

基于构造解析及孔内成像技术的以钻代槽绿色 勘查技术试验应用

渠洪杰^{1,2,3}, 卢 猛^{1,2}, 谭春亮^{1,2}, 冯跃文^{1,2}, 苏兴涛^{1,2}

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质调查局绿色钻探技术创新中心, 北京 100083; 3. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100)

摘要:以钻代槽是利用浅层钻探替代槽探工程,提高绿色勘查程度的一种工作方法。前人主要从钻探设备与取样工艺适用的角度,论证了该方法的有效性,并通过多个钻孔中标志层的识别与对比,获得孔内面状构造的倾向等产状数据。然而,多个钻孔势必会增加对环境的扰动,且在面对复杂的岩层及构造变形区时,存在因无法准确识别和对比标志层,而不能计算出产状的问题。构造解析与孔内成像技术能够提高以钻代槽的绿色勘查效果。在西秦岭辛家咀金矿勘查区,利用构造解析的方法,查明了与成矿作用有关的石英透镜体不同轴长的比例特征,为钻孔部署提供了遵循;在钻孔中实施了孔内成像技术试验,识别了孔壁岩性,测量了地层与石英脉的产状,其数据与临近出露的基岩一致。试验结果表明,基于构造解析与孔内成像技术的以钻代槽勘查新方法,相较于前人更多依赖钻探工程的以钻代槽,以较少的钻探工作量,获得了更为准确和丰富的数据,提高了绿色勘查的水平。另外,采用锂电池驱动的便携式电动钻机以更加轻便、更加安全和更加友好的性能,呈现出更加绿色的特点,具备推广应用的价值。

关键词:绿色勘查;以钻代槽;产状;构造解析;孔内成像;便携式电动钻机

中图分类号:P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)04-0103-08

Experimentation and application of green exploration by drilling instead of trenching based on structural analysis and borehole imaging technology

QU Hongjie^{1,2,3}, LU Meng^{1,2}, TAN Chunliang^{1,2}, FENG Yuewen^{1,2}, SU Xingtao^{1,2}

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. Technology Innovation Center of Green Drilling, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Drilling instead of trenching is a technical method that utilizes shallow drilling to replace trenching engineering and improve the level of green exploration. Previous researchers have mainly demonstrated the practicability of this method from the perspective of drilling equipment and sampling technology, and obtained the occurrence data such as the tendency of the planar structure in the hole through the identification and comparison of marker layers in multiple boreholes. However, multiple drilling holes will inevitably increase the disturbance to the environment. Facing the complex rock formations and tectonic deformation areas, the occurrence cannot be calculated because the marker layers can not be accurately identified and compared. Structural analysis and borehole imaging technology can improve the green exploration effect of drilling instead of trenching. In the Xinjiazui gold exploration area of the Western Qinling Mountains, the proportion characteristics of different axial lengths of quartz lenses related

收稿日期:2024-09-19; 修回日期:2024-12-17 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.04.014

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“地质矿产勘查钻探技术升级与应用示范”(编号:DD20211345)、“绿色勘查钻探应用示范”(编号:DD20240122)

第一作者:渠洪杰,男,汉族,1979年生,正高级工程师,矿物学岩石学矿床学专业,博士,主要从事覆盖区基础、矿产地质调查与绿色勘查技术试验与应用等方面的研究工作,北京市海淀区学院路29号,hongjiequ@163.com。

引用格式:渠洪杰,卢猛,谭春亮,等.基于构造解析及孔内成像技术的以钻代槽绿色勘查技术试验应用[J].钻探工程,2025,52(4):103-110.
QU Hongjie, LU Meng, TAN Chunliang, et al. Experimentation and application of green exploration by drilling instead of trenching based on structural analysis and borehole imaging technology[J]. Drilling Engineering, 2025,52(4):103-110.

to mineralization were identified using structural analysis methods, providing guidance for drilling deployment; In the drilling process, borehole imaging technology was implemented to identify the lithology of the borehole wall and measure the occurrence of the strata and quartz veins. The data were consistent with the adjacent exposed bedrock. The experimental results show that the new method can obtain more accurate and abundant data with less drilling work, improving the level of green exploration compared with the previous method which relies more on drilling engineering. In addition, portable shallow drilling rigs powered by lithium batteries exhibit green characteristics with lighter, safer and more user-friendly performance, and have the value of promotion and application.

Key words: green exploration; drilling instead of trenching; occurrence; structural analysis; borehole imaging; portable electric drill

0 引言

为保障能源资源的供给安全,我国正在实施新一轮找矿突破战略行动^[1-2]。然而,传统技术方法支撑下的矿产勘查与资源开发会对生态环境带来一定的破坏,随着我国矿产资源开发向西部生态脆弱区的转移,资源与环境协调发展的问题更加突出^[1]。绿色勘查是以对生态环境影响较小和可持续发展为理念,由单纯注重勘查开发到绿色勘查与开发并重的转变,着力实现资源勘查开发与生态环境保护协调并进,已获得了业界的共识,引领我国矿业进入新发展阶段^[3-6]。经过近十年的发展,不仅有《绿色勘查指南》、《绿色地质勘查工作规范》等团体与国家标准的出台,还有一系列地方与企业标准的发布;绿色勘查技术也同步得到了创新应用^[7-8],尤其是钻探技术得到了更多的重视^[9-13]。其中,在无法实施槽探和需要加大槽探施工深度的区域,探索和试验了“以钻代槽”的技术方法,即采用便携式浅层钻机及配套工艺,通过在一个或多个剖面上连续实施多个钻孔的方式,采集岩心样品,同步利用“三点一面”的原理,寻找并计算标志层及其产状,进而得到目的层的产状信息,以期代替或补充对地表环境扰动更大的槽探工作^[14-16]。

当前,随着新一轮找矿突破战略行动的实施,浅覆盖区和高山峡谷深切剖区的找矿勘查得到关注。槽探工作在浅覆盖区勘查时不仅破坏环境,而且其3 m以内的剥露深度所提供的找矿信息有限。在绝大部分覆盖区,该深度甚至无法穿透覆盖层,难以获取有效的样品和揭示构造产状。另外,由松散沉积层组成的探槽槽壁也经常面临较大的安全风险;而高山峡谷深切剖区大多人迹罕至,交通条件差,不便于槽探剥露工程所需机械设备的运输与施工。所以,以钻代槽技术的发展与应用对上述两类重点区域实现找矿突破具有重要意义,是新一轮

找矿突破战略行动亟需的绿色勘查技术之一。本文简要梳理了过去以钻代槽技术发展的脉络,总结其在浅覆盖区和高山峡谷深切剖区应用时存在的主要技术难题,并以西秦岭后龙门山构造带中某石英脉型金矿勘查为例,分析了基础地质调查对钻孔部署的重要作用,试验了孔内成像新技术对孔壁所示岩石与构造产状等原位信息的采集效果,探讨了便携式新能源电力驱动钻机的应用前景。

1 以钻代槽技术发展概述

1.1 以钻代槽技术发展的基本脉络

以钻代槽技术伴随着钻探机械设备与工艺的研发、地质勘查需求的变化,以及勘查理念与政策的调整等多种因素而发展。20世纪70—80年代,随着对外交流的开展,国外先进的钻探技术得以引进,促进了国内浅层取样钻探设备和技术的研发,并取得全面进展,以浅钻取代槽探和井探的工作同步迅速提高。21世纪初,在国土资源大调查专项(1999—2010年)和找矿突破战略行动(2011—2020年)实施过程中,地球化学勘查的理念与方法得到了推动,采用浅层钻探技术对覆盖区隐伏矿进行勘查^[17],带动了浅钻技术的又一次进步,钻探设备更加轻便,钻探器具与工艺也得到了大幅度提升,以钻代槽技术也再次被重视^[14-15]。近10年来,绿色发展理念指导着矿产勘查工作,宣传贯彻《绿色地质勘查工作规范》(2021)及相关标准的力度越来越大,人们更多的从落实政策和执行规范的角度,试验、总结和探讨以钻代槽技术的应用^[8]。当前,新一轮找矿突破战略行动对覆盖区和高山峡谷区的矿产勘查特别重视,这也为以钻代槽技术的研发与应用提供了新契机。

1.2 主要难题与解决思路

面状构造的产状是矿产勘查中的重要信息,与

槽探可以直观地提供面状构造相比,钻孔内面状构造产状的恢复一直是钻探工作面临的难题之一,难点集中在对倾向数据的恢复方面。前人曾讨论采用岩心定向法和直接计算法来获取回转钻进岩心的倾向信息^[18-20],但鉴于工序多和计算复杂等原因,使得该项工作未大范围推广。采用计算法时,钻探人员一般采取“三点一面”的方式,在小范围内实施至少3个钻孔^[15],或者在同一钻孔内实施3组不同孔斜的钻进,用数学方法计算产状^[19],但是在具体实施的时候,仍然面临着以下3个方面的问题:(1)在缺失标志层或断裂、褶皱发育等变形复杂的区域,无法确认不同钻孔中用于“三点一面”的层面,所以,难以采用数学原理对目的层进行产状计算;(2)用于以钻代槽的钻探深度一般很浅,难以在同一钻孔实施不同孔斜的钻进工作;(3)上述两类方法都会增加钻探工程的工作量,不仅不利于控制时间和成本,而且难以有效地践行绿色勘查。所以,如何以最少的钻探工作量和工序,以及环保的新技术,准确识别和测量目的层展布及其在钻孔内的产状,是以钻代槽推广应用需解决的主要技术难题。

构造解析作为基础地质调查的重要技术手段,能够统计和分析构造要素的空间关系,并解释其形成规律,对于推测未直接出露地质体的规模与产状形态具有重要作用,所以,在具有零星岩石出露的浅覆盖区和高山峡谷地带的岩石出露区开展勘查时,详细的构造解析应是钻孔部署的重要前提。孔内成像技术不仅能够以光学照片和视频的方式直观观测孔壁所示岩石的岩性与结构,而且可以在孔内原位测定面状构造的产状,解决钻探难以恢复岩层产状的问题,这种技术大多应用于水文与工程建设领域,已经比较成熟^[21-22],但是在固体矿产勘查钻孔中应用较少。

综上所述,如果通过构造解析的方法,查明拟实施以钻代槽工作区域构造要素的空间形态与规律,则能够优化钻孔部署;同时,在钻孔中开展孔内成像数据收集,验证构造解析的认识,直接测定面状构造原位产状,将会较为快速地以绿色和经济的方式,实现勘查目的。2023年,研究团队在中国地质调查局项目资助下,选择陕西省汉中市宁强县中坝金矿区,试验了上述工作方法,验证了以钻代槽技术的应用效果。

2 以钻代槽技术方法试验

2.1 试验区生态景观与地质地貌特征

陕西省汉中市宁强县位于秦岭山脉和巴山山系交汇地带,矿产与生物资源均较为丰富,但生态环境保护的政策严、要求多、力度大,是探索矿产勘查与环境保护协调并进的理想区域。该地区处于东西向秦岭构造带和北东向龙门山断裂带的延伸地段,不仅是前新生代多期构造叠加的区域,而且新构造活动强烈,山体陡峭,沟谷发育(图1a)。

沟谷走向以北东—南西向为主,与该地区的主要构造与岩层的走向近于一致,次之为北西—南东走向。另外,在下古生界千枚岩和板岩分布的区域,极易发生滑坡等地质灾害。所以,对于槽探施工中工程机械设备的便捷性要求较高,且施工后的环境修复与监测维护投入较大,应予以适度调整或采用其他技术方法替代^[23]。

试验区所在部位属于龙门山断裂带的北东延伸段,分布着丁家林金矿床、太阳坪金矿床、董家院金矿床和辛家咀金矿床等一系列矿床(图1a)。沿断裂带且顺地层展布的石英脉是重要的找矿标志^[24-25]。为进一步验证构造解析与孔内成像恢复的孔内岩层、石英脉等构造产状准确性,本次试验在产状相对稳定的下古生界板岩与千枚岩分布区开展工作(见图1b)。

2.2 构造解析对象的选择与认识

构造解析是分析和解释地质体内部结构构造规律及其演化的方法^[26]。在韧性剪切带中,因剪切变形形成的构造透镜体在几何尺寸方面有一定区别,但是透镜体各轴长之间的比例近于相同。所以,可以通过野外地质调查,测量出露的透镜体几何尺寸,进而统计出各轴长的比例,预测同类型透镜体被掩盖或未知部分的几何形态,甚至几何尺寸^[27]。

石英透镜体是在试验区寻找石英脉型金矿体的重要找矿标志,所以,确认石英透镜体的规模是部署槽探和钻探等揭露工程的主要目的,也是构造解析的主要对象。该地区石英脉或透镜体沿着韧性剪切带分布,且平行于地层产出,但绝大多数露头上无法观测其三维的形态与几何大小,只是在不同的露头位置呈现出透镜体的不同截面,个别层面上可以观测到石英透镜体及其同一应力场中形成的透镜空间,其中,最大主应力轴(a轴)平行于地层



图1 以钻代槽野外试验区遥感影像与地质略图

Fig.1 Remote sensing images and geological sketches of the field trial area using drilling instead of trenches

走向,最小应力轴(c轴)垂直于地层倾向(图2)。在不同走向的山体和沟谷所展露出的岩层面上,可以观察到石英透镜体的不同截面,便于测量透镜体在不同轴向上的尺寸。尽管无法确认每个透镜体都恰当的出露了3组轴面,但是通过对完整出露轴面不同轴长的测量和统计,可以获取透镜体在该出露角度上的产出规律,当露头上至少完整呈现出一个轴长的时候,可以利用产出规律,计算出被覆盖或隐伏部分的规模。

因试验区地形陡峭,与主体构造一致的北东和北西走向沟谷发育,本次试验选择在北东走向的狭窄河谷内,在与地面近垂直的谷壁和近水平的河床或路面分别对石英或构造透镜体进行测量,其分别对应于透镜体的bc面和ab面(图3)。

本次试验中针对透镜体的bc面和ab面分别统计了53组和64组数据,计算了不同轴长之间的关系(图4、图5)。在谷壁的出露面上,石英透镜体b轴和c轴的长度较易测量,53组数据统计的结果表明,b轴与c轴长度比值<5的透镜体占比为

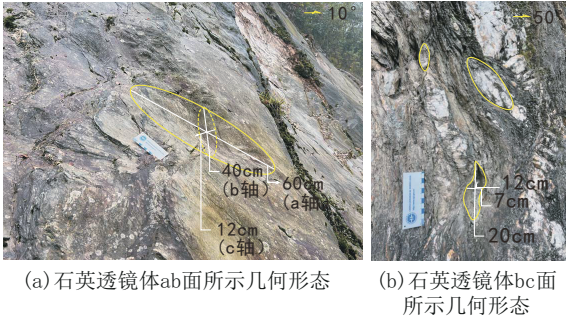


图2 西秦岭地区辛家咀金矿一带下古生界岩层及石英透镜体特征

Fig.2 Characteristics of Lower Paleozoic rock layers and quartz lenses in the Xinjiazui gold deposit area of the western Qinling Mountains

76.36%,两者比值有69.09%的可能性处于2~5的区间。在由河床和山区道路等近水平的出露面上,石英透镜体a轴和b轴的长度较易测量,64组数据统计结果表明,a轴与b轴长度比值介于5~15的透镜体占比为75.38%,其中,比值介于5~10的透镜体占比为61.54%(图5)。

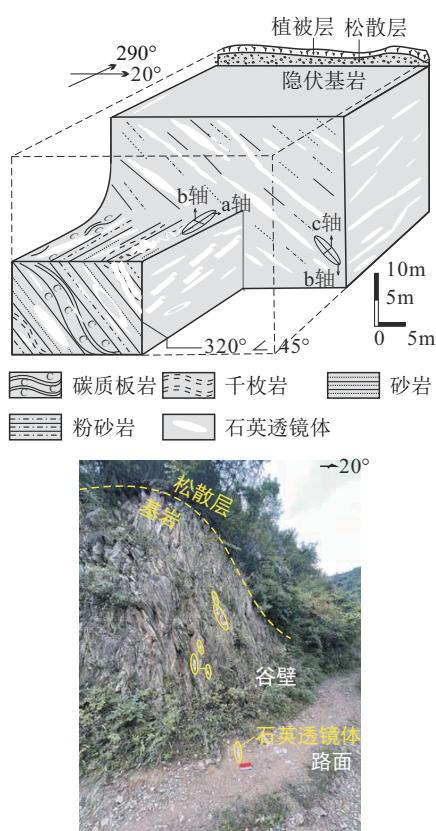


图3 试验区岩层特征及石英透镜体产出形态

Fig.3 Characteristics of rock layers in the experimental area and the morphology of quartz lens production

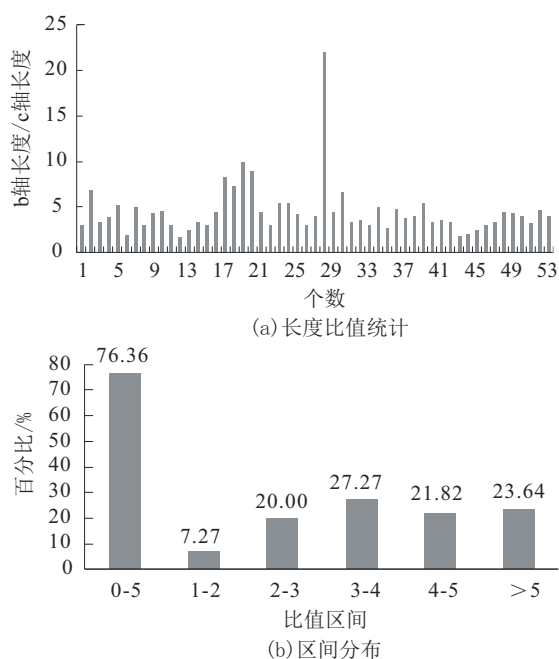


图4 试验区岩层中石英透镜体b轴和c轴长度比值统计

Fig.4 Ratio statistics of the b-axis and c-axis lengths of quartz lenses in the rock layers of the experimental area

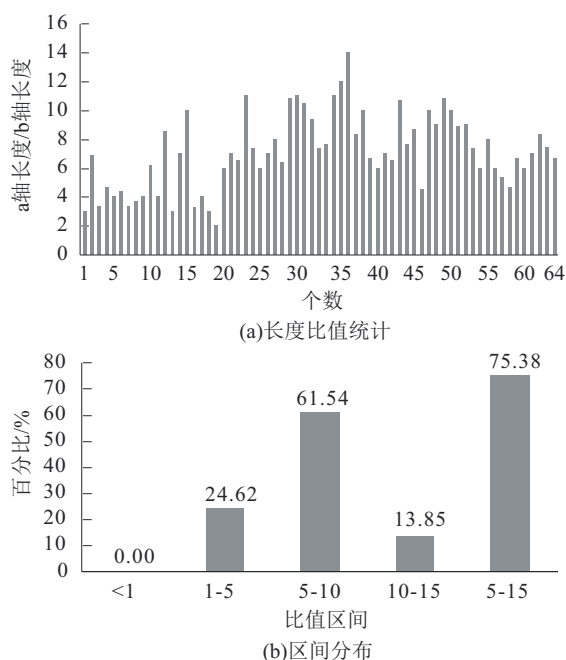


图5 试验区岩层中石英透镜体a轴和b轴长度比值统计

Fig.5 Ratio statistical of a-axis and b-axis lengths of quartz lenses in the rock layers of the experimental area

鉴于在岩层露头不好的区域,野外所见的石英透镜体大多出露不完全,仅出现一个轴的情况更为常见,有了上述类似的统计数据,就可以根据所观察岩石出露面的类型和石英透镜体展露出来的轴长,推算未完整出露部分的一些信息,为钻孔等揭露工程的部署提供参考依据。本次实验中,选择了一个拟定槽探位置不完整出露的两个石英透镜体(图6a、b),它们在北西走向的垂直断面上出露,其c轴长度或透镜体厚度在60和100 cm。根据前述的数据统计规律,该透镜体的b轴长度或沿着岩层走向的长度分别大概率不会超过300和500 cm。据此,分别在垂直其延伸方向的100和200 cm距离内,实施了2个钻孔,但均未钻遇石英脉(透镜体),表明其延伸范围非常有限,未超过通过构造解析而推算的距离。经后期槽探工程揭露,佐证两个石英透镜体规模均较小,稍作挖掘即从岩层中脱落(图6c),不存在较大的延伸幅度,为是否再部署更深的钻探工程等下一步工作提供了有用信息。

2.3 孔内成像技术的试验应用

孔内成像技术是将高清摄像设备和电子罗盘组合成一个短节,依靠缆绳和计数器下放至钻孔内并记录深度,获取孔壁的光学影像、钻孔轨迹与不

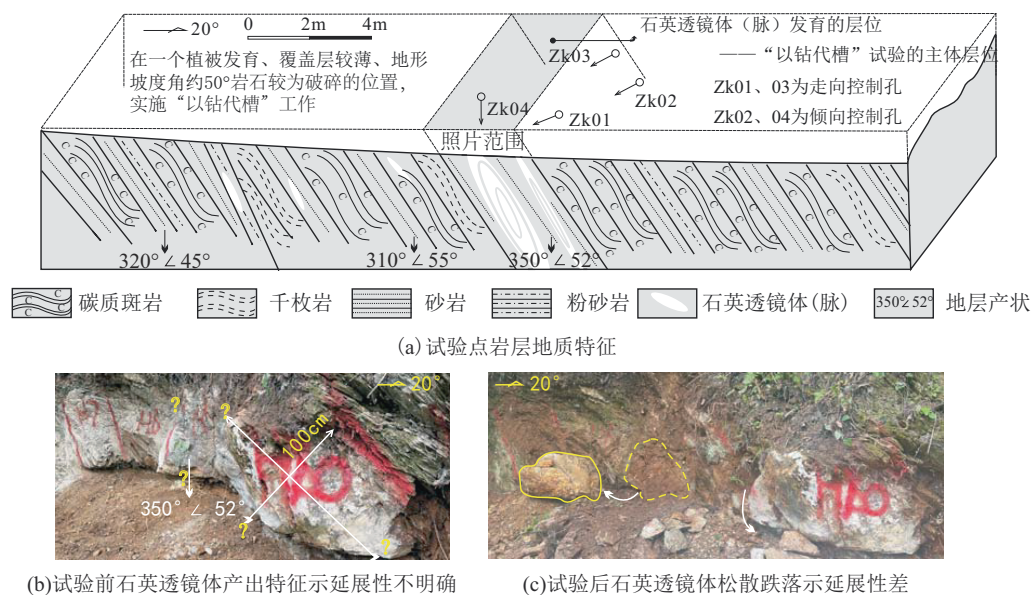


图6 试验所用石英透镜体的野外出露特征

Fig.6 Field exposure characteristics of quartz lens body used in the experiment

同深度面状构造产状的一种技术手段。该技术在工程勘察中得到较好的应用^[21-22],但在基础地质与矿产勘查中的应用较少,对于其是否能够如工程勘察应用那样观测并对孔壁面状构造的深度位置、厚度和产状等进行原位测量,需要实践检验。

试验区的岩性相对简单,地层层理、石英脉和其他变形构造界面等相对稳定,适合通过岩石出露面与孔内观测的对比,验证孔内成像技术的观测效果。试验区的岩石主要为中、下志留统茂县群千枚岩,以及下寒武统牛蹄塘组板岩和上震旦统灯影组白云岩,各时代岩层组成了向北西倾的单斜构造;不同时代地质体之间以走向北东的断层接触,并发育有顺层的韧性剪切作用和石英脉或透镜体(参见图1)。在孔内成像设备所拍摄的孔壁影像中,可以观测到不同深度岩性、岩层厚度、石英脉及其厚度等,并测量到其产状数据。如在一个钻孔的8.30~9.00 m段,清晰的显示多层石英脉,其产状清晰(图7a);在孔深4.80~5.40 m的孔壁段,千枚岩、板岩等主要岩性及其组合,不同岩层的厚度可精确到厘米级,测量得到的岩层产状与临近出露基岩岩层产状一致(图7b),说明该技术拍摄与测量的数据可信。

2.4 便携式电动钻机的试验应用

无论是环境保护的需要,还是难以到达区域钻探施工的适宜性而言,便携式钻探设备的研发与应用都是执行绿色勘查规范指南的重要技术方向,模

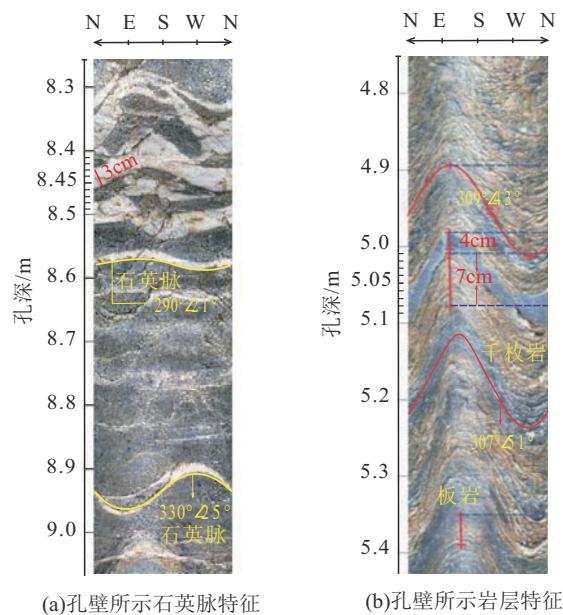


图7 孔内成像技术所示的孔壁特征及面状构造产状信息

Fig.7 Characteristics of borehole wall rock layers and attitude information of planar structures shown by borehole imaging technology

块钻机被认为是当前快速实现绿色勘查的新技术^[28]。以钻代槽使用的钻探设备以便携式为主,本次试验除应用了传统的燃油驱动便携式钻机之外,还尝试了锂电池驱动的电动钻探设备。相较于燃油驱动的传统钻机,电池驱动的钻机具有模块化程度更高,整机和单一模块质量更低,设备占地面积

更小,钻进角度全方位和应用场景更广的优势,而且该类设备解决了野外使用燃油的安全风险,更适用于防火期的施工^[29]。本次试验使用的钻机类型为TGQ-10D型,其功率为1000 W,主轴转速电压60 V,电机转速为3000 r/min,整机质量30 kg,其中,锂电池质量为11 kg。锂电池的电能除驱动钻机运转外,还可以为泥浆循环系统提供动力。另外,电池驱动的钻机较传统燃油钻机噪声更小,且无尾气污染,是钻探设备更加友好的一种进步。在本次野外试验中,除了解决地质问题之外,电动钻机还得到了钻探工人和地方居民的认可,值得在以钻代槽和其他浅层钻探工作中推广使用。

3 结论

以钻代槽是覆盖区和高山峡谷区开展找矿工作的一种绿色勘查技术,较槽探而言,它通过减少地表环境扰动而提高绿色勘查水平,其钻孔部署必须建立在基础地质的认识之上,且在恢复孔内面状构造方面可借助更为先进的技术装备,而无需实施更多的钻探工程,以便更加符合新的环保要求和更加快速、经济。

(1)构造解析能够统计和分析构造要素的空间关系,并解释其形成规律,对于推测未直接出露地质体的规模与产状形态具有重要作用,可对钻孔部署提供有用信息,指导以钻代槽钻孔的布设。

(2)广泛应用于工程地质勘察的孔内成像技术,可以引用到地质矿产勘查钻孔中,通过对孔壁的全景高清光学成像和对面状构造产状的测量,解决岩心钻探难以获得倾向数据的缺点。在以钻代槽方面,不再需要像以往部署至少3个钻孔而计算目的层产状,同时,通过降低钻探工作量而提高绿色勘查效果。

(3)近年来出现的便携式电动化钻机,以更加轻便、钻进角度范围更广、设备更加安全和操作更加友好的特点,适合于在浅覆盖区和高山峡谷区开展以钻代槽浅层地质调查工作,具有较好的推广应用前景。

参考文献(References):

- [1] 鞠建华,强海洋.中国矿业绿色发展的趋势和方向[J].中国矿业,2017,26(2):7-12.
JU Jianhua, QIANG Haiyang. The trend and direction of green development of the mining industry in China[J]. China Mining

- Magazine, 2017, 26(2):7-12.
[2] 杨建峰,马腾,张翠光,等.近20年来全球经济变局与矿产勘查发展态势[J].中国矿业,2022,31(2):11-20.
YANG Jianfeng, MA Teng, ZHANG Cuiguang, et al. Global economic changes and mineral exploration trends in the last 20 years[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(2):11-20.
[3] 鞠建华.绿色发展引领中国矿业进入新发展阶段[J].中国矿业,2021,30(1):1-4.
JU Jianhua. Green development leads China's mining industry into a new stage of development[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1):1-4.
[4] 孟旭光,侯华丽,吴尚昆.矿业发展的“绿色”思维探讨[J].中国矿业,2018,27(8):85-87.
MENG Xuguang, HOU Huali, WU Shangkun. Discussion on “green” thoughts in the development of mining industry[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(8):85-87.
[5] 张福良,薛迎喜,马骋,等.绿色勘查——新时代地质找矿新模式[J].中国国土资源经济,2018,31(8):11-15.
ZHANG Fuliang, XUE Yingxi, MA Cheng, et al. Green geo-prospecting: A new model of geo-prospecting in the new era[J]. Natural Resource Economics of China, 2018, 31(8):11-15.
[6] 郑杰,张福良,靳松,等.绿色勘查项目示范进展与成效研究[J].中国矿业,2021,30(11):37-41.
ZHENG Jie, ZHANG Fuliang, JIN Song, et al. Demonstration progress and effectiveness of green exploration project[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(11):37-41.
[7] 赵元德,张福良,马骋,等.绿色地质勘查评价:以某金银矿为例[J].中国矿业,2019,28(S2):166-171.
ZHAO Yuande, ZHANG Fuliang, MA Cheng, et al. Green geological exploration and evaluation: A case study of a gold and silver mine[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2):166-171.
[8] 郑杰,张福良,李晓宇,等.绿色勘查中以钻代槽技术应用前景浅析[J].地质与勘探,2021,57(5):1158-1165.
ZHENG Jie, ZHANG Fuliang, LI Xiaoyu, et al. Application prospect of the technology replacing trenching with drilling in green exploration[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(5):1158-1165.
[9] 陈永光,汪占领,于水,等.基于钻进声压响应特征巷道顶板岩层界面识别的研究[J].中国矿业,2021,30(3):88-91.
CHEN Yongguang, WANG Zhanling, YU Shui, et al. Research on recognition of roadway roof rock layer interface based on sound pressure response characteristics of drilling[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3):88-91.
[10] 杜蒨,李光春,巩鑫.贵州省道真县新民铝土矿区绿色勘查技术与成效[J].中国矿业,2021,30(1):76-81.
DU Lin, LI Guangchun, GONG Xin. Green exploration technology and results of Xinmin bauxite mining area in Daozhen county, Guizhou province[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1):76-81.
[11] 刘蓓,杨可,张晨,等.固体矿产绿色勘查钻探技术方法探索与实践[J].钻探工程,2021,48(S1):39-46.
LIU Bei, YANG Ke, ZHANG Chen, et al. Exploration and practice of green exploration drilling technology methods for solid minerals[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):39-46.
[12] 刘蓓,寇少磊,朱芝同,等.便携式模块化钻机在绿色地质勘查

- 工作中的应用实践[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 30-39.
- LIU Bei, KOU Shaolei, ZHU Zhitong, et al. Practical application of the portable modular drill in green geological exploration work[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 30-39.
- [13] 胡跃亮, 冯涛, 贾飞, 等. 胶西北西岭超大型金矿区绿色勘查技术[J]. 中国矿业, 2023, 32(2): 69-76.
- HU Yueliang, FENG Tao, JIA Fei, et al. Green exploration technology of Xiling super large gold mining area in northwest Jiadong[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(2): 69-76.
- [14] 赵洪波, 何远信, 宋殿兰, 等. 海南戈枕成矿带峨麻岭矿区以钻代槽勘查技术[J]. 地质与勘探, 2015, 51(3): 573-578.
- ZHAO Hongbo, HE Yuanxin, SONG Dianlan, et al. A new technique with drilling to replace trenching and its application in the emaling gold deposit of the Gezhen Gold Ore Belt in Hainan [J]. Geology and Exploration, 2015, 51(3): 573-578.
- [15] 赵洪波, 何远信, 祝强. 以钻代槽勘查方法研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(11): 6-10.
- ZHAO Hongbo, HE Yuanxin, ZHU Qiang. Research and application of drilling instead of trenching technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(11): 6-10.
- [16] 黎龙昌, 冉强, 段威, 等. 以钻代槽技术在旺苍县黄洋—五权地区钒矿普查中的实践应用[J]. 矿产勘查, 2021, 12(9): 1947-1952.
- LI Longchang, RAN Qiang, DUAN Wei, et al. The practical application of drilling instead of trench technology in general survey of Vanadium deposits in Huangyang-Wuquan area, Wangcang County[J]. Mineral Exploration, 2021, 12(9): 1947-1952.
- [17] 杨少平, 弓秋丽, 王志刚, 等. 地球化学勘查新技术应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1844-1877.
- YANG Shaoping, GONG Qiuli, WEN Zhigang, et al. Application research of the new technologies for geochemical survey [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1844-1877.
- [18] 董士尤, 屈淦泉. 单钻孔确定地下岩层产状的原理与方法[J]. 浙江大学学报, 1984(4): 122-131.
- DONG Shiyu, QU Fuquan. The principle and method based on monohole to ascertain occurrence [J]. Journal of Zhejiang University, 1984(4): 122-131.
- [19] 林银山. 利用钻孔资料确定岩层产状[J]. 华东地质学院学报, 1987(4): 75-87.
- LIN Yinshan. Utilize the drilling data to determine the occurrence of the layers[J]. Journal of East China College of Geology, 1987(4): 75-87.
- [20] 石永泉, 代常友. 钻探方法确定岩体结构面产状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(1): 120-123.
- SHI Yongquan, DAI Changyou. Directly determining the occurrence of rock mass structural plane using drilling method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(1): 120-123.
- [21] 安徽省水利局. 混凝土孔内电视成像检测规程: DB34/T 4051—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Anhui Provincial Water Resources Bureau. Code of video imaging inspection in concrete holes: DB34/T 4051—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [22] 福建省建筑科学研究院有限责任公司. 地基基础孔内成像检测标准: T/CECS 253—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- Fujian Academy of Building Sciences Co., Ltd. Standard for imaging testing through the hole of foundation: T/CECS 253—2022[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [23] 王瑞廷, 成欢, 冀月飞, 等. 秦岭陕西段主要矿产资源分布特征与绿色勘查开发[J]. 矿产勘查, 2020, 11(12): 2672-2684.
- WANG Ruiting, CHENG Huan, JI Yuefei, et al. Distribution characteristics and green exploration and development of main mineral resources of Qinling Mountains in Shaanxi[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(12): 2672-2684.
- [24] 付于真, 方维萱, 刘家军, 等. 陕川丁家林—太阳坪—董家院金矿带的矿田构造—岩相学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2014(4): 787-801.
- FU Yuzhen, FANG Weixuan, LIU Jiajun, et al. Characteristics of tectonic lithofacies in Dingjialin—Taiyangping—Dongjiayuan gold ore belt, Shaanxi and Sichuan provinces[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014(4): 787-801.
- [25] 刘基, 杨可, 张晓星, 等. 后龙门山造山带辛家咀金矿床地质特征及成因探讨[J]. 现代地质, 2022, 36(1): 378-388.
- LIU Ji, YANG Ke, ZHANG Xiaoxing, et al. Geological characteristics and genesis of the Xinjiazui Gold Deposit in back-Longmenshan Orogenic Belt [J]. Geoscience, 2022, 36(1): 378-388.
- [26] 李忠权, 刘顺. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- LI Zhongquan, LIU Shun. Structural Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [27] 宋传中, 牛漫兰, 王道轩, 等. 岩石有限应变与造山带构造块体变形要素的估算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(9): 1141-1145.
- SONG Chuazhong, NIU Manlan, WANG Daoxuan, et al. Rock finite strain and estimation of deformed components of structural blocks in an orogenic belt [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005, 28(9): 1141-1145.
- [28] 陈东廷, 刘添益, 达伟, 等. 黔中汪家寨铝土矿区绿色勘查实践及成效[J]. 中国矿业, 2024, 33(8): 67-76.
- CHEN Dongting, LIU Tianyi, DA Wei, et al. Practice and effectiveness of green exploration in Wangjiashai bauxite mining Area in central Guizhou [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(8): 67-76.
- [29] 岳永东, 谭春亮, 卢倩, 等. 锂电池电动冲击取样钻机及其配套工具的研制[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 44-50.
- YUE Yongdong, TAN Chunliang, LU Qian, et al. Development of the Lithium battery-driven impact sampling drill and complete accessories [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 44-50.

(编辑 王文)