

勘探平硐施工技术与掘进装备发展现状

李 锋¹, 谢玉萍¹, 冉隆田¹, 刘浩杰^{2,3},
文国军^{2,3}, 张冯豆^{2,3}, 贺 鑫^{2,3}, 姚 邹^{2,3}

(1.长江岩土工程总公司(武汉),湖北 武汉 430015; 2.中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院,湖北 武汉 430074;
3.湖北省智能地质装备工程技术研究中心,湖北 武汉 430074)

摘要:平硐勘探是在进行水利水电勘察时,获取山体周围区域的地质参数,全面了解地层情况的一种技术手段。在勘查工作中,首先的目标是查明建筑物的工程地质条件或特殊的地质问题,如断层、夹层等,并进行现场的原位测试和试验。因此,平硐勘探施工技术在重要工程勘察中占据十分重要的地位。如何加快施工进度、缩短工期、解决平硐施工中的难题是这项技术主要的研究方向。目前,平硐的施工工艺和掘进装备已有一定的发展,但是针对勘探平硐开拓技术和相关专用装备的研究仍处于起步阶段。本文主要论述了平硐施工工艺和掘进装备的发展现状,分析其特点及局限性,将不同施工方法的综合性能进行对比,并针对勘探平硐技术发展的实际问题进行分析,探讨了钻孔劈裂方法在勘探平硐中的优势以及适用性,最后基于施工工艺对勘探平硐掘进装备的发展方向进行了展望。

关键词:勘探平硐;钻孔-劈裂方法;掘进装备;工程勘察

中图分类号:P633 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)12-0008-08

Advances in exploration adit construction technology and excavation equipment

LI Feng¹, XIE Yuping¹, RAN Longtian¹, LIU Haojie^{2,3}, WEN Guojun^{2,3},
ZHANG Fengdou^{2,3}, HE Xin^{2,3}, YAO Zou^{2,3}

(1.Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan Hubei 430015, China;
2.School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan),
Wuhan Hubei 430074, China;
3.Intelligent Geological Equipment Engineering Technology Research Center of Hubei Province,
Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Adit exploration is a technical method to obtain the geological parameters of the region around the mountain and comprehensively understand the geology in survey for water conservancy and hydropower works. In the exploration work, the first goal is to find out the engineering geological conditions or special geological problems for the works, such as fault, interlayer, etc, and carry out in-situ tests. Therefore, adit exploration and construction technology occupies a very important position in important engineering investigation. How to speed up the construction progress, shorten the construction period and solve the problems in adit construction is the main research focus in this field. At present, construction technology and excavation equipment for the adit has advanced to a certain extent, but the research and related special equipment is still in the initial stage. This paper mainly discusses the advances in adit construction technology and equipment, and analyzes their characteristics and limitations by comparison of the comprehensive performance of different construction methods. Discussion is also made on the

收稿日期:2020-10-12; 修回日期:2020-11-12 DOI:10.12143/j.tkge.2020.12.002

基金项目:长江岩土工程总公司(武汉)科技项目“勘探平硐非爆破工艺掘进技术研究”(编号:CX2018Z22)

作者简介:李锋,男,汉族,1970年生,高级工程师,工程地质专业,主要从事工程地质勘察工作,1009816496@qq.com。

通信作者:谢玉萍,男,汉族,1990年生,工程师,地质工程专业,主要从事工程地质勘察、检测、施工工作,重庆市巴南区黄溪口12号长江岩土工程总公司(武汉)重庆分公司(401321),649501242.qq.com。

引用格式:李锋,谢玉萍,冉隆田,等.勘探平硐施工技术与掘进装备发展现状[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):8-15.

LI Feng, XIE Yuping, RAN Longtian, et al. Advances in exploration adit construction technology and excavation equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(12):8-15.

actual problems in the development of exploration adit technology, including the advantage and applicability of the drilling-splitting method in exploration adit construction. Finally, the development trend of exploration adit excavation equipment is envisioned based on construction technology.

Key words: exploration adit; drilling-splitting method; excavation equipment; engineering investigation

0 引言

平硐掘进技术在工程勘察、矿山资源开采等领域均有不同程度的发展,在工艺以及机械化配套装置方面也有着较为完善的施工体系^[1-3]。平硐掘进所采用的技术方案需要根据施工要求来进行判断和设计,包括平硐的断面大小、长度、形状、岩石类型、成本、用途等^[4-5]。具体工况的不同衍生出不同的技术方案,比如针对大型平硐的掘进采用凿岩台车配合钻爆法的施工方式、用于煤矿开采掘进的全液压巷道钻机,这种采用机械装备钻出炮孔后,布置炸药爆破的方式具有良好的破岩效果。但一般用于较大断面的平硐掘进,所占体积较大,难以用于平硐勘探掘进当中。

平硐勘探一般是作为大型工程的预研究阶段,主要目的在于对施工区域进行地质勘察,为地质人员全面了解地层提供决策依据。勘探平硐要求的断面尺寸大多是以 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 为主^[6]。随着现代工程开发对工期提出了更高的要求,如何缩短整个平硐开拓的周期,提出符合勘探平硐工况的绿色施工方案,研制适用于小尺寸平硐的钻孔破岩装备成为一个亟待解决的重要工程技术问题。

相比较于矿山巷道,勘探平硐的断面、长度一般较小,施工的环境可能更为复杂,因此对于平硐勘探的钻孔及配套设备的要求也与普通巷道钻机不尽相同。但这些已经成熟应用的平硐掘进装备和方法,对于平硐勘探掘进可以起到很好的借鉴作用。本文通过介绍现有的平硐掘进工艺和装备,分析其适用性和优缺点,概括了勘探平硐装备和工艺的技术要点,并对未来装备的发展进行总结展望。

1 平硐破岩方法

1.1 爆破破岩方法

现如今,多数平硐开挖使用钻爆技术进行施工。钻孔爆破法,即先通过钻孔机械在工作面钻出一定数量的炮眼,之后在炮眼中根据工况和要破碎的岩石多少来布置炸药的药量,起爆引起岩石破碎达到破岩效果^[7]。炸药爆炸生成高温高压气体,膨胀做功引起岩石破坏。爆生气体膨胀力引起岩石质点的

径向位移,由于药包距自由面的距离在各个方向上不一样,质点位移所受的阻力就不同,最小抵抗线方向阻力最小,岩石质点位移速度最高。正是由于相邻岩石质点移动速度不同,造成了岩石中的剪切应力,一旦剪切应力大于岩石的抗剪强度,岩石即发生剪切破坏。同时岩体在冲击荷载的作用下产生应力波和冲击波,首先形成的是应力脉冲,使岩石表面产生变形和运动。由于爆轰压力瞬间高达数千乃至数万兆帕,从而在岩石表面形成冲击波,并在岩石中传播,爆炸应力波在自由面反射后形成反射拉伸波引起岩石破碎。破碎的岩石又在爆生气体膨胀推动下沿径向抛出,形成锥形的爆坑(见图 1)。

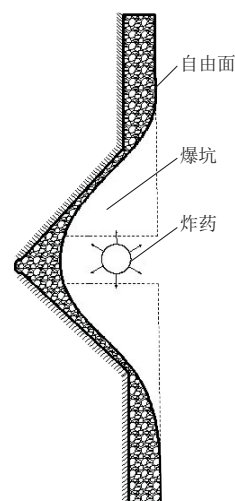


图 1 爆破漏斗

Fig.1 Blasting funnel

岩石爆破破碎正是爆生气体和爆炸应力波综合作用的结果^[8-10]。因为冲击波对岩石的破碎作用时间短,而爆生气体的作用时间长,爆生气体的膨胀促进了裂隙的发展;同样的,反射拉伸波也加强了径向裂隙的扩展;岩体内最初裂隙的形成是由冲击波或应力波造成的,随后爆生气体渗入裂隙并在准静态压力作用下,使应力波形成的裂隙进一步扩展。爆生气体膨胀的准静态能量是破碎岩石的主要能源。

1.2 非爆破破岩方法

近年来,非爆破破岩方法逐渐进入人们的视野,

但仍存在不小技术难度,国内的应用还并不是很多,不论是设备、工艺和材料都在不断的发展完善中。对应着不同的工程要求,非爆破破岩方法主要有静态破碎法、液压劈裂法等。

1.2.1 静态破碎法

静态破碎法主要依靠装填静态破碎剂来进行。静态破碎剂(亦称静态膨胀剂)主要膨胀源为氧化钙,与适量水掺和后产生化学反应,晶体体积的膨胀引起的膨胀压力缓慢的施加给炮孔孔壁。静态破碎剂在炮孔中所产生的膨胀压力一般可达 $30\sim 40$ MPa,而软岩和混凝土产生径向破裂所需的膨胀压力一般小于 $10\sim 20$ MPa,因此只要选取合理的装药量和破裂参数就能达到破碎的效果。静态破碎剂的破岩效果见图2。这种方法在石材开采、城镇结构物的拆除及复杂环境下岩石破碎等工程中得到了大量的应用^[11]。采用静态破碎剂切割大理石、花岗岩或破碎各种岩石、混凝土和钢筋混凝土构筑物时,可完全做到无飞石、无噪声、无振动、无毒气等爆破公害^[12]。



图2 静态破碎法破岩效果

Fig.2 Rock chips with the static rock-breaking method

1.2.2 液压劈裂法

液压劈裂法是近年来发展较快的一种破岩技术,首先在石材开采中得到应用,随后开始应用于其他破岩工程中^[13]。液压劈裂机由动力供给系统(泵站)、液压管路、液压缸、控制元件、楔块组件等构成。工作时,泵向液压系统提供高压油,经控制元件、液压管路而进入液压缸的无杆腔,推动活塞向下运动,通过楔块组件的放大将纵向的推力 P 转化为横向的劈裂力 F ,使岩壁分开(见图3)。从液压劈裂机劈裂岩石的原理来看,劈裂机正常工作至少需要2个自由面。

随着人们对环境 and 安全越来越重视,非爆破破岩方法得到了较大的发展,与常规爆破方法相比,非

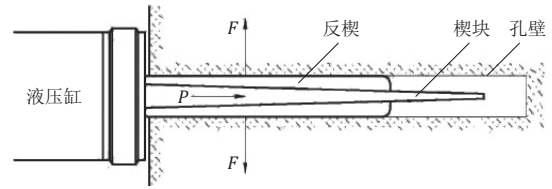


图3 液压劈裂机原理

Fig.3 Principle of the hydraulic splitting machine

爆破法破碎岩石成本高,但它更安全、无污染、无危害。因此在距建筑物较近的地点实施破岩时,应结合爆区周围环境的特点,综合应用这两种手段,合理规划爆破区域与非爆破区域,可以达到既安全又经济的目的。

2 平硐施工工艺现状

与平硐破岩方法相对应,平硐施工工艺一般可分为钻孔爆破平硐施工工艺和非爆破平硐施工工艺。

2.1 传统钻爆平硐施工工艺

传统的平硐施工工艺采取钻爆技术,此方法是在人工或者钻机钻孔后,利用炸药、雷管等爆破器材对岩石断面进行爆破^[14]。爆破技术主要流程为:爆破器材的选取和方案→炮孔布置→起爆方案和装药结构的确定。爆破方案的确定要考虑到工期的因素,尽可能减少炸药的爆破次数,达到节约成本的目的。炮孔的布置包括:掏槽孔、周边孔和辅助孔;掏槽孔的作用是在工作面上创造一个槽腔作为第二自由面^[15-16],一般来说是决定掘进爆破成败的关键;周边孔则决定巷硐断面规格形状,一般均匀布置使得平硐断面满足设计的轮廓线;辅助孔则可以延伸掏槽的范围,主要是作辅助破岩的作用,一般均匀分布在掏槽孔的周围。在布置炮孔后,将炸药装入各个炮孔内,确定起爆时间和顺序,以达到最理想的爆破效果^[17]。

2.2 非爆破平硐施工工艺

随着非爆破破岩方法的快速发展,平硐施工中出现了多种非爆破掘进技术。如悬臂掘进机掘进技术、静态爆破掘进技术、人工水磨钻掘进技术、钻孔劈裂技术等。

2.2.1 悬臂掘进机掘进技术

悬臂掘进机掘进技术根据平硐断面尺寸和岩石力学指标,综合分析施工经济性,选定掘进机的型号。根据掘进机的定位截割范围,可采用上下大台

阶、左右小台阶、分层多台阶施工。这种技术的缺点在于:粉尘大、施工环境差;强度高于 60 MPa 时效率低;节齿消耗大;行走速度慢(6 m/min);同时要求平硐断面尺寸较大。

2.2.2 静态爆破掘进技术

静态爆破掘进技术则是应用静态破碎剂来实现破岩,根据被破碎物体的硬度及被破碎后的尺寸要求,同时根据所选用的静态爆破剂,采用不同的技术参数,以达到理想的爆破效果。静态爆破的施工程序:调查需要爆破的岩石或构筑物→爆破参数计算→选择破碎剂→钻孔→充填灌注→养护→二次破碎→清理。孔位布置:根据施工现场的具体情况,尽可能多地创造临空面,对不同的临空面采取不同的布孔方法,可采取垂直、水平、斜向等布孔方式,为达到更理想的爆破效果^[18],可采取中心掏槽结合垂直、水平、斜向孔同时使用。采用无声破碎剂(Soundless cracking agent)时,对应的钻孔参数见表 1。静态爆破施工程序简单,操作便捷性比较高,施工过程环保,不会与其他施工方式产生干扰。表中 H 表示物体计划破碎高度。

表 1 静态破碎剂布孔参数

被破碎物体类型	钻 孔 参 数				SCA 使用量/(kg·m ⁻³)
	孔径 d /mm	孔距 a /cm	抵抗线 w /cm	孔深 L	
软质岩	45~55	45~65	30~50	1H	9~10
中、硬质岩	42~60	35~60	25~45	1.06H	10~14
软、硬质岩	35~40	25~50	90~200	1H	6~15
无钢筋混凝土	30~50	35~55	35~40	0.7H	8~10
钢筋混凝土	35~50	25~35	20~30	0.8H	13~25
基础、梁、板、柱	35~50	10~30	20~30	0.9H	15~20

2.2.3 人工水磨钻掘进技术

水磨钻主要由水磨钻机、钻筒和专用水泵 3 部分组成。人工水磨钻技术是利用钻机沿着设计的平硐断面轮廓打孔并取出岩心,形成临空面。然后在中间孔锥入风镐楔子挤压岩石,此时岩石同时受到铅垂面上的拉力和水平面上的剪切力作用。当挤压力大于极限抗拉力和极限抗剪切力之和时,岩石沿铅垂面被拉裂并从底部发生剪切破裂,从而达到对岩石支解破碎的目的。

具体施工工艺流程:测量放线→平整场地→清理洞口上方浮石→掌子面开挖(水磨钻钻进先导孔,风镐机清渣)→破岩→出渣→木棚支撑。测量放线

由专业测绘人员进行,测量放线后进行“三通一平”工作,然后清理硐口上方及周围活石或浮石,根据施工情况确定是否进行削坡处理,是否对切坡进行砌筑或挂网喷浆,以及是否在硐口上方和两侧加挖排水沟并用钢筋砼浇筑硐口(门楣),确保施工人员进出安全^[19]。其中进硐段施工最为重要,也是最危险的阶段。硐口段支护好后即可进行掌子面的开挖,水磨钻钻孔、风镐清渣、出渣交替进行,最后进行木棚支撑支护(见图 4)。

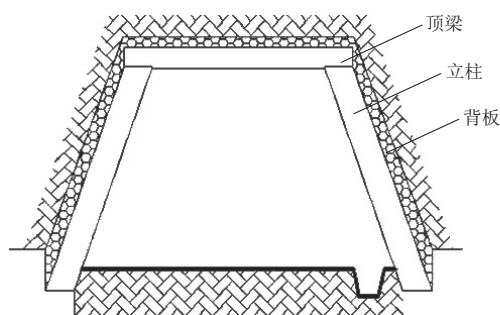


图 4 平硐木支架示意

Fig.4 Schematic diagram of wooden support in the adit

总体来看,人工水磨钻掘进技术效率较低,费用较高,但适应性较好。

2.2.4 钻孔劈裂技术

平硐内钻孔设备与液压劈裂机相结合,平硐掘进工艺流程为:施工准备→测量放线、确定硐口位置→硐口支护→开挖轮廓线确定→布孔→钻孔设备就位→钻孔、取心→钻劈裂孔→液压劈裂机劈裂核心岩体→人工清除劈裂岩体→修边、清除浮石→进入下一循环。其技术要点在于:(1)无需大型设备,所需设备成本低,轻便易维护,易于操作,设备和人员方面的投入较小,施工成本相对较低;(2)钻孔设备及液压劈裂机工作时,产生震动微小、冲击力小、噪声低、粉尘飞屑极少^[20],不会产生有毒气体和其他有害废弃物,对周围环境无影响,施工作业环境明显改善;(3)不受炸材供应限制,报批手续简便,缩短工期,能够组织不间断循环作业,综合效益高;(4)施工工艺简单,组织人员进行简单培训即可上岗,易于学习掌握,便于推广。

2.2.5 综合性能对比

由于掘进原理的不同,上述介绍的几种施工方法在具体工程中所表现出来的效果也不一样(如图 5 所示)。对于人工水磨钻技术:施工后平硐的断面轮廓完整,岩壁表面也较为光滑,同时对工人要求比

较高,施工环境较差。对于以钻爆法为代表的爆破方法:爆破后的断面轮廓不完整,岩壁凹凸不平,存在严重的超挖欠挖问题以及安全性问题。对于悬臂掘进机法:采用铣削岩壁的方式,平硐断面施工的效果佳,岩壁平整度较好,并且能够很好地控制掘进量

和掘进速度,从图5中可以看出施工后的平硐轮廓尺寸比较大。对于钻孔劈裂法:施工后的平硐断面相较于爆破方法有较好的平滑和完整度,减小了超挖欠挖的问题,同时改善了人工水磨钻方法的施工环境,施工的综合效果较好。

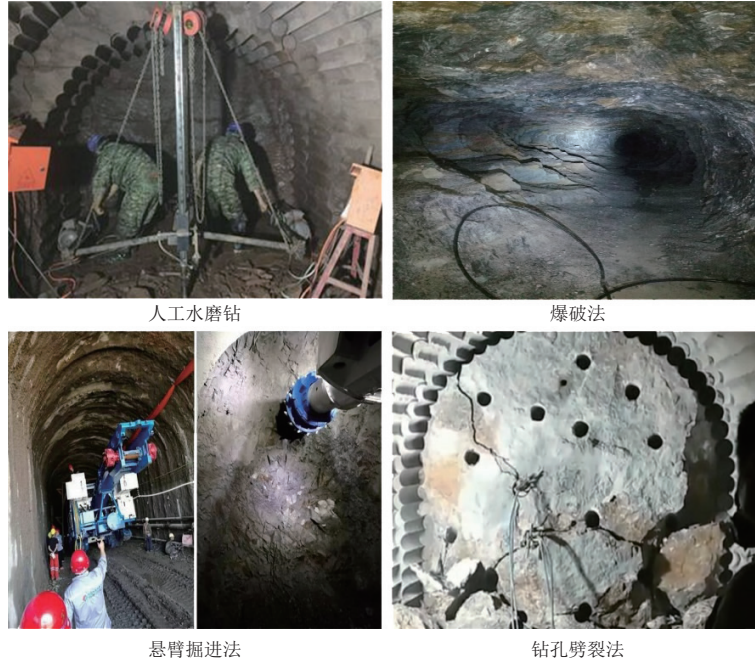


图5 不同施工方法效果

Fig.5 Results from different construction methods

根据上述的平硐施工技术,将几种方法进行比较,表2为平硐不同施工方法的对比。人工水磨钻技术、静态爆破掘进和钻孔劈裂技术适用范围更加

广泛,对于平硐环境、大小的适应性更强。从施工环境和工人劳动强度因素考虑,钻孔劈裂技术相较于前两者又有更好的综合性能。

表2 不同平硐施工方法综合性能对比

Table 2 Comprehensive performance comparison between different construction methods for the adit

施工类型	超欠挖	安全性	劳动强度	施工环境	石材利用	社会影响	初始成本	人工成本	适用性	综合性能
钻爆技术	大	差	大	差	碎石	大	低	高	大断面	差
悬臂掘进技术	小	好	中	中	碎石	中	中	中	大断面	中
静态爆破掘进技术	大	中	中	差	碎石	中	中	高	多类型	中
人工水磨钻掘进技术	中	好	大	差	碎石	小	中	高	多类型	差
钻孔劈裂技术	小	好	小	好	块石	小	高	低	多类型	好

3 平硐掘进装备现状

平硐施工方法的不断优化创新促使相应装备的革新,平硐施工技术在机械化、自动化钻孔装备不断更新条件下得到了快速发展^[21]。在爆破破岩施工中,面向煤矿平硐出现了以耙斗装岩机为主,以侧卸装岩机为主,以钻装机为主和以岩石掘进机为主的4种机械化作业线^[22];面向矿山开挖出现了以凿

岩设备为主的浅孔爆破掘进技术^[23-24]。在非爆破破岩施工中,结合劈裂机工作的凿岩台车以及钻劈台车等设备也逐渐得到应用,在勘探平硐方面,国外Atalas公司研制了针对勘探平硐的小型钻孔取心装备。

3.1 凿岩台车

凿岩台车一般用于隧道施工、矿山开采以及其它地下工程中巷道、隧洞的掘进施工作业,是采用钻

爆法施工的一种凿岩设备,可进行钻爆破孔、锚杆孔、掏槽孔、安装炸药、锚杆、风管等作业。目前的产品分为单臂和多臂类型,图 6 所示为双臂凿岩台车。该设备具有高效、安全、节能、环保,可改善人员作业环境等优点。其配备的液压凿岩机具有强抗倾弯能力、高钻进速度和低钎具消耗等特点,有效提高打边孔作业的使用性能,整机机动灵活,通过性好;钻臂采用专有技术全方位平行保持钻臂,定位精准;钻臂运用交错可伸缩机构,有效提高凿岩范围。钻进系统具有自动防卡钎、防空打及自动退钎功能,有效提高钻进效率。

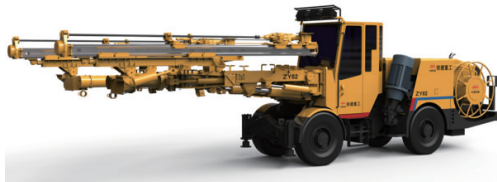


图 6 双臂凿岩台车
Fig.6 Twin-boom drill jumbo

3.2 钻劈台车

钻劈台车将凿岩机钻孔作业和劈裂器劈裂作业有效融合(见图 7),并采用非爆破式静力开挖,能够有效降低施工过程中的震动、飞石、冲击波、噪声、有害气体等影响。可控性高,能够精准控制岩石劈裂,使得施工后隧道周边整齐、平滑,大大降低超欠挖率。在液压系统作用下采用换位机构依次进行钻孔和劈裂岩石的交替作业,采用多自由度操作臂,其可控性高、施工范围广、施工效率高、安全性能高。

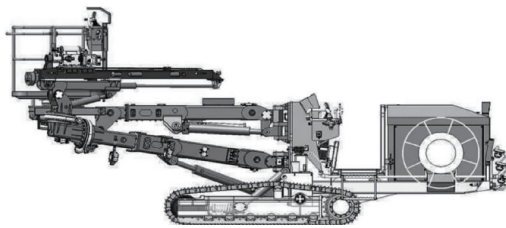


图 7 钻劈台车
Fig.7 Splitting drill jumbo

3.3 Atlas 巷道勘探钻机

由 Atlas 公司研制的巷道勘探钻机 Diamec U6 钻机(见图 8),紧凑的尺寸使它们能够在狭小的空间中移动,采用履带式装载。动力装置、冲洗泵和控制平台的模块化系统使钻机的移动和搬运更加灵活,其单独配备的进给框架和旋转装置,钻机可以根

据施工的需要进行调整,实现竖直平面内 180° 钻孔取心^[25]。



图 8 Diamec U6 钻机
Fig.8 Diamec U6 drill rig

3.4 悬臂掘进机

悬臂式掘进机能够实现切割、装载、运输、行走以及喷雾除尘等功能,施工的原理是以铣削的方式破碎岩石从而进行掘进(见图 9)。它主要由切割机构、装载机构、运输机构、行走机构、机架及回转台、液压系统、电气系统、冷却灭尘供水系统以及操作控制系统等组成。按照前文的分类属于非爆破施工装备,因此所掘进平硐围岩不受震动破坏,有利于巷道支护管理^[26-27]。同时工作的连续性使得切割岩石的量易于控制,可以减少平硐超挖和不必要的工作量,掘进的速度快、效率高。

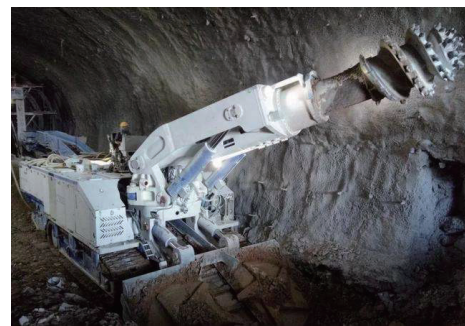


图 9 悬臂掘进机
Fig.9 Boom-type roadheader

4 勘探平硐掘进技术在我国的应用现状

勘探平硐要求的断面尺寸大多是以 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 为主,所处山体环境较为复杂,在机械设备的运输方面极为困难,不利于较大机械进场施工;且由于断面小,降尘、排水的难度较大。

直至今,钻爆法仍然是一种常用而有效的平硐施工方法。例如,陕西省泾河水利工程的可行性研究阶段需要在泾河连杆不同高程开挖若干硐深在

50~250 m的勘探平洞,采用雷管引爆乳化炸药的方法,取得了很好的爆破效果及经济效益。像一些较复杂的地层的施工,如四川安谷水电站勘探竖井,传统的人工挖掘护壁施工难度大,采用的是冲击钻机成孔配合光面爆破的方案进行试验平洞的开挖^[28]。钻爆法的缺点在于爆破成本较高、效率低、噪声大、粉尘较多、地层岩性适应性较差等,因此不适用距离民房或地下或铁路、公路等基础设施较近的水平洞。特别是近年来,办理爆破相关手续的时间越来越长,严重影响勘探工期。爆破法已经不能满足勘查工程对于环境和工期的要求。在工程应用方面,现在仍常采用水磨钻代替人工钻孔。水磨钻机实物见图10,一整套的设备主要包括水磨钻机、水磨钻筒和专用水泵3部分。一般先在周边先钻出设计直径大小的圆,然后在孔中心打一个炮眼,在炮眼中放入炸药引爆,每钻一定深度再循环进行钻孔爆破工作。



图10 水磨钻机
Fig.10 Watermill drill

水磨钻钻孔结合静力爆破剂加热膨胀劈岩则是用静力爆破剂取代传统炸药来进行破岩,属于非爆破方法在勘探平洞中的应用,与之类似的是采用凿岩台车钻孔结合楔形劈裂机劈裂破岩的方式,只是将水磨钻换为凿岩台车,劈裂机替代静力爆破剂,不足之处在于凿岩台车设备尺寸较大,适合勘探平洞使用的凿岩台车需要专门定制。

相较于前两者而言,钻孔-劈裂法的适用性更加灵活。使用平洞钻孔设备进行钻孔,与水磨钻相比

不需要搭设台架,能保证牢固,有足够的强度和稳定性,减少作业过程中的晃动,保证施工安全与施钻精度,在勘探平洞这种小断面平洞掘进中的应用前景更广阔。工程上对于勘探平洞开拓日益增长的需求以及先进工艺方法不断完善,同时也催生着对专用平洞掘进装备的需求。由于空间的限制,适用于勘探平洞的钻机应具备小型便携、效率高、搬迁方便、对地层适应强的特点。工程上对于小型钻机的需求也慢慢得到关注,例如应用于小秦岭金矿田观音峪矿区的便携式钻机^[29]。但是目前专用勘探平洞钻机相关研究还存在不足,这在很大程度上限制了勘探平洞施工技术的推广和应用。

5 结语

由于勘探平洞的特征及其特殊性,在进行施工时比矿山开采在断面上更小,施工空间更狭窄。目前针对矿山平洞掘进机械已日渐成熟,能够实现高效率、自动化精准钻孔。但对于勘探平洞而言,相关机械化装备仍有所欠缺,在施工工艺上仍较多采用钻爆法,因此,基于安全、环保、效率、成本和适用性的要求,为了适应于非爆破破岩的水平洞施工工艺,研制在平洞有限空间内能灵活使用的小尺寸水平成孔钻机及与之相配套的钻具、劈裂系统等已成为未来一个重要的方向。

参考文献(References):

- [1] 秦彦凯.EBZ300Y型掘锚一体机在快速掘进中的应用[J].煤炭技术,2019,38(8):176-178.
QIN Yankai. Application of EBZ300Y driving-bolting integrated machine in rapid excavation[J]. Coal Technology, 2019, 38(8):176-178.
- [2] 钟兆仁,吴建中,高飞.白马水电站岩溶角砾岩基础勘探平洞施工[J].人民长江,2013,44(6):80-82,85.
ZHONG Zhaoren, WU Jianzhong, GAO Fei. Construction of exploratory adit in karst breccia foundation of Baima Hydro-power Station[J]. Yangtze River, 2013,44(6):80-82,85.
- [3] 赵明明.大断面平洞快速施工方法[J].煤,2020,29(6):85-86.
ZHAO Mingming. Rapid construction of large section adits[J]. Coal, 2020,29(6):85-86.
- [4] 张春智.复杂山体平洞施工技术[J].中国矿山工程,2018,47(1):59-62.
ZHANG Chunzhi. Adit construction techniques in complex mountains area[J]. China Mine Engineering, 2018,47(1):59-62.
- [5] 李强.浅析煤矿平洞施工技术的创新与运用[J].价值工程,2013,32(31):126-128.
LI Qiang. Innovation and application of coal mine footrill construction technology[J]. Value Engineering, 2013, 32(31):

- 126—128.
- [6] 宋磊,李琼,刘永波,等.小断面水利勘探平硐爆破掘进技术[J].工程爆破,2016,22(1):53—55,67.
SONG Lei, LI Qiong, LIU Yongbo, et al. Blasting excavation technology of small section water exploration adit[J]. Engineering Blasting, 2016,22(1):53—55,67.
- [7] 汪旭光,等.爆破设计与施工[M].北京:冶金工业出版社,2011.
WANG Xuguang, et al. Blasting design and construction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [8] 苏廷志.硬岩巷道中深孔光面爆破技术研究和应用[D].淮南:安徽理工大学,2007.
SU Tingzhi. Technical study and application on middle deep hole smooth blasting for hard rock tunnel[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2007.
- [9] 陈鹏.小断面隧洞开挖施工技术[J].黑龙江水利科技,2020,48(4):188—190,195.
CHEN Peng. Construction technology of small section tunnel excavation[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020,48(4):188—190,195.
- [10] 余永强,吴帅峰,褚怀保,等.非均质硬岩巷道爆破方法研究[J].工程爆破,2013,19(6):25—27,56.
YU Yongqiang, WU Shuaifeng, CHU Huaibao, et al. Study on blasting method of roadway excavation in heterogeneous hard rock[J]. Engineering Blasting, 2013,19(6):25—27,56.
- [11] 刘伟涛.城市地铁岩石地层非爆破施工试验与应用[J].科技创新与应用,2020(5):167—169.
LIU Weitao. The test and application of non-blasting construction in the subway hard rock tunnel[J]. Technology Innovation and Application, 2020(5):167—169.
- [12] 刘军伟,曹胜利.城际铁路暗挖隧道下穿地表建筑物非爆破施工技术[J].隧道建设,2015(S2):91—96.
LIU Junwei, CAO Shengli. Non-blasting construction technologies for mined tunnel crossing underneath buildings[J]. Tunnel Construction, 2015(S2):91—96.
- [13] 白瑛.钻孔劈裂器在隧道掘进中的应用[J].施工技术,2009(6):87—90.
BAI Ying. Application of drilling splitting device in tunnel driving[J]. Construction Technology, 2009(6):87—90.
- [14] 周爱民.我国硬岩矿山凿岩爆破工艺与装备进展[J].凿岩机械气动工具,2009(1):50—54.
ZHOU Aimin. Progress of drilling and blasting technology and equipment in hard rock mines in China[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2009(1):50—54.
- [15] 蔡建华,刘安邦.机械掏槽在巷道爆破掘进中的应用[J].采矿技术,2014,14(2):86—88.
CAI Jianhua, LIU Anbang. Application of mechanical cutting in tunnel blasting[J]. Mining Technology, 2014,14(2):86—88.
- [16] 黄江.三臂凿岩台车直眼掏槽爆破施工技术[J].中国高新技术,2020(5):76—77.
HUANG Jiang. Construction technology of straight hole cutting blasting by three-arm rock drill trolley[J]. China High-Tech, 2020(5):76—77.
- [17] 武志国.平硐斜井开拓条件下超长岩平巷快速施工技术[J].石化技术,2020,27(5):279,281.
WU Zhiguo. Rapid construction technique of overlong rock entry under the condition of adit inclined shaft opening[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020,27(5):279,281.
- [18] 李晓辉.静态爆破技术在隧道开挖施工中的应用[J].建材与装饰,2018(22):236—237.
LI Xiaohui. Application of static blasting technology to tunnel excavation[J]. Construction Materials & Decoration, 2018(22):236—237.
- [19] 刘建兵.爆破振动作用下平硐开挖前后边坡的动态响应研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
LIU Jianbing. Research on the dynamic response of the slope under the blasting vibration before and after the adit excavation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [20] 席超.地铁站岩石地层非爆破条件下施工技术研究[J].中国科技纵横,2018(6):99—101.
XI Chao. Study on construction technology of underground railway station under non-blasting condition[J]. China Science & Technology Overview, 2018(6):99—101.
- [21] 李美吉,杨宇飞,杨海玲.2009 全国矿山建设学术会议文集(下册)[C]//中国煤炭学会煤矿建设与岩土工程专业委员会.中国煤炭学会,2009:5.
LI Meiji, YANG Yufei, YANG Hailing. Proceedings of the national academic conference on mining construction (Volume II) [C]// Coal Mine Construction and Geotechnical Engineering Committee of China Coal Society. China Coal Society, 2009:5.
- [22] 姚雪松.煤矿巷道掘进机械装备发展浅析[J].黑龙江科技信息,2011(23):87.
YAO Xuesong. A brief analysis on the development of coal mine roadway tunneling machinery and equipment[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(23):87.
- [23] 田富强.矿用坑道钻机以及配套钻具关键技术研究[D].太原:太原理工大学,2017.
TIAN Fuqiang. Research on key technology of mine of tunnel drilling rig and its drilling tool[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [24] 陈玉凡,朱祥.钻孔机械设计[M].北京:机械工业出版社,1986.
CHEN Yufan, ZHU Xiang. Drilling machinery design[M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [25] New Diamec U6 APC core drill. (Product & Process News) [Z]. 2002.
- [26] 漆泰岳,李斌.悬臂掘进机在复杂断面地铁隧道中的应用研究[J].现代隧道技术,2011(4):32—38.
QI Taiyue, LI Bin. Application of boom-type roadheader in a metro tunnel with complex cross-sections[J]. Modern Tunneling Technology, 2011(4):32—38.
- [27] 李振国.EBZ-240 型悬臂式掘进机的研制[J].煤矿机械,2011(12):147—149.
LI Zhenguo. EBZ-240 type cantilever roadheader design[J]. Coal Mine Machinery, 2011(12):147—149.
- [28] 付兵,陈红卫,陈达.四川安谷水电站勘探竖井及试验平硐施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):80—84.
FU Bing, CHEN Hongwei, CHEN Da. Construction technology of exploration shaft and test adit of hydropower station in Sichuan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(6):80—84.
- [29] 翟新建,李大鹏.ROCK-600 型钻机在小秦岭金矿田勘探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):94—98.
ZHAI Xinjian, LI Dapeng. Application of ROCK-600 drill rig in exploration in Xiaolinling Goldfield[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):94—98.