

应用研究·煤矿·

三维可视化激光扫描技术在深井软岩巷道中的应用

Application of 3D Visual Laser Scanning Technology in Deep Softrock Roadway

余国锋¹, 郑群¹, 陈昊喆²

(1. 平安煤炭开采工程技术研究院有限责任公司, 安徽 淮南 232001; 2. 成都天佑智隧科技有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 三维可视化激光扫描技术在深井软岩巷道应用主要为了明晰巷道在回采过程中围岩变形和破坏情况, 并解决传统监控量测数据量少、可视化程度低、数据利用率低等问题。本文采用三维点云处理软件 Tunnelkey 3D Point Clouds Processing & Analyzing System(简称:TK-PCAS)处理实际巷道断面点云轮廓与巷道设计轮廓数据并分析其净空超侵限情况。为了充分掌握变形段支护钢架的变形情况, 建立巷道三维模型云图, 直接提取钢架断面点云数据, 通过与初测钢架断面分析对比得到钢架沉降以及两帮变形的量值, 并对全站仪监测的数据与扫描仪监测的数据在量值与发展趋势状态上进行对比论证。结果表明: 三维激光扫描技术可以对巷道初期支护结构超侵限情况进行准确科学的评估, 并对侵限欠挖部位的初支结构进行指导整改施工; 在变形监测方面, 与传统监测方式下的数据在量值与发展趋势状态上基本一致, 且三维激光扫描技术突破了传统单点式监测的局限性, 使得巷道在纵向与环向方向上的监测信息更全面, 可视化程度更高。为后期确定巷道围岩变形量级, 改进优化巷道支护体系提供了数据支持。

关键词: 深井软岩巷道; 三维可视化激光扫描技术; TK-PCAS; 变形监测; 三维模型云图

中图分类号: TD175 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)05-0037-07

Abstract: The application of 3D visual laser scanning technology in deep softrock roadway is mainly to identify the deformation and failure of wallrock during stoping and eliminate defects of conventional monitoring, including limited amount of measured data, low level of visualization and low utilization rate of data. 3D laser scanning technology was applied to obtain 3D point cloud data of the roadway surface in order to build a 3D visual model of roadway with high precision and high-resolution. Tunnelkey 3D Point Clouds Processing & Analyzing System(TK-PCAS), a 3D point cloud processing software, was adopted to process the point cloud profile data of actual roadway section and roadway design profile data and analyze intrusion beyond clearance limit of roadway; In order to fully master the deformation of steel support in the deformed section, a 3D cloud model of roadway was constructed. Point cloud data of the steel support section were extracted directly for comparison with the steel support section analysis in preliminary survey, so as to quantify the subsidence of steel support and deformation of sidewalls. In order to prove the accuracy of monitoring data, comparative demonstration was made in terms of value and development trend between the monitoring data collected by total station and that by the scanner. The results show that 3D laser scanning technology can accurately and scientifically evaluate the over intrusion of the initial support structure to roadway clearance limit, which offers guidance to the rectification of under-excavated therein; Regarding deformation monitoring, data obtained by 3D scanning technology were generally consistent with conventional monitoring in terms of value and development trend. What's more, 3D laser scanning technology broke through limitations of conventional single-point monitoring, which made the monitoring information of the roadway more complete in both longitudinal and annular directions with higher visualization. It provides data support for determining the deformation magnitude of wallrock and optimizing roadway support system.

Key words: deep softrock roadway; 3D visual laser scanning technology; TK-PCAS; deformation monitoring; 3D cloud model

[作者简介] 余国锋(1975-),男,江西上饶人,博士,教授级高级工程师,从事深井开采动力灾害监测预警与防控研究。

[基金项目] 国家自然科学基金重大资助项目(71942006)

[引用格式] 余国锋, 郑群, 陈昊喆. 三维可视化激光扫描技术在深井软岩巷道中的应用[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(5): 37-43.

1 前言

煤炭是我国主要能源之一, 巷道掘进则是煤炭开采的基础性工作。我国煤炭开采地质环境复杂, 埋深大, 地应力量级高等诸多因素导致的巷道顶板沉降、帮部变形等问题日益严重。为了保证煤炭开

采的安全性,确保巷道的围岩稳定显得尤为重要。广大学者对于复杂的深井软岩巷道变形施工监测中常用的监测技术手段进行了总结和研究。刘晓阳等^[1]认为我国现有的煤矿巷道监测手段通常使用应力传感器获取应力的变化参数来反映巷道围岩的稳定性,则需要投入的安装成本巨大,同时在使用过程中不可避免的受到干扰或损坏,由于工程量的限制和地质研究方法的局限性,很难对巷道空间进行精确监测。魏勇^[2]通过埋设并锚固在巷道围岩表面的监测点,然后用弹簧钢卷尺量取测点之间的相对位移,来推算巷道围岩的发展趋势。该方法虽然简单直观,但需要在监测前设置测点,会导致监测初始值的时间较晚,且监测断面较短,不能全面反映施工期煤矿巷道全断面变形情况。张兴全^[3]在巷道左帮、顶板、右帮表面安装多点位移计,来测得巷顶和两帮表面的相对位移量和位移速率。在仪器的孔口不动的情况下,虽然计算其余测点相对于孔口的位移量也能计算出各测点的位移量,但不够直观,不利于数据分析及根据监测数据进行决策。综上所述,三维可视化激光扫描技术相较于其他监测技术手段,凭借可视化程度高、非接触、监测效率高以及速度快等优势,在煤矿测量中得到了广泛得应用^[4]。在三维激光扫描技术应用方面,彭剑飞^[5]、李建洪^[6]、朱海滨^[7]等学者,对矿山巷道进行实地变形监测扫描应用,并对其精准性进行了验证与评估。相比于传统的巷道监测,三维激光扫描技术取得了良好的应用效果和技术突破。

本文依托淮南朱集东矿深井软岩巷道限阻耗能型支护关键技术研究科研项目,以-906 m 东部辅助轨道大巷作为试验段。依据巷道的初期支护结构三维点云数据了解巷道断面超侵限情况;然后提取已建立的巷道三维点云模型中支护钢架的点云数据进行对比分析确定钢架变形情况。最后通过对比分析三维激光扫描仪与全站仪两种监测方式验证了三维激光扫描技术的精度度。

2 三维可视化激光扫描技术

2.1 数据获取

三维激光扫描仪的基本原理是把结构光栅投影到物体表面,物体表面形状不同让投射过来的光栅影线发生不同的变形,再利用两个相机获取相应反射图像,通过解析变形影线,就可获得图像上像素的三维坐标,形成密集的三维点云。通过利用扫描仪

其内的激光脉冲发射器发射激光到被测物体表面,然后通过探测器接收激光反射回来的信号,利用激光来回时间来计算仪器到被测物的距离。

三维激光扫描仪获得点云距离 S 后,内置的钟编码器会在同一时间测出每条脉冲的水平角 θ ,竖直角 φ ,通过相应的三维坐标转换公式,就可以得到扫描点云相对扫描仪的三维坐标。具体如图 1 所示。

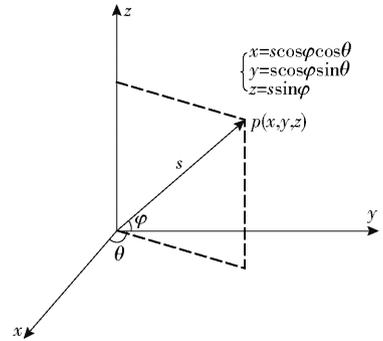


图 1 点云空间位置坐标

在巷道内使用三维激光扫描仪采集数据时,首先架设标靶并对中整平扫描仪与全站仪,用全站仪定位后棱镜球标靶中心。通过使用扫描仪对设置的标靶进行扫描,并对巷道整体进行全景复制。然后将采集得到已施作完成初期支护结构的三维点云数据转化到大地坐标系中。利用三维建模软件建立基于巷道现场支护结构的可视化三维模型如图 2 所示。

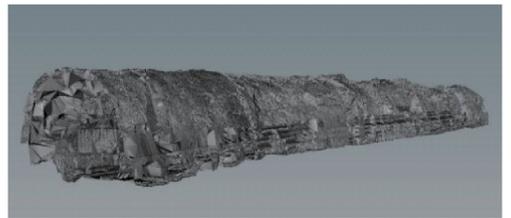


图 2 巷道支护结构三维模型效果云图

扫描仪外业操作流程如图 3 所示。



图 3 扫描仪外业操作流程

2.2 数据后处理原理

外业点云数据采集完成后,数据后处理过程也是三激光扫描技术的一个重要环节。通过三维激光数据处理软件 TK-PCAS 可以自动快速处理大批量

的三维点云测量数据,并生成精确的定量分析报告与三维可视化模型。

三维激光数据处理软件断面变形监测处理流程主要分为线路管理、横断面管理、工程坐标注册、截取分析里程、点云数据自动提取、断面数据自动拟合对比等。其中线路与横断面管理主要作用是对巷道设计横、纵断面进行三维建模。工程坐标传递是进行点云绝对定位的关键,通过输入若干个已知物体的绝对坐标建立坐标转换的矩阵关系,从而将外业采集的相对坐标转换为需要的绝对坐标。内业流程如图4所示。

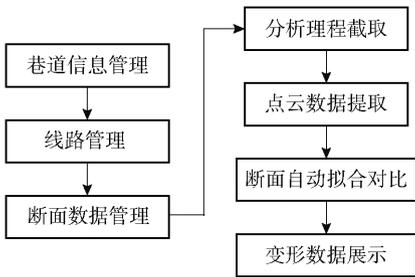


图4 断面变形监测内业流程

2.3 技术指标

为保证巷道三维激光可视化扫描工作质量,三维激光扫描仪的测距最低精度以及全站仪测角精度和坐标注册最低精度所列指标拟采用表1要求,具体指标见表1。

表1 技术指标

| 序号 | 仪器类别 | 项目类别 | 指标 |
|----|------|------|---------|
| 1 | 扫描仪 | 测距精度 | 1mm@25m |
| 2 | 全站仪 | 测角精度 | 1" |
| 3 | 全站仪 | 测距精度 | 1 mm |

2.4 三维激光技术优势分析

1) 可视化程度高

利用该技术对巷道某一区域扫描,可以快速高精度采集空间点位信息,创建高精度、高分辨率图像,而且数据信息丰富,可以保存真实的施工场景。可以有效记录巷道施工过程。

2) 节省时间

外业扫描仪单站扫描几十米仅需最多5 min,且操作简单,相比传统大间距抽样检测,更高效、便捷,可减少时间和人力的投入。

3) 保质量

通过三维可视化激光扫描技术高度量化对比巷

道扫描断面与设计断面,从而得到巷道初支的超侵限情况。来保障巷道施工质量,为巷道整修施工提供客观依据。在-906 m 东部辅助轨道大巷选择里程段:DK0 + 038 ~ DK0 + 047 巷道三维净空如图5所示,并可自动导出此段巷道净空分析断面以及最大超侵限统计值如图6、图7所示。明确存在问题的里程段指导施工单位及时整改,确保巷道的施工质量符合设计标准。

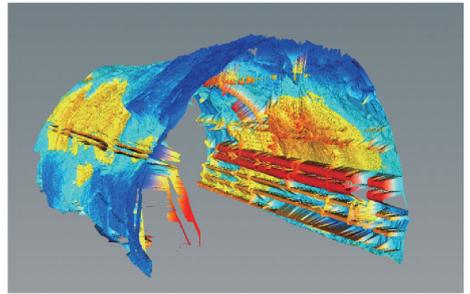


图5 DK0 + 038 ~ DK0 + 047 段巷道三维净空云图

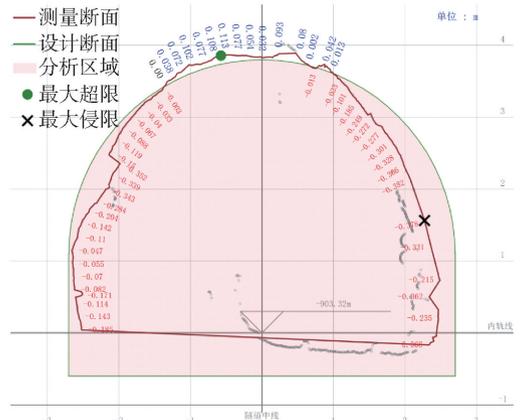


图6 自动导出巷道净空分析断面

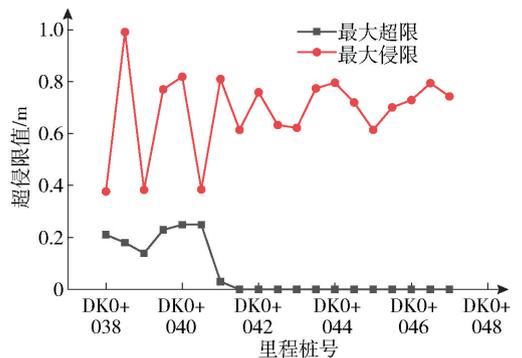


图7 DK0 + 038 ~ DK0 + 047 段巷道初支净空超侵限

4) 监测数据准确度高

为了验证三维可视化激光扫描技术在巷道监测中的准确性,采用扫描仪与全站仪对 DK0 + 104 支

护钢架断面进行顶板沉降与帮部变形监测,两种监测方式对比结果如图8、图9所示。

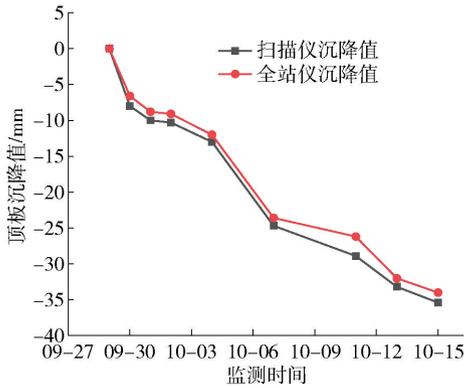


图8 钢架顶板全站仪与扫描仪沉降监测值对比

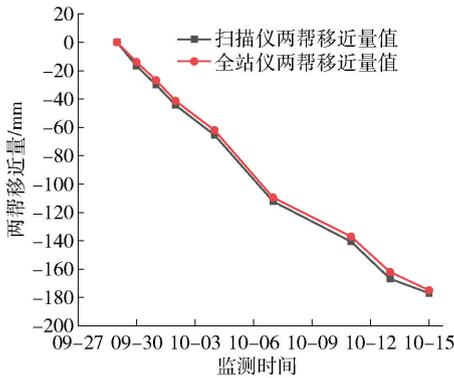


图9 钢架两帮全站仪与扫描仪移近量值对比

由图8可知,监测时间截至10月15日,全站仪监测的钢架顶板最大累计沉降为34 mm,小于扫描仪监测的35.4 mm。在10月11日,沉降速率发生了突变,初步判断由于巷道施工维修扰动导致的。通过计算得到钢架顶板沉降监测平均差为1.4 mm、方差为0.26 mm²。

截至10月15日,钢架边墙两帮变形情况如图9所示。全站仪监测的两帮最大移近量值为174.9 mm,小于扫描仪监测的176.9 mm;帮部变形从监测初期到结束移近量值与移近速度一直处于快速发展的状态,其中10月7日前后该段监测断面的位移量伴随着时间变化出现增加趋势。初步分析由于维修巷道施工扰动,以及围岩应力调整,所在钢架处于持续变形状态。钢架两帮监测平均差为3.2 mm、方差为0.58 mm²。

由此可见两种不同的测量方式监测的数据变化趋势基本一致,且数据偏差较小。可见三维激光扫描技术巷道变形结果具有较高精准度。

5) 与传统全站仪测量技术对比分析

目前煤矿行业,主要是以全站仪为代表的传统单点式测量技术设备进行现场日常测量工作。现将三维激光技术与传统全站仪测量技术具体对比情况总结见表2。

表2 全站仪与三维激光测量技术对比

| 序号 | 对比内容 | 全站仪测量 | 三维激光测量 |
|----|-------|---|--|
| 1 | 测量成果 | 离散单点(后期数据工作量大) | 三维点云体面覆盖(点云处理软件) |
| 2 | 外业安全 | 接触式测量(测量人员需要到爆破边坡等被测点现场,安全性差) | 非接触式测量(测量人员与被测对象可以保持几百米距离进行远程测量,安全性高) |
| 3 | 测量精度 | 测点精度毫米级,点间距为米级,点间距过大大会导致体积测量误差大,开挖验收可行度低,支护质量难以保证 | 点精度精度毫米级,点间距厘米级,点间距精度明显提升一个量级,在工程质量验收与变形监测方便可靠性高 |
| 4 | 测量效率高 | 1测点/分钟 | 1200万点/分钟 |
| 5 | 影像信息 | 全站仪设备无记录影像信息功能,测量人员无法对测点进行定量或定性判断,需要人员去现场复核 | 点云与影像信息同步采集,测量人员可对测点数据进行定量或定性判断,可完成大批量现场数据记录 |

由上表对比结果可知:三维激光技术在测量成果、外业操作安全、测量精度、测量效率以及影像信息记录等方面都优于全站仪测量技术。说明三维激光技术在巷道测量方面具备独特优势和使用价值。

3 现场应用

3.1 工程概况

-906m 东部辅助轨道大巷为朱集东矿辅助轨道巷道,服务于东三采区,全长为1777.5 m。巷道对应地貌为新王圩南部、东南部农田及水渠、道路等。掘进区段位于二叠系下石盒子组含煤岩层组11-2煤顶板。巷道揭露岩性以砂质泥岩和细砂岩为主,煤(岩)层产状约为140°~260°∠2°~5°。本巷道施工中将处于1112(1)工作面采空区上方和1122(3)工作面采空区附近,掘进区段共发育断层17条,其中落差≥5 m的有3条,落差2~5 m的断

层有3条,落差 ≤ 2 m有11条。掘进区段内11-2煤层平均煤厚1.3 m,最大原始瓦斯压力0.56 MPa,最大原始瓦斯含量 $6.44 \text{ m}^3/\text{t}$ 。地下水补充形式主要是主要为顶板煤系砂岩裂隙水。断层附近围岩软弱且破碎,属于典型的深井软岩巷道。

-906 m 东部辅助轨道大巷为直墙半圆拱断面,主要采用锚网索喷支护,断面规格:宽 \times 高(5 400 mm \times 4 300 mm);遇断层、构造带、顶板破碎带等锚网支护无法满足支护强度要求时采用直接架36U型棚支护,断面规格:宽 \times 高(5 400 mm \times 4 300 mm),棚距800 mm,一掘一架施工,U型棚表面喷C20混凝土,喷厚70 mm。巷道支护破坏最先表现为缓慢发展的轻微破坏,帮部混凝土表面脱落掉块,结构沿顶板产生塌落,底板隆起。然后迅速发展为支护严重破坏。

由于传统巷道变形监测方式存在局限性,无法全面反映巷道支护断面的变形情况。此段巷道大变形发生后,选择合理的监测方式显得尤为重要。故采用三维激光变形监测新手段对巷道36U型钢架支护结构进行顶板沉降与帮部变形监测。

3.2 监测方案设计

在对硐室工程进行监测时,首先应对硐室地质信息、施工情况进行综合分析。还需要结合理论研究和相关专业人员的经验,确立巷道监测方案;同时,监测断面布置还应遵循“在断面尺寸变化地段应增设代表性观测断面,在代表性地段(代表性围岩类别、断层带附近、大变形地段)围岩中设置多点位移计监测断面”等相应原则。

基于支护结构破坏情况,故在试验段选择以图10的位置布设变形监测的特征点。根据巷道采用全断面的开挖方式,分别在顶板、两帮处设置了三条测线。监控量测断面间距按钢架间距布置。通过三维可视化激光扫描技术可以获得巷道每一处的变形量;在分析过程中,选择与图10中监测点位相同的特征点位置并自动提取对应里程段钢架激光点云断面,进行断面拟合,对比分析得出钢架沉降以及帮部变化值。

3.3 监测结果

三维激光扫描仪设备采用德国Z+F 5016型号进行三维激光断面变形监测,测距精度1 mm,扫描场景如图11所示。

大变形巷修段设计采用了36U型棚支护方案。由于U型棚支护后未进行喷浆封闭,为了解裸露U

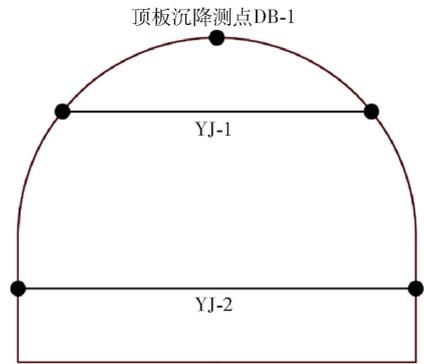


图10 顶板沉降及帮部位移测线布置示意图



图11 现场变形监测扫描

型棚支护结构变形能力,验证支护方案的可行性,就需要合理选择试验监测断面进行监测。

巷道监测断面需要在临近施工扰动、来压大的区域中选择,DK0+101~DK0+110监测段符合上述要求。通过对上述里程段现场巡查中发现:新U型棚支护里程段:DK0+104、DK0+104.9、DK0+105.6、DK0+106.6 4环钢架处的顶板有掉块,帮部有明显挤压变形现象。依据监测断面布置“大变形地段”应设代表性观测断面的原则,故选择上述4环钢架作为代表性监测断面,其能够充分反映巷道新支护结构的变形情况。监测时间:2021.9.25~2021.10.15,共计监测17天。钢架三维点云模型如图12所示。

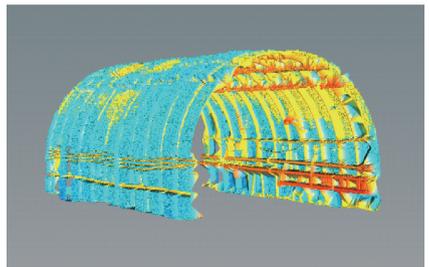


图12 DK0+101~DK0+110监测段钢架三维点云模型

通过一种基于巷道点云数据断面提取的方法来

自动识别并提取支护钢架,效果如图13所示。然后通过TK-PCAS点云数据处理软件并对比分析钢架三维点云模型中4环监测钢架的点云数据。对比拟合效果如图14所示。通过得到钢架监测断面的拟合对比,就可以通过TK-PCAS软件自动导出支护钢架DK0+104~DK0+106.6的断面监测数据。其变形时程曲线如图15至图17所示。

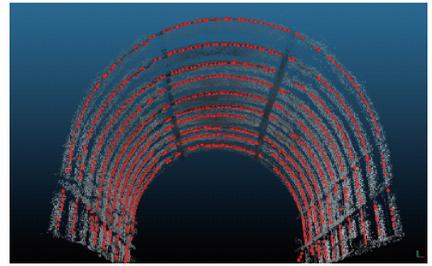


图13 U型钢架点云识别

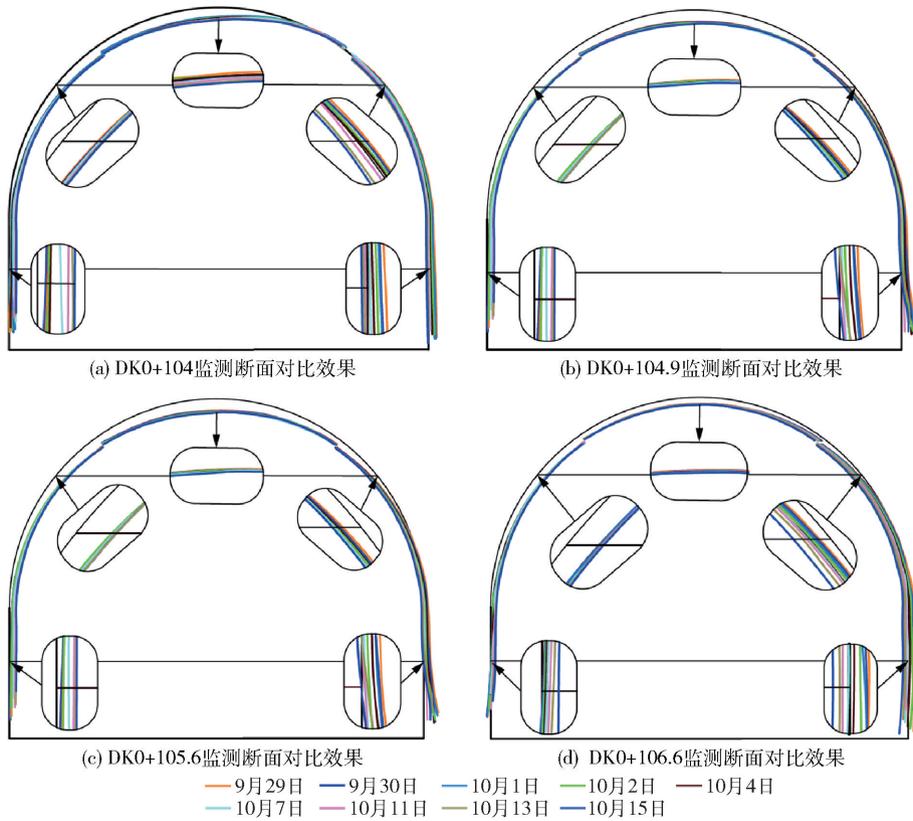


图14 9.29~10.15日36U支护钢架钢架激光监测断面拟合对比效果

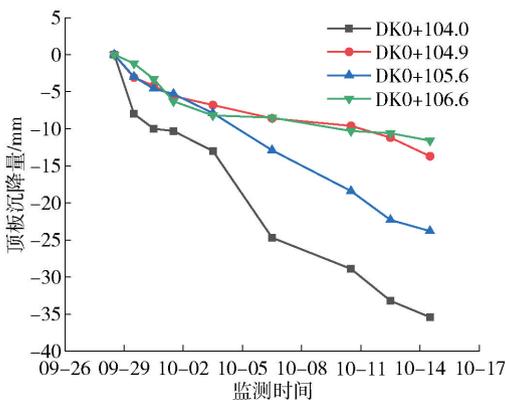


图15 钢架顶板沉降曲线

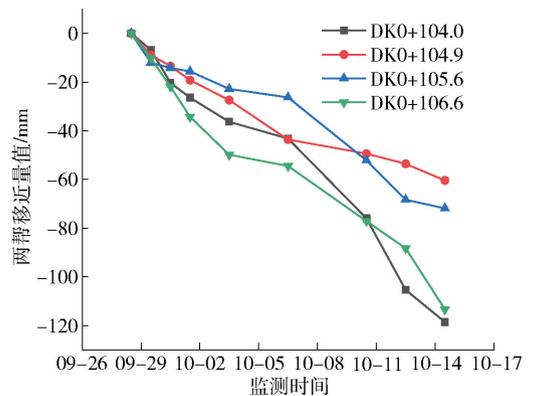


图16 钢架YJ-1帮部位移曲线

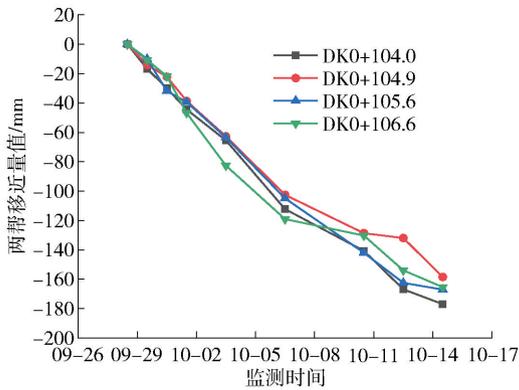


图 17 钢架 YJ-2 帮部位移曲线

顶板沉降方面,36U 支护钢架在监测初期 9 月 29 日~10 月 2 日顶板沉降值与沉降速率变化较小。从 10 月 4 日到 10 月 15 日监测结束,顶板沉降累计值开始增加,沉降累计值最大为 35.4 mm。当日沉降速率最大达到 11.7 mm/d。从钢架整体沉降变化趋势来看,该段监测断面的位移量随着时间的变化出现增加趋势。

帮部变形方面,钢架帮部 YJ-1 测线部位在监测开始到监测结束其累计移近量值和移近速度变化较大,到监测后期变形速度又有了个较快的发展。帮部移近量值最大达到 118.6 mm,平均每日最大移近速度为 6.98 mm/d;判断该监测断面周围的围岩处于加速变形阶段。

钢架帮部 YJ-2 测线部位变形从监测初期到结束移近量值与移近速度一直处于快速发展的状态。钢架帮部移近量值最大值为 176.9 mm,平均每日最大移近速度为 10.41 mm/d。该段监测断面的位移量在净空方向上急剧变化,位移量伴随着时间变化出现增加趋势。在变形监测初期其增长速度相当快,监测后期的个别监测断面短时间内出现变形速率减慢的情况,但这并不代表钢架已经完全处于稳定状态,还需要持续观测其变形情况。

4 结论

依托淮南朱集东矿深井软岩巷道限阻耗能型支护关键技术研究科研项目,使得三维可视化激光扫描技术在深井软岩巷道监测中得到了实际应用,并取得了良好应用效果。在应用过程中总结得到以下结论。

(1) 三维可视化激光扫描技术与传统单点式变形监测相比具有可视化程度高、监测数据量大且易操作,效率高等优势,更能有效地对巷道施工安全

性进行科学评估。通过巷道净空超侵限分析可以对巷道初期支护结构质量进行有效的指导施工和整改。

(2) 通过全站仪监测数据与扫描仪监测数据对比发现二者在量值与发展趋势状态上基本一致。通过计算两种监测方式数据的平均差与方差值,验证了二者监测数据曲线偏离程度较小。并且复核了巷道现场实际变形情况,结果符合监测数据的变化,说明采用三维可视化激光技术应用于变形监测具有可行性。

(3) 依据三维激光扫描技术对 -906 m 东部辅助轨道大巷的支护钢架变形监测的应用效果,给出了一种基于巷道点云数据断面提取的方法,可得到巷道 U 型钢架帮部位移和顶板沉降曲线。为巷道施工提供有参考价值的监测数据,有助于确定巷道变形量级。对后期巷道初期支护结构优化设计提供数据支撑。

(4) 从 U 型棚三维激光变形监测应用结果来看:此巷修试验监测段主要以帮部变形为主,顶板沉降为辅;具有变形持续时间长,变形速度快等变形特点。从巷道长期安全生产运营方面考虑,建议加强巷修段监测频率,调整优化支护方案。

三维激光可视化扫描技术作为兴起的高新技术,具有良好的发展前景。为制定巷道围岩稳定性监测标准、推动煤矿巷道安全生产的标准化建设提供了一定的借鉴意义。

[参考文献]

- [1] 刘晓阳,胡乔森,李慧娟. 基于三维激光扫描技术的巷道顶板监测研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(7): 81-84+107.
- [2] 魏勇. 复杂地质条件下巷道围岩变形监测技术[J]. 煤矿现代化, 2016(2): 38-40.
- [3] 张兴权. 煤矿深井巷道围岩变形监测与研究[J]. 水力采煤与管道运输, 2016(3): 15-19.
- [4] 周竹峰. 基于三维激光扫描技术井下巷道围岩变形监测应用[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(3): 62-64+70.
- [5] 彭剑飞. 露天矿测量中三维激光扫描技术的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2019(18): 179-180.
- [6] 李建洪,王文凯,张得龙. 三维激光扫描测量技术在智慧矿山中应用[J]. 2019(3): 28-29.
- [7] 朱海斌. 三维激光扫描技术在井巷工程中的应用[J]. 中国煤炭, 2019, 45(12): 37-42.