喀拉通克铜镍矿塌陷松散区探测与治理方案研究*

王亚军[1,2],陈寅[3],刘金海[3],鲁金涛[4],曹港[1,2],张云韦[3],李守强[3]

(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;
3.新疆喀拉通克矿业有限责任公司, 新疆 阿勒泰地区 836100;
4.应急管理部研究中心, 北京 100013)

摘要:喀拉通克铜镍矿1#矿体采用崩落法开采后,形成了较大的塌陷松散区。该塌隐松散区域导致上部矿岩开采环境恶化,资源难以有效回收,且对竖井安全构成威胁。为了深入探测与治理该区域,前期通过地质钻探与TRT超前探测初步确定松散边界。因通道堵塞,传统探测设备难以接近目标区域,运用C-ALS Gyro内窥式三维扫描系统对潜在区域进行了详细探测,明确了较大松散区的位置、形态与体积,该区域仅局部存在,且整体塌陷范围趋于稳定。通过对比废石回填治理、崩落围岩治理、胶结充填治理3种方案,综合分析各方案优缺点,依据治理原则确定采用胶结充填治理方案。实际治理效果显示,胶结充填治理方案增强了区域稳定性,使资源回收率提高约30%,同时提升了安全保障水平,降低了环境影响。

关键词:塌陷松散区;地质钻探;TRT超前探测;内窥式三维扫描;胶结充填

中图分类号:TD853.36;TD325+.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)12-0091-07

Research on Detection and Treatment Schemes for Collapsed Loose Areas in Kalatongke Copper-Nickel Mine

WANG Yajun[1,2], *CHEN Yin*[3], *LIU Jinhai*[3], *LU Jintao*[4], *CAO Gang*[1,2], *ZHANG Yunwei*[3], *LI Shouqiang*[3]

(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;
3.Xinjiang Kalatongke Mining Co., Ltd., Altay Prefecture, Xinjiang 836100, China;
4.Research Centre, Ministry of Emergency Management, PRC, Beijing 100013, China)

Abstract: After the 1# orebody of Kalatongke Copper-Nickel Mine was mined by the caving method, a large collapsed loose area was formed. This collapased loose area has deteriorated the mining environment of the upper ore and rock, so that the resources are difficult to be effectively recovered, and the safety of vertical shafts faces a threat. To conduct in-depth detection and treatment of this area, the loose boundary was initially determined through geological drilling and TRT advanced detection in the early stage. Due to channel blockage, traditional detection equipment could hardly access the target area. The C-ALS Gyro endoscopic three-dimensional scanning system was used to conduct detailed detection of the potential area, which clarified the location, shape and volume of the large loose area. It was found that this area only exists locally, and the overall collapse scope tends to be stable. By comparing three treatment schemes including waste rock backfilling treatment, caving surrounding rock treatment and cemented filling treatment, a comprehensive analysis of the advantages and disadvantages of each scheme was conducted. In accordance with the treatment principles, it was determined to adopt the cemented filling treatment scheme. The actual treatment effect shows that the cemented filling treatment scheme enhances regional stability, increases the resource recovery rate by approximately 30%, improves the safety guarantee level, reduces environmental impact.

Key words: Collapsed loose area, Geological drilling, TRT advanced detection, Endoscopic three-dimensional scanning, Cemented filling

* **收稿日期**:2024-12-02
基金项目:深地国家科技重大专项项目(2024ZD1003804);新疆"天山英才"第二批优秀工程师(陈寅)培养计划
作者简介:王亚军(1991—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail:648324460@qq.com
通信作者:曹港(1997—),男,湖南郴州人,硕士,助理工程师,主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail:919591139@qq.com

0 引言

在矿山开采领域,确保生产的安全与高效始终是核心追求。随着资源开发的不断深入,采空区相关问题日益成为制约矿山可持续发展的重要因素[1-5],因此,众多学者在采空区探测与治理方面开展了广泛而深入的研究。

在采空区探测技术领域,目前常用的方法有物理探测技术和钻孔探测技术,物理探测技术相较于钻孔探测技术具有成本低、效率高的优点[6-7]。宋贵磊等[7]采用瞬变电磁法,凭借其对低阻体敏感的特性,通过 COMSOL 有限元软件模拟不同层间距含水采空区模型的感应磁场时空响应特征,有效探测到采空区内积水情况。张鑫等[8]采用被动源地震干涉方法进行震源定位研究,通过对不同界面数值模型进行被动源干涉成像测试,定位出采空区的范围。陈兴隆[9]采用瞬变电磁法和可控源音频大地电磁法相结合的综合物探方法,结合钻孔窥视探测方法,对露天煤矿隐蔽采空区分布及积水情况进行详细探测。孙刚友等[10]利用 BLSS-PE 矿用三维激光扫描和测量系统,对采空区进行三维探测分析,并对三维探测所得数据信息进行数字化处理转换,实现了采空区几何形状的高精度重建。在采空区治理策略方面,缪玉松等[11]采用充填法治理多采空区的过程中,提出了带式胶结充填体结构,运用 3DEC 离散元软件进行数值模拟,并计算沉降位移场、塑性区、应力场,结果表明,该治理方式具有显著效果。张东杰等[12]提出了顺次崩落中段顶柱与地表协同充填的复合采空区治理方法,经数值模拟和现场实践验证,该方法在消除采空区危害的同时,可有效回采 40% 的顶柱矿量。

然而,喀拉通克铜镍矿在开采过程中面临着一系列独特的挑战。1# 矿体 710 m 中段开采区域矿岩条件较差[13],崩落法采矿结束后形成较大塌陷松散区。该区域闲置时间较长,加之开采活动的扰动,顶板、侧帮垮冒现象频繁发生,导致上部矿岩开采环境急剧恶化。受 1# 矿体 710 m 中段崩落法采场复杂开采情况的影响,710～830 m 水平之间开拓、采准工程布置难以确定,采矿方法选择困难,该区域内多达数百万吨的矿石在当前条件下无法安全开采,上部中段受此制约也无法正常回采。此外,崩落法采场距离 1# 主竖井较近,该区域存在塌陷情况,导致竖井出现一定程度的破坏,若回采该区域内留存矿石可能导致主竖井进一步破坏。

在此背景下,对 1# 矿体崩落法塌陷松散区及其影响区域展开深入研究与治理,可为该区域后续采矿方法的合理选择、采准工程的科学布置提供关键依据,进而确保井下开采作业安全高效开展。本文旨在综合运用多种先进探测技术,深入剖析塌陷松散区的实际状况,严谨选择实施治理方案,以期为喀拉通克铜镍矿的安全高效开采提供切实可行的科学解决方案。

1 塌陷松散区探测

1.1 前期已进行的地质钻探与 TRT 超前探测

通过对崩落法影响范围内的 710～770 m 区域开展地质钻探,获取各钻孔钻进反馈信息,结合 TRT 超前探测提供的该区域内的地质结构信息[14],为后续内窥式三维扫描提供初步判断依据。地质钻探与 TRT 超前探测结果表明,有底柱崩落法开采影响区域松散边界顶板标高为 760 m 水平,无底柱崩落法开采影响区域松散边界顶板标高为 755 m 水平,两者上盘边界近似垂直,下盘边界按岩层移动角 60°推断,推测松散边界三维模型如图 1 所示。

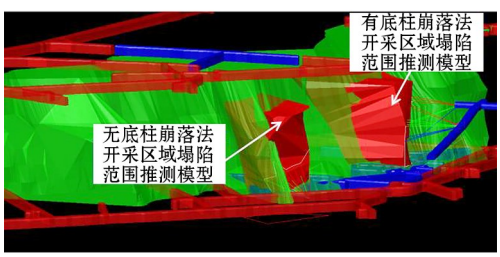


图 1 推测松散边界三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of speculated loose boundary

1.2 本次探测方法

由于通道堵塞,传统探测设备难以接近目标区域,为了探明较大松散区赋存位置及留存情况,对潜在区域开展了内窥式三维扫描工作。

C-ALS Gyro 是一款内窥式三维激光扫描系统,主要应用于地下封闭的较大松散区、采空区、岩溶洞穴的三维数据采集,直径仅 50 mm 的探头可通过钻孔进入预定位置,对 150 m 半径的范围进行数据采集,借助仪器内置的 3D 高精度导航传感器与

已有坐标数据相结合,能够实现对目标区域的高精度、全范围、无盲区的三维测绘。

C-ALS Gyro 内窥式三维激光扫描系统主要由测距系统、测角系统及其他辅助功能系统构成,如内置相机、双轴补偿器等。该激光扫描系统的工作原理为通过测距系统获取扫描仪至待测物体的距离,再借助测角系统获取扫描仪至待测物体的水平角和垂直角,进而计算出待测物体的三维坐标信息;扫描过程中再利用系统自身的垂直和水平马达等传动装置完成对物体的全方位扫描,通过这种以一定取样密度对空间进行连续扫描测量,即可得到被测目标密集的三维彩色散点数据(即"点云"数据);借助 CavityScan 软件,可进一步将获取的点云转换为常用格式的图像文件[15-18]。

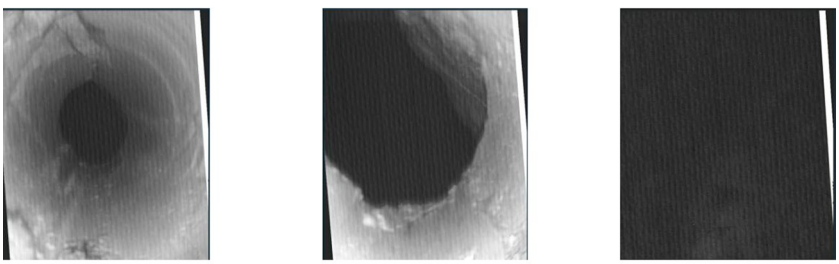
1.3 扫描过程

技术人员将 2 m 长的 C-ALS 探棒推入钻孔中进行作业,探棒另一端通过 200 m 电缆线连接至控制单元,再通过控制单元连接工作站电脑,在电脑端通过专用操作软件控制探头进行扫描作业。通过后视法确认绝对坐标,具体操作为将设备水平放置在支架上,在软件中输入水平钻孔位置坐标和后视位置坐标,即可计算出绝对坐标和方位角。校正探棒陀螺仪后,再将仪器下放至钻孔,每隔一段距离记录一次数据。

1.4 扫描结果

1.4.1 较大松散区扫描情况

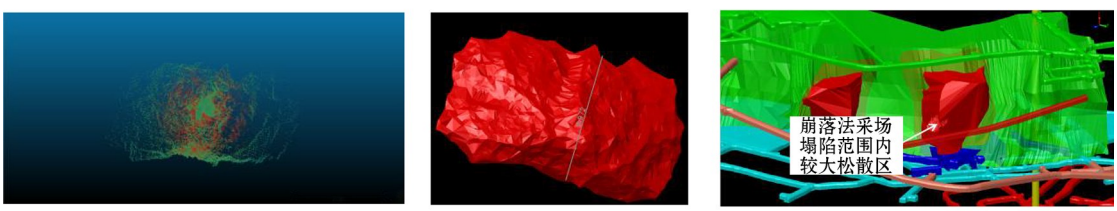
结合地质钻探各钻孔反馈的钻进信息,对部分前端可能存在较大松散区的钻孔开展了内窥式三维扫描,在有底柱崩落法开采区域 739 m 水平测点 198 方位角 0°处探测到较大松散区,较大松散区扫描影像如图 2 所示。扫描过程中,设备将自动以 360°无盲区的视角对目标区域进行三维扫描,获取高密度"点云"数据,根据"点云"数据分析整理,构建出较大松散区的三维模型。较大松散区三维扫描结果及三维模型如图 3 所示。通过模型可知,该区域水平最宽处接近 7 m,整体斜长约 15.5 m,最高标高在 747 m 左右,最低标高在 738 m 左右,体积约 120 m^3。



(a) 钻孔内部全景影像　(b) 边界特征影像　(c) 深部区域影像

图 2 较大松散区扫描影像

Fig.2 Scanning images of larger loose areas



(a) 三维激光扫描原始"点云"数据　(b) 较大松散区局部三维模型　(c) 较大松散区在矿区整体模型中的空间位置

图 3 较大松散区三维扫描结果及三维模型

Fig.3 Three-dimensional scanning results and three-dimensional models of large loose areas

1.4.2 其他区域扫描情况

在其他区域,如 742 m 水平错车硐室测点 198 方位角−20.3°孔、739 m 水平斜坡道内测点 207 方位角−15°孔和测点 230 方位角−14.7°孔等未探测到较大松散区,这些区域钻孔全段均有护孔,壁面光滑,在一定深度处因护孔装置无法继续下放,原岩壁面出露,内窥式三维扫描仪可见前端塌孔堵塞,如图 4 所示。结合 TRT 超前探测及地质钻探等多重手段综合考量,可大致判断崩落法采场开采区域内仅局部存在较大松散区,随时间推移,整体塌陷范围已趋于稳定。

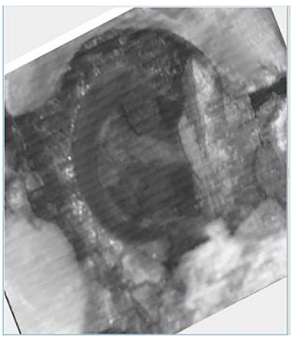


图 4 前端塌孔堵塞

Fig.4 Blockage in front collapse hole

2 塌陷松散区治理方案

2.1 较大松散区安全隐患分析

喀拉通克铜镍矿 1# 矿体 710 m 水平崩落法开采区域,出矿完成后未采取相应处理措施,受周边区域生产扰动及该区域本身矿岩条件的影响,随时间推移,顶板及上下盘矿岩长期承受高应力作用,发生矿岩垮落等情况。现阶段研究区域矿岩应力虽处于相对平衡状态,但内部较大松散区仍存在一定范围岩移风险。一旦产生岩移,将产生以下危害:

(1) 造成较大松散区周边地下工程结构破坏,给人员和设施带来极大安全隐患;

(2) 周边区域在生产过程中,较大松散区围岩受爆破振动等影响,易导致岩体裂隙发育,贯通地表或连通老窿积水区,引发透水事故,淹没坑道和工作面,造成灾难性后果。

该较大松散区已成为矿山生产的重大危险源,严重制约喀拉通克铜镍矿 1# 矿体未来安全、持续、稳定开采,因此需尽快对该区域进行安全处理。

2.2 治理方案选择

2.2.1 废石回填治理方案

在距离较大松散区上方较近的上盘脉外巷道,间隔施工充填井作为废石溜放通道,充填井直径 70 cm 左右,可采用潜孔钻机施工成型,将井下掘进废石通过充填井溜入松散区,严格控制废石块度,尽量将松散区充填密实。废石回填治理方案(方案一)如图 5 所示。

2.2.2 崩落围岩治理方案

在邻近较大松散区的巷道内,向松散区顶部施工钻孔,由于该松散区水平最宽处接近 7 m,整体斜长约 15.5 m,体积约 120 m^3,按围岩崩落松散系数 1.4 测算,炮孔孔底距较大松散区顶部高度约为2.5～3 m,崩下矿石后可将较大松散区充填密实。考虑采用 YGZ90 钻机施工钻孔:直径 65 mm,长度约 30 m,孔位平行布置,水平距离 2 m,仅在较大松散区顶部装药。崩落围岩治理方案(方案二)如图 6 所示。

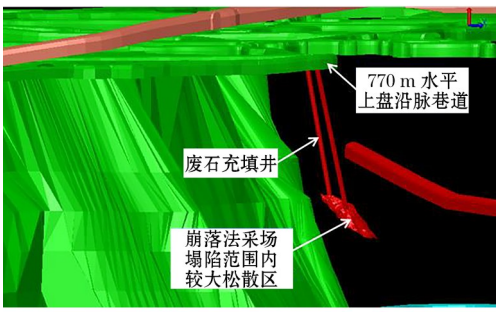


图 5 废石回填治理方案

Fig.5 Waste rock backfilling treatment scheme

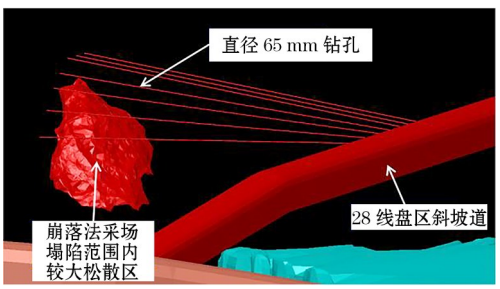


图 6 崩落围岩治理方案

Fig.6 Caving surrounding rock treatment scheme

2.2.3 胶结充填治理方案

在距较大松散区上方较近的上盘脉外巷道,间隔施工胶结充填钻孔作为充填料浆输送通道,充填钻孔直径 150 mm。在充填区域周边通道均已封堵到位、无漏浆风险的前提下,方可输送料浆进行充填治理。充填料浆需保障自凝后强度达到 1 MPa,应尽量降低料浆质量浓度,推荐控制在 60%以下,以提升充填料浆流动性,使其进入较大松散区后能够溢散至周边及下部区域,胶结松散矿岩体,从而提高区域整体强度与稳固性,保障后续矿石回收作业的安全稳定。胶结充填治理方案(方案三)如图 7 所示。

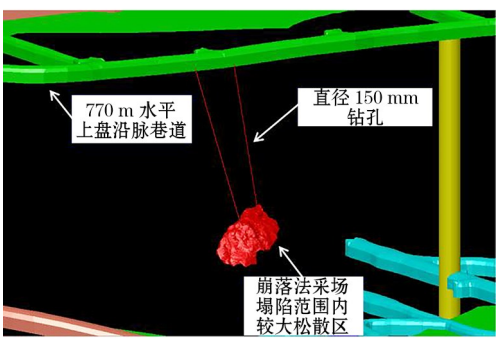


图 7 胶结充填治理方案

Fig.7 Cemented filling treatment scheme

2.3 治理方案比选与推荐

对于上述 3 种较大松散区治理方案,其技术经济指标及处理效果存在一定差异,3 种治理方案的优缺点对比见表 1。

表 1 3 种治理方案优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of three treatment schemes

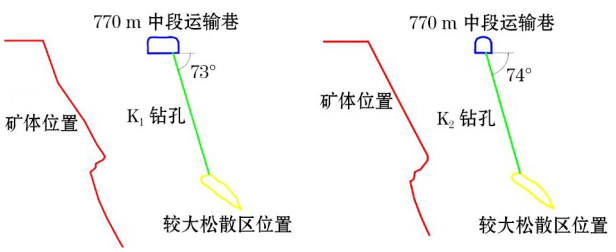
方案	优点	缺点
方案一	1.工艺流程简单、技术应用成熟; 2.废石可以就地取材,解决了废石堆存问题; 3.综合治理成本低。	1.充填井施工困难,存在塌孔风险; 2.对废石块度有要求,大块废石不能直接下放; 3.需要多个充填井下料,且难以将较大松散区充填密实; 4.后续生产时接近该区域需提前做好相应安全技术措施。
方案二	1.工艺流程简单,施工组织管理难度小; 2.治理效率高,综合治理成本低。	1.对钻孔精度要求高; 2.爆破扰动可能对周边矿岩及邻近生产区域造成不利影响; 3.爆破效果难以验证,后续生产接近该区域安全管理难度大。
方案三	1.胶结充填技术在喀拉通克铜镍矿应用成熟; 2.充填料浆能连续制备并输送; 3.充填料浆流动性好,胶结充填能有效消除松散区; 4.胶结充填对松散区周边影响较小,且能对周边松散矿岩起到胶结作用,提高矿岩稳固性。	1.充填料浆养护并达到一定强度需要时间; 2.松散区下部可能漏浆的通道数量较多,挡墙构筑数量多、耗时长; 3.后续生产回采到该区域时会提高矿石贫化指标。

由表 1 可知,方案三虽存在一定缺点,但在技术成熟度、对松散区及周边矿岩的改善效果等方面优势明显,为了更好地查明松散区赋存现状,控制区域变形范围,消除地压灾害安全隐患,稳固该区域矿岩,最终采用方案三治理松散区。

3 实际治理效果

3.1 胶结充填施工方案

(1) 充填钻孔施工。在 770 m 中段上盘脉外巷道 21 线位置附近,布置 K_1 和 K_2 充填钻孔,钻孔设计长度为 770 m 中段巷道到下部松散区顶板的长度(K_1 钻孔孔深 23.6 m,角度 −73°;K_2 钻孔孔深 23.6 m,角度 −74°),采用 CKQ150 潜孔凿岩台车施工,钻孔直径 150 mm,施工接近该松散区时控制钻孔进度,关注下向孔回水情况,防止塌孔掉落。充填钻孔施工方案如图 8 所示。



(a) K_1 钻孔剖面 (b) K_2 钻孔剖面

图 8 充填钻孔施工方案

Fig.8 Filling drilling construction scheme

(2) 胶结充填措施。为防止充填料浆渗透到 710 m 中段并向主巷道溢散,在可能溢散的通道口位置构筑充填挡墙,构筑高度大于 1.2 m,在保证料浆不溢散到主巷的同时,实时观测挡墙外溢状态,及时调整充填时间和方量。一次充填量不超过 120 m^3,且一次充填时间不超过 2 h,充填结束后至少间隔 12 h 才能开始下一次充填,充填施工准备如图 9 所示。



(a) 钻孔充填准备 (b) 710 m 中段充填挡墙构筑

图 9 充填施工准备

Fig.9 Filling construction preparation

(3) 充填效果观测措施。在 739 m 水平和 742 m 水平各预留 1 个地质钻孔(与松散区连通的最高处钻孔)作为料浆观测钻孔,判断松散区内充填料浆的充填进度和充填高度,为充填进度调整提供依据。地质钻孔充填料浆观测情况见图 10。



图 10 地质钻孔充填料浆观测情况

Fig.10 Observation of geological borehole filling slurry

3.2 治理效果分析

(1) 稳定性增强。采用胶结充填治理方案后,

通过对治理区域的长期监测发现,松散区的稳定性得到显著提升。充填完成后一段时间内,对周边矿岩的位移进行监测,监测数据显示,位移量显著减小,表明充填体有效地限制了矿岩的变形,降低了矿岩进一步垮落的风险。原本因松散区存在而引发的应力集中现象得到有效缓解,周围矿岩的应力分布趋于均匀,进一步增强了整个区域的稳定性。

(2) 资源回收率提高。治理前,受松散区的影响,大量矿石资源无法安全开采。治理后,为后续矿石资源的有效回收创造了有利条件。通过合理规划回采顺序,配套有效的支护措施,实现了矿石的安全、高效回收。经统计,治理后矿石资源回收率较治理前提升约 30%,这对提高矿山的经济效益具有重要意义。

(3) 安全保障提升。在治理过程中,严格落实安全管理措施(如实时监测 1# 竖井变化等),有效避免了治理过程中的安全事故。胶结充填形成的稳固结构,显著降低了岩爆、片帮等地质灾害的发生风险。同时,在回采周边矿石资源时,得益于前期治理工作的有效开展,提前制定的安全技术措施可有效应对潜在安全问题,保障了作业人员与设备安全。

(4) 环境影响降低。胶结充填过程中,充填料浆的溢散能够胶结周边松散矿岩,有效减少粉尘的产生。同时,充填体对地下水渗透起一定阻隔效果,降低了地下水潜在污染风险。治理后,矿山周边生态环境受影响程度显著降低,有利于矿山的可持续发展。

4 结论

(1) 本研究运用地质钻探、TRT 超前探测及 C-ALS Gyro 内窥式三维扫描等手段,查明了喀拉通克铜镍矿 1# 矿体崩落法采场塌陷松散区赋存特征。地质钻探与 TRT 超前探测精准确定了松散边界顶板标高,并合理推断了下盘边界;通过内窥式三维扫描明确了较大松散区的位置、形态与体积,在 739 m 水平测点 198 方位角 0°处,其水平最宽约 7 m,斜长约 15.5 m,最高标高在 747 m 左右,最低标高在 738 m 左右,体积约 120 m^3,该矿区仅局部存在较大松散区,且整体塌陷范围趋于稳定。

(2) 胶结充填治理成效显著。监测结果显示,周边矿岩位移量减小,应力集中现象有效缓解且分布均匀;资源回收率提升约 30%,为后续有效回收治理前受影响的矿石创造了条件;治理过程安全无事故,充填体降低了岩爆、片帮等地质灾害发生风险;充填料浆可胶结松散矿岩减少粉尘、阻隔地下水,有效降低了对生态环境的影响。

(3) 后续需完善监测体系,并动态评估采空区,依据评估结果调整治理与开采方案(如优化充填参数、回采顺序等),助力实现精准决策与科学管理,保障矿山可持续开采。

参考文献(References):

[1] 张耀平,曹平,袁海平,等.复杂采空区稳定性数值模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2):233-238.
ZHANG Yaoping, CAO Ping, YUAN Haiping, et al. Numerical simulation on stability of complicated goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 233-238.

[2] 黄武胜.阿勒泰某金矿采空区稳定性评价与采矿方法优化研究[D].北京:北京科技大学,2016.
HUANG Wusheng. Research on mined-out areas stability assessment and mining method optimization of a gold mine in the Altai City[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.

[3] 董建军,张莹,李昕,等.采空区地表 InSAR 形变监测与安全稳定性评价[J].中国安全科学学报,2024,34(1):140-149.
DONG Jianjun, ZHANG Ying, LI Xin, et al. InSAR deformation monitoring and safety and stability evaluation on surface of coal mine goaf[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 140-149.

[4] 蔡鑫,黄涯帅,周子龙,等.基于矿柱失稳风险分析的采空区关键矿柱重定义与辨识[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):216-225.
CAI Xin, HUANG Yashuai, ZHOU Zilong, et al. Redefinition and identification of critical pillars in goaf based on the risk analysis of pillar instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 216-225.

[5] SHI Zhenyue, WANG Qingbiao, WANG Pu, et al. Time series effect on surface deformation above goaf area with multiple-seam mining[J]. Symmetry, 2020, 12(9): 1-16.

[6] 孙英峰,罗霄,高艺瑞,等.瞬变电磁法在探测采空区中的应用[J].煤矿安全,2020,51(3):157-163.
SUN Yingfeng, LUO Xiao, GAO Yirui, et al. Application of transient electromagnetic method in detection of goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(3): 157-163.

[7] 宋贵磊,公绪飞,杨富强,等.含水采空区瞬变电磁时空响应特征研究及应用[J].煤田地质与勘探,2024,52(12):201-212.
SONG Guilei, GONG Xufei, YANG Fuqiang, et al. Spatiotemporal response characteristics of transient electromagnetic field in water-bearing goaves and their applications[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 201-212.

[8] 张鑫,孙文斌,章强新,等.被动源地震干涉成像技术在煤田采空区探测中的应用研究[J].地质论评,2024,70(5):1899-1905.
ZHANG Xin, SUN Wenbin, ZHANG Qiangxin, et al. Study on the application of passive seismic interferometric imaging technology in the detection of goaf in coalfield[J]. Geological Review,2024,70(5):1899-1905.

[9] 陈兴隆.综合物探技术在隐蔽采空区精细探测中的应用[J].中国矿业,2024,33(9):101-109.
CHEN Xinglong. Application of comprehensive geophysical exploration technology in fine exploration of concealed goaf [J]. China Mining Magazine,2024,33(9):101-109.

[10] 孙刚友,张卫中,康钦容,等.精准三维激光探测结合可视化建模的采空区稳定性分析[J].科学技术与工程,2022,22(33):14683-14690.
SUN Gangyou, ZHANG Weizhong, KANG Qinrong, et al. Goaf stability analysis based on accurate 3D laser detection combined with visual modeling[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(33):14683-14690.

[11] 缪玉松,黄飞飞,朱明德,等.多采空区干式充填与带式胶结充填力学性能数值模拟研究[J].金属矿山,2024(6):46-52.
MIAO Yusong, HUANG Feifei, ZHU Mingde, et al. Numerical simulation of mechanical properties of multi-goaf dry filling and belt cemented filling[J]. Metal Mine,2024(6):46-52.

[12] 张东杰,刘泽宇,段晓博,等.复合采空区覆岩冒落机理及其协同治理方法研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):91-96.
ZHANG Dongjie, LIU Zeyu, DUAN Xiaobo, et al. Research on the mechanism of overlying strata caving in composite goaf and its collaborative treatment method[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):91-96.

[13] 周光信,王亚军,李晓辉.喀拉通克铜镍矿采矿方法优化研究[J].采矿技术,2023,23(6):12-17.
ZHOU Guangxin, WANG Yajun, LI Xiaohui. Research on the optimization of mining method in Kalatongke copper-nickel mine[J]. Mining Technology,2023,23(6):12-17.

[14] 陈寅,王亚军,李晓辉,等.基于TRT超前探测与地质钻探相结合的崩落法开采影响区域松散边界确定[J].矿业研究与开发,2024,44(8):139-147.
CHEN Yin, WANG Yajun, LI Xiaohui, et al. Determination of loose boundaries in the affected area of collapse mining based on the combination of TRT advanced detection and geological drilling[J]. Mining Research and Development,2024,44(8):139-147.

[15] 田正华.三维激光扫描技术应用于地面建模的精度分析[D].西安:西安科技大学,2015.
TIAN Zhenghua. Precision analysis of three-dimensional laser scanning technology applied to ground modeling[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology,2015.

[16] 李向前,林恩德,房宽达,等.基于三维激光扫描的隧洞施工数字化系统建设及应用[J/OL].水利水电技术(中英文):1-11[2024-12-02].http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20241125.1346.002.html.
LI Xiangqian, LIN Ende, FANG Kuanda, et al. Construction and application of digital system for tunnel construction based on 3D laser scanning[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering: 1-11[2024-12-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20241125.1346.002.html.

[17] 邱振华,林秀云.基于C-ALS三维激光扫描的深埋隐蔽采空区空间形态探测与治理[J].采矿技术,2021,21(3):145-147.
QIU Zhenhua, LIN Xiuyun. Detection and treatment of the spatial form of deep-buried concealed goaf based on C-ALS three-dimensional laser scanning[J]. Mining Technology, 2021,21(3):145-147.

[18] 东龙宾,王少泉,蔺帅宇,等.基于C-ALS的三维激光扫描技术在采空区探测中的应用[J].有色金属(矿山部分),2019,71(2):1-4.
DONG Longbin, WANG Shaoquan, LIN Shuaiyu, et al. Application of 3D laser scanning technology based on C-ALS in goaf detection[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019,71(2):1-4.