Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1555-1565
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146154

Hans汉斯

大型地采矿山掘进装备与辅助作业系统改造技术的研究与应用

杨文杰，于佳兴*，李　杨，朱雅斌，孟庆喜，孟令民，许文龙

唐山首钢马兰庄铁矿有限责任公司，河北 唐山

收稿日期：2026年10月8日；录用日期：2026年11月4日；发布日期：2026年11月11日

摘　要

针对大型地采矿山在三级矿量衔接紧张、工程空间受限、现有设备利用率不足等复杂约束条件下，如何通过装备改造与辅助作业革新快速释放开拓系统效率的难题，本文以唐首马铁矿开拓工程为背景，开展了掘进装备与辅助作业系统改造技术的研究与应用。研究首先针对传统井下管道安装需动火作业的安全隐患，研发了预制挂钩无火固定技术，采用Φ20 mm螺纹钢在地表预制成标准化“J”型或“L”型挂钩，配合膨胀螺栓实现井下无火快速安装；其次，针对喷浆台车速凝剂罐容量不足、需频繁出井加注的瓶颈，首创“水泥罐车随车携带速凝剂”协同作业模式，通过加装920 L专用容器并系统集成，变“台车出井加注”为“罐车现场补给”；同时，针对传统全站仪测量安全风险高、效率低下的问题，引入基于SLAM技术的三维激光扫描仪实现井下空间数字化测量。现场应用表明：管道安装实现无火化作业，年产生经济效益超100万元；单班喷浆量增加3车，年创效益108万元；测量队伍由4人减少至1人，日验收巷道能力由1条提升至10条，年均节约人工及相关成本约36万元。该技术路线为同类老旧矿山挖潜增效提供了可复制的完整解决方案。

关键词

地下矿山，装备改造，无火固定，速凝剂供给，数字化测量，降本增效

Research and Application of Retrofitting Technologies for Excavation Equipment and Auxiliary Operation Systems in Large-Scale Underground Mines

Wenjie Yang, Jiaxing Yu*, Yang Li, Yabin Zhu, Qingxi Meng, Lingmin Meng, Wenlong Xu

Tangshan Shougang Malanzhuang Iron Mine Co., Ltd., Tangshan Hebei

*通讯作者。

文章引用: 杨文杰, 于佳兴, 李杨, 朱雅斌, 孟庆喜, 孟令民, 许文龙. 大型地采矿山掘进装备与辅助作业系统改造技术的研究与应用[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1555-1565. DOI: 10.12677/me.2026.146154

Received: October 8, 2026; accepted: November 4, 2026; published: November 11, 2026

Abstract

Large-scale underground mines often face complex constraints, such as tight transitions between ore reserve categories, limited working space, and low utilization rates of existing equipment. Addressing the challenge of rapidly enhancing the efficiency of development systems through equipment retrofitting and auxiliary operation innovation, this paper—based on the development projects at the Tangshan Shougang Malanzhuang Iron Mine—explores the research and application of retrofitting technologies for excavation equipment and auxiliary operation systems. First, to mitigate the safety risks associated with traditional underground pipeline installation (which often requires hot work), a "hot-work-free" installation method using prefabricated hooks was developed. Standardized "J" or "L" shaped hooks, fabricated on the surface from 20 mm diameter rebar, are secured underground using expansion bolts, enabling rapid, flame-free installation. Second, to overcome the bottleneck of insufficient accelerator tank capacity on shotcreting rigs—which previously necessitated frequent trips to the surface for refilling—a collaborative operational model was pioneered: transporting the accelerator via a cement tanker. By integrating a dedicated 920-liter container into the system, the process was shifted from "rig returning to the surface for refilling" to "on-site replenishment from the tanker". Furthermore, to address the safety risks and low efficiency inherent in traditional total-station surveying, a 3D laser scanner based on SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) technology was introduced for the digital measurement of underground spaces. Field applications demonstrate that the hot-work-free pipeline installation method generates an annual economic benefit exceeding 1 million RMB. The shotcreting capacity has increased by three truckloads per shift, yielding an annual benefit of 1.08 million RMB. Additionally, the surveying team has been reduced from four personnel to one, while the daily capacity for tunnel inspection and acceptance has risen from one tunnel to ten, resulting in annual savings of approximately 360,000 RMB in labor and related costs. This technical approach offers a replicable, comprehensive solution for unlocking potential and increasing efficiency in similar aging mines.

Keywords

Underground Mines, Equipment Retrofitting, Non-Hot-Work (Flame-Free) Fixation, Accelerator Supply, Digital Measurement, Cost Reduction and Efficiency Enhancement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 前言

三级矿量的科学平衡是保障矿山持续稳定生产的关键。国内外现代化矿山普遍将开拓矿量、采准矿量、备采矿量的动态管理视为生产组织的核心环节。在类似唐首马铁矿的衔接紧张情境下，国外先进矿山常采用“强化开拓先行、多水平协同推进”的战略，并利用算法优化开拓工程顺序与资源分配[1]。国内研究则侧重于在资源有限条件下，通过优化开拓巷道布置与施工工艺来快速形成备采矿量[2]，但对“采准未完成，备采已就绪”这种特殊失衡状态下的高效转换策略研究相对较少。

提高巷道掘进效率是增加开拓矿量的直接途径。在掘进装备改造方面，国内外已有对老旧设备进行机电液一体化改造以提升其性能与可靠性的成功案例[3]，其核心在于不是简单替换，而是通过系统再设

计满足特定工艺需求。然而，上述研究多针对单一设备或新建矿山，对老旧矿山在设备利用率不足、工程空间受限等约束条件下，如何通过装备挖潜与辅助作业革新协同提升开拓系统效率，仍缺乏系统性研究。

在辅助作业机械化方面，传统管道安装需井下动火作业，存在火灾、爆炸等重大安全隐患[4]；台车供水管需人工铺设回收，劳动强度大、效率低[5]；喷浆速凝剂需台车出井加注，往返耗时严重影响支护效率[6]。上述辅助作业环节的机械化、自动化替代研究，已成为矿山安全高效生产的重要方向。在数字化测量方面，传统全站仪测量存在安全风险高、作业效率低下、数据维度单一等问题[7]，基于 SLAM 技术的三维激光扫描仪为解决上述难题提供了新途径[8]。

综上所述，国内外学者专门针对大型地采矿山在三级矿量失衡、工程空间受限、设备利用率不足等复杂约束条件下，如何通过装备改造与辅助作业革新同步实现“提升核心装备能力、革新辅助作业模式”两大目标的研究与实践，尚属前沿探索领域。具体而言，仍面临以下三方面关键难题亟待突破：一是现有掘进台车钻孔能力不足，如何在确保设备长期运行可靠性与精度的同时，实现钻孔深度的突破性提升；二是传统辅助作业工艺中动火作业、人工铺管等高危高耗环节如何实现机械化、自动化替代；三是井下复杂危险空间的高效精准测量难题。

针对上述难题，本文以唐首马铁矿开拓工程为背景，系统开展掘进装备与辅助作业系统改造技术研究。重点围绕装备能力提升、辅助作业机械化替代、数字化测量等核心问题开展理论分析与现场实践，旨在攻克大型地采矿山装备与辅助作业的技术瓶颈，形成一套安全可靠、高效快捷的装备改造与辅助作业成套技术。本文的主要贡献在于：在唐首马铁矿开拓工程场景下，首次应用并集成了预制挂钩无火固定技术、水泥罐车随车携带速凝剂协同供给模式以及基于 SLAM 技术的三维激光扫描测量方法，形成了“装备挖潜－辅助革新－数字赋能”协同推进的成套技术路线，为同类老旧矿山提供了可复制的完整解决方案。

2. 文献综述

2.1. 矿山辅助作业优化研究现状

矿山辅助作业系统涵盖管道安装、支护材料供给、测量验收等多个环节，其效率与安全水平直接影响开拓系统的整体能力。在管道安装方面，传统工艺长期依赖井下动火作业，相关安全规程对此有严格限制，但替代性技术研究相对薄弱。近年来，部分矿山尝试采用预制构件与机械连接方式减少井下动火，但多为零星实践，缺乏系统的力学设计与标准化推广。

在喷浆支护辅助作业方面，速凝剂供给模式是影响喷浆连续作业的关键因素。国内外普遍采用台车自带速凝剂罐的方式，容量有限导致频繁出井加注，成为制约支护效率的瓶颈。现有研究多关注喷浆工艺参数优化，对速凝剂供给系统的装备改造与工序重构研究较少。

2.2. 数字化测量技术研究现状

传统全站仪测量在井下复杂环境中存在安全风险高、效率低、数据维度单一等固有局限。基于 SLAM 技术的三维激光扫描仪通过同步定位与地图构建，能够在无 GPS 信号的井下环境中实现自主导航与三维点云采集，为井下空间数字化测量提供了新途径。该技术在隧道、地铁等工程中已有应用，但在大型地采矿山开拓工程中的系统性应用研究仍不充分。

2.3. 本文贡献定位

基于上述文献分析，本文的贡献在于：针对大型地采矿山在三级矿量衔接紧张、工程空间受限、设

备利用率不足等复杂约束条件下，首次在唐首马铁矿开拓工程场景下，系统集成并应用了预制挂钩无火固定技术、水泥罐车随车携带速凝剂协同供给模式以及基于 SLAM 技术的三维激光扫描测量方法，形成了“装备挖潜－辅助革新－数字赋能”协同推进的成套技术路线，为同类老旧矿山提供了可复制的完整解决方案。

3. 研究内容与技术路线

唐首马铁矿在长期生产实践中，开拓系统面临三级矿量衔接紧张、工程空间受限、现有设备利用率不足等多重约束。辅助作业中管道安装需井下动火作业、喷浆速凝剂需台车出井加注、井下测量依赖传统全站仪等环节，严重制约了作业效率与安全水平。

本研究围绕“革新辅助作业模式、提升安全保障水平”两大目标，采用“装备改造－工序重构－数字赋能”协同推进的技术路线。在管道安装方面，研发预制挂钩无火固定技术，彻底消除井下动火作业风险；在喷浆支护方面，本文首次在水泥罐车随车补给场景下应用并集成了速凝剂协同供给模式，消除喷浆台车出井加注环节；在数字化测量方面，引入基于 SLAM 技术的三维激光扫描仪，实现井下空间数字化精准测量。最终，将上述研究成果集成应用于唐首马铁矿开拓工程，实现安全、效率、效益的同步提升。

4. 研究方法

4.1. 井下管道预制挂钩无火固定技术

4.1.1. 传统工艺弊端分析

在矿山井下开拓过程中，压风、供水等管路的可靠安装与高效延伸是保障各项作业正常运转的基础。如图 1，传统管道固定工艺存在显著弊端：施工时需在巷道壁钻孔后，插入 Φ28 mm 螺纹钢，并使用气焊将其烧红、现场弯制成托架。此方法不仅工序繁琐、对材料强度要求高、施工难度大，更关键的是需要在井下进行动火作业，带来了固有的火灾、爆炸等安全隐患，同时产生有害气体和烟尘，违背了矿山安全生产与绿色作业的发展方向。



井下传统钢筋固管1



井下传统钢筋固管2

Figure 1. Traditional underground steel-bar pipe securing method
图 1. 传统井下钢筋固管

4.1.2. 新技术方案

为彻底消除井下动火风险、降低劳动强度、提高安装效率，唐首马铁矿研发了一种“预制挂钩 + 膨胀螺栓”的无火快速固定新技术(图 2)。其核心内容如下：

一是构件预制化。在地表加工车间，利用 Φ20 mm 螺纹钢预先弯制、焊接成标准化的“J”型或“L”型挂钩，挂钩上部预留标准螺栓孔，整体结构经防锈处理，实现标准化、批量化生产。二是安装机械化与无火化。井下施工时，仅需在巷道壁相应位置钻孔，放入膨胀螺栓，将预制挂钩通过螺栓孔固定在巷道壁上，最后将管道放置于挂钩的承托部位即可，全过程无需任何动火作业，仅使用电钻、扳手等常规工具。三是力学设计优化。新设计充分利用了膨胀螺栓的锚固力与挂钩的杠杆原理，挂钩的力矩方向垂直于巷道壁，Φ20 mm 螺纹钢的强度已完全满足管道承重要求，结构更为简洁、合理。



新型固管模型　　新型固管井下应用1



新型固管井下应用2　　新型固管井下应用3

Figure 2. New type of downhole steel-reinforcement pipe-securing device
图 2. 新型井下钢筋固管

4.1.3. 简化力学模型与承载力校核

(1) 计算简图与荷载取值

将挂钩简化为悬臂梁模型，挂钩根部(与膨胀螺栓连接处)为固定端，管道自重及可能的动载通过承托部位以集中力形式作用于挂钩悬臂端。单根管道单位长度 1 m 自重 100 Kg，每 4 个挂钩挂 3 米的管道，按最不利工况组合，设计荷载取

$$F = 0.75\ \text{kN}$$

(2) 截面特性

Φ20 mm 螺纹钢的有效截面面积：

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 20^2}{4} = 314.16\ \text{mm}^2$$

截面惯性矩：

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi \times 20^4}{64} = 7854\ \text{mm}^4$$

截面抵抗矩：

$$W=\frac{\pi d^3}{32}=\frac{\pi\times 20^3}{32}=785.4\ \text{mm}^3$$

(3) 弯曲正应力校核

悬臂长度 L = 150 mm，则最大弯矩：

$$M_{\max}=F\times L=750\times 0.15=11.3\ \text{N}\cdot\text{m}=1.13\times 10^5\ \text{N}\cdot\text{mm}$$

最大弯曲正应力：

$$\sigma_{\max}=\frac{M_{\max}}{W}=\frac{1.13\times 10^5}{785.4}=143.9\ \text{MPa}\#$$

Q235 钢的屈服强度 σ_s = 235 MPa，抗拉强度 σ_b = 375 MPa~460 MPa。计算应力小于屈服强度，表明按悬臂梁模型且悬臂 150 mm 时强度满足设计要求。实际结构中，挂钩通过“J”型或“L”型几何形状将荷载传递至膨胀螺栓，并非纯悬臂受力；同时挂钩与巷道壁之间存在接触支撑，实际弯矩远小于悬臂模型计算值。按实际结构受力分析，挂钩主要承受拉应力和局部承压，Φ20 mm 螺纹钢的承载力满足要求。

(4) 膨胀螺栓锚固力校核

选用 M12 膨胀螺栓，单个螺栓设计抗拔力 N_t = 10 KN， N_v = 8 KN。管道及挂钩自重产生的竖向应力荷载 F = 0.75 KN 远小于螺栓抗剪承载力，安全系数 K = 8/0.75 = 10.6，满足要求。

(5) 结论

经简化力学模型校核，Φ20 mm 螺纹钢预制挂钩配合 M12 膨胀螺栓，在正常管道安装工况下承载力满足要求，安全系数大于 10。实际应用中未出现挂钩失效案例，验证了设计的可靠性。

4.1.4. 技术优势

与传统工艺相比，新工艺具有显著优势：一是本质安全水平根本提升，完全消除了井下气焊动火这一重大危险源，从根源上杜绝了由此引发的火灾、瓦斯爆炸等事故风险；二是施工效率与质量显著提高，工序由“现场测量、切割、加热、弯制、固定”简化为“预制、钻孔、紧固”三步，安装速度提升数倍，且挂钩规格统一，保证了管道安装的整齐度与可靠性；三是劳动强度与成本大幅降低，避免了繁重的现场热加工工作，降低了工人技能要求和体能消耗，同时采用更细的螺纹钢并减少了现场作业时间，降低了材料与人工综合成本；四是环境友好性增强，避免了焊接烟尘和废气排放，改善了井下作业环境。该技术已在唐首马铁矿及所属公司范围内全面推广应用，成为井下管道安装的标准工艺，年产生经济效益超 100 万元。

4.2. 井下喷浆随车速凝剂供给系统

4.2.1. 问题分析

井下喷浆作业需要添加水泥速凝剂，喷浆台车自身的速凝剂罐容量 500 L，只能满足 4 车水泥浆的用量，每班中途需要将喷浆台车开出井添加一次速凝剂，往返 3 小时，严重影响喷浆作业效率，频繁移动给井下车辆安全运行带来威胁。

4.2.2. 系统改造方案

研究通过工序优化与装备改造，本文首次在水泥罐车随车补给场景下应用并集成了速凝剂协同供给模式：

一是容器改造。精确测量水泥罐车安装空间，在不影响其主体功能前提下，于每台车加装 920 L 专

用速凝剂容器。二是系统集成。3 台改造罐车构成移动补给单元，总携带量达 2760 L，通过专用胶管实现向喷浆台车的快速、现场添加。三是工序重构。变“台车出井加注”为“罐车现场补给”，消除了关键设备的中途移动环节。

系统集成图与工作流程说明：

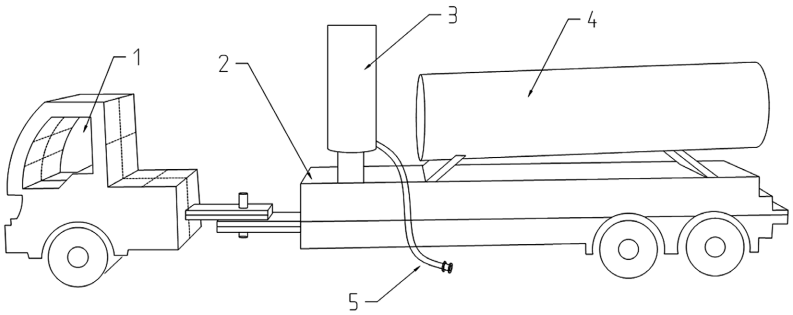


Figure 3. Schematic diagram of system integration
图 3. 系统集成示意图

研究系统集成图如图 3 所示(示意)，主要包括：1、水泥罐车主体；2、装载平台；3、加装的 920 L 速凝剂容器；4、水泥储罐；5、专用输送胶管。工作流程为：水泥罐车装载水泥浆及速凝剂驶入井下作业面→通过专用胶管将速凝剂输送至喷浆台车速凝剂罐→喷浆台车连续作业→罐车根据消耗情况现场补给。3 台罐车形成循环补给单元，确保喷浆作业连续进行。

4.2.3. 应用效果

该方案以较低改造成本，通过对辅助装备进行适应性改造(图 4)并优化工序衔接，从根本上破解了生产瓶颈：一是显著提升效率，完全消除了台车每班 3 小时的无效往返，单班喷浆量增加 3 车，作业连续性实现突破；二是实现安全与经济效益双收，降低了车辆频繁调运的安全风险。经核算，该革新年创经济效益达 108 万元，实现了效率、安全与效益的同步提升，为类似流体材料井下供给提供了创新解决方案，具有广泛的推广价值。



水泥罐车改造前1　　罐车改造速凝剂容器2

Figure 4. Transformation of mine spraying trolley
图 4. 矿用喷浆台车改造

4.3. 基于 SLAM 扫描技术的井下空间数字化测量方法

4.3.1. 传统测量方法瓶颈

在矿山井下开拓与生产过程中，对巷道、硐室、溜井及采空区等空间进行精确、高效的测量与验收，

是保障工程质量、指导安全生产与后续设计的关键环节。传统的全站仪测量方法在此类场景下面临着显著的技术瓶颈与安全挑战：一是安全风险高，对于大型硐室、高陡溜井、不稳定采空区等危险区域，测量人员难以进入或长时间滞留，使用全站仪进行接触式测量存在极高的人身安全风险；二是作业效率低下，完成一条标准巷道的验收，需配备至少 4 名作业人员，工序繁琐，平均每日仅能完成约 4 条巷道的测量工作；三是数据维度单一，全站仪获取的是离散的二维坐标点数据，难以全面、直观地反映复杂三维空间的整体形态。

4.3.2. 技术方案与设备参数

为突破上述瓶颈，本研究探索并引入了一种全新的非接触式、移动式测量技术——基于同步定位与地图构建(SLAM)技术的三维激光扫描仪。该技术方案的核心创新点在于：一是技术原理革新，SLAM 技术使扫描仪在移动过程中，能实时解算自身位姿并同步构建周围环境的三维点云模型，完全不受井下 GPS 信号缺失的制约，无需依赖任何外部控制点即可实现自主导航与绝对精度构建；二是作业流程革命性简化，摒弃了传统测量中对中、整平、设站等繁琐步骤，作业人员仅需背负或手持设备在待测区域中行走扫描，设备即自动采集海量三维空间点数据，实现了从“点测量”到“面扫描”的根本性转变；三是高性能参数保障，所选设备可在单次扫描中快速、精准地构建半径 100 m 范围内的精细三维空间模型，点云精度达到毫米级，完全满足矿山工程测量的精度要求。

数据处理流程简述：数据采集完成后，将点云数据导入专业软件，经过滤波去噪、点云配准、坐标转换等预处理步骤，自动生成高精度三维数字模型。基于该模型，可进行巷道断面截取、超挖欠挖分析、空区体积计算等操作，生成多元化成果输出。

在矿山井下开拓与生产过程中，对巷道、硐室、溜井及采空区等空间进行精确、高效的测量与验收，是保障工程质量、指导安全生产与后续设计的关键环节。传统的全站仪测量方法在此类场景下面临着显著的技术瓶颈与安全挑战：一是安全风险高，对于大型硐室、高陡溜井、不稳定采空区等危险区域，测量人员难以进入或长时间滞留，使用全站仪进行接触式测量存在极高的人身安全风险；二是作业效率低下，完成一条标准巷道的验收，需配备至少 4 名作业人员，工序繁琐，平均每日仅能完成约 4 条巷道的测量工作；三是数据维度单一，全站仪获取的是离散的二维坐标点数据，难以全面、直观地反映复杂三维空间的整体形态。

为突破上述瓶颈，本研究探索并引入了一种全新的非接触式、移动式测量技术——基于同步定位与地图构建(SLAM)技术的三维激光扫描仪。该技术方案的核心创新点在于：一是技术原理革新，SLAM 技术使扫描仪在移动过程中，能实时解算自身位姿并同步构建周围环境的三维点云模型，完全不受井下 GPS 信号缺失的制约，无需依赖任何外部控制点即可实现自主导航与绝对精度构建；二是作业流程革命性简化，摒弃了传统测量中对中、整平、设站等繁琐步骤，作业人员仅需背负或手持设备在待测区域中行走扫描，设备即自动采集海量三维空间点数据，实现了从“点测量”到“面扫描”的根本性转变；三是高性能参数保障，所选设备可在单次扫描中快速、精准地构建半径 100 m 范围内的精细三维空间模型，点云精度达到毫米级，完全满足矿山工程测量的精度要求。

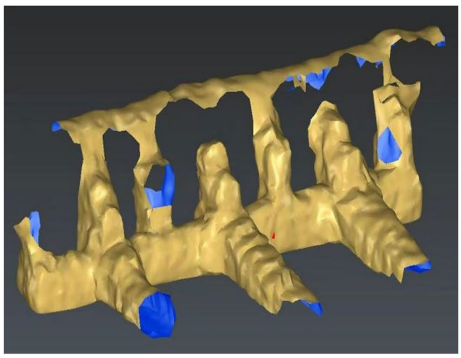
4.3.3. 应用效果

该技术已在矿山井下测量实践中得到成功应用(图 5)：一是数据采集，单人操作设备，沿巷道行进一次即可完成扫描；二是数据处理与建模，将采集的点云数据导入专业软件，自动生成高精度三维数字模型；三是多元化成果输出，可从三维模型中任意截取巷道断面，超挖、欠挖情况通过色阶图或对比设计断面一目了然，安全获取不稳定空区的完整三维形态，精确计算其体积，生成的三维模型可作为永久数字化档案。

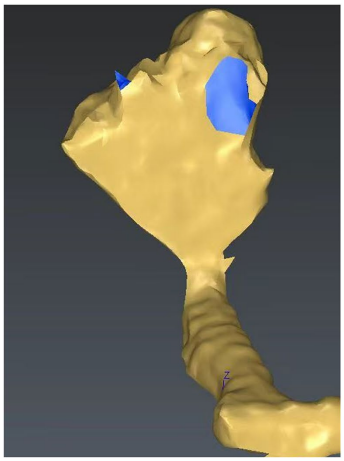
与传统全站仪方法相比，本技术方案取得了显著的综合性效益：一是安全效益根本性提升，实现了对危险区域的“遥测”，将人员从高风险环境中彻底解放，杜绝了相关测量事故；二是作业效率飞跃，测量队伍从 4 人减少至 1 人，人均日验收巷道能力从 1 条提升至 10 条，作业综合效率提高了 10 倍以上；三是经济效益显著，直接减少 3 个测量岗位的人力配置，经核算，年均节约人工及相关成本约 36 万元；四是数据价值与技术水平的提高，获取的全要素、高精度三维空间信息，极大地提升了矿山数字化、信息化管理水平。



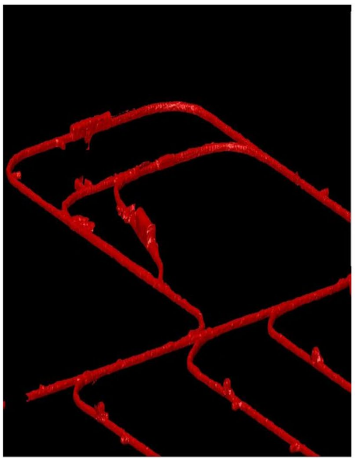
巷道扫描测量验收



大型硐室扫描效果图



采空区扫描效果图



巷道验收效果图

Figure 5. On-site scanning and acceptance
图 5. 现场扫描验收

5. 应用与效益分析

5.1. 应用情况

本项目实现了辅助作业与测量技术的协同革新。通过研发标准化预制挂钩与机械固定技术，彻底消除了井下焊接、切割等动火工序；本文首次在水泥罐车随车补给场景下应用并集成了速凝剂协同供给模式，消除喷浆台车出井加注环节；引入基于 SLAM 技术的三维激光扫描仪，实现井下空间数字化精准测量，推动管理决策从经验判断向数据驱动根本转变。

5.2. 经济效益

经济效益如下表 1。

Table 1. Economic benefit
表 1. 经济效益

技术项目	年经济效益	主要来源
无火固定技术	超 100 万元	材料与人工成本降低、效率提升
速凝剂随车供给	108 万元	单班喷浆量增加 3 车
SLAM 数字化测量	约 36 万元	减少 3 个测量岗位
合计	**约 244 万元**	—

5.3. 社会效益

本项目在取得经济效益的同时，产生了显著的社会效益：一是从根本上改善劳动条件，通过无火安装、机械化装置等技术，将矿工从高危、重体力劳动中解放，降低了职业健康风险，践行了“以人为本”的理念；二是系统性提升本质安全，从源头消除了井下动火、受限空间作业等重大风险，构建了“技防优先、少人则安”的主动安全新格局；三是提供可复制的行业升级方案，形成的低成本、快见效的技术包，为同类老旧矿山提供了挖潜增效的完整路径，示范并驱动了行业向安全、高效、智能化转型；四是践行绿色集约开采，通过智能计量等措施，降低了资源能源消耗与污染排放，实现了经济效益与环境效益的协同；五是履行企业社会责任，项目保障了矿山稳产与就业稳定，并通过攻关实践培养锻炼了核心技术团队，增强了企业发展内生动力，实现了经济、社会与人才效益的统一。

6. 讨论

6.1. 技术成功应用的原因分析

三项技术之所以能够在唐首马铁矿成功应用并取得显著效益，主要原因在于：

(1) 问题导向明确。三项技术均针对生产实践中长期存在的真实瓶颈，而非脱离实际的“为创新而创新”。无火固定技术直接针对井下动火这一重大危险源，速凝剂供给系统直接针对台车出井加注的效率损失，SLAM 测量直接针对传统全站仪的安全与效率短板。

(2) 低成本、快见效。三项技术改造均以较低投入实现显著效益，无火固定技术仅改变构件预制方式和连接方式，速凝剂供给系统仅加装容器并优化工序，SLAM 测量仅引入设备并调整作业流程，均未涉及大规模设备更换或系统重建。

(3) 系统集成与工序重构并重。不是单一设备的简单替换，而是将装备改造与工序重构相结合，实现“装备–工序–管理”的协同优化。

(4) 与现场条件高度适配。所有改造方案均基于唐首马铁矿的实际空间条件、设备配置和作业习惯进行定制化设计，确保了技术的可落地性。

6.2. 推广应用的潜在挑战与边界条件

尽管三项技术具有广泛的推广价值，但在其他矿山应用时需注意以下边界条件：

(1) 无火固定技术：适用于管道直径和荷载在 Φ20 mm 螺纹钢承载力范围内的场景；对于超大口径管道或高动载工况，需重新进行力学校核并可能需增大钢筋直径或增加固定点密度。膨胀螺栓的锚固力受巷道壁岩性影响较大，在软弱破碎岩体中需采取加强锚固措施。

(2) 速凝剂随车供给系统：适用于水泥罐车与喷浆台车配合作业的场景，需确保罐车安装空间充足、井下道路条件满足罐车通行要求。速凝剂容器材质需与速凝剂化学性质兼容，防止腐蚀。3 台罐车构成移动补给单元的模式需根据矿山生产规模调整罐车数量。

(3) SLAM 三维激光扫描测量：适用于巷道、硐室、溜井、采空区等空间测量，但在高粉尘、高湿度、强振动等极端井下环境中，点云质量可能受到影响，需采取防尘、防潮、减振措施。设备精度受扫描距离和表面反射特性影响，在远距离或低反射表面区域需增加扫描站点或采用辅助标靶。

6.3. 未来研究方向展望

(1) 智能化调度与协同作业。将速凝剂供给系统与矿山车辆调度系统集成，实现罐车与喷浆台车的智能匹配与动态调度，进一步减少等待时间。

(2) 多技术融合与数字孪生。将 SLAM 三维扫描获取的点云数据与矿山数字孪生平台融合，实现开拓工程进度的实时可视化监控与智能决策。

(3) 装备改造的标准化与模块化。将无火固定技术、速凝剂供给系统等改造成果形成标准化技术包，便于在同类矿山快速复制推广。

(4) 基于人工智能的测量数据分析。利用深度学习算法对三维点云数据进行自动识别与分类，实现巷道超挖欠挖的智能评判与验收报告的自动生成。

7. 结论

(1) 研发了预制挂钩无火固定技术，采用 Φ20 mm 螺纹钢在地表预制成标准化“J”型或“L”型挂钩，配合膨胀螺栓实现井下无火快速安装，彻底消除井下动火作业风险，安装速度提升数倍，年产生经济效益超 100 万元。简化力学模型校核表明，该结构在正常工况下安全系数大于 10，满足承载力要求。

(2) 本文首次在水泥罐车随车补给场景下应用并集成了速凝剂协同供给模式，通过加装 920 L 专用容器并系统集成，变“台车出井加注”为“罐车现场补给”，单班喷浆量增加 3 车，年创效益 108 万元。

(3) 引入基于 SLAM 技术的三维激光扫描仪实现井下空间数字化测量，测量队伍由 4 人减少至 1 人，日验收巷道能力由 1 条提升至 10 条，作业综合效率提高 10 倍以上，年均节约人工及相关成本约 36 万元。

(4)“装备挖潜－辅助革新－数字赋能”协同推进的技术路线，为同类老旧矿山在过渡期或资源紧张条件下的采掘衔接难题提供了可复制的完整解决方案。

参考文献

[1] 王运敏. 现代采矿手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.

[2] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.

[3] 冯夏庭, 江权, 苏国韶. 高应力下硬岩地下工程动态反馈分析与设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 1945-1953.

[4] 薛侃, 施震. 深孔一次爆破成井技术的研究与应用[J]. 现代矿业, 2022, 38(12): 110-112, 116.

[5] 潘敏. 支溜井一次爆破成井技术在冬瓜山铜矿的应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(5): 72-75.

[6] 李显发, 李春, 蔡富春, 等. 综合成井法在深孔爆破成井中的应用[J]. 中国钨业, 2023, 38(2): 22-27, 44.

[7] 毛国宾, 张应平, 陈浩. 大红山铜矿巷道掘进光面爆破参数优化[J]. 云南冶金, 2023, 52(2): 22-27.

[8] 张伟, 褚夫蛟, 王银刚, 等. 空孔在硬岩光面爆破作用中的试验与应用[J]. 爆破, 2023, 40(2): 49-53, 138.