的稳定性;采用气囊预占位工艺,实现二步骤采场开采工艺的连续以及开采效率和能力的提升。

2.1 采场结构与布置

在垂直方向上将矿体分层,分层高度为 4 m ,沿着矿体走向方向划分盘区,盘区长度为 $60\sim 100\text{ m}$,盘区宽度为矿体全厚,在盘区内进一步划分分层采场,分层采场宽度为 $4\sim 8\text{ m}$,高度为分层高度,当分层采场垂直矿体走向布置时,采场长度为矿体厚度;当分层采场沿矿体走向布置时,采场长度为 $20\sim 30\text{ m}$ 。将分层采场划分为一步骤采场和二步骤采场间隔回采,待整个盘区分层采场回采充填完毕后,再进行上一分层的回采。

2.2 低废采切工程布置

为实现复杂形态矿体的探矿与开采相结合以及减少开采过程中废石产出的目标,提出一种低废采切工程布置方式。该工艺采用脉内采准方式,主要的采切工程有:下盘阶段脉外运输巷道、穿脉巷道、下盘人行充填井、顺路放矿溜井、下盘联络巷、分层联络巷等,并提出下盘联络巷“之”字形换层方法和气囊预占位成巷方法。下盘联络巷“之”字形换层方法如图2所示。在下盘矿岩交界线位置施工沿脉联络平巷,用于连接分层内每一采场。当每一分层回采充填完毕后,在进行上分层开采前,先进行下盘联络巷的换层施工。自下盘联络巷中央开始向采场的一侧进行压顶,以 12% 的坡度对压顶崩落的岩石进行平场并到达上分层标高,到达上分层标高后自采场一端向另一端反向压顶,对崩落的岩石进行平场,形成上分层下盘联络巷道,进行上分层的回采工作。每一分层结束后采用上述工艺进行压顶、平场和回采,上下相邻的两个分层的压顶方向成“之”字形交替布置,在整个阶段盘区回采期间,铲运机不出采场,最后一分层回采完毕后,通过压顶的方式,将下盘联络巷与上阶段探矿穿脉联通,便于铲运机进出。

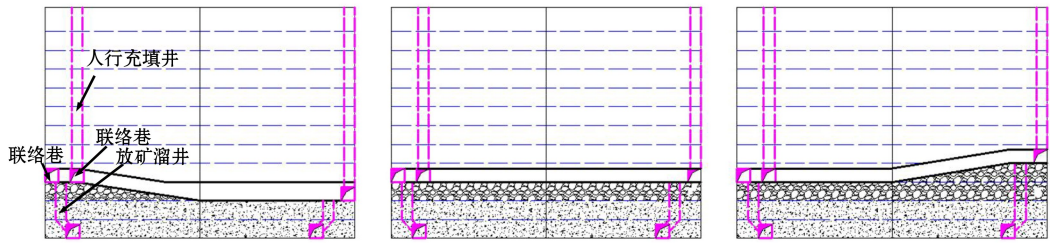


图2 下盘联络巷“之”字形换层方法

Fig.2 “之”shaped layering method in the footwall connection drift

当分层采场跨度大于等于 6 m 时,在回采时一般需要在采场的中央先行施工小断面切割平巷(断面 2 m×2 m),以该切割平巷为自由面进行分层采场的回采作业。这种作业方式增加了采切工程量,提高了回采工艺的复杂性,导致采场生产效率降低。为此,提出一种气囊预占位成巷方法,该方法在分层采场回采完毕后,在采场的一侧布设气囊,当气囊充气完毕后进行分层采场的充填,在相邻二步骤采场回采前将气囊放气脱出,通过气囊占位的方式形成切割平巷,为二步骤采场回采创造自由面和爆破补偿空间,这种方法显著降低了采切工程量,大幅提高了二步骤采场的生产能力和效率,其工艺过程如图 3 所示。

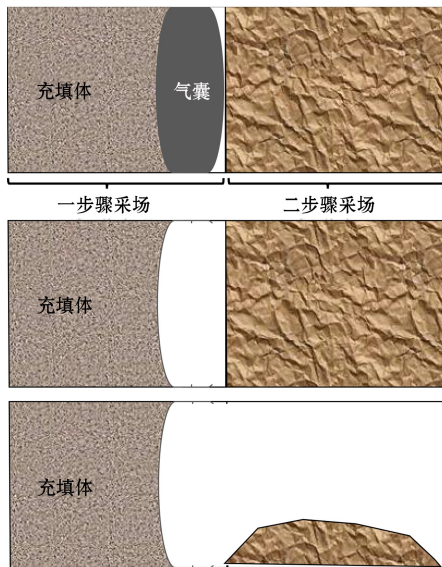


图3 气囊预占位成巷方法

Fig.3 Airbag pre-positioning drift formation method

2.3 回采工艺

将盘区内分层采场划分为一步骤采场和二步骤采场,回采时先回采一步骤采场,再回采二步骤采场。一步骤采场采用先切割后回采的传统方法,一

步骤采场回采完毕后在采场内布设预占位充填气囊并进行采场充填,待充填体形成强度后,将气囊进行放气卸压并移除,进而为二步骤采场形成爆破自由面和补偿空间,方便二步骤采场开采。按照自下而上的水平分层回采,每一分层待盘区内采场均回采充填完毕后进行整体换层,直至回采到最上分层为止。盘区内根据矿体形态可选择从一翼向另一翼退采或从两翼向中央的回采顺序。

本方法采用浅孔落矿,一次爆破进尺为 2.3 m,爆破采用 2# 岩石乳化炸药,数码电子雷管,分段起爆,通过调整爆破时间间隔与顺序,减小爆破扰动,同时在采场边界处设置光爆孔,提高采场断面的平整度,进而提高采场围岩的稳定性。在断层附近区域以及采场穿过断层时,应采取必要的支护措施,控制围岩的稳定性。在该区域采用锚+网+喷的联合支护方式,爆破后对采场顶板进行素喷,喷浆厚度为 5 cm,采用树脂锚杆+金属网的支护方式,树脂锚杆间距为 0.8 m,排距为 1 m,金属网采用菱形柔性金属网。

采场爆破崩落的矿石采用铲运机经回采巷道与下盘联络巷运至顺路放矿溜井中,自阶段底部的运输巷道装车运出。一步骤采场充填采用尾砂胶结充填,采用灰砂比为 1:20 的充填体,为保障无轨铲运机在充填体上行进,需要在每一分层采场的顶部进行硬化,硬化厚度为 0.5 m,充填料灰砂比为 1:4。二步骤采场充填采用废石尾砂充填,在进行尾砂充填前可用铲运机堆放废石,然后进行尾砂胶结充填,充填材料的灰砂比为 1:20,同样在二步骤采场的顶部也需进行充填体硬化,硬化厚度为 0.5 m,充填料灰砂比为 1:4。

3 分层采场结构参数设计

3.1 现场岩体力学调查

根据现场调查在试验矿段共揭露 6 种岩性,分

别是混合花岗岩、斜长角闪片麻岩、大理岩、片岩、玢岩和石英岩。分别对以上岩性岩石开展室内岩石加载卸载力学试验,得到该金矿试验矿段各类岩石的物理力学特性,其参数见表 1。

表 1 岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters

岩性	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
混合花岗岩	272.72	53.82	0.18	9.07	22.404 70	56.16
斜长角闪片麻岩	173.52	80.94	0.25	8.71	21.394 06	54.73
大理岩	145.40	72.89	0.26	4.23	13.408 03	46.24
片岩	79.84	54.69	0.2	4.82	17.968 57	47.1
玢岩	137.74	70.26	0.24	4.65	20.337 31	49.7
石英岩	208.97	57.06	0.13	7.46	19.019 28	65.25

采用 Sirovision 节理岩体遥测系统开展试验矿段岩体结构面产状及分布调查,在试验矿段内共设置 14 个调查区段,每一个调查区段长 8 m。现场调查结果显示,在试验矿段内主要有三组优势节理,以急倾斜结构面为主,节理产状分布如图 4 所示。优势节理组 1:倾向 290°,倾角 82°;优势节理组 2:倾向 88°,倾角 86°;优势节理组 3:倾向 160°,倾角 70°。除去以上三组优势结构面,还离散分布着一些随机节理。计算得到该区域内岩体 RQD 指标为 48~90,在断层上下盘 1 m 范围内岩体节理发育,岩体 RQD 指标小于 40。

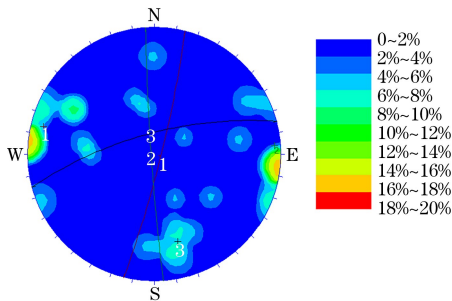


图 4 试验矿段岩体节理产状分布

Fig.4 Distribution map of joint orientation in the experimental mining section rock mass

采用 RMR 岩体质量评价方法,综合考虑试验矿段的岩石力学特性、节理间距、节理产状、地下水以及节理剪切力学特性,进行岩体质量综合评价,获得 14 个调查区段的综合评价结果。在试验矿段内大部分岩体属于三类岩体,有 2 个调查区段岩体质量较好,属于二类岩体,岩体质量指标 RMR 最大值为 63,最小值为 51,平均值为 57。在断层上下盘 1 m

范围内岩体质量较差,岩体质量 RMR 值小于 45。

3.2 分层采场结构参数设计

采用 UBC Critical span 方法进行分层采场跨度的设计,在进行采场极限跨度计算时未考虑围岩支护,同时如该区域存在明显的缓倾斜节理时,则将岩体质量 RMR 值降低 10 之后,再进行采场跨度设计与计算。设计结果如图 5 所示,本次试验矿段内岩体质量指标 RMR 的最大值为 63,对应的分层采场的极限跨度为 10.5 m;最小 RMR 值为 51,对应的分层采场极限跨度为 5.5 m;平均 RMR 值为 57,对应的分层采场极限跨度为 8 m;对于断层近区,分层采场的跨度应控制在 4 m 以下,并进行喷锚网联合支护。

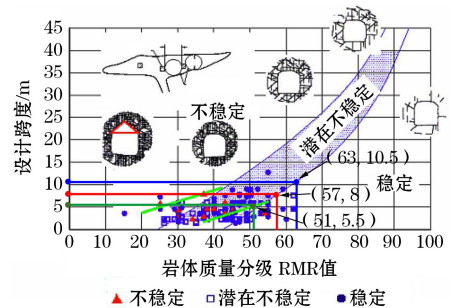


图 5 分层采场极限跨度计算

Fig.5 Calculation of maximum span in layered mining slope

4 分层采场气囊预占位成巷与连续开采工艺

4.1 预占位充气式气囊设计原理与结构

分层充填法采场预占位充气式气囊主要包括高压气源、气囊、限位装置、高压胶管、压力补偿充气装置,其整体结构构成如图 6 所示。其设计原理及流程:选定预占位隔离地点,在该区域设定限位装置,将气囊与限位装置相连接,调节压力补偿装置设定充气压力,通过高压胶管连接高压气瓶(或与地下矿山的高压风管相连)开始充气加压,施工人员即可撤离现场,气囊随充气量的增加逐渐膨胀,当气囊内压力达到设定压力时,气囊内外的压力平衡,从而自动停止充气,完成气囊的预占位隔离过程。待采场充填完毕后,相邻二步骤采场计划开采前,对气囊进行放气、卸压,去除限位装置,将气囊拆除,为相邻采场开采提供爆破补偿空间。

4.1.1 气囊材料的选择及制作要求

气囊在功能上应具有可靠性、耐用性和安全性,以保证气囊受到外力作用后能迅速恢复稳定状态。

因此,气囊的材料应满足以下几点要求:气囊的重量轻,搬运方便;气囊安设方法简单易行,速度快;气囊材料参数达标,在井下环境中不易磨损,与粗糙岩壁接触不易被尖锐岩体刺穿。同时,在地下采场使用时,气囊的接缝处一般需要进行密封处理,并加强防护。目前常用于制作充气式气囊的材料有橡胶、塑料薄膜和尼龙布等。塑料薄膜质量轻、气密性好,但是耐磨性差,且易被尖锐物体刺穿;尼龙材料气密性差,无法长期持压;橡胶耐磨、气密性好、重量较轻,且该材料的扯断伸长率为 229%,扯断总拉力平均值为 171.65 kN,扯断应力强度为 5.73 MPa,可满足采场充气式气囊的使用需求。为了提高充气式气囊对充填料浆的隔离作用,减少充填料浆进入隔离区,在制作气囊时,将气囊边缘制作成曲线形褶皱,充气后气囊褶皱会鼓起并与采场顶底板有效接触,堵塞边角,提高了隔离的严密性。

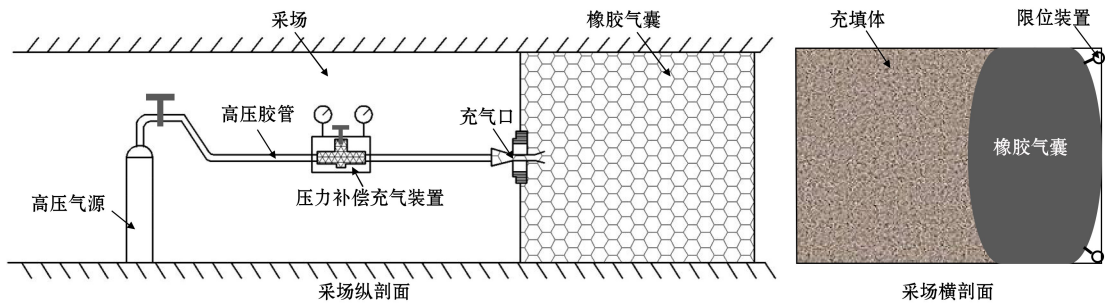


图 6 采场预占位隔离充气式气囊系统组成

Fig.6 Composition of stope pre-positioning isolation inflatable airbag system

4.2 气囊工作压力计算

充气式气囊的充气压力应使其能够承受充填料浆对气囊的作用力,其次气囊对采场的顶底板应作用足够的载荷,用来隔离充填料浆。

4.2.1 充填料浆对气囊的作用力

充填料浆对气囊的作用力主要是充填料浆(水、砂、泥浆)所产生的侧压力,气囊受力如图 7 所示。充填料浆主要由水、碎石和胶结料组成。水压的高程设为 h ,气囊长度为 L ,变形后曲面长度为 S ,水的密度为 $\rho_{\text{水}}$,砂的密度为 $\rho_{\text{砂}}$,水、泥砂所产生的最大压力分别为 $F_{\text{水}}$ 、 $F_{\text{砂}}$ 。气囊变形后外部曲面上静水总压力的水平分量等于该曲面的垂直投影平面上的静水总压力,由此,气囊所受的最大压力 F 为:

$$F = F_{\text{水}} + F_{\text{砂}} = \rho_{\text{水}} ghLS/2 + \rho_{\text{砂}} ghLS/2$$

因此,气囊在充气加压时,其额定压力应不小于 $(F_{\text{水}} + F_{\text{砂}})$ 。

4.1.2 压力补偿充气装置

由于气囊充气加压后,需等到采场内充填体形成强度后才能进行放气卸压,整个过程的时间长达 3~5 d,而橡胶气囊在充气加压后会缓慢放气的问题,这时候就需要使用压力补偿充气装置,当气囊内压力降低时,进行充气加压补偿。压力补偿充气装置由高压胶管、气体减压阀、压力表和充气接口组成。减压阀采用了多级减压方式,实现气囊压力的稳定维持。

4.1.3 气囊限位装置

由于气囊的尺寸小于采场的尺寸,当气囊安设于采场内且不对气囊进行限位固定时,在充气加压过程中会导致气囊的摆动,因此,必须设计相应的限位装置来固定气囊。在气囊的一侧设置固定绳,在采场的帮壁上安装挂钩,通过固定绳与挂钩的联接来实现对气囊的固定。

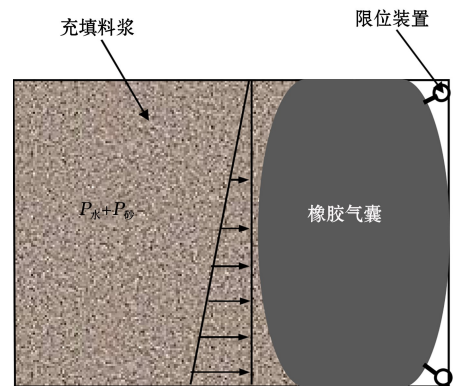


图 7 充填料浆对气囊的侧压力

Fig.7 Lateral pressure of backfill slurry on the airbag

4.2.2 气囊对采场顶底板的作用力

气囊隔离能力是指气囊与采场顶底板之间形成的摩擦力能够使气囊阻挡充填料浆(水、泥砂)所产生的侧压力。设气囊与采场顶底板的接触宽度为

B , 采场高度为 h , 气囊材料与采场顶底板的摩擦因数为 f , 气囊的内力为 P 。则气囊与采场顶底板间的摩擦力 F_3 为:

$$F_3 = 2LBfP$$

则保证气囊形成隔离能力的必要条件为:

$$F_3 > F_{\text{水}} + F_{\text{砂}}$$

$$\text{即: } 4BfP > (\rho_{\text{水}} + \rho_{\text{砂}})ghS。$$

由以上分析可知, 气囊的工作压力是保障其承载能力以及隔离效果的关键指标, 同时工作压力的大小也为气囊材料厚度的选择提供了必要指标。如果工作压力选择过小, 则充填料浆挤压气囊, 易导致气囊形变破坏, 同时气囊不能抵挡充填料浆的侧压力, 不能起到隔离作用, 充填料浆与气囊混杂在一起, 导致相邻采场回采时产生矿石贫化。如果工作压力选择过大, 强度系数虽然增大, 但是气囊材料壁厚增加, 浪费材料的同时导致气囊重量增加, 不易折叠, 不易现场操作, 而且壁厚的增加也极大程度地增

加了气囊的生产成本。

根据以上计算结果, 结合隧道中的气囊密封施工经验, 气囊的工作压力 P 与采场底板处充填料浆的最大压力有关, 一般为充填料浆最大压力的 1.5~1.7 倍, 即:

$$P = n(\rho_{\text{水}} + \rho_{\text{砂}})gh$$

设计分层采场高为 4 m, 水的密度为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 充填砂浆的密度为 $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 选择系数 $n = 1.5$, 则气囊的工作压力可确定为: $P = 0.19 \text{ MPa}$ 。

4.3 气囊尺寸设计

气囊预占位充填的作用是为相邻采场的回采提供爆破补偿空间。当预占位充填的尺寸较小时, 爆破补偿空间小, 相邻采场回采爆破效果不理想; 当预占位充填的尺寸过大时, 相邻采场回采后, 采场跨度大, 导致采场的稳定性差, 预占位充填尺寸大小的影响如图 8 所示。同时, 应考虑现场施工对气囊尺寸的要求。

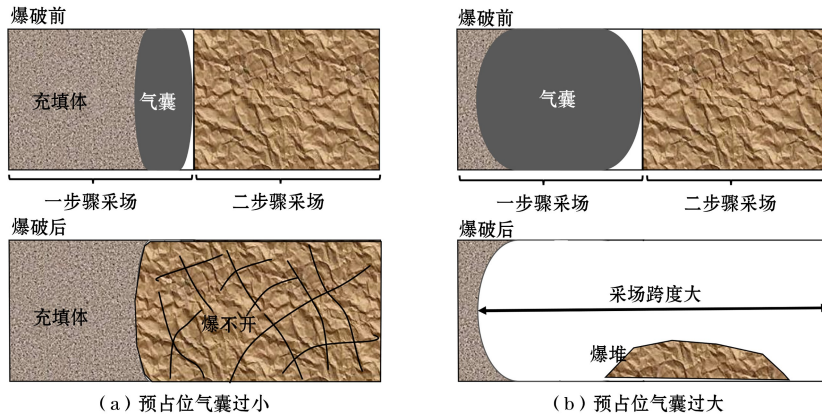


图 8 预占位气囊尺寸大小的影响

Fig.8 Influence of pre-positioning airbag size

气囊的形状有圆形、矩形和梯形, 可按照采场充填预占位区域的断面形状和尺寸加工系列气囊产品。气囊的结构分为整体式和组合式两种, 当所需预占位充填的断面尺寸小于 6 m^2 时, 选用整体式, 对于断面尺寸大于 6 m^2 时, 选用组合式。制作时, 其高度一般应比采场的高度高 200~300 mm。在满足以上要求的前提下, 还应符合以下尺寸要求。

(1) 现场安装拆卸尺寸要求。在相邻采场回采前应将气囊放气移除, 为了保证施工的方便, 预占位充填的宽度不得小于 1.5 m。

(2) 爆破补偿空间的要求。采用室内相似材料试验的手段研究爆破补偿空间与岩石碎胀系数的关系。试验分别测定了松散状态下、挤压状态下的岩

石碎胀系数, 并通过散体挤压试验测定岩石的爆破补偿系数。相似材料试验的几何相似比为 1:50, 试验所用矿岩散体均取自该金矿试验矿段。分别模拟不同单一粒级和混合粒级岩石散体的松散特性。试验结果可知, 在松散状态下, 矿岩散体的碎胀系数与块度成反比, 碎胀系数在 1.76~2.01 之间。对松散矿岩散体施加压力, 当所施加压力较小时, 矿岩散体的碎胀系数变化明显, 随着所施加压力值的增加, 碎胀系数的变化量逐渐减小。当施加 10 MPa 的压力时, 矿岩散体的碎胀系数在 1.37~1.45 之间; 当施加 20 MPa 的压力时, 矿岩散体的碎胀系数在 1.24~1.32 之间; 当施加 30 MPa 的压力时, 矿岩散体的碎胀系数在 1.18~1.26 之间。

(3) 碎胀系数与爆破空间补偿系数之间的关系。试验将混合粒级散体装入特制圆筒中(圆筒内径为 108 mm,壁厚为 6 mm,高为 200 mm)。首先,在特制圆筒中放入加载钢柱,并保证加载钢柱与圆筒接触良好,测量圆柱顶端至圆筒的距离 L_1 及试样质量 M_1 ;然后,利用试验机施压,压缩量分别为 2 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm,压缩后圆柱顶端至圆筒的距离为 L_2 ;最后,取出圆柱,称量落下散体的质量 M_2 ,计算压缩后的碎胀系数,结果见表 2。

由试验结果可知,随着矿岩散体碎胀系数的减小,其散体下落的百分比也相应减少,且两者间并非成线性关系。当矿岩散体的碎胀系数大于等于 1.45 时,大部分散体可顺利下落,而当碎胀系数小于 1.45 时,散体下落量很少。即岩体破碎后当其无法完全松散时,在一定的范围内仍可顺利落矿,其最小补偿系数为 1.45,该系数可为爆破补偿空间的计算提供依据。设计分层采场的跨度为 5.5 m,则最小爆破补偿空间跨度为 2.25 m。综合以上要求,最终确定采场预占位充填气囊的跨度为 2.5 m。

表 2 不同碎胀系数与散体下落量之间的关系

Table 2 Relationship between different fragmentation coefficients and the amount of material drop

压缩量/mm	碎胀系数	散体下落百分比/%
2	1.76	100
4	1.48	89
5	1.45	82
6	1.40	29
7	1.38	18

5 现场工业试验

基于前文对基于预占位隔离充气式气囊的高效低贫损上向水平分层充填采矿方法研究,开展现场工业试验。现场试验地点选择在该金矿十中段 31092[#]采场。设计采场高度为 4 m,采场跨度为 5.5 m,长度为 20 m,现场气囊选用橡胶材料制作,高为 4.1 m,长为 6 m,宽为 2.5 m,气囊形状为一圆柱体,设定工作压力为 0.2 MPa,最大承载压力为 0.5 MPa,在现场共布设 3 个橡胶气囊。该气囊的安装施工过程和实施效果如图 9 所示。

为了使气囊在放气后能与充填体分离,安设时,在气囊的表面涂抹润滑油,并在上面覆盖一层土工布,使得气囊与充填体不直接接触。回采后统计得出二步骤采场的经济技术指标为:采场生产能力为

150 t/d,矿石的回采率为 94%,矿石贫化率为 4.8%。



图 9 采场预占位隔离充填气囊现场安置过程及效果

Fig.9 On-site placement process and effect diagram of slope pre-positioning isolation filling airbags

6 结论

(1) 提出脉内“之”字形低废采准工艺,研发基于充气式气囊的预占位隔离方法,形成了高效低贫损上向水平分层充填开采新方法。

(2) 开展现场岩石力学调查与试验,获得试验矿段的岩体质量指标,并采用 UBC Critical span 方法进行分层采场极限跨度设计,得到该区域的采场极限跨度为 5.5~10.5 m。

(3) 设计了采场预占位隔离充填气囊的整体结构,包括高压气源、气囊、限位装置、高压胶管、压力补偿充气装置。计算了气囊所需的工作压力,当采场高度为 4 m 时,气囊的工作压力为 0.2 MPa,承载能力为 0.5 MPa。开展爆破补偿空间与岩石碎胀系数关系研究,计算岩体爆破的最小补偿系数,确定了采场预占位隔离充填气囊的跨度为 2.5 m。

(4) 开展了现场工业试验,试验过程中采场稳定,二步骤采场生产能力达 150 t/d,矿石的回采率为 94%,矿石贫化率为 4.8%。

参考文献(References):

- [1] 李强,赵大千,卢海波,等.基于 FLAC3D 的上向水平分层充填法采场稳定性分析[J].采矿技术,2023,23(2):53-57.
LI Qiang, ZHAO Daqian, LU Haibo, et al. Stability analysis of upward horizontal layered filling method mining field based on FLAC3D[J]. Mining Technology, 2023, 23(2):53-57.
- [2] 王振闽,李振龙,李帅,等.机械化上向水平分层充填法在低品位缓倾斜多层金矿脉开采中的应用[J].中国矿业,2021,30(11):87-93.

- WANG Zhenmin, LI Zhenlong, LI Shuai, et al. Application of mechanized upward slicing and filling method in mining low grade, gently inclined and multilayer parallel gold veins [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(11): 87-93.
- [3] 张润达, 李江, 朱晨迪. 盘区交错式上向水平分层充填采矿法 [J]. 采矿技术, 2021, 21(2): 18-21.
- ZHANG Runda, LI Jiang, ZHU Chendi. Panel interlocking upward horizontal layer filling mining method [J]. Mining Technology, 2021, 21(2): 18-21.
- [4] 李永辉, 顾生春, 王海文. 机械化上向水平分层充填采矿法在哈图金矿的应用 [J]. 黄金, 2019, 40(12): 32-35.
- LI Yonghui, GU Shengchun, WANG Haiwen. Application of mechanized upward horizontal slicing and filling mining method in Hatu Gold Mine [J]. Gold, 2019, 40(12): 32-35.
- [5] 夏世羽. 上向水平分层充填采矿法采场安全回采顺序研究 [J]. 四川冶金, 2019, 41(5): 30-34.
- XIA Shiyu. Research on safe sequence of upward horizontal cut-and-fill stoping method [J]. Sichuan Metallurgy, 2019, 41(5): 30-34.
- [6] 李强, 李晓, 李佳建. 小东沟矿缓倾斜厚大矿体开采关键技术研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(6): 1-4.
- LI Qiang, LI Xiao, LI Jiajian. Research on key mining technology of gently inclined thick orebody in xiaodonggou mine [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(6): 1-4.
- [7] 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 cut and fill mining method with mining preparation out of veins in steeply-inclined thin ore body [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(5): 1-6.
- [8] 曲立平, 王泳棋. 上向水平分层充填采矿法在急倾斜破碎薄矿体中的应用 [J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(12): 1-4.
- QU Liping, WANG Yongqi. Application of upward horizontal layered filling mining method in steeply-inclined broken thin orebody [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(12): 1-4.
- [9] 李啸. 深部缓倾斜厚大破碎矿体采矿方法及结构参数研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- LI Xiao. Research of mining method for deep slowly inclined heavy broken orebody and structural parameters [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [10] 周登辉. 川口钨矿半风化矿脉群难采矿体采矿方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2015.
- ZHOU Denghui. Study on mining methods of semi-weathering ore vein group difficult mining orebody in Chuankou Tungsten Mine [D]. Changsha: Central South University, 2015.
- [11] 贾王玉, 吴若茜, 万串串. 三山岛金矿深部矿体上向水平分层充填采矿法优化研究与应用 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2021, 73(1): 22-27.
- JIA Wanyu, WU Ruohan, WAN Chuanchuan. Optimization and application of upward horizontal cut and fill mining method for deep orebody in Sanshandao Gold Mine [J]. Nonferrous Metals (Mine Parts), 2021, 73(1): 22-27.
- [12] 石大庆, 王贻明, 张纯锋, 等. 丰山铜矿机械化盘区高效采矿方法优化 [J]. 金属矿山, 2023(6): 40-44.
- SHI Daqing, WANG Yiming, ZHANG Chunfeng, et al. Optimization of efficient mining method in mechanized pan area of Fengshan Copper Mine [J]. Metal Mine, 2023(6): 40-44.
- [13] 张宝. 破碎中厚矿床上向超高进路安全高效开采方案研究及实践 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2022, 74(5): 68-73.
- ZHANG Bao. Research and practice on safe and efficient mining scheme of upward ultra-high drift filling in broken medium-thick deposit [J]. Nonferrous Metals (Mine Parts), 2022, 74(5): 68-73.
- [14] 李建壮. 上向分层充填连续落矿侧向爆破开采工艺研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- LI Jianzhuang. Research on lateral blasting mining technology for upward layered filling continuous ore falling [D]. Tangshan: North China University of Technology, 2023.
- [15] RAFFALDI M J, SEYMOUR J B, RICHARDSON J, et al. Cemented paste backfill geomechanics at a narrow-vein underhand cut-and-fill mine [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(12): 4925-4940.
- [16] LIANG Weizhang, ZHAO Guoyan, WU Hao, et al. Optimization of mining method in subsea deep gold mines: A case study [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(10): 2160-2169.
- [17] HU Yafei, HAN Bin, ZHANG Bo, et al. Force analysis and strength determination of the cemented paste backfill roof in underhand drift cut-and-fill stoping [J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 855.
- [18] 张雄天, 张国胜, 赵永峰, 等. 上向进路充填法进路回采顺序的优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(1): 5-9.
- ZHANG Xiongtian, ZHANG Guosheng, ZHAO Yongfeng, et al. Optimal research on the drift mining sequence of upward drift stoping with backfill [J]. Mining Research and Development, 2016, 36(1): 5-9.

Study on High-Efficiency and Low-Depletion Upward Horizontal Layered Filling Mining Method for Complex Metal Deposits*HU Songtao¹, ZHU Mingde^{1,2,3}*

(1.Shandong Gold Mining Technology Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China;

2.Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd., Laizhou, Shandong 261442, China;

3.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the problems of large ore dilution and loss and poor stope stability in the mining of complex metal deposits, the “之” shaped low-depletion mining technology in the vein and the airbag pre-occupancy method were proposed. On this basis, a new method of high-efficiency and low-depletion upward horizontal layered filling mining was proposed. Based on a gold mine in Inner Mongolia, the structural parameters of the layered stope and the overall structure and size of the pre-occupancy airbag were studied by means of field investigation and laboratory test. The results are as follows. Firstly, the RMR value of the rock mass quality index of the test section of the mine is 51–63, and the limit span of the corresponding stratified stope is 5.5–10.5 m. Secondly, the overall structure of the pre-occupancy inflatable airbag was designed and determined. The working pressure of the inflatable airbag is calculated to be 0.2 MPa, and the bearing capacity is 0.5 MPa. The relationship between the blasting compensation space and the rock crushing coefficient is obtained, and the reasonable span of the pre-occupancy inflatable airbag is determined to be 2.5 m. On this basis, the field industrial test was carried out. The industrial test stope is 4 m high, 5.5 m wide and 2 m long. The mining results of the test stope show that the two-step stope production capacity of this method can reach 150 t/d, the ore recovery rate reaches 94%, and the ore dilution rate is 4.8%, which realizes the high-efficiency and low-depletion mining of complex metal deposits.

Key words: Complex metal deposit, Layered filling mining method, Low-depletion mining technology, Pre-occupancy airbag, Dilution ratio, Loss rate