

矿山安全

富水环境缓倾斜矿体采矿方法与突水防控研究

Research on Mining Method and Water Inrush Prevention and Control
of Gently Inclined Orebody in Water-Rich Environment黄明发^{1,2}

(1. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200; 2. 紫金(长沙)工程技术有限公司, 湖南 长沙 41001)

摘要:本文以某金矿缓倾斜矿体为研究对象,开展了富水环境下机械化采矿方法研究;采用巷道出水预测法和C14追踪法分析了涌水来源;基于矿围岩体Q值和无支护跨度分析,初选了预切顶中深孔房柱嗣后充填法、机械化上向水平分层充填法和机械化上向进路充填法三种采矿方法方案,通过FLAC^{3D}数值模拟分析了各采矿方法的扰动范围,最后通过方案的技术性、经济性、安全性综合比较推荐了采矿方法。结果表明:矿床涌水主要来自于底板岩溶承压含水层,矿坑最大涌水量达到35 000 m³/d;机械化上向进路充填法方案扰动范围为3~4 m,该方案扰动范围最小;基于现有注浆加固范围15 m、水环境安全隔离层厚度要求和方案的技术经济指标,优选推荐机械化上向进路充填法。现场工业试验表明,采用多序次超前注浆加固回采区域,试验区域采场涌水量明显减少;采场综合能力为110 t/d,损失率6%,贫化率4%。该研究为富水环境缓倾斜矿体安全、高效开采提供了技术支持。

关键词:富水环境;缓倾斜矿体;机械化回采;突水防控;采矿方法;注浆技术

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2024)06-0034-08

Abstract: The sources of water inrush were analyzed using the tunnel water inflow prediction method and C14 tracing technique. Based on the Q-value assessment of the surrounding rock mass and unsupported span analysis, three initial mining method schemes were selected: pre-cut top medium-deep hole room-and-pillar subsequent filling, mechanized upward horizontal stratified filling, and mechanized upward drift filling. The disturbance ranges of each mining method were analyzed through FLAC3D numerical simulations. Ultimately, the mining method was recommended through a comprehensive comparison of the technical, economic, and safety aspects of the schemes. The results indicate that the primary source of water inrush in the deposit is the karst confined aquifer in the floor, with a maximum water inrush rate reaching 35 000 m³/d. The disturbance range of mechanized up-approach filling method is the smallest, and the disturbance range is 3~4 m. Considering the current grouting reinforcement range of 15 meters, the thickness requirements for the safety isolation layer in the aquatic environment, and the technical and economic indicators of the schemes, the mechanized upward drift filling method was preferentially recommended. Field industrial tests demonstrated that implementing multi-sequence advanced grouting reinforcement in the mining area significantly reduced the water inrush in the stope. The stope achieved a comprehensive mining capacity of 110 t/d, with a loss rate of 6% and a dilution rate of 4%. This study provides technical support for the safe and efficient mining of gently inclined orebodies in water-rich environments.

Key words: water-rich environments; slightly inclined orebody; mechanized mining; water inrush prevention; mining method; grouting technology

1 前言

在富水环境下进行缓倾斜矿体的开采,一直是采矿工程领域的一大挑战^[1-4]。富水环境不仅增加了采矿作业的难度和复杂性,还对采矿安全构成严重威胁。矿体内部的含水层、断层和裂隙等地质构造使得地下水易于渗透和积聚,这不仅影响矿体的稳定性,还可能导致突水事故的发生,给矿山生产和

[作者简介] 黄明发(1982—),男,本科,高级工程师,主要从事采矿及充填工艺方面研究。

[基金项目] 国家“十四五”重点研发计划“高寒及生态脆弱区大型矿山绿色开采技术”(课题编号:2022YFC2903904)。

[引用格式] 黄明发.富水环境缓倾斜矿体采矿方法与突水防控研究[J].中国矿山工程,2024,53(6):34-41.

人员安全带来极大的风险^[5-9]。

国内外对于富水矿床的采矿方法进行了广泛的研究和实践^[10-12]。在国外,一些先进的采矿技术如注浆加固、帷幕注浆、预注浆等技术被广泛应用于富水矿床的开采中^[13-14],有效地提高了矿山的开采效率和安全性,但针对富水环境下缓倾斜矿体的开采仍面临诸多技术难题,如合理采矿方法的选择、注浆工艺的优化、突水风险的预测与防控等。

本文以某金矿富水环境缓倾斜矿体为研究对象,分析了富水环境下矿体开采的难度,重点研究了富水环境下缓倾斜矿体机械化采矿方法优选和突水风险防控与监测,为富水环境下缓倾斜矿体安全、高效机械化回采与突水防控提供了技术支撑。

2 工程概况

2.1 矿体赋存特征

该矿山上部矿床采用全面法和房柱法开采,目前进入开采晚期。下部矿床为沉积碳酸盐岩中的卡林型金矿,矿体赋存于灰家堡背斜轴部龙潭组与茅口组岩溶不整合界面间。矿石工业类型为硫化物型矿石。含矿岩石主要为角砾状硅化黏土岩、碎裂化黏土岩;矿体赋存条件复杂,顶底板岩性主要为较软的黏土岩类,该类岩石具有力学强度低、吸水膨胀的特点,易产生底鼓、片帮、顶板坍塌等不良现象。

矿体呈层状、似层状,倾角 $3^{\circ} \sim 10^{\circ}$;矿体厚度 $1.0 \sim 12 \text{ m}$,平均厚度 4.33 m ;矿体走向与地层走向一致,呈东西向展布,走向上具有波状起伏;东西走向长 758 m ,南北倾向宽 $65 \sim 645 \text{ m}$ 。矿体圈定金属量 5953 kg ,平均品位 5.27 g/t 。基于矿体赋存分布和井下涌水情况,将 $7 \sim 15$ 线间矿体定为采区,该区域矿体倾角 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,矿体平均厚度为 7 m ,首采区矿量 107 万 t ,金金属量 2380 kg 。矿体赋存空间分布如图1所示。

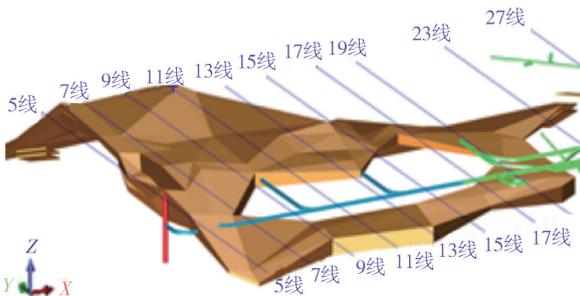


图1 矿体赋存空间分布

2.2 水文与构造关系

该金矿矿体主要赋存于富水性较弱的龙潭组裂

隙含水层中,其上部存在有富水性中等的岩溶含水层长兴组和夜郎组二段,下部存在富水性强的茅口组岩溶含水层。矿体底板茅口组岩溶含水层具有较高承压性,是矿床底板直接充水水源,据钻孔揭露,其厚度大于 400 m ,分布面积广,充水量巨大。

1097 m中段抽水时,揭露的茅口组承压水水文钻孔承压水水头较为稳定,基本不受大气降水影响;说明茅口组承压水的水位明显低于上覆含水层潜水水位。它们之间显著地水头差也表明茅口组承压水与上覆岩溶水之间没有水力联系。

C14同位素测年法^[15]是利用自然存在的碳14同位素的放射性定年法,用以确定原先存活的动物和植物的年龄的一种方法。该方法也可以表明地下水停止和空气等其他物质直接接触的时间。通过C14同位素测年法测试结果表明,1097中段地下水平均滞留时间为 10977 ± 356 年,说明矿区茅口组承压水形成历史很长,与现代大气降水及地表水并无较大的水力联系,属于封存水。

2.3 涌水与突水风险

1097 m中段当前抽水量约为 $10800 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据2011年9月至2013年4月抽水量分析,水位降至1097 m标高时,矿坑最大涌水量达到 $35000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

茅口组岩层顶部 50 m 内岩溶极为发育,富含岩溶承压(热)水,矿坑开采过程中,很容易直接揭露岩溶水,或者通过导水断层,或者发生底鼓破坏,造成突水,对矿床开采构成严重威胁。1097 m开拓巷道掘进期间,17线附近掘进工作面超前探水出水情况,该超前钻孔涌水量为 $150 \text{ m}^3/\text{h}$,具体如图2所示。



图2 1097 m中段17线开拓工作面出水情况

该矿体赋存带为“含矿带、含水带、构造带”三带一体,水文地质开采条件为极复杂类型;该矿曾在开拓、开采过程中发生多次突水事故。该矿体赋存环境复杂,底板岩层高承压岩溶水导致矿井涌水量大,矿体倾角缓、矿岩破碎导致开采难度高。矿山上

部矿床资源已近枯竭,为实现矿山产能有序接替,延长服务年限,深部富水环境矿床开采迫在眉睫。

3 采矿方法优选

3.1 采场无支护最大跨度分析

采矿方法选择需综合考虑矿体赋存特征、工程水文地质、矿石价值、岩石力学条件等因素。该矿床为富水环境下开采,岩石力学条件与突水防控是关键考虑因素。

该矿体岩芯岩石质量指标(RQD)平均值为43.66%。实地开展工程地质调查,按照 Q 系统分级方法评价岩体等级^[16],顶板 Q 值为1.21,矿体 Q 值为1.82,均为差等级。采矿方法的选择与采场无支护跨度有关,开挖体的最大无支护跨度 $SPAN$ 与 Q 值和开挖体支护比(ESR)的关系为^[17]

$$SPAN = 2Q^{0.66} = 2 \times ESR \times Q^{0.4}$$

开挖体支护比与开挖体的用途和它所允许的不稳定程度有关,Barton(1976)建议采用表1进行 ESR 的取值。

表1 不同开挖工程类别的 ESR 建议值

开挖工程类别	ESR
临时性矿山巷道	3~5
永久性矿山巷道、水电站引水涵洞(不包括高水头涵洞)	1.6
大型开挖体的导洞、平巷和风巷	1.3
地下储藏室、地下污水处理厂、次要公路及铁路隧道、调压室、隧道联络道	1.0
地下电站、主要公路及铁路隧道、民防设施、隧道入口及交叉点	0.8
地下核电站、地铁车站、地下运动场和公共设施以及地下厂房	0.8

开挖体支护比与开挖体的用途和它所允许的不稳定程度有关,基于Barton(1976) ESR 取值建议,本次考虑临时性和永久性巷道类别,计算得出顶板在 ESR 为1.6时最大无支护跨度为3.5 m; ESR 为3.0~5.0时最大无支护跨度为6.5~10.8 m。

3.2 采矿方法初选

对于大水矿床,选择合理的采矿方法是矿山安全开采的保障。目前,我国大水矿床开采的采矿方法有崩落法、充填法和空场法,应用较多的是充填法^[18-22]。

该矿体上覆为居民区,地表不允许塌陷;矿床为富水环境,空场法易形成空区水患,因此考虑充填法回采。下部矿体为缓倾斜中厚矿体,矿体平均厚度

7 m;结合无支护最大跨度、水文环境,初选以下三种采矿方法。

1) 方案一:预切顶中深孔房柱嗣后充填法

矿块长轴沿矿体倾斜方向,采场规格为80 m(长度)×60 m(宽度),回采方向为逆倾斜方向,方便自行设备运输。矿块划分为矿房与矿柱,矿柱为3 m宽连续条柱;矿房内布置方形点柱,规格为3 m×3 m,点柱间距为8~10 m。采场回采高度为矿体厚度,分两层回采,上分层采3 m,余下4 m采用中深孔侧崩回采,回采后采用尾砂胶结嗣后充填,具体如图3所示。在空场回采期和富水环境下,该方案作业条件较差,尤其是存在底板突水风险,采场易积水。

切顶层采用凿岩台车作业,切顶高度3 m,掘进宽度3.6 m;每次掘进有效进尺3 m,台班采矿量89.4 t,台班扩刷量100~120 t。采场内切顶和刷扩可错开布置,平行作业,每天安排1个台班掘进,2个台班扩刷,切顶层采场生产能力200 t/d。下分层采用中深孔回采时,则下分层的生产能力可达500 t/d以上。采场综合生产能力达400 t/d,切顶和下分层中深孔回采会引起贫化,预留矿柱会产生损失;经核算,采场损失率21%、贫化率10%。

2) 方案二:机械化上向水平分层充填法

矿体划分为若干个盘区,盘区规格为80 m(长度)×60 m(宽度);盘区内采场沿矿体走向布置,采用自下而上逐分层回采。采场跨度为8 m,长度为45 m。矿体平均厚度7 m,采用上向水平分层分3次回采,采用尾砂胶结嗣后充填,具体如图4所示。在富水环境下,该方案作业条件相对较好。首采层回采时,凿岩切割巷断面规格为3.6 m(宽)×3.0 m(高)。二三分层回采时,采用似水平压顶工艺回采,压顶高度2.0 m。

采场采用掘进台车作业,每次掘进有效进尺3 m,台班采矿量104.3 t,台班扩刷矿石量为150~170 t,二三分层似水平压顶回采台班矿量174.5 t,该方法采场综合生产能力175 t/d。盘区采场采用隔三采一回采,可同时回采采场数量为2个,盘区生产能力350 t/d;分层回采会引起矿岩接触区域的贫化和损失,经核算,采场损失率9%、贫化率为8%。

3) 方案三:机械化上向进路充填法

矿体划分为若干个盘区,盘区规格为80 m(长度)×60 m(宽度);采场沿矿体走向布置,采用自下而上逐分层回采。矿体厚度为7 m,划分为两个分

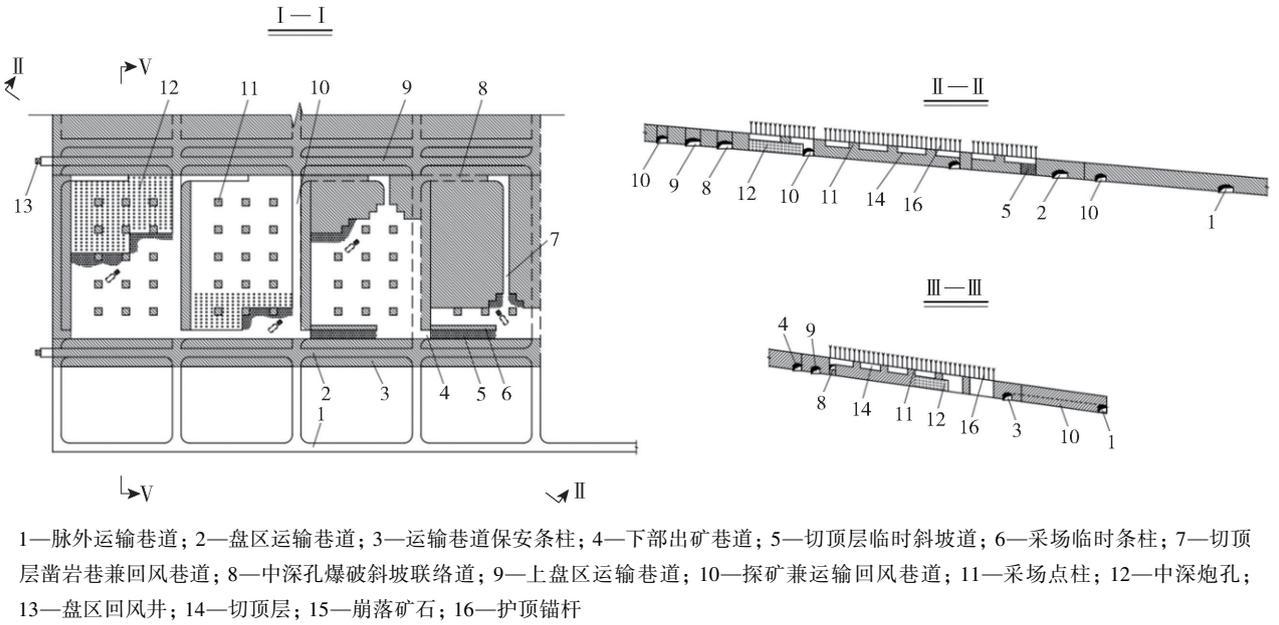


图3 方案一采矿方法

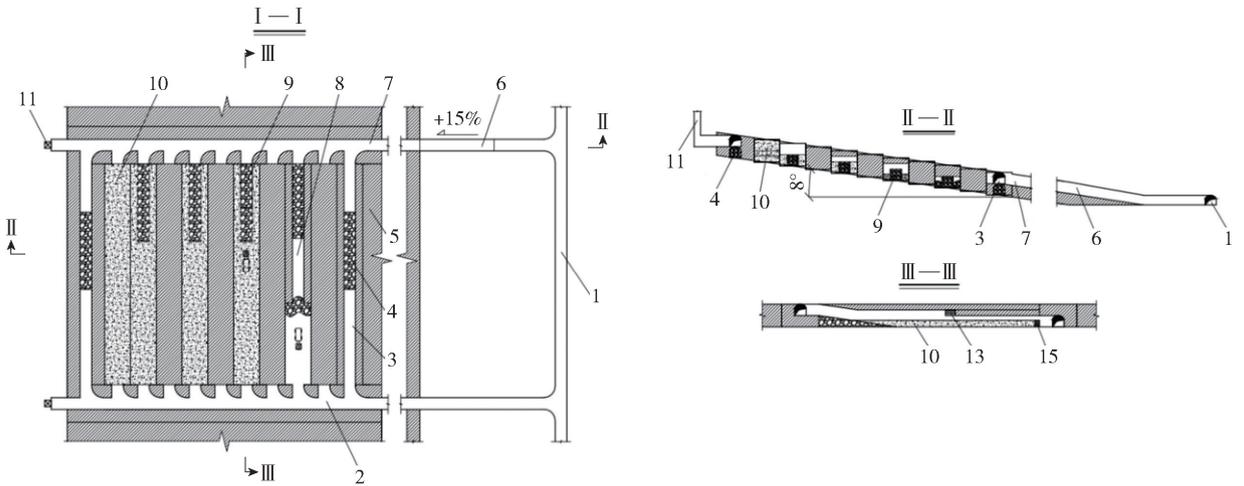


图4 方案二采矿方法

层回采。采场跨度3.8 m,采场高度3.5 m。在盘区内进路采用隔三采一方式,回采后尾砂胶结充填,具体如图5所示。在富水环境下,该方案作业条件好。

采场采用掘进台车作业,台班有效进尺3 m,采场综合生产能力100 t/d。盘区采场采用隔三采一回采,可同时回采采场数量为3个,盘区生产能力300 t/d。该方法采场损失率9%、贫化率为5%。

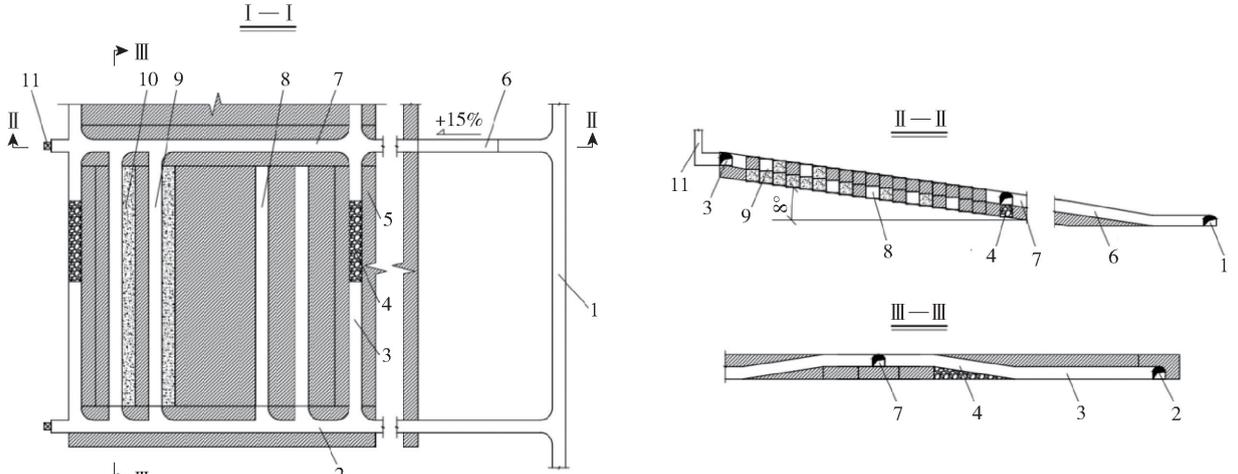
3.3 采矿方法优选

采矿方法初选方案技术经济指标对比见表2。从表中可以看出,在富水条件下方案一预切顶中深孔房柱嗣后充填法虽然生产能力大,但预留点柱损

失率最大,在空场回采期存在底板突水、积水的情况,作业安全程度最差;方案二机械化上向水平分层充填法和方案三机械化上向进路充填法单生产能力相近,与方案三相比,方案二在水平孔压顶时会存在采场跨度大,空场时间较长,作业安全程度比方案三差,压顶时近水平孔会导致损失率和贫化率比方案三大;因此,综合初选方案生产能力、贫损等技术经济指标,方案三>方案二>方案一,即优先机械化上向进路充填法。

该矿体为富水环境,矿体开采会引起采场周边扰动形成裂隙带,成为地下水通道,会引发突水或采

场回采安全,因此需要进一步分析回采扰动范围,论证采矿方法安全性。



1—脉外运输巷道; 2—盘区运输兼回风巷道; 3—盘区联络运输巷道; 4—通转层巷道斜坡道; 5—巷道保安矿柱; 6—转层巷道斜坡道; 7—转层运输兼回风巷道; 8—首采层进路采场; 9—转层进路采场; 10—充填体; 11—盘区回风井; 12—采场挡墙

图5 方案三采矿方法

表2 采矿方法初选方案比较

技术经济指标	方案一:预切顶中深孔房柱嗣后充填法	方案二:机械化上向水平分层充填法	方案三:机械化上向进路充填法
采场生产能力/t·d ⁻¹	400	175	100
可作业采场数	1	2	3
盘区生产能力/t·d ⁻¹	400	350	300
损失率/%	21	9	9
贫化率/%	10	8	5
作业安全程度	差	较好	好

3.4 回采安全性分析

本次采用FLAC^{3D}分析三种初选采矿方法回采扰动范围,模拟区域为首采区矿体回采过程,通过矿

体回采的塑性区来圈定扰动范围。本次稳定性采用Mohr-Coulomb本构关系,数值模拟采用的Hoek-Brown强度准则折减的岩体力学参数见表3。

表3 稳定性模拟方案岩体力学参数

岩性	容重/ kN·m ⁻³	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
顶板-粉砂质岩	28.20	0.19	7.55	0.267	1.61	21.77
矿岩	28.20	0.18	13.80	0.297	2.41	27.53
底板-灰岩	27.30	0.23	23.10	0.283	3.64	31.98
充填体	16.45	0.12	1.907	0.260	0.28	43.30

根据FLAC^{3D}模拟结果,方案一预切顶中深孔房柱嗣后充填法最大扰动范围大致为32~35m,方案二机械化上向水平分层充填法最大扰动范围约8~9.8m,方案三机械化上向进路充填法最大扰动范围约3~4m。各方案扰动范围如图6所示。

3.5 采矿方法综合选择

由矿体水文条件分析可知,矿体下盘茅口组岩溶含水层具有较高承压性,是矿床底板直接充水水

源,因此富水环境下矿体开采,必须严格控制对水体的采动影响程度,防控底板突水风险。

参考《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(以下简称《规范》),阻水带厚度 h_2 可按下式计算:

$$h_2 = P/Z$$

式中: P 为作用在底板上的水压力,MPa;现场测试水压0.93MPa; Z 为阻水系数,MPa/m。完整灰岩阻

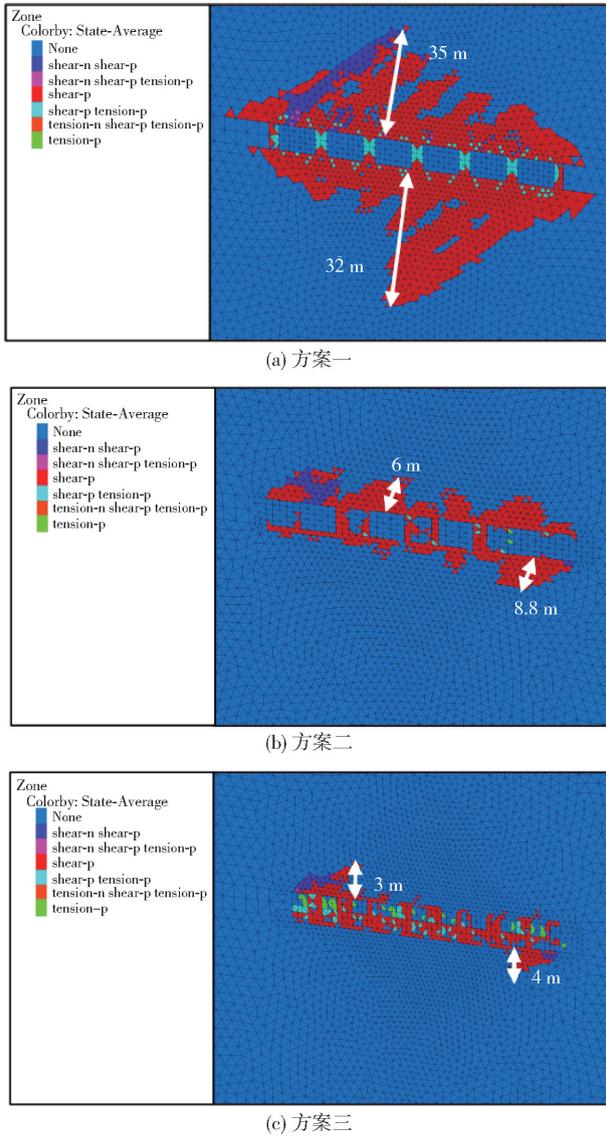


图6 不同采矿方法扰动范围

水系数在 0.1 ~ 0.4 MPa/m, 考虑到茅口灰岩上部岩溶裂隙发育, 完整性较差因此取 0.15 MPa/m。

经计算, 该矿底板阻水带厚度为 6.2 m。根据《规范》要求, 将受开采影响的水体必须留设相应的安全隔离层; 要求设计的底板防水安全隔离层 (h_s) 应当大于或者等于导水破坏带 (h_1) 和阻水带厚度 (h_2) 之和^[23-24]。

初选不同采矿方法方案开采扰动范围可视为导水破坏带, 那么方案一至方案三要求的底板防水安全隔离层最小厚度分别为 41.2 m、16.0 m 和 10.2 m。目前矿山采用超前钻孔预注浆进行超前治水可实现稳定的注浆范围为 15 m, 因此综合考虑初选采矿方法方案开采扰动范围、水体环境下安全隔离层要求和可实现稳定注浆范围, 优选方案三, 即机

械化上向进路充填法。

4 突水防治与回采安全

4.1 突水机理分析

该矿坑下部茅口组岩溶含水层具有较高承压性, 是矿床底板直接充水水源。矿体开采扰动会产生导水破坏带, 原始底板破坏带和阻水带厚度逐渐变小, 岩体失去隔水性能会直接导通了承压水体, 或隔水保护层在承压水水压作用下遭到破坏, 则会发生突水事件。

4.2 突水防控措施

原位超前注浆指工程开挖前使浆液预先充填围岩裂隙, 利用浆液把围岩周围的各种弱面充实、重新胶结起来, 改善围岩的物理力学性能, 从而提高围岩的整体稳定性和抗渗性, 达到堵塞水流、加固围岩的目的。

鉴于原位注浆的优势, 该矿山富水矿床的突水防控主要是通过原位超前注浆、疏干排水, 使矿床原位赋存特性发生物理、化学变化, 强含水层被改造成弱含水层或不含水层, 从而改善富水矿床开采技术条件, 有利于实现矿产资源的安全、高效开采。目前矿山已建立了 2 套 23 000 m³/d 排水措施。

多序次超前注浆^[25]就是在矿体开采之前, 沿其四周用钻机钻孔, 利用注浆泵通过钻孔将浆液注入到岩层裂隙中; 浆液凝固固化后, 堵塞岩石裂隙, 达到加固围岩, 截断地下水流, 减少渗漏水流入作业面的目的, 从而为安全施工创造良好的作业条件。

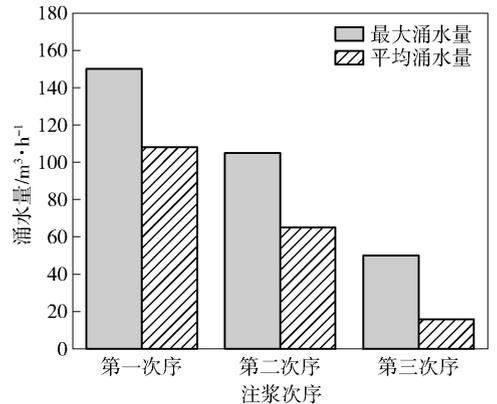
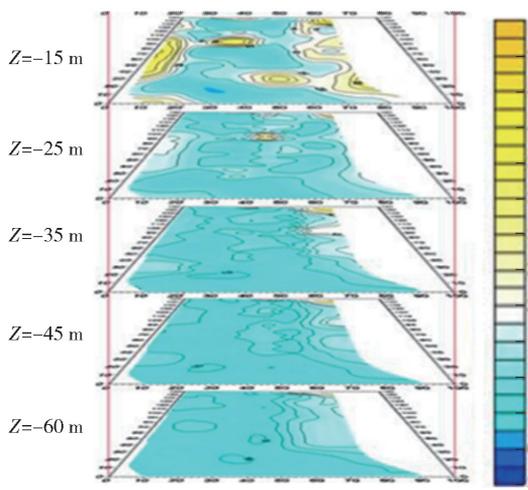


图7 不同序次钻孔涌水情况统计分析

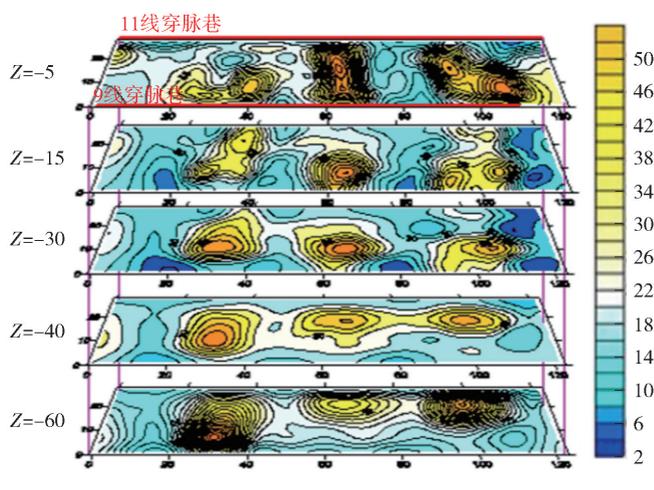
在 1 120 m 中段探查了 9 ~ 11 线首采区域采用多序次超前注浆改造, 第一次序孔施工的 12 个探查孔, 施工孔深在 17.5 ~ 95.5 m, 累计孔深 426.1 m; 第二序孔布设在 7 线以北和 1 120 m 中段大巷内, 进行加密检查补充注浆, 共施工注浆孔 3 个, 施工孔深

在 69.15 ~ 73.85 m, 累计孔深 212.90 m; 第三次序孔共计施工了 5 个钻孔, 孔深在 52 ~ 74.5 m, 累计孔深 323.75 m。

采用水泥尾砂中和渣浆液, 浆液水灰比为 3:1、2:1、1:1, 水泥尾砂中和渣比例为 1:1, 浆液扩散半径 15 m, 注浆压力 1.0 MPa; 注浆分为 3 个次序, 第一序 12 个注浆孔, 第二序 3 个孔, 第三序 5 个孔。根据现场钻孔单孔涌水量, 最大单孔涌水量由 150 m³/h 降低至 50 m³/h, 单孔平均涌水量 108 m³/h 降低至 15.9 m³/h, 第三序次后注浆加固区域的过水能力大幅下降 85.3%。具体统计如图 7 所示。



(a) 注浆改造前瞬变电磁探测成果图



(b) 注浆改造后瞬变电磁探测成果图

图 8 注浆改造后瞬变电磁探测成果对比图

4.3 突水预测与监测技术

超前钻孔探水是利用巷道掘进掌子面超前注浆孔涌水量初步分析, 利用瞬变电磁物探法来探测重点涌水区水文环境, 进而综合判断突水情况。鉴于以上两种方式的优点, 因此采用超前钻孔探水法和瞬变电磁物探法来分析注浆效果和预测突水情况。

5 工业试验

工业试验采场位于首采区 9 线, 采用机械化上向进路充填法回采; 试验采场长度 50 m, 回采断面为 3.8 m × 3.5 m; 试验采场地质储量为 1 820 t, Au 品位为 5.27 g/t。

试验采用凿岩台车光面爆破布置炮孔, 炮孔直径 40 mm, 孔深 3.0 m, 采用 2 号岩石炸药, 装药系数 0.8, 非电导爆管起爆。

新鲜风流从脉外运输经盘区运输巷进入采场, 清洗工作面后经采场临时斜坡联络道至盘区转层运

采用瞬变电磁物探法针对注浆加固区域分别在注浆前后进行了底板含水层富水性探测, 注浆改造后瞬变电磁探测成果对比如图 8 所示。注浆前后物探探查结果对比分析: 中段大巷及穿脉巷道底板在注浆改造前电阻率值普遍提高, 且在横向上低电阻率区域连续性很好, 说明注浆改造前期富水性很好。注浆改造后底板含水层出现了高电阻率异常区, 并且底板以下 20 ~ 30 m 存在高电阻率和低电阻率异常明显分区, 说明经过注浆改造后底板含水层富水性发生了变化, 富水联通性变弱。

通过钻孔涌水量和电磁探测结果说明, 采用多序次超前注浆改造后取得了良好注浆效果。

输巷, 回风至盘区充填回风井至上中段回风巷, 排出地表。

首分层进路结束后, 底部低强度充填体 (0.5 MPa) 充填 3.0 m, 上面浇面高强度 (2 MPa 以上) 充填体 0.5 m, 以便转层回采时自行设备铲装、运输。

试验采用多序次超前注浆加固回采区域, 根据现场钻孔单孔涌水量, 最大单孔涌水量由 130 m³/h 降低至 45 m³/h, 单孔平均涌水量 102 m³/h 降低至 14 m³/h, 涌水量明显减小。试验采场回采历时 15.5 天, 采出矿量 1 710 t, 出矿品位 5.06 g/t; 经核算, 采场综合能力为 110 t/d, 损失率 6%, 贫化率 4%。工业试验表明: 机械化上向进路充填法能够很好地满足该矿富水条件下矿体安全高效回采的要求。

6 结论

(1) 矿体为缓倾斜中厚矿体, 岩体质量评价为差等级; 井下涌水量主要为底板下部茅口组岩溶含

水层,具有较高承压性,复杂水文条件导致矿体开采难度高。

(2)矿围岩岩体等级评级为差,结合矿体特征、无支护最大跨度、水文环境等,初选了三种采矿方法,分别为预切顶中深孔房柱嗣后充填法、机械化上向水平分层充填法和机械化上向进路充填法,通过对三种方案的技术经济指标对比及开采扰动范围、安全隔离层厚度模拟分析,结合目前矿山可实现的稳定注浆范围,研究推荐机械化上向进路充填法开采。

(3)富水矿床突水防控主要是通过多序次超前注浆和疏干排水措施来改善水环境,其中多序次超前注浆采用3次注浆,将单孔平均涌水量 $108\text{ m}^3/\text{h}$ 降低至 $15.9\text{ m}^3/\text{h}$,第三序次后注浆加固区域的过水能力大幅下降85.3%,注浆效果显著。

(4)工业试验采场采用机械化上向进路充填法回采,采用多序次超前注浆加固回采区域,试验区域采场涌水量明显减少,采场综合能力为 110 t/d ,损失率6%,贫化率4%。

[参考文献]

[1] 黄桂林,吴志南.缓倾斜厚大磷矿体开采方案技术优化[J].中国矿山工程,2022,51(4):35-38+44.

[2] 宫明山,谭立维,杨成志,等.SICOMINES铜钴矿开采阶段地下水变化规律研究[J].中国矿山工程,2023,52(1):35-40+53.

[3] 吴高善,李学锋,杨一豪,等.充水环境下房柱法采场稳定性分析[J].金属矿山,2023,(4):15-21.

[4] 马元磊,贺鹏.膏体胶结充填技术在下向进路采矿的应用与优化[J].中国矿山工程,2021,50(3)7-11.

[5] WANG Ye, ZHANG Qiulan, WANG Shichang. Forecasting of water yield of deep-buried iron mine in Yanzhou, Shandong [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2015, 3(4):342-351.

[6] 刘建博,陈昌云.金属矿山充填开采富水巷道围岩稳定性控制研究[J].中国矿业,2023,32(11):178-186.

[7] 吴高善,李学锋,杨一豪,等.充水环境下房柱法采场稳定性分析[J].金属矿山,2023(4):15-21.

[8] 贺敬平,周景凯,刘培跃.注浆改造顶-底板灰岩含水层技术应用实践研究[J].中国矿山工程,2022,51(1):67-76.

[9] 柯愈贤,曾杰,胡凯建,等.渗透水压作用下全尾砂胶结充填体的三轴力学特性及演变机制[J].有色金属科学与工程,2024,15(3):422-431.

[10] 盛建龙,乔宇,王平,等.基于LOF-SMOTE算法的地下水影响下矿山岩溶塌陷风险预测研究[J].有色金

属科学与工程,2023,14(3):372-380+399.

[11] Qinqiang Guo, Haoxuan Yu, Zhenyu Dan, etc. Mining Method Optimization of Gently Inclined and Soft Broken Complex Ore Body Based on AHP and TOPSIS: Taking Miao-Ling Gold Mine of China as an Example [J]. Sustainability. 2021, 13:1-14.

[12] 崔改革.多层矿体不同开采方案下矿坑涌水量预测[D].合肥:合肥工业大学,2019.

[13] 马成卫,轩大洋,许家林,等.覆岩隔离注浆充填浆液减水改性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):1122-1128.

[14] 袁世冲,李强,孙帮涛,等.金属矿山深部开采突水致灾危险源辨识与危险性评价——以滇东北毛坪铅锌矿为例[J].工程地质学报,2023,31(5):1668-1679.

[15] YANG Yun, WU Jianfeng, LIU Depeng, Numerical modeling of water yield of mine in Yangzhuang Iron Mine, Anhui Province of China [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2015, 3(4):352-362.

[16] 黄超,何文,赵奎,等.下向分层胶结充填体顶板稳定性研究[J].有色金属科学与工程,2017,8(2):70-78.

[17] 李垂泉.地下空间岩体质量评价及围岩稳定性分析[D].南京:南京理工大学,2020.

[18] 尚晓明,贺茂坤.南非某金矿采矿方法研究[J].中国矿山工程,2019,48(6):30-31.

[19] 韩柳.罗河铁矿开采对地下水系统影响研究[D].合肥:合肥工业大学,2022.

[20] 盛佳,万文,张海云,等.金川二矿区上盘贫矿采矿方法优选及采动效应分析[J].地下空间与工程学报,2024,20(4):1389-1400.

[21] 刘大可,张浩强,郭翔.基于AHP-Fuzzy-TOPSIS帕鲁特金矿不同中段开采方法对比优化选择[J].中国矿山工程,2024,53(2):17-23.

[22] 冯帆,孟宪伟,李鹏杰,等.下向进路分层无分段巷道充填法采场间柱回采技术研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):1-4.

[23] 周国平,钱涵,樊勇.江西某铜矿水文地质条件分析及防治水对策研究[J].中国矿山工程,2021,50(5):35-37.

[24] 张硕,甄大勇,刘康,等.TSP与瞬变电磁成果三维化在隧道断层含水预报中的应用[J].中国铁路,2024(5):75-81.

[25] 王凯.全风化花岗岩富水地层注浆加固机理及应用[D].济南:山东大学,2017.