

近景摄影测量技术在非开挖岩体裂隙发育特征研究中的应用

董雨休^{1,2}, 孙平贺^{*1,2}, 杨涵涵³, 左雷彬⁴, 韩萌⁵, 张绍和^{1,2}, 魏宏超⁶

1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083;
2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;
3. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410083;
4. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊 065000;
5. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安 710065;
6. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西西安 710054)

摘要:岩体裂隙结构的准确获取分析对于生态脆弱区非开挖钻遇岩体的稳定性分析有重要意义。本文基于近景摄影测量技术,通过PhotoModeler Scanner软件对多方位岩体图像特征点畸变处理、杂点剔除,实现密集点云三维信息准确提取,进而建立三角网格、依据三角网建立密集曲面,最后通过数据的可视化对曲面进行渲染,实现岩体的三维建模。建立的三维模型裂隙形态与原裂隙趋于一致,可实现对于裂隙长度、平均宽度、面积等参数的无损拾取与观察,将获取裂隙信息进行对比,结果与直观反映的岩体裂隙发育程度一致。

关键词:近景摄影测量;量化识别;三维模型;裂隙岩体;非开挖;生态脆弱区

中图分类号:P642;P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0514-06

The application of close-up photogrammetry technology in characteristics research of rock mass fractures in trenchless

DONG Yuxiu^{1,2}, SUN Pinghe^{*1,2}, YANG Hanhan³, ZUO Leibin⁴,
HAN Meng⁵, ZHANG Shaohu^{1,2}, WEI Hongchao⁶

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
3. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha Hunan 410083, China;
4. China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China;
5. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an Shaanxi 710065, China;
6. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: The accurate acquisition and analysis of fracture structure of rock mass is of great significance for the stability analysis of trenchless drilling rock mass in ecologically fragile areas. Based on close-up photogrammetry technology, this paper uses PhotoModeler Scanner software to process the feature point distortion and noise removal of multi-directional rock mass images to achieve accurate extraction of three-dimensional information of dense point

收稿日期:2023-06-27; 修回日期:2023-08-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.084

基金项目:国家重点研发计划项目“污染场地土层精准控制液压推进系统研发”(编号:2020YFC1807200);中国石油科技计划项目“高海拔地区山体定向穿越断层稳定性分析及泥浆技术研究”(编号:2019-07-01)

第一作者:董雨休,女,汉族,2000年生,在读硕士研究生,资源与环境专业,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号,225012118@csu.edu.cn。

通信作者:孙平贺,男,汉族,1982年生,教授,博士生导师,从事非开挖、矿产地质及非常规能源深部钻进技术的教学与科研工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号,pinghesun@csu.edu.cn。

引用格式:董雨休,孙平贺,杨涵涵,等.近景摄影测量技术在非开挖岩体裂隙发育特征研究中的应用[J].钻探工程,2023,50(S1):514-519.

DONG Yuxiu, SUN Pinghe, YANG Hanhan, et al. The application of close-up photogrammetry technology in characteristics research of rock mass fractures in trenchless[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):514-519.

clouds, and then establish a triangular mesh, establish dense surfaces according to the triangular network, and finally render the surfaces through data visualization to realize the three-dimensional modeling of rock masses. The established 3D model fracture morphology tends to be consistent with the original fracture, which can realize non-destructive picking and observation of fracture length, average width, area and other parameters, and compare the obtained fracture information, and the results are consistent with the visually reflected fracture development degree.

Key words: close-up photogrammetry; quantitative identification; 3D model; fractured rock mass; trenchless; ecologically fragile areas

0 引言

穿越生态脆弱区时,非开挖钻遇的岩体具有软硬不均、易变形等现象,这是因为极浅埋、浅埋状态下岩体强度较低,具有岩性软及风化强的特性;而深埋状态下岩体强度虽较高,但山体穿越工程易对上部岩体与生态系统产生相应干扰^[1-2]。钻遇此类岩体时,易发生掉块、坍塌、滑移、剥落等轻度、中度变形,造成对生态脆弱区的二次伤害。为预防此类工程事故发生,提高非开挖钻进安全性,研究生态脆弱区岩体裂隙特征、分析其变形机理显得尤为必要。

工程中对于岩体裂隙分析常使用野外勘探结合数据统计分析以及基于数字图像的表征模拟2类方法^[3-6],但由于山体穿越工程地质条件复杂、外界干扰因素较多,仅通过前期勘察对其裂隙结构发育特征进行准确分析十分困难,故需在钻进期间对岩体裂隙的特征进行补充研究。目前在对岩体破坏程度较低的前提下,主要采用的方法有:CT扫描技术、电镜扫描结合算法及 Monte Carlo 理论、摄影测量法。CT扫描技术结合三维重建、机器算法、三轴实验等能够对岩体中的特征结构进行定量描述与分析,但此类方法在复杂场地中难以快速获取信息,故而在工程施工中应用受限^[7-12]。电镜扫描结合机器算法、Monte Carlo 理论能够对二维图像中岩体裂隙自动识别,可提取处理复杂裂隙数据,但其耗时较长且需要大量对应裂隙数据用于机器训练^[13-16],成本较高,难以得到普遍应用。近景摄影测量技术能够结合三维建模获取更详实且便于保存的裂隙几何信息^[17-28],并且相对其他常用方法而言具有经济、便捷的优点,成为目前裂隙分析研究的重点方向。

1 岩体裂隙发育特征分析

本文选取现场钻遇地层2块代表性样品为研究对象。经测量,样品A尺寸约为17 cm×10 cm×6 cm,泛玻璃光泽,条痕为黑色、黑褐色,呈条带状结

构,向同一方向延伸。其节理裂隙垂直层理面不均匀发育,裂隙面多组呈斜交状,具有清晰的阶梯状断口以及棱角状断口。样品B尺寸约为31 cm×11 cm×14 cm,岩体硬度大但裂隙纵横分布,较大裂隙被矿物充填,该类岩体在工程中易发生漏失现象。样品实物见图1。

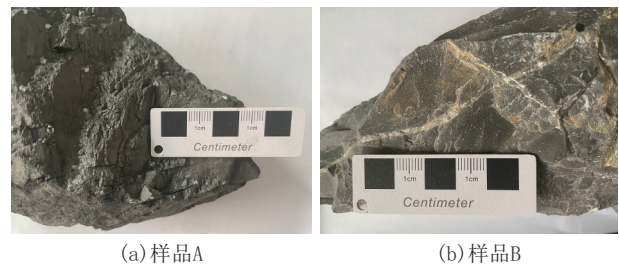


图1 样品标本

岩体样品A岩体裂隙发育、无充填、连通性好,有明显裂隙12条,其中最长的为A-9号裂隙,长42 mm;平均宽度最大的为A-10号裂隙,宽1.2 mm;面积最大的为A-9号裂隙,面积29.4 mm²。此外样品A中有4个阶梯状断口清晰可见,大致面积分别为1184、720、260、324 mm²。岩体样品B岩体裂隙发育、存在充填、连通性好,有明显裂隙9条,其中长度、面积最大的均为B-1号裂隙,该裂隙长112.7 mm,面积为315.56 mm²,已被石英、长石等矿物充填。测定的裂隙参数详见见表1。

将三维模型重建裂隙与对应裂隙参数进行对比,能够判定模型准确性。

2 岩体三维模型构建

本文通过 PhotoModeler Scanner (PMS) 软件,从照片中提取出测量数据,并完成密集点云和3D模型的建立。为满足PMS软件对输入图像分辨率的要求,本文输入设备使用镜头可变焦距范围为18~135 mm的 Canon Eos 7D单反相机,并采用19点的

表1 样品主要裂隙参数

裂隙编号	长/mm	平均宽/mm	面积/mm ²
A-1	14	0.4	5.6
A-2	32	0.9	28.8
A-3	21	0.5	10.5
A-4	7	0.1	0.7
A-5	26	0.3	7.8
A-6	15	0.2	3
A-7	13	0.2	2.6
A-8	18	0.1	1.8
A-9	42	0.7	29.4
A-10	16	1.2	19.2
A-11	14	0.7	9.8
A-12	8	0.4	3.2
B-1	112.7	2.8	315.56
B-2	20.3	0.6	12.18
B-3	32.4	0.5	16.20
B-4	22.3	0.1	2.23
B-5	89.8	0.3	26.94
B-6	68.9	0.8	55.56
B-7	80.6	0.2	16.12
B-8	36.7	0.1	3.67
B-9	55.2	0.4	22.08

十字对焦模式。该输入设备的有效像素可达1800万,最高分辨率为 5184×3456 。

2.1 近景摄影测量技术基本原理

为实现岩体三维模型的快速精准构建,本文采用近景摄影测量技术(Close-range Photogrammetry)识别图像信息,建立岩体模型。技术依据立体像交汇、图像匹配、图像数值提取等科学理论方法,对图像中2D标记点、3D对象点、智能点、线、轮廓、表面和形状进行识别,经过特征定位、全局优化算法(GOA)、自检校3阶段获得包含三维坐标、颜色等参数的点云,利用点云特征参数提取密集区面创建近似三维模型。

2.2 近景摄影测量设备及检校

依据样品尺寸、图像清晰度、特征点及定位点覆盖率等因素,对于相机的焦距选取18、35 mm两焦距进行比较筛选。通过相机检校准确获取相机参数值,从4个对应呈直角的方向用3个不同角度的相机(正方、绕相机摄影光轴向左旋转 90° 、绕相机摄影光轴向右旋转 90°)分别拍摄12张标定图板图像。图

像导入PMS中分析后所获参数可导入系统并自动应用于岩体图像分析。各自经过3次迭代处理、2阶段加工调整,得到检校参数如表2所示。

表2 佳能EOS-7D相机检校参数

参数	检校值/mm	检校值/mm
焦距(f)	18	35
主距(f)	19.1019	35.333209
图像大小(像素)	W:5184	W:5184
	H:3456	H:3456
成像面大小	W:22.6835	W:22.7176
	H:15.1130	H:15.1130
像主点	X:11.3535	X:11.2107
	Y:7.3965	Y:7.5944
径向畸变	K1:5.286e-004	K1:-7.940e-005
	K2:-9.304e-007	K2:-2.501e-007
	K3:0.000e+000	K3:0.000e+000
偏心畸变	P1:-8.254e-005	P1:0.000e+000
	P2:-6.507e-005	P2:0.000e+000

选取18 mm焦距时,标定点大部分为亚像素,所获结果精度较高,最大残差 >1.00 像素(点142, 3.30),平均照片点覆盖率为83%,存在各图像之间相机分辨率或焦距不匹配问题。选取35 mm焦距时,标定点大部分为亚像素,所获结果精度较高,最大残差 >1.00 像素(点12, 4.27),此外无其他问题,平均照片点覆盖率为83%,可达到软件覆盖率要求。综上,结合样品与软件导出分析,实验相机焦距最终选取35 mm。

相机检校试验是图像处理中消除相机个体缺陷带来误差的重要步骤。进行实验前,需要对非量测型相机进行准备处理,包括对其径向、偏心畸变误差进行试验分析,以及获取相机的参数等信息并存储于软件中。

2.3 图像数据获取

在试验现场,取边长为65 cm的正方形无反光白纸作为幕布,于幕布上设定3个内径0.5 cm、外径1 cm的标记点,标记点确立二维坐标系 XOY ,轴上两定位标记点间隔距离分别为30、40 cm。铺放幕布于平坦地面,样品置于 XOY 坐标轴范围内。

实验全程采用同一台相机进行拍摄,过程中全程开启闪光灯模式,拍摄方法主要分为2种:手持拍摄法、支架拍摄法。将相机焦距调至35 mm,以垂直

OX轴方向为正方向、样品为圆心,逆时针/顺时针旋转固定角度,每次旋转拍摄1张图像,获取图像12张以上,见图2。重复上述步骤6次。

上述6组图像中,选用支架拍摄法的2组得到的图像畸变情况较少,但是特征点的覆盖率不高;选

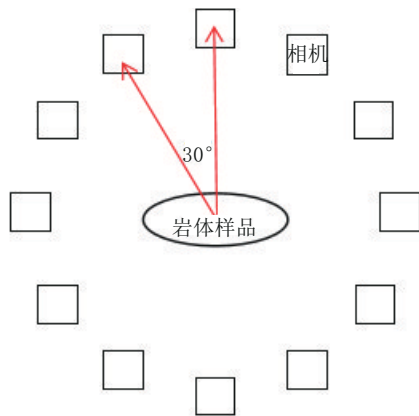


图2 拍摄示意

用手持拍摄法的4组,因拍摄过程中需手动固定焦距,所得图片特征点覆盖率高,但是少量图片存在抖动情况。标记点的扭曲变形根据椭圆形圆心定位准则可进行图像处理,对图像提取分析的影响不太严重;但图像不清晰且标记点不在拍摄范围内的情况会对后期处理产生严重影响。综上,对比图像平均覆盖率与清晰度,剔除不合格图像,最终选取逆时针方向手持拍摄法图像。见图3。

为减小由于岩体的玻璃光泽导致拍摄图像存在反光杂点对图像识别的影响,本实验对图像进行了手工标记特征点处理。首先对第一张图像使用Sub-pixel Target模块按一定顺序对特征位置点进行标记,并对所有标记点进行特征关联分析;然后依次标记剩余图像的特征点,直至所有图像标记完成(图4)。为减小由于拍摄环境因素导致图像存在标志岩屑、粉尘等物体的微小杂点对于模型建立的影响

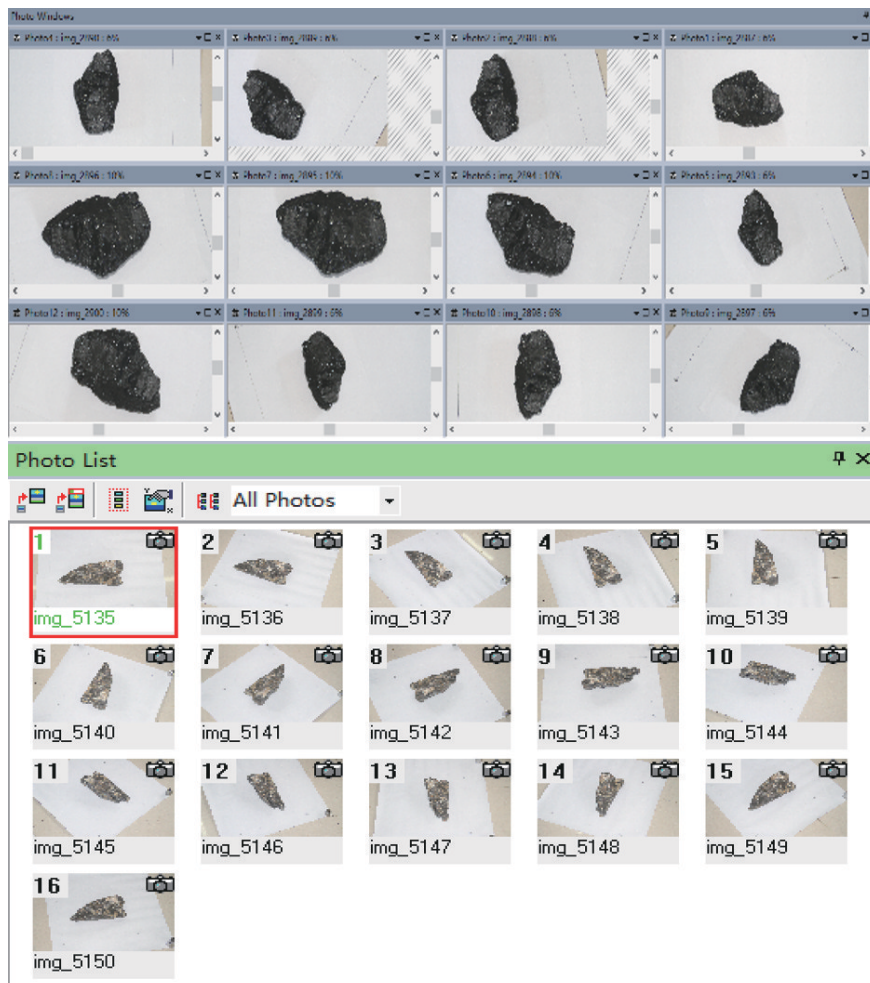


图3 拍摄样品图像组

响,打开点视图的所有可视化选项,将自动识别所提取的无效点进行剔除。

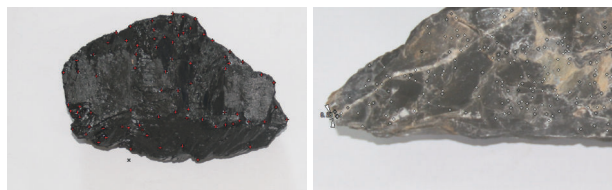


图4 特征点亚像素标记

3 三维模型构建及研究结果分析

3.1 构建三维模型

将图像去杂点处理完成后,PMS软件对图像进行多次迭代处理,生成三维图像(3D view),在三维视图的基础上,将进行标记处理的3个定位标记点数据导入外部几何资源管理器(External Geometry Explorer)模块,从而在PMS软件中建立网格坐标系(图5)。经过坐标建立后的三维模型可以在

auto CAD中打开,并实现测量与修改。



图5 坐标系

三维模型构建以样品A为例,具体分为以下3步:(1)通过各图像特征点分析匹配,实现点云图的建立(图6a);(2)根据曲面的不规则性,对三维点云网进行三角网格的划分(图6b),可生成具备空间坐标的三维标高模型图(图6c、d);(3)生成具备纹理的3D模型(图6e)。样品B同样处理,得到模型(图6f)。

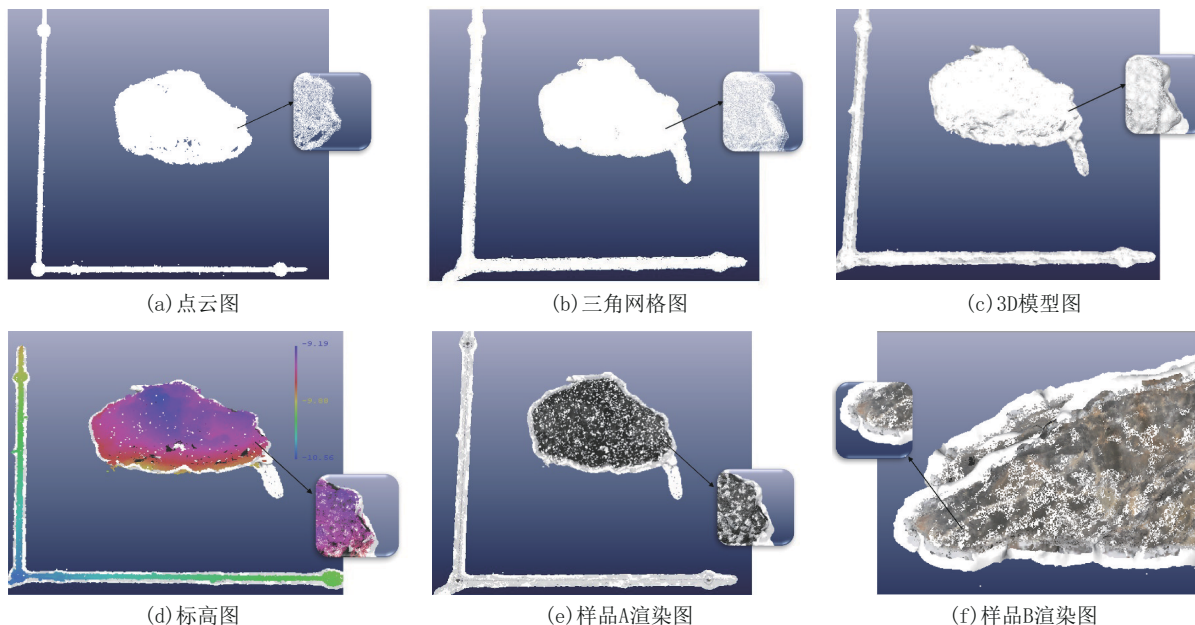


图6 岩体样品3D模型

3.2 研究结果分析

从三维模型可识别出样品A存在12条裂隙以及4个断口,样品B存在9条裂隙(图中黄线条为裂隙标识),对应裂隙编号与表1一致;红色线条组成面为断口。模型中裂隙、断口标记编号与样品标记编号一致,根据模型比例可计算得到样品裂隙的定量数据与测量数据一致(图7)。

4 结论

(1)基于近景摄影测量技术应用PMS平台,实现了岩体裂隙发育特征的三维建模,采用图像获取、处理和可视化三维信息的方法,实现样品表面三维坐标参数的运算。通过实测与对三维模型分析结果可知,选取大焦距针对小范围局部岩体在目标对象较小的情况下仍可以精确地恢复三维信息。

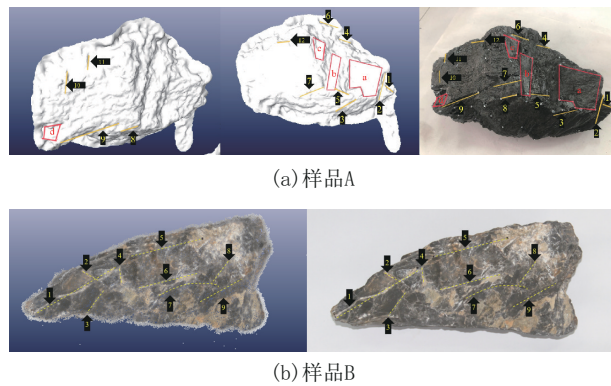


图7 裂隙、断口对比

(2)本文通过对岩体的拍摄图像识别,获取高密度点云的三维坐标信息,进而分析岩体裂隙的发育特征。对于岩体较明显且易对施工产生影响的裂隙,经过畸变处理、杂点剔除步骤后,可实现清晰识别及精准建模。但点云获取仍存在杂点影响,后续研究可从改善室内实验环境以及再开发PMS软件两方面来消除。

参考文献:

- [1] 黄智刚.长距离曲线岩石顶管技术用于供水管道建设[J].中国给水排水,2020,36(20):39-44.
- [2] 梁伟,王飞,薛晓辉.穿越浅埋偏压长大斜坡体进洞施工技术[J].施工技术,2011,40(23):57-60.
- [3] 张杨,宁立波,尹峰,等.岩体裂隙率野外测量及计算方法的研究[J].工程地质学报,2020,28(1):10-18.
- [4] Z. H. Cheng, B. Liu, Q. L. Zou, et al. Analysis of spatial-temporal evolution of mining-induced fracture field: A case study using image processing in the Shaqu Coal Mine, China[J]. Natural Resources Research, 2020,29(3):1601-1615.
- [5] Z. Q. Tang, C. Zhai, Q. L. Zou, et al. Changes to coal pores and fracture development by ultrasonic wave excitation using nuclear magnetic resonance[J]. Fuel, 2016,186:571-578.
- [6] 莫云龙,李宏艳,孙中学,等.原生裂隙结构对煤岩物理力学特性影响分析[J].煤炭科学技术,2020,48(5):25-34.
- [7] 付裕,陈新,冯中亮.基于CT扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J].煤炭学报,2020,45(2):568-578.
- [8] 李相臣,陈德飞,康毅力,等.基于CT扫描的煤岩孔裂隙表征[J].煤田地质与勘探,2016,44(5):58-62,70.
- [9] 魏国营,王泽华,贾天让.三轴压缩蠕变条件下煤岩裂隙演化规律试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(2):15-21.
- [10] 王长盛,翟培城,王林森,等.基于Micro-CT技术的煤岩裂隙精细表征[J].煤炭科学技术,2017,45(4):137-142,55.
- [11] 王刚,沈俊男,褚翔宇,等.基于CT三维重建的高阶煤孔裂隙

- 结构综合表征和分析[J].煤炭学报,2017,42(8):2074-2080.
- [12] 赵小平,裴建良,戴峰,等.裂隙岩体内3维裂隙体的分形描述[J].四川大学学报(工程科学版),2014(6):95-100.
- [13] 夏红欣,屈争辉,卢晨刚,等.碎裂煤二维显微裂隙自动识别及信息提取[J].煤田地质与勘探,2017,45(2):75-79.
- [14] Cheng Guoxi, Jiang Bo, Li Ming. Quantitative characterization of fracture structure in coal based on image processing and multifractal theory [J]. International Journal of Coal Geology, 2020,228:103566.
- [15] 李祥春,高佳星,张爽,等.基于扫描电镜、孔隙-裂隙分析系统和气体吸附的煤孔隙结构联合表征[J].地球科学,2022,47(5):1876-1889.
- [16] 宫伟力,李晨.煤岩结构多尺度各向异性特征的SEM图像分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2681-2689.
- [17] 刘春,王宝军,施斌,等.基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J].岩土工程学报,2008,30(9):1383-1388.
- [18] 王凤艳,陈剑平,杨国东,等.基于数字近景摄影测量的岩体结构面几何信息解算模型[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(6):1839-1846.
- [19] Sofia Catalucci, Roberto Marsili, Michele Moretti, et al. Comparison between point cloud processing techniques[J]. Measurement, 2018,127:221-226.
- [20] Haekyung Park, Dongkun Lee. Comparison between point cloud and mesh models using images from an unmanned aerial vehicle[J]. Measurement, 2019,138:461-466.
- [21] 兰徽.浅谈数字近景摄影测量技术在三维重建中的应用[J].福建建材,2021,245(9):24-26.
- [22] F. L. Lu, C. C. Fu, G. Y. Zhang, et al. Convolution neural network based on fusion parallel multiscale features for segmenting fractures in coal-rock images[J]. Journal of Electronic Imaging, 2020,29(2):13.
- [23] S. Manzoor, S. Liaghat, A. Gustafson, et al. Establishing relationships between structural data from close-range terrestrial digital photogrammetry and measurement while drilling data [J]. Engineering Geology, 2020,267:10.
- [24] 张春雷,李太任,熊琦华.煤岩结构与煤体裂隙分布特征的研究[J].煤田地质与勘探,2000(5):26-30.
- [25] 关蕾蕾,张绍和,李跃华,等.密集曲面建模技术在深基坑位移监测中的应用[J].人民长江,2015,46(11):76-79.
- [26] 高旭光,刘辉.建筑裂缝近景摄影测量法观测与空间模型建立[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(5):646-652.
- [27] 刘春,王宝军,施斌,等.基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J].岩土工程学报,2008,30(9):1383-1388.
- [28] 周生伟,孙平贺,苏卫锋,等.玄武岩纤维堵漏体系在高海拔非开挖钻进中的应用研究[J].钻探工程,2022,49(3):139-145.

(编辑 周红军)