

潜孔锤-旋挖组合钻进技术在硬岩桩基工程中的应用

何正勇, 李应平

(贵州地矿基础工程有限公司, 贵州 贵阳 550004)

摘要:旋挖钻进技术具有经济、快捷、环保等优点,在桩基工程中得到广泛应用,但常规旋挖钻机在钻凿硬岩(抗压强度 >80 MPa)时,进尺非常缓慢。为解决采用旋挖钻进技术钻凿硬岩时进尺缓慢的问题,考虑到潜孔锤具有对脆性岩石施工速度快的优点,探索将潜孔锤与旋挖钻机组合使用。基于官井基地滑坡治理工程中抗滑桩的施工,对潜孔锤-旋挖组合钻进成孔技术进行介绍,对其碎岩成孔机理进行分析,验证了潜孔锤-旋挖组合钻进成孔技术的可行性,可为硬岩桩基工程的施工提供有益参考。

关键词:硬岩桩基;抗滑桩;旋挖钻进;潜孔锤

中图分类号:P634.5;TU473.1⁺4 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2021)12-0114-06

Combination of the DTH hammer with rotary drilling in hard rock pile foundation

HE Zhengyong, LI Yingping

(Guizhou Geology and Mineral Foundation Engineering Co. Ltd., Guiyang Guizhou 550004, China)

Abstract: Rotary drilling technology has the advantages of low cost, high drilling rate and environmental protection, and is widely used in pile foundation engineering. However, conventional rotary drilling is very slow in drilling hard rock (compressive strength greater than 80 MPa). In order to solve the slow advance problem with rotary drilling in hard rock, and in view of high penetration rate of the DTH hammer in drilling hard and brittle rock, the combination of the DTH hammer with rotary drilling rig was explored. This paper introduces the construction process of the combined DTH hammer and rotary drilling technology with respect to the construction of anti-slide piles in the Guanjing Base landslide treatment project, analyzes the rock breaking mechanism, and verifies the feasibility of the combined DTH hammer and rotary drilling technology. It can provide a useful reference for the construction of hard rock pile foundation projects.

Key words: hard rock pile foundation; anti-slide pile; rotary drilling; DTH hammer

1 概述

在桩基础施工中,旋挖钻机钻孔成桩具有施工效率高、机械化智能化程度高、工程质量好、环保等优点^[1-3],近几年来逐渐成为桩基施工的首选。旋挖钻机使用不同钻具,可在粘土、粉土、砂土、砂卵砾

石层以及基岩地层中进行成孔作业^[4],对地层的适应性较广,成孔直径最大可达1.5~4 m,成孔深度可达60~90 m,有些机型施工深度可达130 m,基本上满足了目前常规桩基施工的需求^[5-6]。采用旋挖钻机在基岩地层中施工时,旋挖钻机钻头对岩体进行

收稿日期:2021-08-13; 修回日期:2021-11-18 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.12.017

基金项目:贵州省科学技术基金项目“岩石边坡病害风险评估模型研究”(编号:黔科合J字[2015]2037号)

作者简介:何正勇,男,汉族,1968年生,副总工程师,高级工程师,探矿工程专业,长期从事岩土工程勘察、设计、地质灾害治理、基础工程施工及管理工作,贵州省贵阳市观山湖区金阳北路3号附1号正汇国际大厦7楼,648201676@qq.com;

李应平,男,汉族,1983年生,副总经理,高级工程师,勘察技术专业,长期从事岩土工程勘察、设计、地质灾害治理、基础工程施工及管理工作,贵州省贵阳市观山湖区金阳北路3号附1号正汇国际大厦4楼,117240469@qq.com。

引用格式:何正勇,李应平.潜孔锤-旋挖组合钻进技术在硬岩桩基工程中的应用[J].钻探工程,2021,48(12):114-119.

HE Zhengyong, LI Yingping. Combination of the DTH hammer with rotary drilling in hard rock pile foundation[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):114-119.

切削或磨碎,岩屑(岩心)通过钻头携带并提出孔口卸弃,钻进、出渣等施工多次循环,最终形成桩孔。旋挖钻机成孔使用的钻头常见的有短螺旋钻头、筒式取心钻头和捞砂斗等,这些钻头在硬岩中施工时会出现截齿磨损严重、进尺缓慢、震动大、施工经济性较差等问题^[2]。实践表明,若岩石抗压强度达到80 MPa以上时,旋挖成孔进尺非常缓慢,若岩石抗压强度 >150 MPa时,旋挖钻机钻头切削破碎岩石极为困难^[7-8],几乎形成不了进尺,钻齿严重磨损而失效,如果强行钻进,还会造成一些机械和孔内事故。

从岩石破碎学原理可知,当坚硬岩石受到冲击时,首先形成微裂纹,在外力的作用下,微裂纹连通形成体积破坏,岩石抵抗外界的破坏力大大降低,即岩石在受到冲击时更容易破碎。潜孔锤作为机械冲击破岩的重要工具之一,其具有钻头寿命长、能量利用率高等优点,被广泛应用在小口径钻探如凿岩爆破孔、矿山通风孔及地质钻探中^[9],其被视为钻进硬岩地层最高效的工具^[10]。但目前较为成熟的单体的潜孔锤的最大直径 $\nabla 28$ in(771.2 mm),最大仅能施工43 in(1092 mm)的桩孔,无法直接用于大口径桩基工程的施工,且其价格过高,不利于在市场中推广应用。

为解决在硬岩地层中大口径桩孔钻进困难这一难题,可将潜孔锤与旋挖钻机配合使用,以提高钻凿效率^[11-12]。目前应用较多的施工方法为采用旋挖钻机配套集束式潜孔锤^[13],集束式潜孔锤配气机构复杂,共振严重,排渣困难,需要配备的空压机功率大、能耗高,旋挖钻机改装费用高。采用旋挖钻机配套集束式潜孔锤这一特殊钻井工具钻凿破岩虽然可以大幅度提高钻进效率,但对钻具改装耗资巨大,施工工艺复杂,施工成本高。本文提出的潜孔锤-旋挖组合钻进技术其基本原理是,先用小直径的单体潜孔锤,在大直径桩孔施工面内进行科学布孔钻进,形成蜂窝状,对岩石结构预破坏,然后再用旋挖钻机钻进成桩,既简化了施工工艺,降低了施工成本,又提高了硬岩成孔施工效率。

以上工法优缺点对比见表1。

从以上分析对比中可以发现,传统的旋挖工法和单体潜孔锤均不适用于超硬岩层的大直径桩基施工。

集束式潜孔锤虽然可以用于大直径硬岩桩基的

表1 桩基施工工法对比

Table 1 Comparison of the pile foundation construction methods

| 钻孔工法 | 钻孔直径/m | 硬岩钻进效率 | 设备投入 | 施工成本 |
|----------|----------|--------|------|------|
| 旋挖钻机 | 1.5~4 | 低 | 低 | 低 |
| 单体潜孔锤 | ≤ 1 | 高 | 低 | 低 |
| 集束式潜孔锤 | 0.6~3 | 高 | 高 | 高 |
| 潜孔锤+旋挖组合 | 1.5~4 | 中 | 中 | 低 |

施工,但其施工工艺复杂、施工成本高。采用传统的潜孔锤和旋挖工法组合完成大直径硬岩桩基工程,可降低施工成本,潜孔锤钻进小孔对岩石预破坏,提高了旋挖钻机的钻进效率,两种施工工序可分别在不同桩孔同时进行,提高了施工效率。所以,潜孔锤-旋挖组合钻进技术是大直径硬岩桩基施工的一种经济实用的工法。该工法在贵州省地矿局114地质大队官井基地滑坡治理工程中得到了有效应用。

2 工程施工难点分析

贵州省地矿局114地质大队官井基地滑坡治理工程,局部地段垂直切坡,采用“抗滑桩+预应力锚索”支护(见图1)。由于该边坡以岩质边坡为主,且岩石多为坚硬岩,因此本项目的施工难点在于抗滑桩的桩孔施工。由于岩石坚硬,其中石英砂岩天然抗压强度达130 MPa以上,起初采用常规的旋挖成孔工艺,但钻进速度很慢,钻机超负荷工作,钻头钻齿磨损严重(见图2),旋挖钻头钻齿的磨损形态呈平面,截齿无法切入岩石进而产生体积破碎,岩石的强度和硬度高,研磨性强,岩石破碎以平面接触的摩擦为主,大大降低了碎岩效率,致使施工速度缓慢。钻齿更换频繁,综合施工成本高。后采用人工挖孔桩施工,需要7天才能进尺1 m,设计桩径2500 mm,桩长25 m,需4个月才能成桩。由于边坡存在安全隐患,且雨季来临,为确保边坡的安全,需要尽快完成抗滑桩的成桩,因此,设计一套成本低、施工效率高、稳定可靠性强的适用于硬岩钻进成孔的施工工艺十分必要。

3 潜孔锤-旋挖组合钻进施工方案及碎岩机理分析

3.1 潜孔锤-旋挖组合钻进施工方案

潜孔锤-旋挖组合钻进,先用潜孔锤对完整坚硬



图1 官井基地滑坡治理工程施工现场

Fig.1 Construction site of the Guanjing Base landslide control project



图2 旋挖钻头磨损情况

Fig.2 Wear of the rotary drilling bit

的岩石进行预处理,在其中形成小孔,破坏岩石整体结构,释放地层应力,为旋挖钻机钻扩孔增加自由面条件,使后期破碎岩石更加容易;然后采用旋挖钻机进行钻进,坚硬岩石沿已有自由面破碎,成孔效率得到较大提高。潜孔锤-旋挖组合钻进成孔方法所用的均是常规设备,不用改装钻具,节约成本,且因潜孔锤钻孔尺寸小,要求空压机功率低。具体施工方案如下:

(1)用潜孔锤钻 $\text{O}219\text{ mm}$ 的小孔,在桩中心钻孔1个,在直径为 1500 mm 的圆周上钻孔10个,在直径为 2400 mm 的圆周上钻孔18个,共计29个,如图3所示。潜孔锤钻进所用钻机为MD200A型,潜孔锤为75A型,空压机为VHP750型,工作风压 1.38 MPa ,风量为 $21.2\text{ m}^3/\text{min}$,潜孔锤钻进效率为 0.15 m/min 。

(2)潜孔锤成孔结束以后,用旋挖钻机分3级进行钻扩孔,用 $\text{O}1500\text{ mm}$ 的钻头钻孔一次, $\text{O}2000\text{ mm}$ 和 $\text{O}2500\text{ mm}$ 分别在前序钻孔的基础上扩孔一次。旋挖钻机采用低钻压、低转速的原则钻进^[14],预防造成钻齿折断^[9]。每一级直径的施工顺序均为先用岩石取心筒式钻头,然后再下同径的截齿捞砂斗。本项目中,桩长 25 m ,根据旋挖钻机实时监测

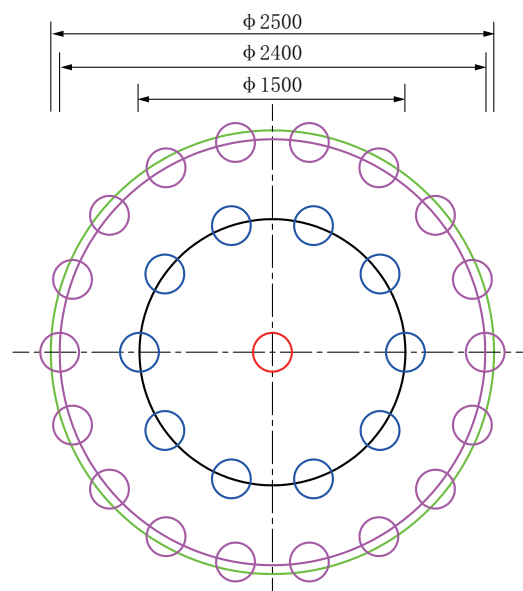


图3 潜孔锤钻孔布置

Fig.3 Layout of the drill holes for the DTH hammer

的孔斜数据,必要时进行纠偏。

(3) $\text{O}2500\text{ mm}$ 的桩潜孔锤钻孔29个需要2天。采用旋挖钻机成孔时,第一级 $\text{O}1500\text{ mm}$ 的成孔需要2天,第二级 $\text{O}2000\text{ mm}$ 的成孔需要2天,第三级 $\text{O}2500\text{ mm}$ 的成孔需要1天。每个桩孔施工时间为7天,相比采用人工挖孔桩节约了110天的时间。

采用潜孔锤钻进时,合理地选择转速对钻头寿命和钻进效率至关重要。潜孔锤钻进特点是大冲击功、低冲击频率,如果转速过快,钻头钻齿没有足够时间压入岩石,对岩石形成破坏,钻齿一直在未形成体积破碎的岩石表面快速滑动磨损,钻齿磨损快,碎岩效果差。如转速太慢,钻齿后续冲击落点易与前序冲击凹坑重合,产生重复破碎,导致钻速下降。选择潜孔锤转速的考虑因素有冲击频率、潜孔锤直径、岩石强度等,一般来说,岩石愈硬,所用转速愈低^[15-16]。本项目中,潜孔锤所用转速约为 20 r/min 。

3.2 潜孔锤-旋挖组合钻进成孔机理分析

首先选用合理直径的潜孔锤(本工程采用潜孔锤直径为 219 mm),以一定的分布规律进行钻进,钻进后桩截面留下了有很多自由面的岩层体(见图 4),潜孔锤在硬岩地层的碎岩机理及施工工艺很多的文献中都有过论述,这里不再重复。

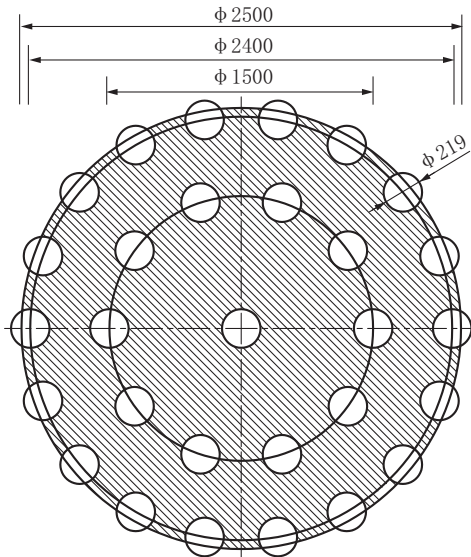


图4 潜孔锤施工后留下的岩墙

Fig.4 Remaining rock wall after DTH hammer drilling

旋挖钻机施工时会用到两种钻头:岩石取心筒式钻头和截齿捞砂斗,岩石取心筒式钻头布置截齿^[17]的间距为 200~240 mm(见图 5),截齿捞砂斗的截齿间距为 100~130 mm(见图 6),从图 4 中可以算出在 $\text{O}1500\text{ mm}$ 和 $\text{O}2400\text{ mm}$ 圆周上,潜孔锤成孔后,周向岩墙的厚度约为 252 mm(见图 7),在用筒式钻头钻进时,保证每个岩墙上都有一个截齿分布,当在钻压的作用下,形成裂纹与潜孔锤已成的孔连通,在旋转扭矩的作用下对岩墙剪切破坏,钻齿所扫过的面积的岩石与母岩分离形成钻渣。在使用截齿捞砂斗钻进时,主要是为了解决径向岩墙, $\text{O}1500\text{ mm}$ 和 $\text{O}2400\text{ mm}$ 径向岩墙的厚度为: $(2400 - 1500)/2 - 219 = 231\text{ mm}$ (见图 8),在径向岩墙之间保证有两个截齿分布,由于径向岩石切削量较大,所以面齿密度比周向大 1 倍,在钻压的作用下,截齿先压入岩石,因为 $\text{O}1500\text{ mm}$ 和 $\text{O}2400\text{ mm}$ 直径上的岩石已被切空,在扭矩的作用下,岩墙岩石被破坏形成岩渣向两个岩沟掉落,然后进入捞砂斗内提出孔外。

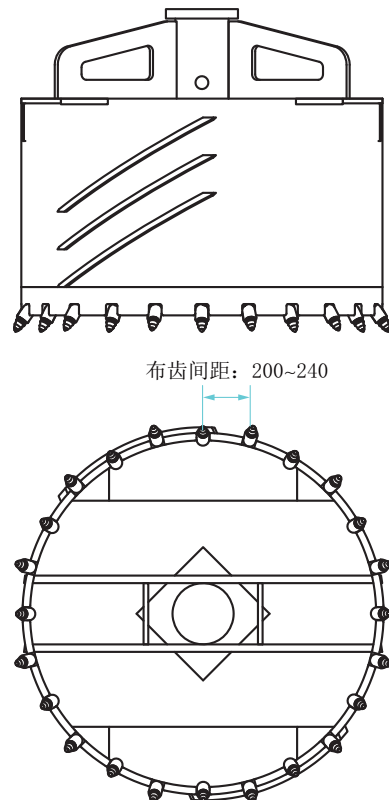


图5 岩石取心筒式钻头及布齿

Fig.5 Rock coring barrel bit and the teeth arrangement

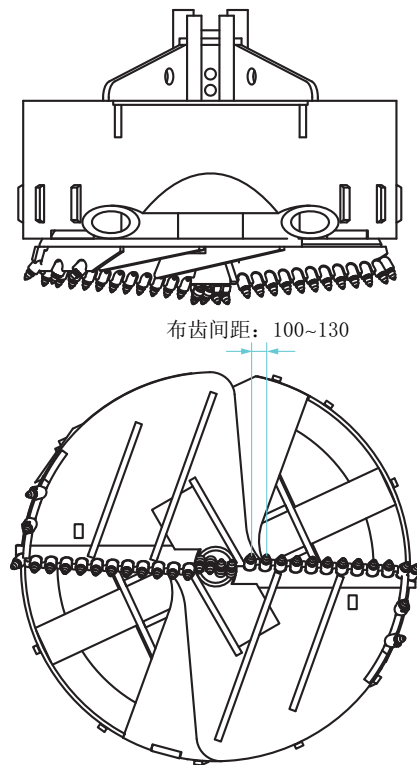


图6 截齿捞砂斗及布齿

Fig.6 Pick bailing bucket and the teeth arrangement

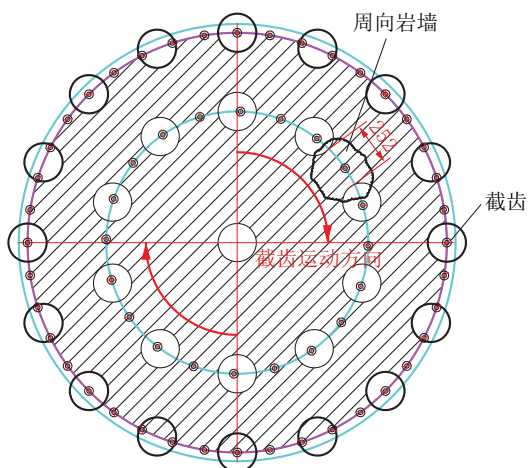


图7 筒钻破除周向岩墙示意

Fig.7 Breaking the radial rock wall with the drilling barrel

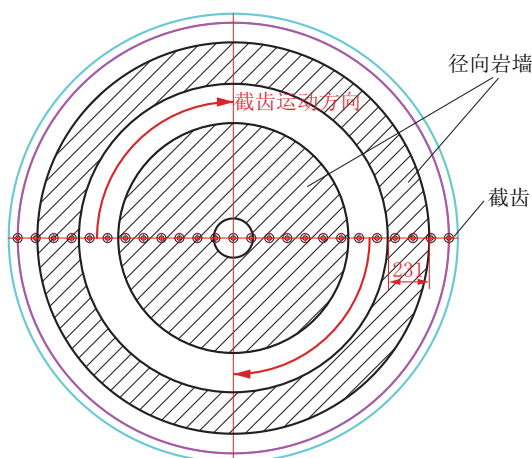


图8 捞砂斗破除径向岩墙示意

Fig.8 Removing the circumferential rock wall with the bailing bucket

4 施工效果

采用潜孔锤-旋挖组合钻进施工,钻进效率明显提高。采用冲击钻钻进时,平均施工效率为 $4\text{ m}^3/\text{d}$,采用潜孔锤-旋挖组合钻进时,平均效率为 $20\text{ m}^3/\text{d}$ 。潜孔锤-旋挖组合钻进可以解决超硬岩石施工中成孔效率低的问题,极大地提高了施工速度,大幅度缩短了工期,进一步节约生产运营成本。本项目工期提前了6个月。

采用潜孔锤-旋挖组合钻进施工树立了良好的企业形象,工期缩短,及时消除了周边的安全隐患,减少了周边的环境污染,社会效益显著。

5 结论

采用潜孔锤-旋挖组合钻进成孔工艺,较好地完成了本项目的抗滑桩钻孔施工,大大提高了旋挖钻机的钻进效率,成功地解决了硬岩钻进难题。本项目的实施,进一步证明该潜孔锤-旋挖组合钻进技术具有成孔质量好、速度快、操作方便等特点。采用潜孔锤-旋挖组合钻进施工,既提高了钻进效率,降低了生产成本,又因为缩短工期及时消除了周边的安全隐患,项目的经济效益和社会效益显著。根据实际地质情况确定合理的钻进方式,对于提高旋挖钻机的工效,降低钻具损耗,以及指导同类工程的施工有着重要指导和借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 陈祝霄. 旋挖桩施工常见技术问题及对策分析[J]. 四川建材, 2021, 47(1): 89-91.
CHEN Zhuxiao. Analysis of common technical problems and countermeasures in construction of rotary hole filling pile[J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(1): 89-91.
- [2] 邓建红, 戴祥, 刘燕苹, 等. 旋挖桩施工中常见技术问题及对策分析[J]. 城市建筑, 2020, 17(27): 119-120.
DENG Jianhong, DAI Xiang, LIU Yanping, et al. Analysis of common technical problems and countermeasures in the construction of rotary digging pile[J]. Urbanism and Architecture, 2020, 17(27): 119-120.
- [3] 陈茂林. 旋挖桩施工中常见技术问题及对策分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(14): 60-61.
CHEN Maolin. Analysis of common technical problems and countermeasures in the construction of rotary hole filling pile[J]. Engineering Technology Research, 2020, 5(14): 60-61.
- [4] 杨浩. 旋挖成孔灌注桩的设计、施工及应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
YANG Hao. Design, construction and application of rotary hole filling pile[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [5] 尤耀彬. 旋挖钻在岩石地层中的技术研究[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(7): 151-152.
YOU Yaobin. Technical research of rotary drilling in rock stratum[J]. Heilongjiang Jiaotong Keji, 2019, 42(7): 151-152.
- [6] 樊延祥. 旋挖钻进技术在硬岩层围护桩施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(5): 106-109.
FAN Yanxiang. Application of rotary drilling technology for hard rock surrounding pile construction [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(5): 106-109.
- [7] 陈浩文, 殷国乐, 王艳丽, 等. 旋挖钻机用气动潜孔锤反循环硬岩钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2): 68-72.
CHEN Haowen, YIN Guoyue, WANG Yanli, et al. Reverse-circulation hard rock drilling technology with pneumatic DTH

- hammer for rotary drilling rig [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(2): 68-72.
- [8] 牛万保. 旋挖钻机破岩的力学分析及机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- NIU Wanbao. The mechanical analysis and mechanism study of rotary drilling rig rock-breaking [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [9] 周红军. 旋挖钻进技术适用性的初步研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2009, 36(8): 39-45.
- ZHOU Hongjun. The study on applicability of rotary drilling technique [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009, 36(8): 39-45.
- [10] 杨彬. 旋挖钻机潜孔锤振动特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YANG Bin. Study on vibration characteristics of DTH hammer of rotary drilling rig [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [11] 牛庆磊, 吕永亮, 贾炜, 等. 旋挖钻机配套集束式潜孔锤硬岩施工方法研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2015, 42(12): 57-60.
- NIU Qinglei, LU Yongliang, JIA Wei, et al. Study on hard rock drilling construction by rotary drilling rig matched with cluster DTH hammer [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(12): 57-60.
- [12] 蔡芝源, 江红祥. 潜孔锤破岩系统动力学特性研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(1): 62-69.
- CAI Zhiyuan, JIANG Hongxiang. Dynamic characteristics of rock crushing system with DTH hammer [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(1): 62-69.
- [13] 谭现锋, 朱学顺, 胡克祯, 等. 潜孔锤旋挖钻机组合在基岩桩施工中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2006, 43(7): 22-23, 26.
- TAN Xianfeng, ZHU Xueshun, HU Kezhen, et al. Down-the-hole hammer combined with auger drill in the pile of rock foundation [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2006, 43(7): 22-23, 26.
- [14] 张继光, 贾学强, 苏陈, 等. 旋挖钻机在特殊工况中的减压钻进研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(6): 109-112.
- ZHANG Jiguang, JIA Xueqiang, SU Chen, et al. Rotary drilling with reduced WOB under special working conditions [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(6): 109-112.
- [15] 刘家荣, 王建华, 王文斌, 等. 气动潜孔锤钻进技术若干问题[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2010, 37(5): 40-44.
- LIU Jiarong, WANG Jianhua, WANG Wenbin, et al. Some problems on pneumatic DTH drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010, 37(5): 40-44.
- [16] 徐瑞晗. 旋挖钻机潜孔锤钻进特性仿真研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- XU Ruihan. Simulation study on drilling characteristics of down-hole-hammer of rotary drilling rig [J]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [17] 韩益强. 旋挖钻进用牙轮筒钻的结构探讨及应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(6): 64-69.
- HAN Yiqiang. Structure and application of rotary drilling core barrel with roller bits [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(6): 64-69.

(编辑 周红军)