

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.008

# 基于三维点云的地下厂房爆破面 残孔识别方法及应用

王少伟<sup>1</sup>, 陈焕杰<sup>2</sup>, 罗滔<sup>2</sup>, 傅少君<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610200;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 残孔率是评价地下厂房爆破效果的重要指标之一, 以某水电站地下厂房边墙的爆破开挖效果评价工作为依托, 提出了一种基于三维点云的爆破面残孔识别与评价方法。首先, 形成了运用手持式三维扫描仪获取区域爆破面三维点云数据方法; 随后, 基于三维点云处理软件 CloudCompare 实现了点云数据的精简预处理, 通过对比选择对点云的空间信息保留完整度及减量化程度最优的降采样方法; 最后, 基于 RANSAC 算法实现了点云中圆柱形炮孔痕迹拟合并识别, 进而计算爆破面残孔率。结果表明: 该方法获取三维点云数据便捷高效, 采用空间降采样方法可在完整保留原始点云空间信息的前提下有效降低数据量, 基于三维点云的区域爆破面残孔率计算结果较人工测量所得相差仅为 0.33%~2.55%, 显著减少人工测量工作量的同时有效避免了人为测量误差。研究成果可为类似爆破开挖工程的爆破参数设计和爆破效果评价提供参考。

**关键词:** 地下厂房开挖; 三维点云; 爆破效果; 残孔识别; 残孔率计算

中图分类号: TV542

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0056-07

## Identification Method and Application of Semi-holes in Blasting Surface of Underground Powerhouse Based on 3D Point Clouds

WANG Shaowei<sup>1</sup>, CHEN Huanjie<sup>2</sup>, LUO Tao<sup>2</sup>, FU Shaojun<sup>3</sup>

(1. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610200, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** The semi-hole rate is one of the important indicators for evaluating the blasting effect of underground powerhouses. Based on the evaluation of the blasting excavation effect of the side wall of the underground powerhouse of a certain hydropower station, a method for identifying and evaluating the semi-hole on the blasting surface of the underground powerhouse based on three-dimensional point clouds was proposed. Firstly, a method for obtaining three-dimensional point cloud data of the regional blasting surface using a handheld 3D scanner was formed; Subsequently, the streamlined preprocessing of point cloud data was achieved based on the 3D point cloud processing software CloudCompare, and the down sampling method with the best retention of spatial information integrity and reduction degree of the point cloud was compared and selected. Finally, the RANSAC algorithm is used to achieve the fitting and recognition of cylindrical blast hole traces in the point cloud and the calculation of the semi-hole rate of the blast surface. The results show that this method is simple and fast to obtain three-dimensional point cloud data. The spatial down sampling

收稿日期: 2025-06-21

修稿日期: 2025-08-05

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(19JK0913); 中国水利水电第五工程局有限公司科研项目(2022-05-009); 陕西省教育厅青年创新团队项目(24JP197)

作者简介: 王少伟(1988—), 男, 工程师, 主要从事水利水电工程方面的研究工作。E-mail: 347706736@qq.com

通讯作者: 罗滔(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工结构安全与耐久性等方面研究工作。E-mail: luotao19870426@126.com

method can effectively reduce the total number of points and completely retain the original point cloud spatial information. The calculation results of the semi-hole rate of the regional blasting surface based on three-dimensional point cloud differ from those obtained by manual measurement by only 0.33% to 2.55%, which can significantly reduce the manual measurement work and avoid manual measurement errors at the same time. The research results can provide references and guidance for the design of blasting parameters and the evaluation of blasting effects in similar blasting excavation projects.

**Keywords:** excavation of underground powerhouse; 3D point clouds; blasting effect; semi-holes recognition; semi-holes ratio calculation

随着我国对西南地区水力资源的大力开发,诸多水电站已建成投产或正在建设<sup>[1-4]</sup>。该地区水电站大多数将发电机组布置于峡谷两岸山体中的地下洞室内<sup>[5-6]</sup>,地下洞室结构复杂,跨度较大,工程区所处围岩地质条件多变,一般采用传统钻爆法分段进行厂房爆破开挖<sup>[7-8]</sup>。爆破开挖过程中,一般采用预裂爆破方法初步构建厂房外轮廓边墙,爆破后产生的开挖面的爆破效果是后续施工的基础<sup>[9]</sup>。提升开挖面爆破效果是保证后续地下厂房工程质量与施工安全性、提高经济效益的重要手段,故探究快速准确的爆破效果评价方法是十分必要的<sup>[10-12]</sup>。

工程中爆破效果评价指标一般包括超欠挖量、残孔率、平整度、块度等,其中残孔率是可以最为直观获取及计算的指标之一<sup>[13-15]</sup>。但地下厂房工程施工环境较为昏暗,洞室内施工条件复杂,使用传统肉眼测量方法受光线、色差等环境因素及人为主观因素影响严重,使得评价结果准确率不高。近年来,三维点云逐步应用于工程建设效果评价方面,并取得了丰富经验。Wang 等<sup>[16]</sup>运用地面激光扫描方法获取隧道工程中围岩表面点云数据,基于局部几何信息和围岩表面不连续特征分析不稳定块体演变及破坏机制,并生成与实际围岩具有相同特征的离散裂隙网格作为节理围岩体用于数值模拟计算,该方法成功应用于红石岩水电站溢洪道的不稳定块体检验与评估;李徐然等<sup>[17]</sup>使用三维激光点云获取光面爆破面几何信息,对比颜色特征、反射率特征及曲率特征,选取较好的曲率特征进行残孔位置拟合,减小残孔识别受人为主观因素及环境光照因素影响,提高识别效率及准确度。Jiang 等<sup>[18]</sup>利用三维激光扫描获取隧道点云数据,基于点云数据重建隧道变形过程,从而探究隧道围岩变形时间演化规律,并通过识别变形相对较大区域进行不稳定区域预警;齐成龙<sup>[19]</sup>结合三维激光扫描及其他信息化手段,采用聚类及 BPA 算法将矿山法隧道施工过程中爆破面点

云转化为空间三角网格,随后借助三角网格投影计算开挖面超欠挖体积,并模拟靠尺法进行平整度计算,从而评价开挖面爆破效果;Tabib 等<sup>[20]</sup>基于深度学习方法,自动检测三维点云中孔洞边界,构建拟合曲面并在曲面上用插值点进行孔洞填充,从而补全点云几何信息,作为后续计算基础。研究者们对三维点云获取、预处理、计算等诸多方面进行了大量研究,但针对地下工程基于三维点云的爆破效果分析评价的相关研究与应用还较少,使得地下厂房工程缺少相应爆破效果指标评价方法。

本文拟基于某地下厂房分层、分段爆破开挖过程中的爆破面三维点云扫描数据,使用点云分析软件 CloudCompare 进行点云数据预处理对比选择最优降采样算法,然后开展爆破面残孔识别并根据识别结果计算区域爆破面残孔率,最后评价爆破效果,以期建立操作简便、精确高效的地下厂房工程基于三维点云的残孔率计算方法,为类似爆破开挖工程的爆破参数设计及爆破效果评价提供参考。

## 1 工程概况

该水电站地下厂房建设在雅砻江中游右岸山体中,厂房内布置 4 台 255 MW 水轮发电机组,总装机容量 1 020 MW。地下厂房部位的地面高程 2 070 m~2 240 m,上覆岩体厚度 117 m~290 m。地下厂房由主副厂房及主变洞两个主要洞室组成,主副厂房尺寸为 227.90 m×26.00 m/28.60 m×75.77 m(长×宽×高)。厂区所处区域初始地应力属于低—中等级地应力。厂区围岩岩性以变质砂岩、砂质板岩、含碳质板岩为主,区域地质条件复杂,断层及层间挤压带发育。厂房结构布置如图 1 所示。

地下厂房采用钻孔爆破法进行整体开挖,主厂房分十层自上而下开挖,最大开挖高度约为 75.8 m。如图 1(a)所示,第一层至第十层开挖高度分别为 12 m、4.3 m、9.8 m、6 m、8 m、8 m、9.5 m、6 m、5 m、7.2 m。其中三至七层均采用“两侧边墙一次预

裂先行,两小层半幅平推开挖”的方式施工,即每层分为两小层开挖,第一小层开挖时在开挖轮廓线钻取整层高度的铅直预裂孔,配合主爆进行一次预裂爆破,第二小层仅进行主爆作业,每次爆破开挖进尺

为 5 m ~ 12 m;预裂爆破作业装药炮孔直径为 90 mm,孔间距 70 cm,炮孔圆心处于开挖轮廓线上,预裂爆破设计及理想爆破面如图 1(b)所示。

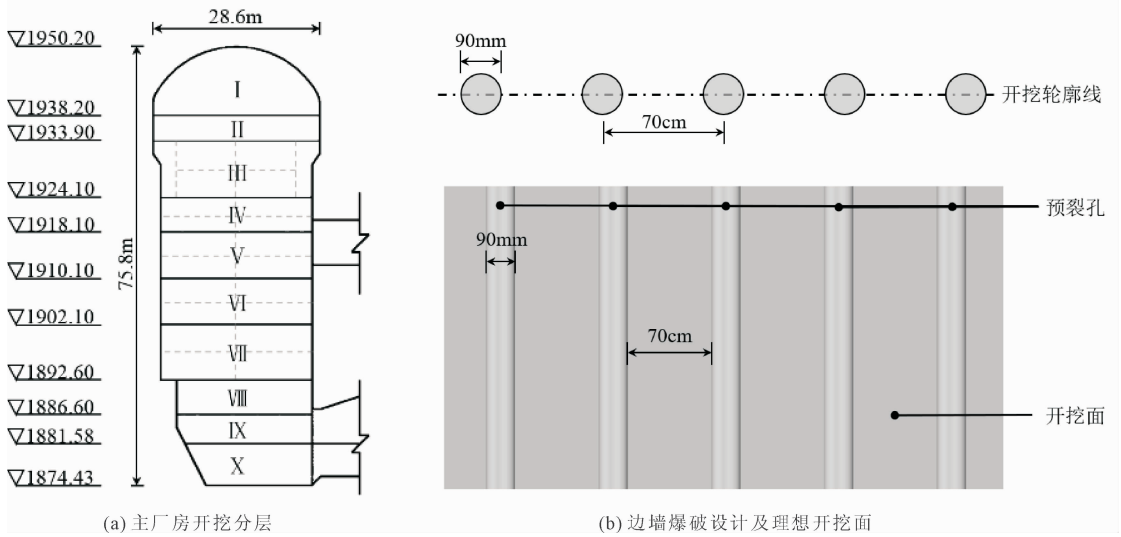


图 1 主厂房爆破开挖方案

## 2 残孔识别方法及步骤

### 2.1 点云数据获取方法

残孔识别前需要获取点云数据,运行手持式三维扫描仪,控制扫描仪距离待采集爆破面约 0.5 m ~ 1.0 m,持扫描仪平行于爆破面沿 S 型路径移动进

行点云数据采样。为保证点云数据完整性,每次采集数据均沿纵向、横向进行两次 S 型路径扫描。爆破开挖施工方案中单次爆破作业产生的爆破面高为 3 m ~ 5 m,宽为 5 m ~ 12 m,故设定单次采集爆破面大小为 3 m × 3 m ~ 5 m × 5 m。点云数据获取方法如图 2 所示。

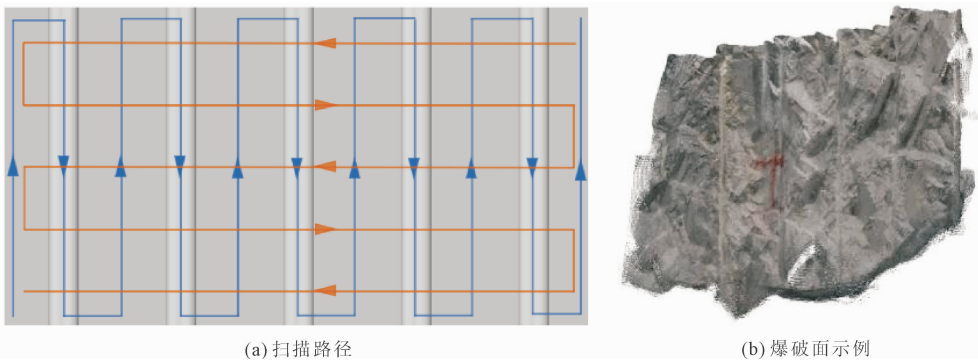


图 2 三维点云获取方法

### 2.2 降噪方法

初始点云数据常出现明显远离爆破面的离群噪声点,故需在残孔识别前进行点云降噪。使用基于空间分布的去噪算法 Statistical Outlier Removal (SOR) 去除离群噪声点,该算法仅需设置倍数参数  $a$  及临近点个数  $k$  两个参数,计算每个点的  $k$  个临近点距离和  $D$ ,将所有点的  $D$  值求和后计算平均值

$D_m$ 、标准差  $D_s$ ,根据  $D_m + aD_s$  计算得到最大允许离群距离,随后去除超过该距离的噪点。

### 2.3 降采样方法

由于经过剪裁及去噪的点云数据点数较多,通常为百万左右,故需对数据进行降采样处理,以降低拟合难度及拟合时间。CloudCompare 软件包含基于 Octree 的降采样方法、随机降采样方法及空间降采

样方法三类基础点云降采样方法,图 3 为对同一剪裁去噪后的爆破面点云数据使用以上三种方法的降

采样结果。

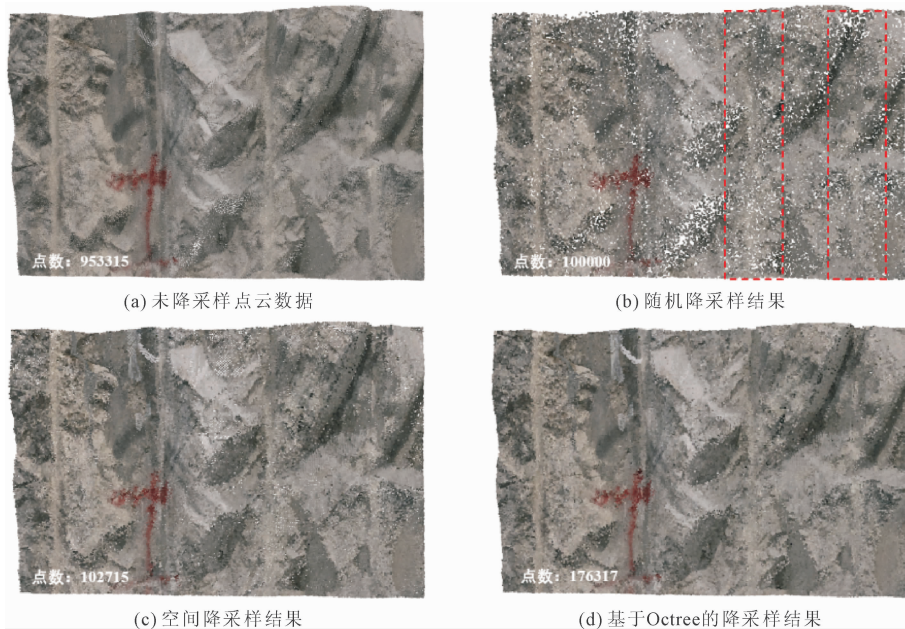


图 3 降采样方法对比

由图 3 可知,未降采样前三维点云数据总点数为 953 315,拟合难度及计算量较大。图 3(b)为随机降采样后结果,可以得到指定点数的点云数据,但其对点云数据的空间特征无法精确保留,待分析爆破面的残孔区域点云部分被破坏,出现残孔已无法辨别现象;图 3(c)、(d)分别为空间降采样与基于 Octree 的降采样处理后结果,空间降采样结果较后者点数减少约 40%,且两方法均较好地保留了三维点云的空间信息,残孔清晰可见。故选择空间降采样方法对待分析点云进行处理。

### 2.4 基于机器学习的残孔识别方法

基于预处理后的三维点云数据进行残孔识别。由于处理后的点云数据包含凹凸不平的爆破面及半孔痕迹,所以选用抗噪性更强的 RANSAC 算法进行拟合。CloudCompare 中对于 RANSAC 圆柱拟合可以对图元最小支撑点数  $N_m$ 、距离阈值  $D_l$ 、最大法向偏差  $a$ 、采样分辨率  $b$ 、忽略概率  $c$ 、圆柱最大或最小半径  $R_{max}$ 、 $R_{min}$  此七个参数进行设置,通过基于爆破面点云数据的残孔识别试验,得知拟合前仅需设置四个参数,分别为:图元最小支撑点数  $N_m$ 、距离阈值  $D_l$ 、圆柱最大或最小半径  $R_{max}$ 、 $R_{min}$ 。其中,图元最小支撑点数  $N_m$  为组成拟合圆柱的最小点数,避免爆破面中凹凸不平处被错误进行拟合计算,提高残孔识别效率;距离阈值  $D_l$  为拟合圆柱中临近点间最大

距离,一般设置较小值,用于排除点云较疏散区域;圆柱最大或最小半径  $R_{max}$ 、 $R_{min}$  为考虑一定误差的待拟合圆柱半径。

RANSAC 圆柱拟合的判定流程如图 4 所示。

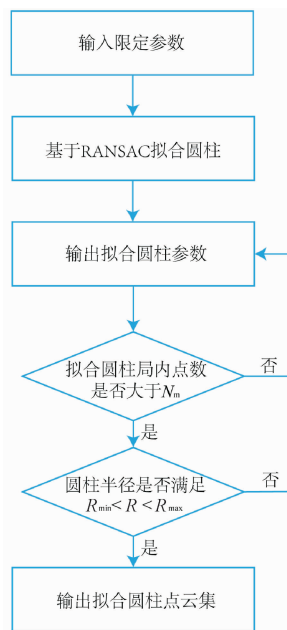


图 4 RANSAC 圆柱拟合的判定流程

### 2.5 残孔识别步骤

残孔识别的详细流程如图 5 所示,预处理过程包含区域剪裁、降噪及降采样,然后进行残孔拟合和

残孔率计算,详细操作如下:

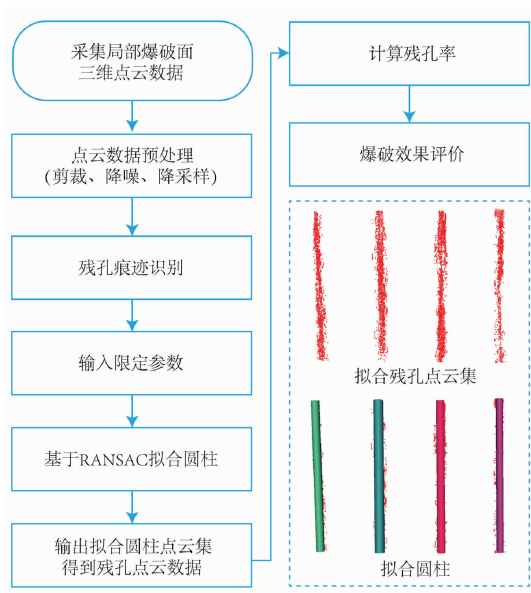


图 5 残孔识别流程

(1) 区域剪裁:将获取的爆破面三维点云数据导入至 CloudCompare 软件,手动截取需要进行残孔识别的区域,并将爆破面所在坐标平面设定为  $xoy$  平面。

(2) 降噪:使用基于空间分布的去噪算法 Statistical Outlier Removal (SOR) 去除离群噪点,设置倍数参数  $a$  为默认值 1,临近点个数  $k$  取 200~300。

(3) 降采样:选择空间降采样方法并设置点间最小距离对点云数据进行降采样计算。

(4) 残孔拟合:进行 RANSAC 圆柱拟合前,根据残孔在待分析点云数据中面积占比大致计算最小支撑点数  $N_m$ ,圆柱最大或最小半径  $R_{max}$ 、 $R_{min}$  通常选择待拟合爆孔半径  $\pm 5$  mm,距离阈值  $D_l$  根据空间降采样设置的点空间最小距离适当增大,最终经多次拟合得到符合实际炮孔痕迹分布的残孔点云集,各残孔点云集所拟合圆柱应贴合实际残孔走向,且拟合圆柱半径与炮孔半径相对误差在 10 mm 以内。

(5) 残孔率计算:残孔拟合所得各圆柱高度即为对应残孔的有效长度,求和得拟合残孔长度总和  $d_n$ ,根据点云数据可知检测区爆破面实际炮孔长度总和  $d$ ,代入  $d_n/d$  即得该爆破区域残孔率。

## 3 地下厂房爆破面残孔识别应用

### 3.1 爆破面选取

选取地下厂房爆破开挖过程中采集的 3 处爆破面三维点云进行残孔识别试验,并比较识别计算的残孔率与人工测量残孔率,验证识别及计算方法准确性。3 处爆破面所在位置分别为:① VII 层下游厂右 025-厂右 028,② VI 层下游厂右 010-厂右 013,③ VI 层下游厂右 070-厂右 073。各面炮孔直径均为 90 mm,孔间距 70 cm,炮孔圆心处于开挖轮廓线上。初始三维点云数据如图 6 所示。初始三维点云待分析区域边缘均存在多余数据及噪点,且点数均在 170 万~200 万,故需要进行预处理后进行残孔率识别。

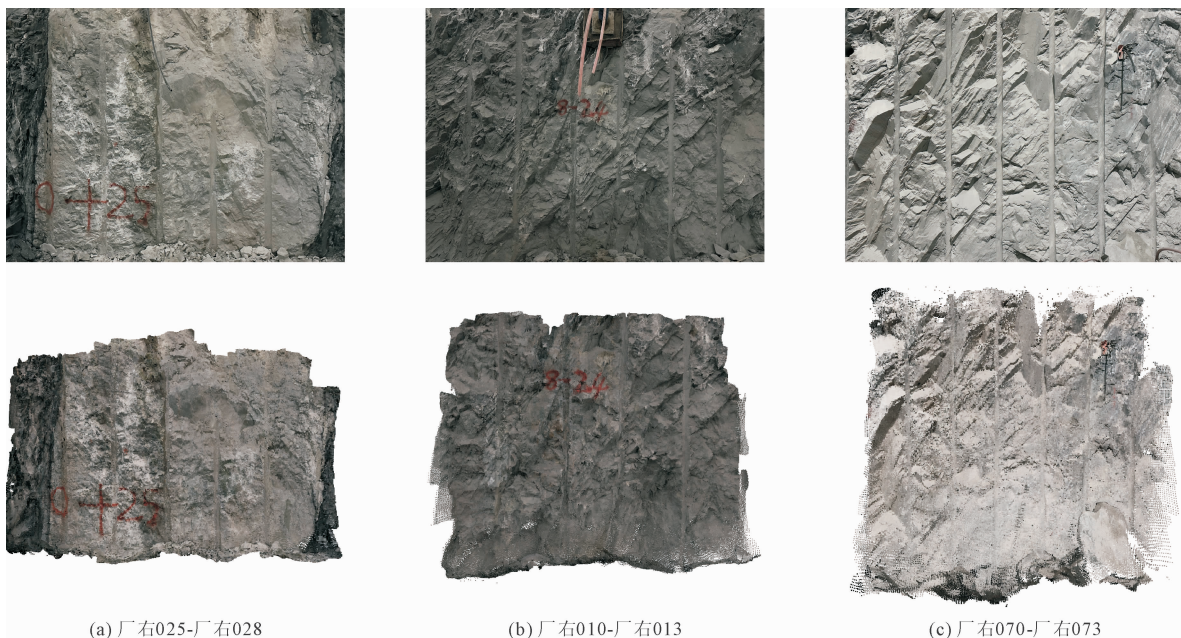


图 6 初始三维点云数据

图 7 为 3 处残孔识别试验区点云数据预处理结果。对 3 处爆破面三维点云进行预处理,截取爆破面保留需要残孔识别的区域,随后使用 Statistical Outlier Removal 方法去除离群噪点,经过空间降采样后,3 处待拟合爆破面三维点云数分别为 93 477、

84 083 及 79 858,在保留残孔空间信息的基础上将点数降低到十万以下,节省计算时间。预处理后的三维点云数据能够较好的表征采集区域残孔的空间信息,且点数较少,可作为残孔拟合及残孔率计算的数据基础。

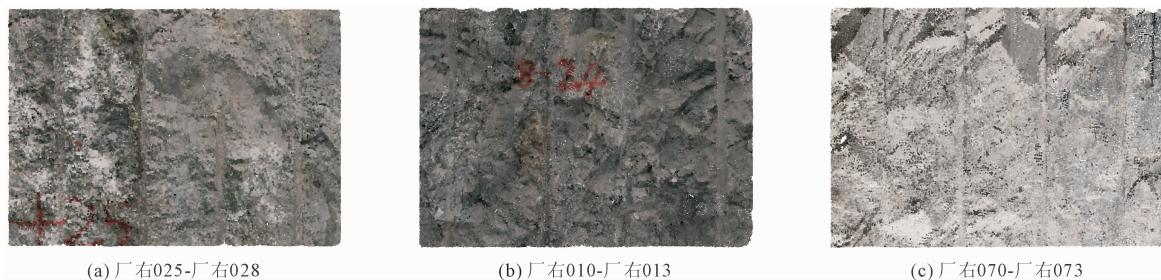


图 7 三维点云数据预处理结果

### 3.2 残孔识别及评价

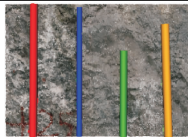
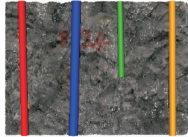
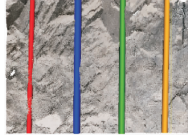
识别程序中考虑施工及计算过程中的相应误差,取圆柱最大半径  $R_{max} = 50 \text{ mm}$ , 最小半径  $R_{min} = 20 \text{ mm}/30 \text{ mm}$ , 设置图元最小支撑点数  $N_m = 150/200$ 、距离阈值  $D_l = 0.01$ 。基于预处理后的点云数据按以上参数进行 RANSAC 圆柱拟合直至待拟合残孔均明显呈现,最后根据式(1)计算基于点云识别的残孔率,并根据式(2)计算人工测量的相同区域残孔率,计算结果如表 1 所示。

$$C_1 = d_n/d \quad (1)$$

$$C_2 = d_m/d \quad (2)$$

式中: $C_1$  表示基于点云识别残孔率; $C_2$  表示人工测量残孔率; $d_n$  表示拟合残孔长度总和,m; $d_m$  表示人工测量残孔长度总和,m; $d$  表示检测区爆破面实际炮孔长度总和,m。

表 1 爆破面残孔识别结果

序号	残孔识别	$d_n/m$	$d_m/m$	$d/m$	$C_1/\%$	$C_2/\%$
①		7.59	7.37	8.64	87.85	85.30
②		7.05	7.23	8.08	87.21	89.48
③		8.23	8.26	8.26	99.67	100.00

孔拟合计算的残孔率分别为 87.85%、87.21%、99.67%,相应区域人工测算残孔率分别为 85.30%、89.48%、100%,两方法获取残孔率相差较小,仅为 0.33%~2.55%。根据《水电水利基本建设工程单元工程质量等级评定标准第 1 部分:土建工程》(DL/T 5113.1—2019)对地下开挖工程单元工程质量检验标准,完整岩石爆破后残孔率应大于 85%,故 3 处爆破面均满足残孔率要求,爆破效果良好。

## 4 结 论

依托某水电站地下厂房边墙爆破开挖工程,运用手持式三维扫描仪获取区域爆破面三维点云数据,基于三维点云处理软件 CloudCompare 进行了点云数据剪裁、去噪、降采样,并对比分析了采用不同降采样方法对点云空间信息的保留完整度及点的减量化程度,然后基于机器学习算法 RANSAC 拟合识别了点云中圆柱形炮孔痕迹并计算了爆破面残孔率,最后采用该方法对某水电站地下厂房边墙进行了残孔率评价,得到如下结论:

(1) 基于三维点云数据和 RANSAC 算法的残孔率评价方法能够快速精确地识别残孔和计算残孔率,较人工测量所得相差仅为 0.33%~2.55%,满足工程对于爆破效果进行快速评价的需求,且可以大幅减少人工和人为误差。

(2) 运用手持式扫描仪及特定采集方法获取的三维点云数据能够较好记录爆破面空间信息,且获取过程操作简便,大幅减少人员投入。

(3) 空间降采样方法能够在保证点云空间信息完整的前提下,大幅度降低点数,预处理后的点云数据减少复杂施工环境影响及冗余计算问题。

如表 1 所示,3 处爆破面基于点云数据进行残

(4) 该水电站地下厂房 3 处爆破面残孔率均大于 85%, 满足工程规范要求, 爆破效果良好。

### 参考文献:

- [1] Li Biao, Xu Nuwen, Dai Feng, et al. Microseismic monitoring and stability analysis for the large-scale underground caverns at the Wudongde hydropower station[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7): 3559-3573.
- [2] 樊启祥, 陆佑楣, 周绍武, 等. 金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 294-304.
- [3] Huang Xiang, Xu Dingping, Chen Dongfang, et al. Damage assessment of high-stress brittle surrounding rock masses in a deep large-span high-sidewall underground cavern; In situ measurement and numerical simulation [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 161: 108273.
- [4] Yuan Fei, Shi Anchi, Zhou Jiawen, et al. Deformation and failure analyses of the surrounding rock mass with an interlayer shear zone in the Baihetan underground powerhouse[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 2988998.
- [5] He Benguo, Meng Xiangrui, Feng Xiating, et al. Effect of intermediate principal stress on the failure characteristics of an underground powerhouse[J]. Engineering Geology, 2022, 311: 106914.
- [6] Li Ang, Liu Yi, Dai Feng, et al. Deformation mechanisms of sidewall in layered rock strata dipping steeply against the inner space of large underground powerhouse cavern[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2022, 120: 104305.
- [7] 王仁坤, 邢万波, 杨云浩. 水电站地下厂房超大洞室群建设技术综述[J]. 水力发电学报, 2016, 35(8): 1-11.
- [8] 肖明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 421-425.
- [9] 杨玉银, 郝利军, 杨仕杰, 等. 硬梁包水电站地下厂房顶拱开挖光面爆破试验[J]. 工程爆破, 2022, 28(3): 64-69.
- [10] 赵强, 王涛. 一种三维激光扫描技术隧道整体变形分析方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 99-105.
- [11] 谢超群, 李启月, 刘玉丰, 等. 基于 SVR 的隧道掘进光面爆破效果预测模型[J]. 矿冶工程, 2022, 42(02): 28-31.
- [12] 陈庆凯, 孙俊鹏, 李松鹏, 等. 基于高速摄影的露天矿山爆破效果评价[J]. 爆破, 2012, 29(3): 31-34.
- [13] 薛斌, 徐恒阳, 魏快快, 等. 新型光面爆破技术在边坡开挖中的应用[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6): 28-31.
- [14] 王子琛, 李祥龙, 王惠芬, 等. 基于正交设计模拟实验的预裂爆破参数优化方法研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(5): 96-101.
- [15] 谢博, 施富强, 赵建才, 等. 爆破岩块自动识别与块度特征提取方法[J]. 爆破, 2019, 36(3): 43-49.
- [16] Wang Meng, Zhou Jiawen, Chen Junlin, et al. Automatic identification of rock discontinuity and stability analysis of tunnel rock blocks using terrestrial laser scanning[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(7): 1810-1825.
- [17] 李徐然, 施富强, 廖学燕, 等. 基于三维点云的光爆半孔率数字化检测技术[J]. 工程爆破, 2018, 24(5): 45-49.
- [18] Jiang Quan, Shi Yingen, Yan Fei, et al. Reconstitution method for tunnel spatiotemporal deformation based on 3D laser scanning technology and corresponding instability warning[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 125: 105391.
- [19] 齐成龙. 基于三维激光扫描的矿山法隧道超欠挖及平整度智能化检测[J]. 铁路技术创新, 2024(2): 99-105.
- [20] Tabib A R, Jadhav V Y, Tegginkeri S, et al. Learning-based hole detection in 3D point cloud towards hole filling [J]. Procedia Computer Science, 2020, 171: 475-482.