

基于全景成像技术的水平孔电子岩心获取与解译

李冰乐^{1,2}, 吴金生^{1,2*}, 房勇^{1,2}, 庄生明^{1,2}, 罗显梁^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局智能钻探技术创新中心, 四川 成都 611734)

摘要:塔什达坂北锂矿区位于昆仑—阿尔金山脉, 矿区地质构造复杂, 高寒深切割地区, 地形落差大, 钻探设备搬迁困难。该矿区矿层产状陡倾, 为贯彻落实“绿色勘查”理念, 钻探施工主要采用水平和近水平定向孔, 减少设备搬迁, 保护生态环境。为克服取心钻探过程中因地层破碎、取心不连续、岩心编录时人为差异等原因导致钻取的岩心无法准确获取地层产状、裂隙宽度、软弱夹层等地层信息的问题, 采用自主研发的多参数全方位无缆测井系统对水平孔进行钻孔全景成像, 攻克了水平孔全景成像地层结构面计算方法, 采用无缆存储和钻杆推送的方法, 克服了测试仪器在水平深孔中无法下放的问题。在下放过程中获取钻孔孔壁高清、连续、完整、原状的照片, 通过图像处理技术形成“电子岩心”, 从中可以清晰直观地获取到地层岩性、裂隙、软弱夹层、岩溶和岩层厚度等信息, 准确测算出地层结构面参数, 实现了精细勘查, 提高了钻探施工质量, 有效支撑了找矿突破数字化转型。

关键词:绿色勘查; 水平孔; 钻孔全景成像; 电子岩心; 地层结构面参数

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)06-0122-06

Acquisition and interpretation of horizontal hole electronic cores based on panoramic imaging technology

LI Bingle^{1,2}, WU Jinsheng^{1,2*}, FANG Yong^{1,2}, ZHUANG Shengming^{1,2}, LUO Xianliang^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Technology Innovation Center for Intelligent Drilling, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The Northern Tashidaban Lithium Mining Area is located in the Kunlun-Altyin Mountains. Characterized by complex geological structures, it lies in an alpine region with deeply incised terrain and large topographic relief, making the relocation of drilling equipment extremely difficult. The ore layers in this mining area have steep dips. To implement the concept of “green exploration”, horizontal and near-horizontal directional boreholes are mainly used in drilling operations to reduce equipment relocation and protect the ecological environment. To address the issue that core samples obtained during coring drilling cannot accurately capture formation information (such as formation attitude, fracture width, and weak interlayers) due to factors like fractured formations, discontinuous coring, and human differences in core logging, a self-developed multi-parameter all-directional cableless logging system was adopted for full-hole panoramic imaging of horizontal boreholes. This study overcame technical challenges by developing a calculation method for formation structural planes based on horizontal borehole panoramic imaging. Additionally, a cableless storage and drill pipe pushing method was used to solve the problem that testing instruments cannot be

收稿日期: 2025-03-07; 修回日期: 2025-05-16 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.016

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“西部地区复杂地层绿色钻探技术支撑”(编号: DD20240123); 深地国家科技重大专项课题“反循环钻探取样测试一体化技术与装备研发”(编号: 2024ZD1003101); 四川省重点研发项目“高原山区便携式模块化智能钻探装备研发与应用”(编号: 2023YFG0071)

第一作者: 李冰乐, 男, 汉族, 1998年生, 助理工程师, 地质资源与地质工程专业, 硕士, 主要从事地质岩心钻探相关研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 1508021804@qq.com。

通信作者: 吴金生, 男, 汉族, 1971年生, 教授级高级工程师, 地质工程专业, 博士, 主要从事深孔复杂地层钻探技术及科学钻探研究与开发工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 542768373@qq.com。

引用格式: 李冰乐, 吴金生, 房勇, 等. 基于全景成像技术的水平孔电子岩心获取与解译[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 122-127.

LI Bingle, WU Jinsheng, FANG Yong, et al. Acquisition and interpretation of horizontal hole electronic cores based on panoramic imaging technology[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 122-127.

lowered in deep horizontal boreholes. During the lowering process of the logging system, high-definition, continuous, complete, and in-situ photos of the borehole wall were acquired. Through image processing technology, “electronic cores” were generated, from which information such as formation lithology, fractures, weak interlayers, karst features, and rock layer thickness can be clearly and intuitively obtained. This enables accurate measurement and calculation of formation structural plane parameters, realizing detailed exploration, improving the quality of drilling operations, and effectively supporting the digital transformation of mineral exploration breakthroughs.

Key words: green exploration; horizontal hole; panoramic borehole imaging; electronic core; stratigraphic structural plane parameters

0 引言

地质岩心钻探作为矿产资源开发的先导环节,其技术精度与效率直接影响找矿突破的进程。传统地质岩心钻探虽能获取地下岩层样本,但受限于取心率不足(通常难于达到100%)、岩心原位信息失真等问题,无法形象感知地层的裂隙、构造、软弱夹层、产状等信息^[1-2]。钻孔全景成像技术作为地质勘查领域的革命性手段,有效弥补了传统岩心钻探的局限性^[3]。经过多年的发展,钻孔全景成像技术从最初的只能“看”,发展到如今既能“看”还能“算”,实现了从“定性观察”到“定量测算”的跨越^[4-11]。钻孔全景成像采集钻孔孔壁高清、连续、完整、原状的照片,通过图像处理拼接形成“电子岩心”,再利用算法在“电子岩心”上提取地层结构面的特征参数。与实物岩心相比,“电子岩心”所能反映的地层信息更丰富、更准确,同时也更易保存,显著提升了地质解译的客观性与可追溯性。因此钻孔全景成像技术在地质岩心钻探领域逐步推广使用^[12-14]。

在塔什达坂北锂矿区找矿突破行动中,因矿区属高寒深切割的地区,地形落差大,生态环境脆弱,交通条件极差,且地层产状陡倾,因此采用水平定向钻探技术施工水平孔和近水平孔,显著降低了施工成本,保护了生态环境。同时利用探矿工艺研究所自主研发的多参数全方位无缆测井系统进行钻孔全景成像,是国内首次将钻孔全景成像技术应用在找矿突破水平孔钻探施工中,并提取出地层结构面参数,实现了钻孔测试与绿色勘查融合示范应用^[15]。

1 项目概况

1.1 矿区地质概况

新疆阿尔金山塔什达坂北锂矿区位于新疆巴州若羌县。该矿区位于高寒高海拔山区,海拔高度3200~3800 m,地形落差大,沟谷纵横,为典型的深切流水侵蚀地貌。矿区出露地层主要为古元古

界阿尔金岩群和中元古界长城系扎斯勘赛河组、贝壳滩组、蓟县系金雁山岩组,主要岩性有片麻岩、变粒岩、片岩、大理岩。矿区区域构造运动活跃,岩浆活动频繁,褶皱断裂发育,地层情况较为复杂。

1.2 钻孔施工概况

矿区内 ρ_1 矿脉地表出露脉长约534 m,脉宽1~9 m,平均宽度约1.7 m,产状 $300^\circ\angle 65^\circ$ 。矿体主要矿物为锂辉石和锂云母,地表矿化分布不均,局部较为富集。如图1所示,矿脉地表出露在山腰上,与山沟地表高差在100 m以上,山体地形陡峭,修建道路难度大,耗时长,容易对周边脆弱的生态环境造成严重破坏。且矿脉产状陡倾,若施工竖直孔则钻孔与矿脉遇层角较小,不利于估算矿体规模,遂决定施工水平定向孔T03ZK01。

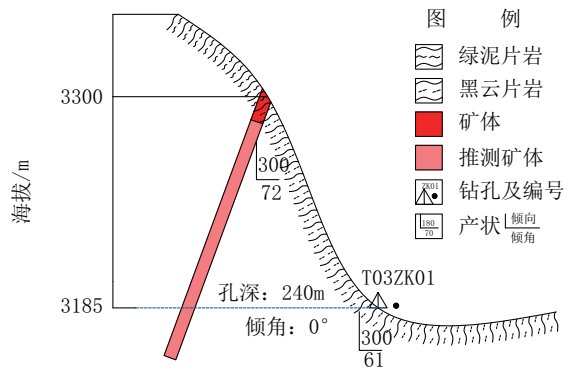


图1 T03ZK01钻孔设计示意

Fig.1 Schematic diagram of drill hole design for T03ZK01

T03ZK01孔设计孔深260 m,终孔孔深264 m,钻孔采用三开结构,开孔孔径 $\Phi 110$ mm,终孔孔径 $\Phi 76$ mm。采用绳索取心+水力水平推送内管相结合的取心方案,搭配适用于水平定向钻进绿色防塌冲洗液进行钻进施工,钻进效率高,全孔岩心采取率高。T03ZK01孔在孔深177 m处钻遇了 ρ_1 矿脉,钻取了约4 m长的矿层岩心,但因取心不连续、岩心破碎和扰动等原因,无法有效获取矿脉的产状

和厚度。因此采用自主研发的多参数全方位无缆测井系统进行钻孔孔壁全景成像,并计算矿层的产状和厚度。

2 多参数全方位无缆测井系统

多参数全方位无缆测井系统是中国地质科学院探矿工艺研究所针对工程勘察超深水平定向钻孔研制的钻孔测试仪器,该系统采用模块化的设计,可一次性完成钻孔全景成像、声波测试、水压力测试、地温测试、井斜方位测试和岩性综合测试,也

可以根据需要选择测试模块进行钻孔测试^[16]。本次在塔什达坂北锂矿区钻探施工中,根据地质要求,采用该测井系统中钻孔全景成像仪器模块对T03ZK01孔进行钻孔测试。为了验证钻孔全景成像仪的可靠性和精度,仪器现场应用前,在室内用亚克力管模拟钻孔孔壁进行测试试验,试验结果表明该仪器可靠性高,测量误差在技术要求范围内。

2.1 钻孔全景成像仪器组成

钻孔全景成像仪主要由图像采集模块和深度采集模块组成,其主要技术指标如表1和表2所示。

表1 图像采集模块技术指标

Table 1 Technical specifications of the image acquisition module

仪器最大 外径/mm	最大承受压 力高/MPa	工作温 度/℃	连续工作 时长/h	内存容 量/G	数据接口	方位角测 量范围/(°)	倾角测量 范围/(°)	横滚角测量 范围/(°)	RB角测 量范围/(°)
45	60	-10~125	≥24	64	USB	0~360	±90	±180	±180

表2 深度采集模块技术指标

Table 2 Technical specifications of the depth acquisition module

连续工作 时长/h	深度测量 范围/m	测量精 度/m	内存容 量/G	数据 接口	显示 精度
≥24	0~10000	0.001	8	USB	0.01

图像采集模块是将视频采集单元、姿态采集单元、数据存储单元、电池管理单元、主处理器、通讯接口等集成在如图2所示的金属管内,主要功能是进行孔壁图像和钻孔姿态参数采集、储存。深度采集模块由带有光电编码器的导向轮、数据线和地面深度采集存储箱组成,主要功能是记录下放图像采集模块时,仪器在孔内的深度和下放时间。



图2 钻孔全景成像仪

Fig.2 Omnidirectional borehole imaging device

2.2 钻孔全景成像仪器工作原理

钻孔全景成像仪的基本工作原理如图3所示,测试过程中,用钻杆将图像采集模块推送至孔内,采集钻孔孔壁高清图像文件与全方位参数文件,深

度采集模块记录仪器下放深度,生成深度数据文件。首先由图像信息处理软件将全方位参数文件与深度数据文件融合成图像信息文件,再通过视频数据拼接软件按照两个模块时间计时器计时一致将图像文件与图像信息文件进行拼接组合,形成钻孔全景成像测试视频文件,再利用图像数据处理分析软件解析视频文件,生成“电子岩心”,测算地层结构面参数,最终得到钻孔全景成像测试结果。

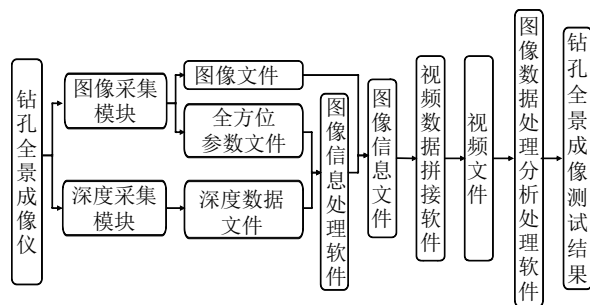


图3 钻孔全景成像仪工作原理

Fig.3 Working principle of the omnidirectional borehole imaging device

2.3 钻孔全景成像图像拼接方法

在进行视频数据拼接时,因仪器不居中等因素影响,会导致拼接的图像变形,因此在图像拼接前要先进行图像畸变纠正处理。如图4所示,在视频数据拼接软件中加入了居中调节和拼接区域调节,对图像进行调整,便于后续图像拼接。

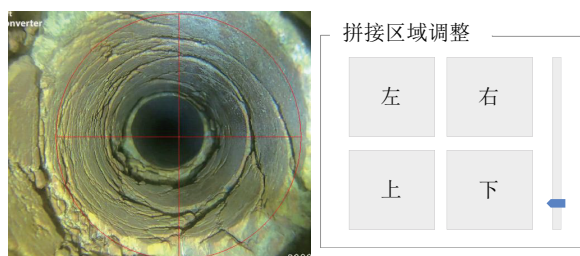


图4 图像畸变纠正处理

Fig.4 Image distortion correction processing

图像拼接方法如图5所示,在调整好拼接区域后,将该区域的图像按深度信息裁剪成1mm的环状孔壁图像,然后将环状的图像在重力高边位置(水平孔孔顶位置)裁开形成条状的钻孔图像,将条状的钻孔图像按照深度信息进行叠加,拼接形成钻孔孔壁高清展开图。在拼接图像时,受深度影响,可能会出现重复的图像叠加,软件会对拼接图像的每帧的像素点进行计算,剔除重复的像素,用下一帧的图像进行代替,保证了图像质量。

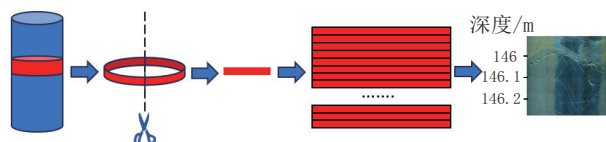


图5 钻孔全景成像仪图像拼接方法

Fig.5 Image mosaic method for omnidirectional borehole imaging device

2.4 地层结构面特征提取方法

传统结构面提取方法是人为在图像上选取3个目标点或是选择最高点和最低点来计算结构面产状,若结构面存在一定宽度或是结构面分界线不清晰,可能导致较大的计算误差。为了提高钻孔全景成像仪的使用范围,提出了一种适合任意倾角钻孔的图像结构面特征提取方法。

首先,根据钻孔孔壁三维图像中提取至少5个第一基准点,然后在孔壁展开二维图像上,获取第一基准点的坐标,根据第一基准点的坐标进行曲线拟合,计算出拟合函数。然后根据拟合函数构造出3个第二基准点,计算出第二基准点的平面法向量。基于平面法向量和第二基准点,对平面方程进行求解,得到平面的倾向和倾角。最后根据测量得到的钻孔的方位角和倾角,经过空间变换和数据转换,得到结构面的产状。

3 钻孔全景成像仪器现场应用

ρ_1 矿脉施工的水平孔T03ZK01,钻取了约4m的矿层岩心,岩心锂辉石含量高,品位好,但由于取心不连续、岩心破碎,无法确定矿层的产状,不利于估算矿体规模,因此采用钻孔全景成像仪获取钻孔孔壁高清图像,获取矿层准确的产状等信息。

3.1 钻孔全景成像仪器数据采集

取心钻进结束后,用清水换浆洗孔,待孔口返出的浆液清澈时提钻,卸下钻头钻具。打开深度采集模块和图像采集模块电源开关,同步计时器时间。利用变径接头将图像采集模块和钻杆连接,做好下放准备。将深度采集模块中的导向轮固定在孔口管上,然后搭在钻杆上,导向轮可随着钻杆的起放滚动,带动光电编码器转动,记录孔深数据(图6)。安装导向轮后,下放钻杆,缓慢向孔内推送图像采集模块,采集钻孔孔壁高清图像。为保证图像采集清晰准确,下放速度控制在2~3 m/min。

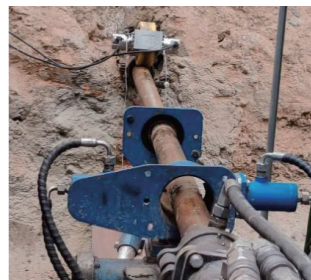


图6 孔深数据采集

Fig.6 Borehole depth data acquisition

3.2 图像数据处理

采集完成后将图像采集模块提出钻孔,图像文件、全方位参数文件、深度数据文件全部导出在电脑上,利用测试软件将深度数据、全方位参数数据和图像数据拼接在一起,得到如图7所示的钻孔全景成像测试视频文件。

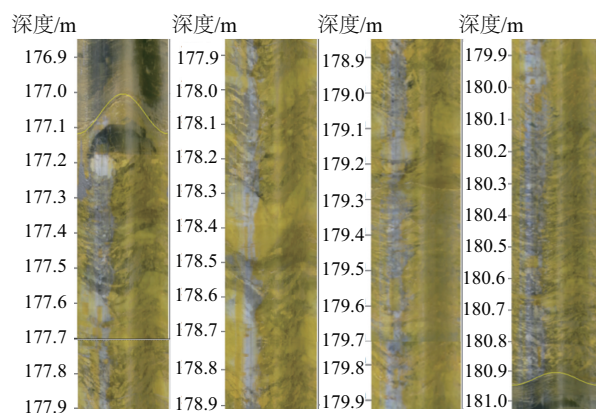
利用测试软件将获得的测试视频文件中的钻孔孔壁展开,得到T03ZK01孔全孔段孔壁照片,形成了T03ZK01孔“电子岩心”文件。图8所示是T03ZK01孔 ρ_1 矿脉段清晰直观的孔壁图像,图像中孔壁上黄色薄膜是洗孔未清洗掉的冲洗液薄膜。

根据孔壁展开图像,提取 ρ_1 矿层与上下地层接触面的产状(图9),为估算矿体规模提供可靠的依据,同时也提取了矿层中179.2~179.3 m处裂隙结构面特征(图10)。与传统结构面特征测量方式相



图7 钻孔全景成像测试视频文件

Fig.7 Video file of drilling panoramic imaging test

图8 T03ZK01孔 ρ_1 矿层段孔壁展开图像Fig.8 Unfolded image of the hole wall in the ρ_1 ore layer section of Hole T03ZK01

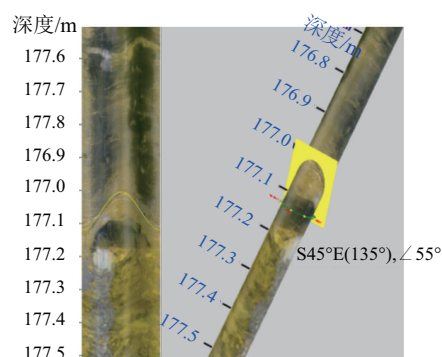
比,通过孔壁图像测算地层结构面特征更快、更方便、更贴近其真实赋存状态。

4 结论

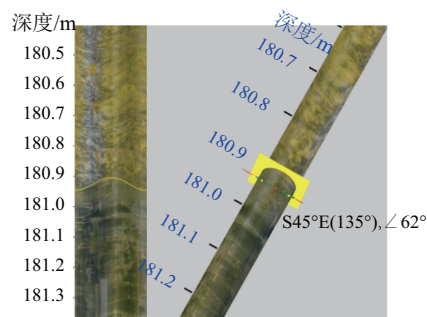
(1)在新疆昆仑—阿尔金塔什达坂北地区找矿突破行动中施工水平孔,并采用自主研发的多参数全方位无缆测井系统进行钻孔测试,减少了道路修建和设备搬迁,极大程度上降低了施工成本,提高了钻探施工效率和施工质量,减少了对周边环境的扰动破坏,推动了绿色勘查、精准勘查和精细勘查技术示范应用。

(2)首次将钻孔全景成像技术应用在找矿突破水平孔钻孔测试中,通过自主研发的钻孔全景成像仪器,获取了该水平孔清晰、连续、完整、原状的钻孔孔壁图像,形成了“电子岩心”照片,快速、准确地提取出地层结构面的特征参数,推动了找矿突破数字化转型。

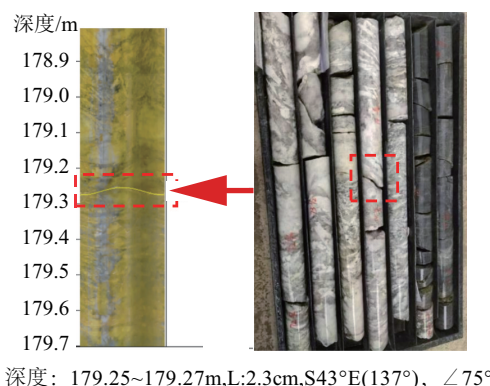
(3)钻孔全景成像仪采用了一种新的地层结构面特征提取方法,利用尽可能多的结构面上原始点



(a) 矿层与上部地层接触面产状



(b) 矿层与下部地层接触面产状

图9 ρ_1 矿层与上下地层接触面产状Fig.9 Attitude of the contact surfaces between the ρ_1 ore layer and adjacent formations图10 ρ_1 矿层中裂隙结构面特征提取Fig.10 Extraction of fracture structural surface features in the ρ_1 ore layer

的信息,减少了传统提取方法中系统误差和人为误差,测算出来的结构面特征更接近其原始赋存状态。采用机械推送代替人工推送,解决了钻孔电视仪器在深水平孔中的下放问题。

(4)钻孔全景成像技术对洗孔质量有严格要求,洗孔后需孔壁无明显泥皮、浮渣,避免遮挡摄像视野。后续研究中考虑将声波成像技术与光学成像技术相结合,可更精准地识别出地层的微小裂

隙,并引入机器学习和人工智能技术,提高自动识别和分析地质特征的准确率和效率。

(5)洗孔会严重影响孔壁的稳定性,因此该技术在水敏性强、松散破碎等复杂地层中推广应用难度大,需配合无固相的成膜防塌冲洗液使用。

参考文献(References):

- [1] 谭显江,张建清,刘方文,等.高清数字钻孔电视技术研发及其在水电工程中的应用[J].长江科学院院报,2012,29(8):62-66.
TAN Xianjiang, ZHANG Jianqing, LIU Fangwen, et al. R&D of high-resolution digital borehole TV technology and its application in hydropower project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(8): 62-66.
- [2] 赵宪堂.钻孔电视成像系统的研制及其应用[D].青岛:山东科技大学,2014.
ZHAO Xiantang. The development and application of borehole television imaging system [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2014.
- [3] 曹茂永,高炜,邓兆鹏,等.基于前视钻孔摄像提取全景图像的方法[J].郑州大学学报(理学版),2017,49(2):78-82.
CAO Maoyong, GAO Wei, DENG Zhaopeng, et al. Extraction of panoramic images based on forward borehole camera[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 78-82.
- [4] 王川婴,葛修润,白世伟.数字式全景钻孔摄像系统研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):398-403.
WANG Chuanying, GE Xiurun, BAI Shiwei. Study of the digital panoramic borehole camera system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 398-403.
- [5] 王川婴,葛修润,白世伟.数字式全景钻孔摄像系统及应用[J].岩土力学,2001,22(4):522-525.
WANG Chuanying, GE Xiurun, BAI Shiwei. The digital panoramic borehole camera system and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 522-525.
- [6] 于景良,王德福,孙鼎俊.全景式孔内彩色电视系统的研制及其应用[J].大坝观测与土工测试,1996(4):30-32,38.
YU Jingliang, WANG Defu, SUN Dingjun. The development of panoramic borehole color TV system and its application[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1996(4): 30-32, 38.
- [7] 秦英译,王川婴.前视井下电视和数字钻孔摄像在工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2834-2840.
QIN Yingyi, WANG Chuanying. Axial downhole TV and digital optical borehole imaging and their engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2834-2840.
- [8] 葛修润,王川婴.数字式全景钻孔摄像技术与数字钻孔[J].地下空间,2001,21(4):254-261.
GE Xiurun, WANG Chuanying. Digital panoramic borehole camera technique and digital borehole [J]. Underground Space, 2001, 21(4): 254-261.
- [9] 王川婴, KTim L. 钻孔摄像技术的发展与现状[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3440-3448.
WANG Chuanying, KTim L. Review of borehole camera technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3440-3448.
- [10] 邹先坚,王川婴,宋欢.岩体内摄像视频高精度快速成图方法研究[J].工程科学与技术,2021,53(4):158-167.
ZOU Xianjian, WANG Chuanying, SONG Huan. A high-precision and fast image forming method for borehole camera video of rock mass [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 158-167.
- [11] 周旭.基于岩心定向和OTV/ATV技术的露天边坡岩体稳定性研究[J].钻探工程,2025,52(1):145-151.
ZHOU Xu. Stability study of open-pit slope rock mass based on oriented core and OTV/ATV survey [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 145-151.
- [12] 邹先坚,王川婴,韩增强,等.钻孔图像特征分析与结构面区域划分方法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(1):88-94.
ZOU Xianjian, WANG Chuanying, HAN Zengqiang, et al. Borehole image characteristic analysis and structural planes partitioning method [J]. Journal of Tianjin University Science and Technology, 2018, 51(1): 88-94.
- [13] 李兰新.覆岩结构裂隙数字式全景钻孔摄像观测分析[J].中国煤炭,2018,44(6):42-45.
LI Lanxin. Digital panoramic borehole camera observation and analysis of overlying structure fractures [J]. China Coal, 2018, 44(6): 42-45.
- [14] 查恩来.钻孔电视成像技术在工程探测中的应用研究[D].长春:吉林大学,2006.
ZHA Enlai. Research on application of the television imaging log technique in the engineering test borehole [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [15] 吴金生,罗显梁,王子忠,等.水平定向钻探与综合测试技术研究及应用[J].钻探工程,2023,50(S1):200-204.
WU Jinsheng, LUO Xianliang, WANG Zizhong, et al. Research and application of horizontal directional drilling and comprehensive testing technology [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 200-204.
- [16] 房勇,钱锋,周策,等.水平孔多参数综合测试仪器研发与应用[J].钻探工程,2024,51(1):97-105.
FANG Yong, QIAN Feng, ZHOU Ce, et al. Development and application of multi-parameter integrated testing instrument for horizontal hole [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 97-105.

(编辑 王文)