

地下矿山二步骤采场爆破设计优化和测量装备技术研究

苏凤波¹,张君^{2*},王显波¹,王艳超¹,胡铭浩¹

(1. 赤峰中色白音诺尔矿业有限公司; 2. 长沙施玛特迈科技有限公司)

摘要:探讨了先进的三维激光扫描技术在地下矿山二步骤采场回采爆破设计中的应用。该方法通过快速获取采空区的三维坐标数据,生成高精度的三维模型、更加多源的岩石物理信息为爆破设计提供了精确的设计参数。与传统的测量方法相比,集成化移动式三维激光扫描技术不仅提高了数据采集的效率和精度,而且通过与矿业软件的集成,实现了模型与设计的高效融合,显著提升了爆破方案的精准度和采场的安全性。通过实际工程案例分析,验证了该方法在减少矿石损失、提高资源回收率和作业效率方面的显著效果,采场矿石资源回收率达到95%以上,为矿山的安全、高效开采提供了有力的技术支持。

关键词:地下矿山;二步骤开采;爆破设计;测量装备;三维激光扫描;集成式;精确度

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)06-0028-05

doi:10.11792/hj20250606

引言

在矿山开采领域,随着科技的不断进步,矿山测量装备和技术的发展日新月异。尤其是在地下开采矿山中,空场嗣后充填采矿工艺^[1-2]的应用日益广泛,但其爆破设计优化和采空区探测的准确性一直是矿山安全生产和资源回收率提升的关键因素。传统的采空区探测方法存在一定的危险性和局限性,如依赖全站仪测量,不仅效率低,而且难以确保数据的精确性,这对矿山的精细化管理和资源的最大化利用构成了挑战。

三维激光扫描技术的引入,为采空区的精确探测和精细化爆破设计提供了新的解决方案。该技术能够快速获取矿山采空区的三维坐标数据,生成高精度的三维模型,从而为爆破设计提供更为精确的参考依据^[3-5]。前人在这方面的研究已经取得了一系列成果。例如:王利岗等^[6]在磷矿充填回采中应用三维激光扫描技术,有效提高了充填量计算的准确性,并为爆破控制优化提供了参考。李建等^[7]在罗河铁矿采空区的研究中,通过三维激光扫描技术构建了采空区的三维实体模型,为超欠挖体积的计算和回采设计提供了基础数据。陈凯等^[8]在大直径深孔采矿中应用三维激光扫描技术,验证了该技术在提高矿山测量精度方面的有效性。万串串等^[9]在残矿回采与采空区治理中协同应用三维激光扫描技术,提高了作业流程

的安全性和效率。黄彬等^[10]基于C-ALS采空区探测及三维建模技术研究,进一步展示了三维激光扫描技术在采空区精细化管理中的应用潜力。

本文的研究旨在深入探讨三维激光扫描技术在地下开采矿山二步骤采场回采爆破设计优化中的应用效果,通过分析和总结前人的研究成果,提出新的研究思路和目的。通过实际工程案例,评估三维激光扫描技术在采空区探测的准确性、爆破设计优化、资源回收率提高及作业流程改进方面的具体效果,以期成为矿山的安全、高效开采提供更加有力的技术支持和理论依据。通过这些研究期望能够进一步提高矿山开采的精细化管理水平,实现资源的最大化利用,同时保障矿山作业的安全性。

1 地下采空区测量技术与装备的发展趋势

随着科技的进步,地下采空区的测量技术与装备经历了重要的发展历程。从传统的全站仪和激光测距仪,到架站式固定扫描仪,再到单一手持式三维激光扫描仪和机载扫描仪,每一步都标志着技术的重大突破^[11-14]。当前,地下采空区测量技术正朝着更高效、更精确、更安全的方向发展,融合了激光雷达、高清视频扫描和RTK技术^[15]的移动式三维激光扫描仪代表了最新的技术趋势。地下矿山测量装备的演进趋势如图1所示。

传统的全站仪和激光测距仪虽然在一定程度上

收稿日期:2024-12-03; 修回日期:2025-01-30

基金项目:湖南省基金项目2020年度安全生产预防及应急专项资金项目(2020YJ001);湖南创新型省份重点领域研发计划项目(2022GK2061)

作者简介:苏凤波(1984—),男,工程师,从事矿山生产管理与测量技术的研究工作;E-mail:274402905@qq.com

*通信作者:张君(1987—),男,高级工程师,从事矿山信息化与智能技术和装备研究工作;E-mail:295912247@qq.com



图1 地下矿山测量装备的演进趋势

Fig. 1 Evolutionary trends of survey equipment for underground mines

能够提供采空区的测量数据,但受限于测量方法的单一性和效率的局限性,难以满足快速发展的矿业需求。随后,架站式固定扫描仪的出现提高了数据采集的效率和精度,但由于其固定性,对于复杂或难以到达的采空区仍存在局限性。

手持式三维激光扫描仪的问世,为地下采空区的测量带来了便捷性和灵活性。这种设备通常体积小、操作简便,能够快速获取采空区的三维点云数据,为后续的数据处理和分析提供了丰富的信息,然而手持式设备在长距离或大面积扫描时仍受限于操作者的活动范围和安全风险。

机载扫描仪,包括无人机载扫描仪和车载扫描仪,克服了手持设备的局限,能够覆盖更大的扫描区域,尤其适合于地形复杂或人员难以到达的区域。通过搭载高精度的激光扫描仪和高清摄像头,机载扫描仪能够实现对采空区的快速、大范围扫描,获取更为全面的数据。

最新的移动式三维激光扫描仪,融合了激光雷达、高清视频扫描和RTK技术,代表了当前技术发展的最前沿。这种设备不仅能够提供高精度的三维空间数据,还能够通过RTK技术实现实时、精确的定位,同时结合高清视频提供更为直观的采空区视觉信息。移动式扫描仪的非接触性、高效率和高精度特点,使其在地下采空区的测量中具有显著优势。

综上所述,地下采空区测量技术的发展趋势指向了更高的自动化、智能化和集成化。未来的技术发展可能会集中在提高扫描速度、改善数据质量、增强设备稳定性及开发更为智能的数据处理算法。此外,随着人工智能和机器学习技术的发展,预计这些技术也将被应用于采空区数据的自动解析和分析中,进一步提升地下采空区测量的智能化水平。

2 精细化二步骤采场回采爆破参数设计

空场嗣后充填采矿工艺在地下矿山应用广泛,该

工艺具有高效、安全和绿色开采的特点。为了安全回采资源,在生产计划时往往是分步骤开采,即“隔一采一”或“隔三采一”,一步骤回采矿房、二步骤回采矿柱,典型的空场嗣后充填采矿工艺如图2所示。

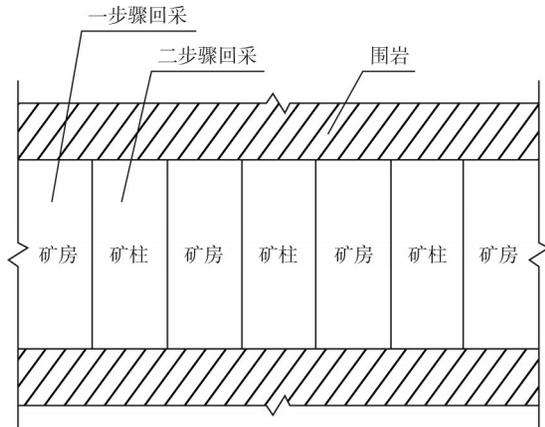


图2 典型的空场嗣后充填采矿工艺

Fig. 2 Typical open stope and subsequent filling mining method

2.1 二步骤采场开采爆破设计面临的挑战

二步骤开采是嗣后充填空场开采工艺的一个重要环节,尤其在处理地下遗留采空区或复杂矿柱时,显得尤为重要。传统的二步骤开采面临的几个核心挑战和现状包括:

1) 技术局限性与效率问题。过去二步骤开采设计依赖技术人员的经验和传统测量装备,如测距仪或全站仪,这种方法不仅效率低而且难以精确描绘复杂采空区形态,导致设计不准确,爆破设计缺乏可靠依据。

2) 采空区探测难题。采空区的存在是开采的一大安全隐患,传统探测手段难以精确定位其位置、大小和形态,这直接影响了爆破边界设定,易引发超爆、欠爆,增加矿石资源回采贫化和安全隐患。

3) 爆破设计粗糙。缺少精确爆破设计依据,爆破孔布置、装药量估算根据经验进行设计,不能精细调整,导致回采效率低和资源浪费。

4) 安全与环保。传统方法对环境和作业人员安全考虑不足,存在较高的作业风险、较低的资源回收率等问题,不符合绿色矿山开采理念。

综上所述,这些现状揭示了空场嗣后充填采矿工艺二步骤开采在技术、安全、效率、资源回收、环境方面存在的局限性,迫切需要技术创新和智能化、精确化改进。而三维激光扫描技术的融入提供了一个突破,以点云数据为基础,为精细化爆破设计、安全优化、资源回收率提高创造了可能,也为解决当前二步骤开采技术面临的问题指明了方向。

2.2 精细化爆破设计方法

为了实现精细化爆破,首先需要进行采场采空区

扫描建模工作,移动式三维激光扫描仪凭借其小巧灵活特点,适应于不同类型的采空区。中国地下矿山资源赋存条件多种多样,导致采矿过程中出现了大大小小形状各异的采空区。过去一般通过延长杆方式搭载扫描仪伸入到采空区中进行探测或采用钻孔式三维激光扫描仪通过钻孔伸入到采空区中进行探测,移动式三维激光扫描仪由于质量小(一般小于2 kg),可以通过小型无人机搭载方式进行采空区扫描,以降低人员作业的安全风险。此外,为了更加精确地掌握一步骤采场采空区的爆破效果和爆破边界特征,可以采用多传感器集成移动式三维激光扫描仪,这不仅可以获得采空区的几何模型,还可以掌握爆破边界纹理信息(如图3所示)。通过先进的集成移动式三维激光扫描仪可以获取非常精细化的采场爆破效果评估信息,这不仅为二步骤采场爆破设计提供准确的信息,还可以为一步骤采场残矿回收提供指导,以实现资源最大化回收利用,符合绿色矿山的开采理念。

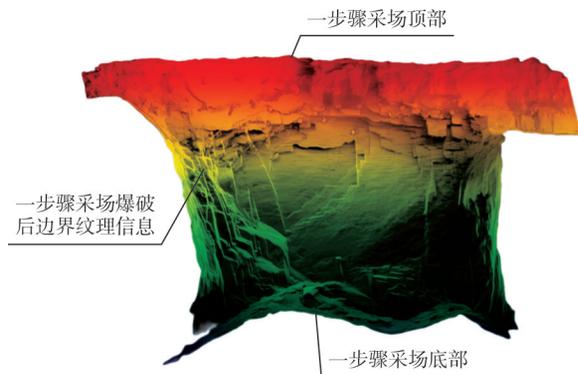


图3 三维激光扫描仪扫描一步骤采场采空区三维模型

Fig. 3 3D model of the goaf in the one-step stope scanned by 3D laser scanner

其次,将一步骤采场采空区三维激光扫描数字模型导入矿业三维设计软件中,数据导入是一个难题,往往需要多个软件配合才能完成模型的导入。例如:采用点云处理软件 Geomagic 软件进行封装去除噪点,处理完毕后需要转换文件格式,然后再导入三维矿业软件中进行坐标转换和切割面等工作。而随着技术发展,三维激光扫描点云数据格式 .ply(一种由斯坦福大学 TURK 等设计开发的多边形文件格式,因而也被称为斯坦福三角格式)、.obj(3D模型文件格式,是一种文本文件)、.las(LiDAR数据的工业标准格式)、.xyz(一种文本格式)等文件可以直接导入三维矿业软件中,基于控制点坐标一键完成模型的坐标转换,转换后的扫描模型将与矿山采矿设计的采场和工程巷道三维模型进行复合,如图4所示。

最后,根据采空区模型提供的精准边界信息和纹

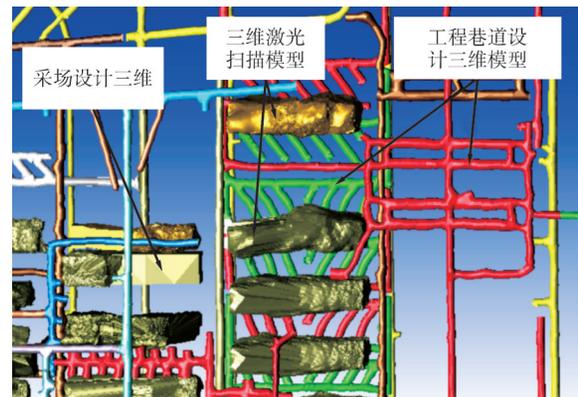


图4 三维激光扫描模型与矿业三维设计模型的融合

Fig. 4 Fusion of 3D laser scanning model and 3D design model of mining industry

理信息在三维矿业软件中完成爆破参数设计。上述二步骤采场回采精细化爆破参数设计方法流程如图5所示。

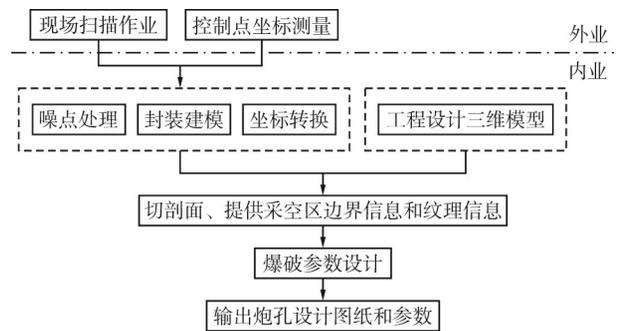


图5 二步骤采场回采精细化爆破参数设计方法流程

Fig. 5 Flowchart of the refined blasting parameter design method for stoping in the two-step stope

3 应用案例与效果评估

某地下开采矿山采用空场嗣后充填采矿法,采场尺寸为68 m×18 m×32 m,采用深孔与中深孔方式崩落矿石,回采顺序按照“隔一采一”或“隔三采一”方式,分区由中部向两翼进行推进。该矿山之前采用固定式三维激光扫描仪进行采空区探测。为了实现二步骤采场资源高效和安全回收利用,引进了高精度移动式三维激光扫描仪进行采空区探测,采用人工、延长杆和无人机多种作业模式进行采空区探测。固定式三维激光扫描仪一般需要3人联合作业,每天处理2个采场;当换成移动式三维激光扫描仪时只需要2人进行作业,其中,1人为安全员,实际作业1人,每天处理5个采场。根据矿山的安全管理规定,每天下井作业时间实际只有3 h,因此采用先进的测量设备会显著提高测量效率。

3.1 一步骤采空区三维建模效果

该矿山一步骤采场采空区三维激光扫描模型如图6所示。由图6可知:该矿山在过去一年一共扫描

了17个采场采空区,实际一步骤回采结束后,爆破效果与设计要求相差较大,几乎所有一步骤采场均出现了超欠挖现象,部分采场甚至在爆破时将邻近的矿柱崩落导致采空区贯通,造成了二步骤矿柱矿房难以开展回采工作。根据图6可以进一步计算每个采空区的体积,估算出每个采场的实际出矿量,从而获得准确的采场矿石回收率或采矿损失率。

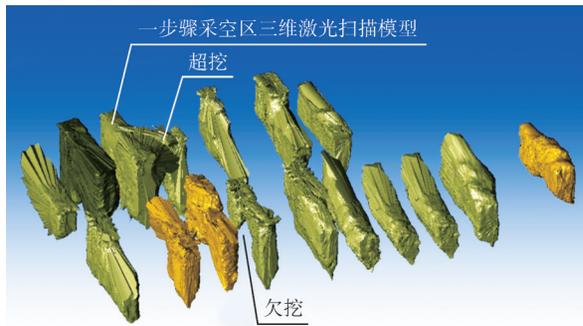


图6 一步骤采场采空区三维激光扫描模型

Fig. 6 Diagram of 3D laser scanning model of the goaf in the one-step stope

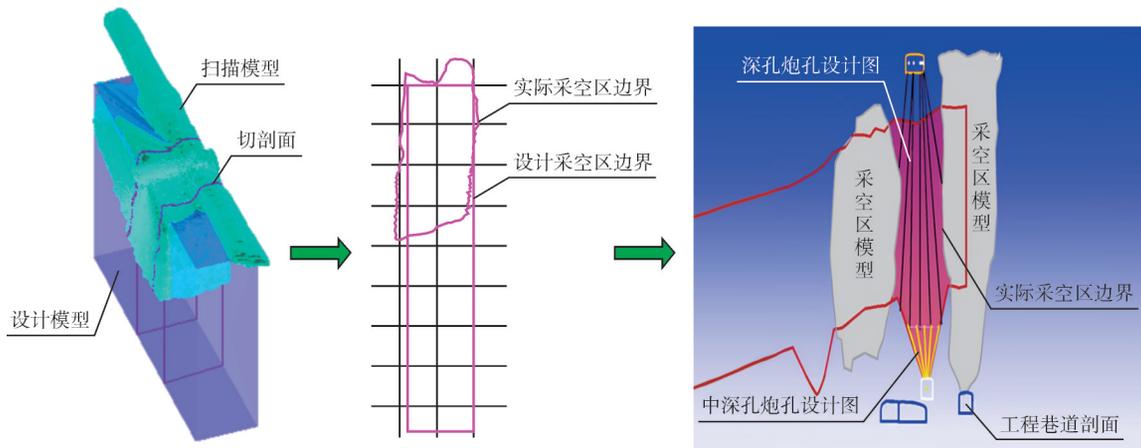


图7 二步骤采场精细化爆破设计流程

Fig. 7 Flowchart of the refined blasting design for the two-step stope

理者的重要工作之一。在统计采场资源回收率方面需要准确计算设计矿量、实际回采矿量和存留矿量,这些数值通过计算三维模型的体积量即可非常便捷地得到。该矿山部分采场资源回收率统计结果如表1所示。由表1可知:大部分采场资源回收率在95%以上,部分采场回收率较低是因为该采场地质条件较差或爆破效果不好,出矿难度增加。通过先进的测量工具可以使得资源回采情况数字化,矿山生产管理者可以获得精准的生产数据,为矿山的经营管理提供科学决策依据。

4 结论

本文系统地研究了地下矿山空场嗣后充填采矿工艺二步骤采场回采精确爆破设计的方法,具体结论如下:

3.2 二步骤采场精细化爆破设计

二步骤采场精细化爆破设计流程如图7所示。第一步,将采空区扫描模型和设计三维模型进行布尔计算或在三维矿业软件中通过实体切割面的功能,按照一定间距设置剖面线距离,该距离最好小于炮孔的设计水平间距;第二步,提取剖面线,精细地观察和测量超欠挖部分矿体的具体尺寸,该尺寸会直接影响炮孔的设计长度;第三步,爆破设计,传统的爆破设计基于CAD图纸手工绘制,在三维矿业软件中可以通过炮孔设计功能批量化进行深孔和中深孔爆破设计,只需要输入如炮孔间距、炮孔角度、排距等参数,软件即可自动生成爆破设计图纸。

3.3 资源回收率

资源回收率是反映矿山企业生产管理水平和经济效益的一项重要技术指标,在传统的采矿生产管理中,由于缺乏相关工具很难精确获取每个采场的资源回收率,只能整体进行粗略估算,在绿色矿山发展理念的推动下,最大化提高资源回收率是矿山企业管

表1 部分采场资源回收率统计结果

Table 1 Statistics of the resource recovery rate in part of the stopes

采场编号	设计矿量/t	实际回采矿量/t	存留矿量/t	资源回收率/%
32-2 [#]	361 336.01	481 556.01	14 047.42	97.08
32-4 [#]	268 464.86	333 954.2	14 716.9	95.59
32-6 [#]	172 910.29	206 554.7	7 641.8	96.30
32-8 [#]	170 581.38	185 863.5	40 515.59	84.02
32-10 [#]	232 722.59	142 059.6	4 802.01	96.62
32-12 [#]	261 941.49	135 102.5	9 760.07	92.78

1) 地下采空区测量技术和装备正逐步走向集成化、智能化、自动化、高精度和高效率,从单一数据采集到全面空间模型构建,再到模型数字化与决策支持,这一技术迭代,不仅解决了传统测量难题,而且推动了采矿作业的现代化,提升了地下资源高效和安全

开采水平。

2)相对传统的测量装备,采用集成式移动三维激光扫描仪可以高效、安全、全面地获取采空区状态信息,这种信息不仅仅是精确的几何模型或地理坐标信息,还包括岩石表面的纹理信息和色彩信息,这些多源信息为矿山爆破质量评估提供了科学的决策依据。

3)基于三维激光扫描设备与三维矿业软件的结合,空场嗣后充填采矿工艺二步骤采场爆破设计可以做到精准设计,避免了盲目布孔带来的资源回收损失和安全风险。

[参考文献]

- [1] 孙星,安龙.深部低品位资源阶段空场嗣后充填采矿法采场结构优化与稳定性控制[J].黄金,2023,44(7):75-82.
- [2] 黄浩辉,苏卫宏,古绪球.大团山矿床-580 m以下矿体采矿方法选择的探讨[J].黄金,2011,32(9):32-35.
- [3] 廉旭刚,蔡音飞,胡海峰.我国矿山测量领域三维激光扫描技术的应用现状及存在问题[J].金属矿山,2019(3):35-40.
- [4] 张君,胡哲骏,刘晓杨.三维激光扫描设备在矿山井巷工程快速测绘中的应用[J].采矿技术,2020,20(6):229-232.
- [5] 万飞,宋卫东,曹帅,等.空区探测及3D建模技术在采矿损失贫化核算中的应用[J].黄金,2018,39(9):26-29.
- [6] 王利岗,胡建军,陈凯,等.基于三维激光扫描技术的某磷矿充填回采应用[J].中国矿业,2018,27(增刊1):216-221.
- [7] 李建,王世松,张驰,等.罗河铁矿采空区三维激光扫描及应用分析研究[J].有色金属(矿山部分),2020,72(1):6-11.
- [8] 陈凯,张达,张君,等.三维激光扫描技术在大直径深孔采矿中的应用[J].有色金属工程,2015,5(增刊1):41-46.
- [9] 万串串,王湖鑫,罗先伟,等.高峰矿105号矿体残矿回采与采空区治理协同技术研究[J].中国矿业,2017,26(增刊2):340-344.
- [10] 黄彬,张诚,陈尚波.基于C-ALS采空区探测及三维建模技术研究[J].采矿技术,2016,16(1):49-51.
- [11] 杜保义,袁霞.测绘新技术在矿山测量中的应用[J].黄金,2009,30(12):33-36.
- [12] 沙文忠,张驰,彭张,等.普朗铜矿采区溜井精细化扫描及建模技术[J].矿冶,2020,29(1):5-10.
- [13] 肖丽娟.便携式三维激光扫描在安开数字化矿山中的应用[J].采矿技术,2020,20(4):130-131,134.
- [14] 杨福斗,李湘洋,刘海科,等.基于CMS探测技术的房柱采矿法采空区精细化探测及稳定性评价[J].黄金,2019,40(5):38-41.
- [15] 张晓铭.三维激光扫描仪与RTK技术在矿山综合测绘及数据集成中的联合应用[J].科技创新与应用,2024,14(5):189-192.

Optimization of blasting design and survey equipment technology in two-step underground stopes

Su Fengbo¹, Zhang Jun², Wang Xianbo¹, Wang Yanchao¹, Hu Minghao¹

(1. Chifeng NFC Baiyinnuoer Mining Co., Ltd.; 2. Changsha Smartmine Technology Co., Ltd.)

Abstract: This study investigates the application of advanced 3D laser scanning technology in the blasting design for mining in two-step underground stopes. The method rapidly acquires 3D coordinate data of the goaf and generates high-precision 3D models along with comprehensive rock physical property data, providing precise parameters for blasting design. Compared with traditional survey methods, integrated mobile 3D laser scanning technology not only improves the efficiency and accuracy of data collection but also, when combined with mining software, enables efficient integration of the 3D model with the design scheme. This significantly enhances the precision of the blasting plan and the safety of the stope. Analysis of a practical case validates that this method significantly reduces ore loss and increases the resource recovery rate and operational efficiency. In that case, the ore recovery rate in the stope exceeded 95 %, providing strong technical support for safe and efficient mining operations.

Keywords: underground mine; two-step mining; blasting design; survey equipment; 3D laser scanning; integrated; precision