

水电工程探洞开挖掘进技术现状及发展趋势

王光明, 张正雄, 王俊博

(中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041)

摘要: 本文全面探讨了水电工程探洞开挖掘进技术的现状及发展趋势。首先, 介绍了探洞勘探的定义、作用及其在水电工程中的重要性。随后, 详细分析了传统钻眼爆破法、机械掘进法和新型掘进技术的技术特点、应用范围及优缺点。文章还探讨了当前探洞开挖掘进技术面临的主要挑战, 包括地质条件复杂、环境保护要求和施工效率与安全问题。最后, 展望了未来探洞开挖掘进技术的发展趋势, 包括智能化与自动化技术、绿色环保技术的应用。本文旨在为水电工程勘探探洞开挖掘进技术的进一步发展提供参考和指导。

关键词: 水电工程; 探洞; 开挖掘进技术; 钻眼爆破法; 机械掘进法

中图分类号: TV554 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0047-05

Current status and development trends of adit excavation technology in hydropower engineering

WANG Guangming, ZHANG Zhengxiong, WANG Junbo

(Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming Yunnan 650041, China)

Abstract: This paper comprehensively examines the current status and development trends of tunnel excavation technology in hydropower projects. First, it introduces the definition, functions, and significance of exploration adit in hydropower projects. Subsequently, it provides a detailed analysis of the technical characteristics, application scope, advantages, and limitations of traditional drill-and-blast methods, mechanical excavation methods, and emerging tunneling technologies. The paper also discusses the major challenges faced by current tunnel excavation techniques, including complex geological conditions, environmental protection requirements, and concerns regarding construction efficiency and safety. Finally, it outlines future development trends, such as the application of intelligent and automated technologies, as well as green and environmentally friendly techniques. This study aims to serve as a reference and guide for the further advancement of tunnel excavation technology in hydropower projects exploration.

Key words: hydropower projects; exploration adit; excavation technology; drill-and-blast method; mechanical excavation method

0 引言

水电工程勘察主要为工程设计服务, 对水电工程有关地质问题做出评价。工程勘察常用的手段有钻探、探洞、坑槽探、地球物理勘探、测试、现场及室内试验等。各种勘探手段适用范围不同, 通常综合考虑各种勘探手段特点, 采用多种手段互相验证

和补充。《水电工程坑探规程》(NB/T 10340—2019)^[1]对探洞定义为沿与水平面夹角不大于6°掘进的坑道。勘探探洞可实现以下目的: (1) 查明地层岩性、风化、卸荷程度及岩体完整性; (2) 查明地质构造(包括断层、软弱夹层、挤压带及节理)发育情况及分布规律; (3) 查明工程地质及水文地质条

收稿日期: 2025-05-29; 修回日期: 2025-06-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.008

基金项目: 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司科研项目“复杂堆积体综合勘察技术研究及应用”(编号: RD93)

第一作者: 王光明, 男, 汉族, 1985年生, 副总工程师, 正高级工程师, 地质资源与地质工程专业, 硕士, 主要从事工程勘探工作, 云南省昆明市学府路691号, 253530844@qq.com。

引用格式: 王光明, 张正雄, 王俊博. 水电工程探洞开挖掘进技术现状及发展趋势[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 47-51.

WANG Guangming, ZHANG Zhengxiong, WANG Junbo. Current status and development trends of adit excavation technology in hydropower engineering[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 47-51.

件;(4)在洞内配合开展钻探、物探、现场物理力学试验及取样工作等。

随着科学技术的不断进步和绿色勘察技术的发展,探洞施工方法逐渐由单一钻眼爆破法发展到钻眼爆破法、TBM法、悬臂掘进法、水磨钻掘进法、钻孔式硬岩隧道掘进法等多种施工方法。常规水电工程一般在预可研阶段布置探洞,探洞长度50~200 m,一般不超过400 m,断面尺寸以2.0 m×2.0 m、2.5 m×2.2 m为主;抽水蓄能电站一般在可研阶段布置探洞,探洞长度一般超过400 m,断面尺寸以2.5 m×2.2 m、2.5 m×2.5 m、3.0 m×3.0 m为主。

随着国家安全生产、职业健康、环境保护等法律法规不断健全和完善,深入研究探洞开挖掘进技术的现状及发展趋势,对于提高勘探效率、保障施工安全和促进水电工程的可持续发展具有重要意义。

1 水电工程探洞开挖掘进技术现状

1.1 钻眼爆破法

钻眼爆破法是探洞开挖掘进中最常用的技术之一。其基本原理是通过钻孔、装药和爆破的方式破碎岩体,然后进行出渣和支护。钻眼爆破法具有适用范围广、经济性好和作业便捷等特点,适用于各种地质条件和工程规模。然而,钻眼爆破法也存在一些缺点,如爆破震动对围岩的损伤、施工效率相对较低、安全风险较高、距居民区要有一定距离等。因此,应综合地形、地貌、地质条件和周边环境条件等,合理选择爆破参数和施工工艺,以最大限度地发挥钻眼爆破法的优势,减少其不利影响。

钻眼爆破法通常使用手风钻或凿岩台车钻孔,采用人工或扒渣机装车出渣,手推车或小型出渣车运输至洞外后,再用自卸车运输至指定位置。

1.2 TBM法

TBM(Tunnel Boring Machine)是一种集机、电、液压、流体、信息、控制等技术于一体的大型开挖掘进设备,大大提高了隧道的开挖效率。TBM法适用于中硬至硬岩地层,具有开挖掘进效率高和围岩扰动小等优点。

2022年4—8月,水电五局承担的垣曲二期抽水蓄能电站地质勘探探洞率先采用TBM“江源15号”(新型敞开式TBM,开挖直径3.63 m,长度75 m,最小转弯半径30 m,整机质量230 t)进行探洞掘进开

挖,与人工钻眼爆破法相比,更加绿色节能、安全高效,有效缩短工期4个月,是全国首例TBM掘进探洞,日进尺约22 m,开挖直径3.63 m、洞长1338.2 m,最大纵坡5‰。“江源15号”进场20余天即完成始发,历时129天完成掘进任务。勘探探洞岩性主要为石英砂岩,岩石强度高,抗压强度大于100 MPa。地质条件复杂,TBM掘进过程中共穿越断层破碎带43次,其中超过10 m的9个,最宽断层破碎带达40 m。“江源15号”单班最快掘进16.03 m,单日最快掘进31.05 m,创造了同级别TBM单日进尺纪录,有效保障了垣曲二期抽水蓄能电站工程的建设进度。

葛洲坝勘测设计公司2024年4—7月使用“岫岩号”TBM(新型敞开式TBM,开挖直径3.53 m,设备总长60 m,最小转弯半径30 m)完成辽宁岫岩龙潭抽水蓄能电站可研阶段勘探探洞主洞掘进任务,创下最高日进尺37.08 m、最高月进尺804.07 m的纪录。

综合研究分析表明,因地质(断层破碎带、涌水突泥、软岩变形、超硬岩)和洞径因素的影响,TBM施工效率波动明显,一般条件下月掘进进尺在300~500 m之间^[2]。

TBM与钻眼爆破法相比,除成本高不占优势外,在安全、社会效益、工期、技术及环境等方面都具有优势,见表1。

1.3 悬臂式掘进机法

悬臂式掘进机法是铣挖法最主要的方式,具有机械化程度高、快速掘进、连续作业、断面规则、对围岩扰动小、岩体界面相对连续完整等优点,也存在地质适应性受限、初期投资高、进尺速度存在瓶颈、通风与除尘要求严格等局限性。目前国外加快了对悬臂掘进机的研究步伐,使之逐渐应用于中硬和硬岩巷道的掘进施工^[3-4]。

悬臂式掘进机在勘探探洞中应用能否成功,关键在于地质条件是否匹配。

(1)理想:抗压强度低于50 MPa的煤层、泥岩、砂岩、页岩、风化岩、部分灰岩。

(2)可尝试但效率/成本需评估:中等硬度完整岩层(50~80 MPa)。

(3)不适用或效率极低:极硬岩、石英含量高的强磨蚀性岩层,严重破碎/大涌水/高地压/膨胀岩等复杂不良地质体。

表 1 TBM 法与钻眼爆破法对比		
工 法	TBM 法	钻 眼 爆 破 法
施工速度	200~1200 m/月	80~200 m/月;很多地区受爆破作业管制限制,施工进度被迫中断
施工安全	不需要爆破,安全风险低	需要爆破施工,安全风险高
施工质量	对周边围岩扰动小,成洞表面圆顺光滑	对围岩扰动大,超欠挖较为普遍
文明施工	好	差
作业环境	通风较好,无明显烟尘	通风差,灰尘大
人员投入	较少	较多
环境保护	纯机械破岩,对周边环境基本无影响	爆破施工,对周边环境影响较大
工期	组装设备耗时长;连续掘进,效率高,工期短	工序多,工期长
管理	自动化、信息化程度高,数据可以远程传送、实时监控	管理难度大
经济性	机械化施工,人力投入少,设备费用相对较高	设备费用低,人力投入大,同时间接增大工程量,增加费用
适用性	定制设备,适用硬岩地层,对进场公路要求高,始发平台占地面积大,洞口地形地貌需开阔平缓	适用面广,灵活性强

目前水电工程探洞尚无悬臂式掘进机法应用报道。

1.4 人工水磨钻法

岩石的核心力学特性:

(1)强度各向异性:岩石具有显著的不对称抗破坏能力,其单轴抗压强度远高于抗拉强度与抗剪强度。

(2)拉裂破坏机制:当外部荷载产生的张拉应力超过岩石极限抗拉强度时,岩石发生张拉破裂,裂隙沿最大主应力方向扩展。

(3)剪切破坏机制:当剪切应力超过岩石的极限抗剪强度,且在 Mohr-Coulomb 准则的临界应力状态下,岩石发生剪切滑移破坏,形成斜向破裂面。

水磨钻法施工探洞充分利用了岩石的三大力学特性,核心原理采用“周边钻孔取心切割围岩+中心钻孔分块劈裂”的方法进行探洞掘进开挖。在不干扰围岩原始条件下,采用水磨钻沿探洞设计轮廓线进行连续近似水平钻孔取心,钻孔直径 160~180 mm,钻进深度 60~80 cm,通过连续钻孔成环,使掌子面岩石和山体围岩分离,形成开挖轮廓,同时为掌子面内岩体劈裂提供临空面。掌子面内岩石分区域施钻预裂孔,预裂钻孔仍采用水磨钻进行,钻孔深度 50~80 cm,钻孔自上而下分层分列布置,把掌子面上岩石根据岩石硬度分成大小均匀块体,具体块体大小可根据出渣运输条件和设备确定^[5]。主要施工工艺如图 1 所示。

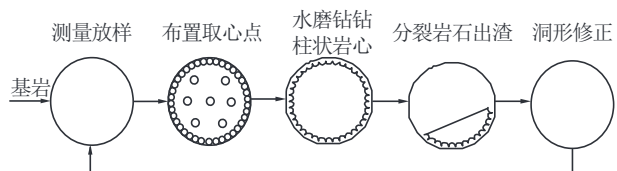


图 1 人工水磨钻法施工工艺

水磨钻每循环进尺 0.6~0.8 m,耗时 15 h,工作面进尺约为 30 m/月。从我院在某水电站 PD704 实施情况来看,人工水磨钻掘法日进尺是钻爆法的 1/3,每米成本是钻爆法的 2 倍多,但适应性较好,一般用于离居民区较近、不具备爆破条件且深度小于 150 m 的探洞。

1.5 钻孔式硬岩隧道掘进法

钻孔式硬岩掘进机是在人工水磨钻基础上发展起来的一种新型静态爆破施工技术,可在无震动、无飞石、无噪声、无污染的条件下完成探洞掘进工作。该设备设置液压马达恒压驱动钻筒,自动钻进,自动出心,解决了大部分设备的断心卡心除心难的问题,加快了探洞掘进效率,提高了文明施工水平。探洞内钻孔设备与液压劈裂机相结合的探洞掘进工艺流程为:施工准备→测量放线、确定洞口位置→洞口支护→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^[6-7]。钻孔式硬岩隧道掘进法每循环进尺 1~1.2 m,适用于断面尺寸大于 2.5 m 的探

洞,施工效率是人工水磨钻法的3倍,与钻爆法接近。

1.6 静态爆破掘进法

静态爆破掘进法则是通过钻孔注入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破碎剂,采用不同的技术参数,以达到理想的爆破效果。孔位布置确定时应根据施工现场的具体情况,尽可能多地创造临空面,对不同的临空面采用不同的布孔方式,如水平、斜向等布孔方式。为达到更理想的爆破效果^[8],可采取中心掏槽结合斜向钻孔、水平钻孔等方式。静态爆破掘进法基于钻孔,与水磨钻法程序类似,差别在于劈裂方式不同。目前,静态爆破掘进法通常与水磨钻配合使用。

1.7 综合性能对比

(1)钻眼爆破法:传统打眼放炮的钻眼爆破法每月开挖进尺100 m左右,且对周围岩层的扰动大。

(2)机械破岩法:包括TBM法、悬臂式掘进机破岩法、人工水磨钻法和钻孔式硬岩隧道掘进法等手段,但都存在一定的局限性。TBM法适用于断面尺寸 ≥ 3.5 m、地质条件稳定的中长探洞施工,同时造价高;悬臂式掘进法则在开挖过程中粉尘较大,且超欠挖严重,无法掘进硬岩探洞;人工水磨钻法劳动强度大、工作环境恶劣且危险、效率低;钻孔式硬岩隧道掘进法只省去了人工架设钻架的工作,钻掘的灵活度不够,且需人工劈裂岩石,工作环境仍存在危险性,人工装载碎石料,劳动强度高^[6]。

(3)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。人工水磨钻技术:施工后探洞的断面轮廓完整,岩壁表面也较为光滑,对工人要求比较高,施工环境较差。以钻眼爆破法为代表的爆破方法:断面轮廓不完整,岩壁凹凸不平,存在严重的超挖欠挖问题及安全性问题。悬臂掘进机法:采用铣削岩壁的方式,探洞断面施工效果佳,岩壁平整度较好,且能够很好地控制掘进量和掘进速度。钻孔式硬岩隧道掘进法:施工后的探洞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^[8]。TBM法:洞壁较光滑,对洞壁清洁度要求更高。

(4)人工水磨钻法、静态爆破掘进和钻孔式硬

岩隧道掘进法适用范围更加广泛,对于探洞环境、尺寸的适应性更强。从施工环境和工人劳动强度因素考虑,钻孔式硬岩隧道掘进法相较于前两者又有更好的综合性能^[6]。

2 探洞开挖掘进技术面临的主要挑战

地质条件的复杂性是探洞开挖掘进技术面临的主要挑战之一。水电工程通常位于山区或河谷地带,地质条件复杂多变,岩体结构、构造和物理力学性质差异较大。例如,断层、裂隙、软弱夹层和地下水等地质因素都会对探洞开挖产生不利影响,增加施工难度和风险。因此,在探洞开挖过程中,需要详细勘察地质条件,合理选择掘进技术和施工工艺,采取有效的支护和加固措施,以保障施工安全和工程质量。

随着环保意识的增强,探洞开挖掘进技术面临的环保要求也越来越高。传统钻眼爆破法会产生爆破震动、噪声和粉尘,但该方法仍然是主流掘进方式。悬臂式掘进机法虽然环境影响相对较小,但仍存在泥浆处理、废水排放和噪声污染等问题。因此,在探洞开挖过程中,需要采取有效的环保措施,如降噪、除尘、废水处理和生态修复等,以减少对环境的负面影响。

施工效率与安全问题是探洞开挖掘进技术面临的另一重要挑战。探洞开挖通常需要在高地应力、高水压和复杂地质条件下进行,施工难度大,安全风险高。传统钻眼爆破法施工效率相对较低,且存在爆破震动和飞石等安全隐患。机械掘进法虽然施工效率较高,但设备故障和围岩失稳等问题仍可能影响施工进度和安全。因此,在探洞开挖过程中,需要采用先进的施工技术和设备,加强施工管理和安全监控,提高施工效率,保障施工安全。此外,智能化、自动化技术的应用,也为提高施工效率和安全性提供了新的途径。

3 探洞开挖掘进技术的发展趋势

(1)智能化与自动化技术是探洞开挖掘进技术未来发展的重要方向。随着人工智能、随钻感知等技术的快速发展,智能化掘进设备和系统逐渐应用于探洞开挖中。例如,智能掘进机能够通过传感器和控制系统实时监测掘进参数和围岩状态,自动调整掘进速度和方向,提高施工精度和效率。自动化

出渣系统和支护设备也能够减少人工操作,提高施工安全性。此外,基于大数据和人工智能的施工管理系统,能够实现施工过程的实时监控和优化,提高施工效率和质量。未来,智能化与自动化技术将在探洞开挖掘进中发挥越来越重要的作用,推动探洞开挖向高效、精准和安全的方向发展。

(2)绿色环保技术是探洞开挖掘进技术发展的另一重要趋势。随着环保要求的不断提高,传统掘进技术产生的环境影响逐渐成为制约探洞开挖的重要因素。因此,开发和应用绿色环保掘进技术,减少施工过程中的噪声、粉尘、废水和废气排放,成为探洞开挖掘进技术发展的重要方向。未来,绿色环保将成为探洞开挖掘进技术发展的重要驱动力,推动探洞开挖向可持续、环保的方向发展。

(3)开发和应用高效安全掘进技术,提高施工速度和安全性,成为探洞开挖掘进技术发展的重要方向。例如,高效掘进设备和快速支护技术能够显著提高施工效率,减少施工周期。先进的地质预报和围岩监测技术能够及时识别和预警潜在的地质灾害,保障施工安全。

4 结语

水电工程探洞开挖掘进技术面临着地质条件复杂、环保要求高和施工效率与安全等多重挑战。未来的探洞装备将朝着自动化、智能化、多功能集成化、便携化等方向发展^[9]。未来探洞开挖掘进技术的发展趋势将主要集中在智能化与自动化技术、绿色环保技术和安全高效技术三个方面。同时,随着水平定向钻探和物探技术的成熟,部分探洞逐步

被水平定向钻探技术替代^[10]。在不具备钻爆法施工条件,而TBM法又不经济的情况下,如何采用非爆破开挖掘进探洞值得深入研究,如研究大口径钻探结合定向钻进技术、潜孔锤技术实施探洞等^[11]。

总之,探洞开挖掘进技术的发展是一个不断探索和创新的过程。未来随着科技的进步和工程需求的不断提高,探洞开挖掘进技术将不断取得新的突破,为水电工程的发展提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 国家能源局.水电工程坑探规程:NB/T10340—2019[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [2] 许琦,叶健,张广厦,等.定向钻探技术在隧洞超前地质预报中的应用初探[J].钻探工程,2025,52(3):30-36.
- [3] 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.
- [4] 李振国.EBZ240型悬臂式掘进机的研制[J].煤矿机械,2011(12):147-149.
- [5] 中电建十一局工程有限公司,中国水利水电第十一工程局有限公司.水磨钻非爆破石方洞挖施工的方法:CN109026019B[P].2018-12-18.
- [6] 安徽理工大学.一种全自动全截面水磨钻孔式硬岩隧道掘进机:202411484168.4[P].2025-01-24.
- [7] 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.
- [8] 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(11):236-237.
- [9] 杨鸣,谢玉萍,龙三,等.平硐勘探绿色施工技术[J].绿色科技,2020(20):176-178.
- [10] 孙刚,朱泳,赵敏,等.基于水平钻探的地形变观测平硐勘察方法研究[J].钻探工程,2024,51(2):154-160.
- [11] 胡郁乐,赵海滨,姚震桐.坑道定向钻进系统在隧洞水平勘探工程中的适应性分析[J].钻探工程,2023,50(5):116-124.

(编辑 王跃伟)