

【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

基于无人机图像的隧道岩块弃渣识别与分析

刘世纲¹, 余漾¹, 韩宇舟², 张学民², 张燕勇², 游钰阳², 周贤舜^{3, 4}

1) 中交一航局第三工程有限公司, 辽宁大连 116010; 2) 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410083; 3) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 4) 深圳大学极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 广东深圳 518060

摘要: 钻爆法隧道施工会产生大量岩块弃渣, 高效、精准地分析其块度特征是提升资源化利用水平的关键。针对传统人工测量方法效率低、覆盖范围有限的问题, 采用无人机影像采集与深度学习相结合的方法, 智能提取岩块轮廓, 对青海省当顺隧道弃渣场的岩块分布规律与资源化潜力展开研究。结果表明: 岩块直径中值为300 mm, 最大直径超过1 500 mm; 由坡顶向坡脚岩块的直径和形态均发生了变化, 岩块直径逐渐由细变粗, 岩块形态则由次圆状渐变为棱角状; 最新倾倒区岩块较好地保持了爆破原始状态, 直径超过1 000 mm的岩块占比偏高, 建议通过优化装药结构与孔距等方式予以控制。基于岩块的重力分选特征, 提出分区资源化利用策略: 坡顶与坡面区的中细粒料宜直接用作填料或筑路材料, 坡脚区大块岩石则经破碎后再利用。研究成果可为隧道弃渣的高效资源化与爆破参数优化提供技术依据。

关键词: 隧道工程; 隧道弃渣; 岩块识别; 任意分割模型; 块度级配; 几何特征; 资源利用

中图分类号: U455.5

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2026.03309

UAV image-based identification and block size analysis of tunnel muck using deep learning

LIU Shigang¹, YU Yang¹, HAN Yuzhou², ZHANG Xuemin², ZHANG Yanyong²,
YOU Yuyang², and ZHOU Xianshun^{3, 4}

1) Third Engineering Co. Ltd., CCCC First Harbor Engineering Co. Ltd., Dalian 116010, Liaoning Province, P. R. China

2) School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan Province, P. R. China

3) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

4) State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Maintenance for Extreme Environment Rock Soil and Tunnel Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Drill-and-blast tunneling generates large volumes of rock spoil, and efficient and accurate characterization of block size distribution is critical for enhancing resource utilization. However, traditional manual measurement methods are time-consuming and limited in spatial coverage. To address these limitations, a UAV-based image acquisition approach combined with deep learning was employed to automatically extract rock block contours. The block size distribution and resource utilization potential of tunnel spoil were investigated using a case study from Dangshun Tunnel spoil yard in Qinghai Province, China. The results show that the median block diameter is approximately 300 mm, with maximum sizes exceeding 1 500 mm. Both the size and morphology of rock blocks

Received: 2025-09-11; **Revised:** 2026-03-20; **Accepted:** 2026-03-26; **Online (CNKI):** 2026-04-27

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52378425); CCCC First Harbor Engineering Co. Ltd. Technology Project (105049901C-2024-JSFW-41); Shenzhen Stability Support Plan (20231122095154003)

Corresponding author: Associate researcher ZHOU Xianshun (zhouxs0056@szu.edu.cn)

Citation: LIU Shigang, YU Yang, HAN Yuzhou, et al. UAV image-based identification and block size analysis of tunnel muck using deep learning [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(3): 309-315. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



exhibit systematic spatial variation along the slope, with particle size gradually increasing from fine to coarse from the slope crest to the slope toe, while block shape transitioning progressively from subrounded to angular. In recently dumped areas, rock blocks largely preserve their original blast-induced fragmentation features, with a relatively high proportion of large fragments exceeding 1 000 mm in size. This suggests that optimization of charging structure and blasthole spacing is necessary. Based on gravity-induced sorting characteristics, a zoned resource utilization strategy is proposed in which medium- and fine-grained materials at the crest and slope face zones can be directly used as fill or road construction materials, whereas coarse blocks accumulated at the slope toe should be crushed for recycling. The findings provide a technical basis for efficient resource utilization of tunnel spoil and optimization of blasting design in tunnel engineering.

Key words: tunnel engineering; tunnel muck; rock identification; segment anything model (SAM); block size distribution; geometric features; resource utilization

钻爆法隧道施工利用炸药爆破破碎围岩,再通过挖掘机和渣土车将碎石运出洞外。在长隧道工程中,施工周期常达1~2 a,产生的岩块弃渣量可达上百万立方米^[1]。传统处理方式以堆放和掩埋为主,不仅造成大量浪费,还可能引发地质灾害与环境污染^[2-3]。近年来,随着绿色建造理念的推广,隧道弃渣的资源化利用逐渐成为研究热点。例如,将隧道弃渣经分级、碾压及稳定剂掺和处理后,可满足公路路基施工技术要求,作为路基填料使用^[4]。此外,通过破碎、筛分和洗选等工艺,合格弃渣还可制成建筑用再生粗细骨料,用于混凝土或砖块等制品生产^[5]。实践表明,隧道爆破产生的弃渣具有广阔的资源化利用前景。

岩块直径尺寸是决定弃渣资源化用途的关键参数。根据黄法礼等^[6]的建议,粒径为0~4.75 mm的细集料可用于高速公路路基填筑及桥隧工程浇筑;粒径大于4.75 mm的粗集料则适用于作为路基块石土和碎石土。因此,准确获取岩块尺寸是提升弃渣资源化潜力的关键环节。目前,岩块特征采集方法主要有人工测量、激光扫描与机器视觉3类。人工测量包括筛分法、直接块度量测法及摄影-图像分析法等^[7],此类方法存在效率低、覆盖范围有限、结果易受主观经验影响等问题。激光扫描精度最高,但设备成本高昂,易受地形遮挡干扰,且点云数据的处理过程复杂,专业性要求较高。

近年来,无人机设备在性价比、成像质量、计算能力与分辨率方面有显著提升^[8],基于视觉信息的数字图像空间分析已成为爆破效果评估的重要方向^[9-10]。机器视觉技术在隧道爆破孔痕识别^[11]和超欠挖轮廓提取^[12]等方面均取得了显著进展。陈承桢^[13]基于无人机平台实现了台阶爆破块度的现场快速识别,识别精度达3 mm。BAMFORD等^[14]利用无

人机在实验室环境下快速拍摄岩堆图像并生成块度直径分布曲线,与人工测量结果误差小于10%,展现出高效率与高精度的优势。上述研究表明,图像分割与目标检测算法能够自动识别岩块尺寸与几何轮廓,相较于人工方法,显著提升了结果的客观性与可重复性。随着深度学习技术的发展,Crowd-SAM和YOLOv8等模型^[15-16]也进一步增强了非结构化视觉数据的识别与分析能力^[17]。

综上所述,轻量化无人机平台结合机器视觉与深度学习技术,可实现快速大范围覆盖,获取高分辨率影像,进而构建三维模型,实现厘米级精度的地形反演与块度识别,为隧道弃渣岩块的精细化资源化利用奠定了基础。本研究依托青海省当顺隧道弃渣场,融合图像三维重建与人工智能识别算法,对弃渣的块度直径分布与空间特征进行系统分析。基于岩块在弃渣场的分布特征,提出了资源化利用与爆破参数优化的建议,以期为推动隧道工程绿色建造提供参考。

1 工程背景

本研究依托的隧道工程位于中国青海省,全长13.493 km,是西宁至成都高速铁路的重要控制性工程。隧道穿越区围岩主要为Ⅲ~Ⅳ类,岩性以新近系泥岩夹砂岩、砾岩以及三叠系砂岩、板岩和砾岩为主;岩体结构致密,节理裂隙发育中等。隧道采用钻爆法施工,其爆破设计参数如图1所示。其中,单孔装药量为1.3~2.0 kg/m,孔深为3.2~3.3 m,孔直径为32 mm,孔距600~1 300 mm。爆破产生的弃渣集中运至洞口弃渣场堆放,该弃渣场依地形设置两级堆放平台。

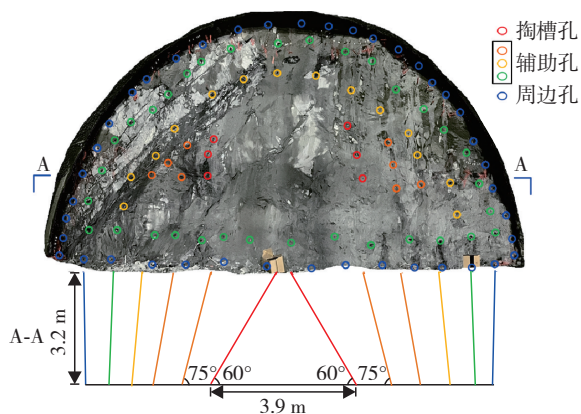


图1 隧道掌子面与炮孔布置示意

Fig. 1 Photo of tunnel rock and schematic layout of blasthole. Cut holes (red icons), auxiliary holes (orange, yellow, and green icons) and contour holes (blue icons).

2 智能识别方法

2.1 图像采集方法

无人机采用大疆精灵4 RTK型号,集成了实时动态差分定位(real time kinematic, RTK)模块,能够对影像位置进行实时补偿。通过接入网络RTK定位服务开展倾斜摄影测量,所构建的三维模型在平面坐标上的精度可达厘米级^[18-19],满足《三维地理信息模型数据产品规范》^[20]的相关要求。

无人机具体参数请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料表S1。设备搭载1台高清可旋转单镜头,有效像素达2 048万(5 472 × 3 648像素),搭配8.8 mm定焦镜头(等效焦距为24 mm)。航拍前,对露天岩块渣堆进行航线规划,设定飞行高度为20~50 m。为表征识别精度,单个像素点代表的地面尺寸^[13]为

$$G = \frac{Hp}{f} \quad (1)$$

其中, p 为传感器上1个像素的物理尺寸(单位:μm); f 为相机镜头焦距(单位:mm); H 为相机到地面的垂直高度(单位:m)。

经计算,本研究中 $G = 0.9$ mm,据此可推算出图像平面测量精度约为2.7 mm(通常取 G 的2~3倍),满足渣堆块度测量的精度要求。

2.2 三维点云重建方法

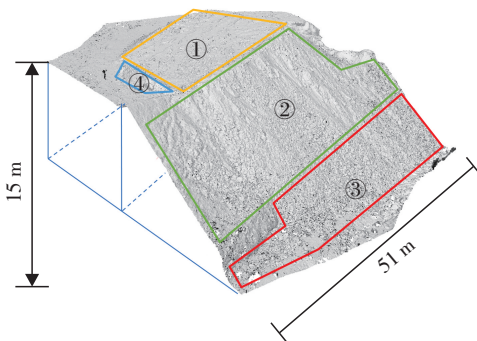
基于图像的三维重建本质是通过多视角影像解析反演场景几何结构,其核心流程始于对序列影像的特征提取:采用尺度不变特征变换算法^[21-22]检测

各影像的显著关键点,并生成高维描述符;通过描述符空间最近邻搜索与双向匹配策略建立跨视图的对应点对,这些点对构成后续运动恢复结构(structure from motion, SfM)^[23]的输入基础。SfM假设相机遵循针孔模型,1个三维空间点投影到图像平面上的数学表示为

$$\lambda P = K[R|t]P_w \quad (2)$$

其中, λ 为尺度因子; K 为相机内参矩阵; $[R|t]$ 为相机外参矩阵, R 为3×3旋转矩阵(描述相机朝向,从世界坐标系到相机坐标系), t 为3×1平移向量(描述相机位置,从世界坐标系原点到相机坐标系原点); P_w 为三维空间点在世界坐标系下的齐次坐标, $P_w = [x, y, z, 1]^T$, P 为二维点在图像上的齐次坐标, $P = [u, v, 1]^T$, x, y, z, u 和 v 为坐标值。

SfM的优势在于高精度的特征匹配、鲁棒的基础矩阵估计和强大的光束法平差优化^[24],其输出的相机位姿和稀疏点云为后续的稠密重建提供了至关重要的基础。无人机获取图像后,经过SfM算法得到重建的三维稀疏点云,再采用半全局匹配(semi-global matching, SGM)算法^[25]对稀疏点云处理得到密集点云,如图2所示,重建了长51 m、宽40 m、高15 m的大尺度三维点云模型。



①为坡顶区;②为坡面区;③为坡脚区;④为最新倾倒区

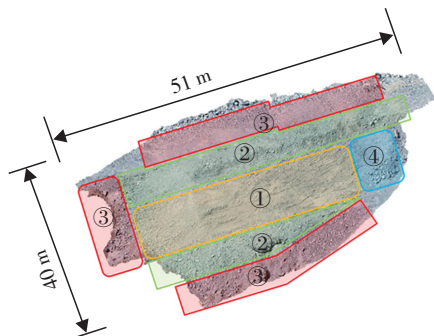
图2 图像三维点云重建

Fig. 2 Photo of 3D point cloud reconstruction. Slope crest ① (yellow curve), slope surface ② (green curve), slope toe ③ (red curve) and latest dumping area ④ (blue curve).

2.3 岩块特征提取方法

弃渣岩块的特征包括空间分布、几何形态和直径分布。直径分布参数包括最大直径 D_{max} 和中值直径 D_{50} 。形态特征主要以长短轴比和颗粒类型进行表征。特征的提取采用数字图像分析法:将三维重建的模型导出正射影像,由于弃渣场的占地范围较

大,且主体部分已经堆积数月,根据其堆积稳定性和空间分布特征初步将所得的正射投影分为坡顶区、坡面区、坡脚区和最新倾倒入4个部分,如图3所示.



①为坡顶区;②为坡面区;③为坡脚区;④为最新倾倒入

图3 图像正射投影分区(坡顶区①、坡面区②、坡脚区③和最新倾倒入④)

Fig. 3 Orthophoto zoning map. Slope crest ① (yellow curve), slope surface ② (green curve), slope toe ③ (red curve) and latest dumping area ④ (blue curve).

根据坐标换算后通过任意分割模型(segment anything model, SAM)进行岩块轮廓分割,能够有效识别弃渣场影像中各类岩块的边界形态.该模型基于大规模预训练的视觉分割框架,对不同形态的岩块均表现出较好的适应性,模型分割的精度依赖于传入图像的质量.按以下流程处理:首先将正射影像与三维点云数据进行空间对齐与比例校正,再将图像输入至SAM模型进行自动分割,从而得到单块岩石的轮廓多边形.分割结果如图4所示.

SAM模型在本研究场景仍存在一定局限性.岩块分割结果的局部放大图请扫描论文末页右下角二

维码查看补充材料图S1.由图S1可见,模型在处理遮挡及重叠岩块时表现不佳,虽能较准确地识别表层可见岩块,但对重叠部分几何尺寸的统计存在明显偏差.此外,模型对块度直径小于50 mm的岩块识别效果欠佳,目前仍需依赖人工校准.为提升模型在岩块分割任务中的精度,未来可从两方面进行改进:一是扩充高质量标注数据以增强模型训练效果;二是进一步提升航拍图像的分辨率.

3 弃渣岩块特征分析

3.1 空间分布

在对弃渣场进行初步区域划分后,发现不同地形部位的块度分布呈现规律性差异,坡顶区域、坡面和坡脚的岩块级配分布请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S2.由图S2可见,坡顶区以细粒及中等直径的岩块为主,坡面区多为中等块度和小部分的大块岩石,坡脚区为大块岩石最集中的区域.这是由于重力作用下,大质量岩块在倾倒过程中更易滚落至坡脚堆积,形成粗粒富集带.从资源化利用角度看,坡顶与坡面区的中细粒料更适合作为填料或筑路材料;而坡脚区富集的大块岩石则需经机械破碎后再利用.上述基于重力分选效应的块度分布规律,为弃渣的分区分类资源化利用提供了重要依据.

3.2 几何形态

基于深度学习对弃渣岩块图像进行分割后,进一步统计长短轴频率分布及不同颗粒类型的占比情况,结果如图5所示.形态分析表明,弃渣岩块整

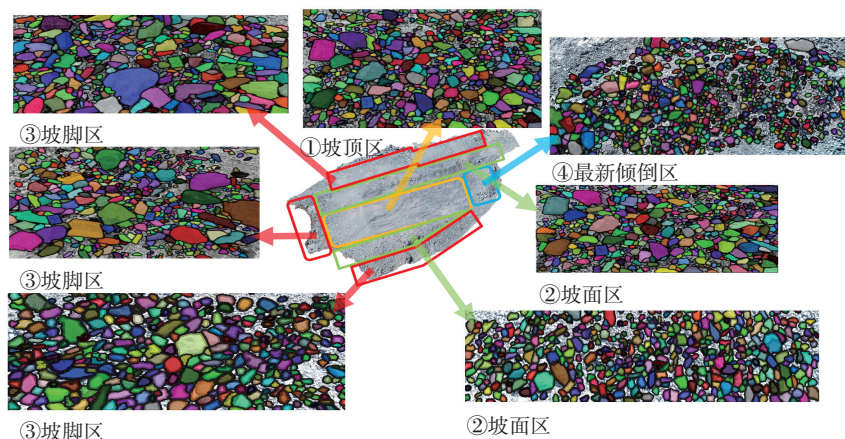


图4 利用SAM模型对岩块的分割结果

Fig. 4 Rock block segmentation results using the SAM model. Slope crest ① (yellow arrow), slope surface ② (green arrow), slope toe ③ (red arrow) and latest dumping area ④ (blue arrow).

体以圆状和次圆状为主,椭圆长轴与短轴之比多集中于1.2~1.8,呈现规则化、扁平化趋势.不同分区形态特征差异显著:坡脚区保留了较多大块、棱角分明的岩块;坡面区与坡顶区则以中细粒岩块为主,形态多为次棱角状,分布较为均匀.这种空间分异同样受重力作用控制.基于上述规律,建议在资源化利用中实施分区策略:坡脚区大块岩体需强化破碎加工;坡面与坡顶区的中细粒料宜直接用作填筑或路基材料;而新倾倒区岩块因其较好地保持了爆破原始状态,可用于爆破质量评估与施工参数优化.

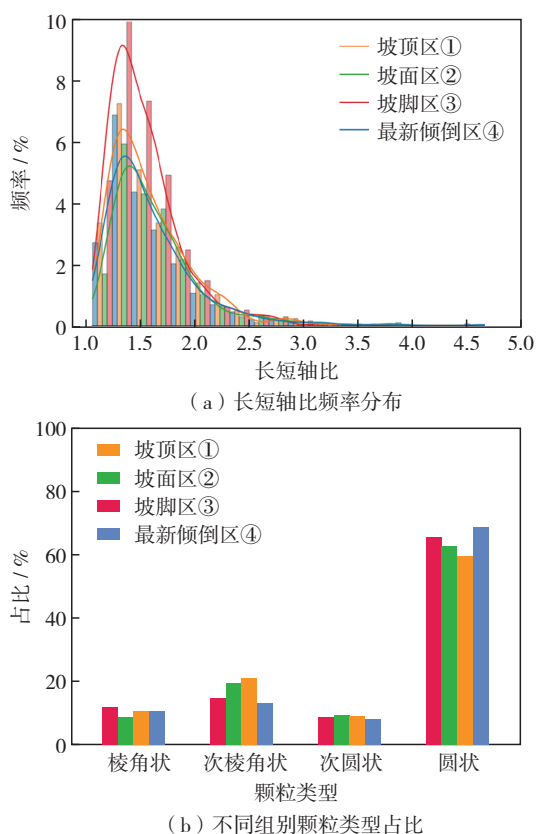


图5 岩块几何形态分析

Fig. 5 Rock block geometric morphology analysis results. Slope crest ① (yellow curve), slope surface ② (green curve), slope toe ③ (red curve) and latest dumping area ④ (blue curve).

3.3 块度直径分布

通过对无人机航测影像、三维点云建模及图像识别后,对坡顶区、坡面区、坡脚区和最新倾倒区进行分析,结果请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S3.由图S3可见,弃渣场坡面不同位置的岩块分布存在显著差异.坡顶区岩块直径偏小,在100 mm处累积百分比已超过80%,频率峰值高达16%,表明该部分颗粒破碎充分且分布集

中;坡脚区以粗大岩块为主,在1 000 mm时累积百分比才接近90%,在500~1 000 mm内仍保持较高频率,表明该区岩块直径显著偏大.总体而言,岩块在坡顶—坡面—坡脚呈现出由细至粗的分布规律.

考虑到隧道运输距离较短,且弃渣倾倒后未经历明显的机械扰动,运输和装载过程对块度直径分布的影响较小.鉴于现场装载机的运输条件,爆破产生的块径大于1 000 mm的岩块被视为大块,需要进行再次爆破.计算结果表明,新倾倒区的大块率为2.5%,较整体大块率16.4%已显著降低,但仍存在直径接近2 000 mm的岩块.与图1对照分析表明,掏槽孔与底板孔的间距(1.3 m)以及掏槽孔自身的间距(超过3.9 m)超过了1 000 mm,这是大块率产生的主要原因.为进一步消除此类岩块的产生,应继续通过减小孔距和优化起爆间隔时间等措施进行调整与控制.

3.4 隧道弃渣资源化利用建议

本隧道爆堆弃渣的岩块直径分布范围广,级配连续性良好,显示出较高的资源化利用潜力.最大直径超过1 500 mm,中值直径为300 mm.弃渣在空间分布上呈现明显的重力分选特征:坡顶及坡面以中细粒料为主,可直接用作填料或筑路材料;坡脚区则富集大块岩石,需经机械破碎后方可资源化利用.这种空间分布规律为实施分区分类利用提供了依据.此外,最新倾倒区的岩块较好地保持了爆破原始状态,适用于爆破质量评估与施工参数优化.观测发现,尽管近期爆破效果有所改善,仍存在个别直径接近2 000 mm的巨型块石,明显大于平均抵抗线距离.鉴于出渣运输距离短且倾倒后无机械扰动,弃渣的块度直径受运输及作业影响较小,表明大块石主要来源于爆破过程.因此,建议通过适当减小孔距和优化起爆间隔等措施,进一步控制爆破块度,降低大块率.

4 结 论

基于无人机图像采集与几何特征智能提取技术,对中国青海省当顺隧道弃渣场的岩块分布特征及资源化潜力进行系统研究,主要结论如下:

1) 弃渣场岩块呈现明显的重力驱动空间分异规律.沿坡顶—坡面—坡脚方向,岩块直径由细向粗过渡,形态由次圆状向棱角状转变,分选性由强

变弱. 重力作用下, 大块岩体在倾倒过程中更易滚落至坡脚堆积, 形成粗粒富集区. 坡顶与坡面则以中细粒和次棱角状岩块为主, 形态相对均匀.

2) 弃渣的块度直径范围宽, 级配良好, 具备较高的资源化潜力. 建议基于自然分选效应实施分区利用策略: 坡顶与坡面区的中细粒料宜直接用作填料或筑路材料; 坡脚区的大块岩石则需经机械破碎后再生利用. 该策略有助于提升资源化效率, 减少环境扰动.

3) 最新倾倒区岩块较好地保持了爆破原始状态, 整体大块率偏高, 可用于爆破质量评估与参数反馈. 建议通过优化装药结构、孔距和起爆时序等措施, 降低大块率, 并依据该区域的持续监测结果动态调整爆破方案.

本研究的图像识别方法仍存在一定局限, 主要体现在对遮挡、重叠岩体的分割精度不足, 目前尚需依赖人工校正. 此外, 对于块度直径小于 50 mm 岩块轮廓的识别效率有待提升, 耗时较长. 未来研究将通过优化深度学习模型结构与训练策略, 进一步提升识别精度与运算效率.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378425); 中交第一航务工程局有限公司科技资助项目(105049901C-2024-JSFW-41); 深圳市高等院校稳定支持计划资助项目(20231122095154003)

作者简介: 刘世纲(616202729@qq.com), 中交一航局有限公司高级工程师. 研究方向: 隧道施工.

引文: 刘世纲, 余漾, 韩宇舟, 等. 基于无人机图像的隧道岩块弃渣识别与分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2026, 43(3): 309-315.

参考文献 / References:

- [1] 严志伟, 刘大刚, 赵大铭, 等. 铁路隧道弃渣的本地资源化利用[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1649-1656.
YAN Zhiwei, LIU Dagang, ZHAO Daming, et al. Study on key technologies of green and efficient utilization of huge abandoned slag of railway tunnel [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(5): 1649-1656. (in Chinese)
- [2] 徐治明, 陈现辉, 汝风杰, 等. 天山胜利隧道弃渣综合利用探讨[J]. 中国水土保持, 2024(12): 56-58.
XU Zhiming, CHEN Xianhui, RU Fengjie, et al. Comprehensive utilization of discard slag in Tianshan Shengli tunnel [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024 (12): 56-58. (in Chinese)
- [3] 孙晓辉, 张明, 陈湘生, 等. 工程建设余泥渣土高效利用技术与展望[J]. 深圳大学学报理工版,

2025, 42(6): 678-687.

- SUN Xiaohui, ZHANG Ming, CHEN Xiangsheng, et al. Efficient utilization technology and research prospects for waste slurry and soil from engineering construction [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(6): 678-687. (in Chinese)
- [4] 马耀举, 张甘成, 马进学, 等. 隧道花岗岩弃渣沥青混凝土路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(S2): 41-48.
MA Yaoju, ZHANG Gancheng, MA Jinxue, et al. Study on pavement performance of asphalt concrete with tunnel granite slag [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(S2): 41-48. (in Chinese)
- [5] OU Yazhou, TIAN Gang, CHEN Junjie, et al. Feasibility studies on the utilization of recycled slag in grouting material for tunneling engineering [J]. Sustainability, 2022, 14(17): 11013.
- [6] 黄法礼, 李化建, 王振, 等. 隧道洞渣建筑材料资源化应用研究现状与存在问题分析[J]. 中国铁路, 2019(8): 14-18.
HUANG Fali, LI Huajian, WANG Zhen, et al. Research results and challenges of recycling tunneling mucks [J]. Chinese Railways, 2019 (8): 14-18. (in Chinese)
- [7] 林大泽. 爆堆块度评价方法研究的进展[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(9): 9-13.
LIN Daze. Recent development in assessing fragmentation of rock blasting [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(9): 9-13. (in Chinese)
- [8] 房平, 刘爱军, 张俊阳, 等. 基于无人机影像的矿区地表水平位移特征识别算法效果对比研究[J]. 金属矿山, 2025(10): 226-233.
FANG Ping, LIU Aijun, ZHANG Junyang, et al. Comparative study on the effect of surface horizontal displacement feature recognition algorithm in mining area based on UAV image [J]. Metal Mine, 2025 (10): 226-233. (in Chinese)
- [9] 金启明, 王锋, 杨娟娟, 等. 结合空间几何信息和全局特征的无人机图像三维重建模型[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(6): 266-276.
JIN Qiming, WANG Feng, YANG Juanjuan, et al. Three-Dimensional reconstruction model for unmanned aerial vehicle images combining spatial geometric information and global features [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(6): 266-276. (in Chinese)
- [10] 孔庆群, 吴福朝, 樊彬. 基于深度学习的图像匹配: 方法、应用与挑战[J]. 计算机学报, 2024, 47(7): 1485-1520.
KONG Qingqun, WU Fuchao, FAN Bin. Image matching in deep learning era: methods, applications and challenges

- [J]. Chinese Journal of Computers, 2024, 47(7): 1485-1520. (in Chinese)
- [11] LI Mingze, CHEN Ming, ZENG Xinhua, et al. Deep learning-based image automatic segmentation of blast-hole mark and quantitative calculation of half-hole ratio [J]. Automation in Construction, 2025, 179: 106454.
- [12] 阳军生, 张宇, 祝志恒, 等. 基于图像三维重建的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 中南大学学报自然科学版, 2020, 51(3): 714-723.
YANG Junsheng, ZHANG Yu, ZHU Zhiheng, et al. Study on tunnel under-over break detection method based on three-dimensional image reconstruction technology [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2020, 51(3): 714-723. (in Chinese)
- [13] 陈承桢, 李荟, 朱万成, 等. 基于深度学习和贴近摄影测量的露天矿爆堆块度识别算法[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 151-162.
CHEN Chengzhen, LI Hui, ZHU Wancheng, et al. Blast pile fragments recognition algorithm for open pit mines based on deep learning and nap-of-the-object photogrammetry [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 151-162. (in Chinese)
- [14] BAMFORD T, ESMAEILI K, SCHOELLIG A P. A real-time analysis of post-blast rock fragmentation using UAV technology [J]. International Journal of Mining Reclamation and Environment, 2017, 31(6): 439-456.
- [15] WANG Ziqiang, HOU Zhiyu, HOU Shuai, et al. Generalizable digital rock image segmentation under limited data with the segment anything model [J]. Intelligent Geoengineering, 2026, 3(1): 1-10.
- [16] 文奴, 郭仁忠, 贺彪. 基于DCN-Mobile-YOLO模型的多车道车辆计数[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(6): 628-635.
WEN Nu, GUO Renzhong, HE Biao. Multi-lane vehicle counting based on DCN-Mobile-YOLO model [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(6): 628-635. (in Chinese)
- [17] 彭家奕, 傅中志, 沈振中, 等. 基于CT图像人工智能分析的砂砾料几何特征参数提取方法[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(10): 2096-2105.
PENG Jiayi, FU Zhongzhi, SHEN Zhenzhong, et al. Method for parameter extraction of geometric features of gravel materials based on artificial intelligence analysis of CT images [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(10): 2096-2105. (in Chinese)
- [18] 曹琳. 基于无人机倾斜摄影测量技术的三维建模及其精度分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
CAO Lin. Three dimensional modeling and its precision analysis based on UAV oblique photogrammetry technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [19] 张林杰, 黄筱, 饶维冬, 等. 网络RTK和PPK辅助水利免像控无人机倾斜摄影测量三维建模分析[J]. 测绘通报, 2023(4): 115-120.
ZHANG Linjie, HUANG Xiao, RAO Weidong, et al. NRTK PPK aided 3D modeling analysis of image free UAV tilt photogrammetry for water conservancy projects [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023 (4): 115-120. (in Chinese)
- [20] 国家测绘地理信息局. 三维地理信息模型数据产品规范: CH/T 9015-2012[S]. 北京: 中国测绘出版社, 2012.
National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation. Specification for the digital products of three-dimensional model on geographic information: CH/T 9015-2012 [S]. Beijing: China Surveying and Mapping Press, 2012. (in Chinese)
- [21] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [22] GORDON I, LOWE D G. What and where: 3D object recognition with accurate pose [M]// PONCE J, HEBERT M, SCHMID C, et al. Toward Category-Level Object Recognition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 67-82.
- [23] 张平, 王山东, 黄瑾娉, 等. 基于SFM和CMVS/PMVS的建筑物点云重构方法研究[J]. 苏州科技学院学报自然科学版, 2015, 32(3): 60-64.
ZHANG Ping, WANG Shandong, HUANG Jinpin, et al. Research on building point cloud reconstruction method based on SFM and CMVS/PMVS [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology Natural Science, 2015, 32(3): 60-64. (in Chinese)
- [24] JIANG San, MA Yichen, JIANG Wanshou, et al. Efficient structure from motion for UAV images via anchor-free parallel merging [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 211: 156-170.
- [25] 李迎松. 摄影测量影像快速立体匹配关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
LI Yingsong. Research on key techniques of fast stereo matching for photogrammetric images [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料