

水利工程小断面水工隧洞悬臂式掘进机施工关键技术研究

潘苏锋 覃大泰 朱继伟 柴东威

中国安能集团第一工程局有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i7.7065

[摘要] 小断面水工隧洞净空受限、工序干扰集中,钻爆法还面临爆破振动、超欠挖和通风排烟时间长等问题。结合近年来小断面引水隧洞、导流洞机械开挖实例,分析悬臂式掘进机的适用边界,提出由地质复核、设备选型、分区切割、连续出渣、快速支护和环境控制组成的施工技术体系。研究认为,工程应用的关键不在单机截割能力,而在围岩强度与节理条件识别、设备外形和转弯能力校核、截割参数动态调整以及开挖—支护—运输系统匹配。以广西某灌区小断面引水隧洞为案例开展技术复盘,形成软弱夹层处理、富水段超前处置、硬岩段刀具保护和狭窄空间安全组织措施。该体系可为Ⅲ—Ⅴ类围岩小断面水工隧洞无爆破施工方案比选与现场控制提供参考。

[关键词] 水利工程; 小断面水工隧洞; 悬臂式掘进机; 机械开挖; 初期支护

中图分类号: TV52 **文献标识码:** A

Key Technologies of Boom-type Roadheader Construction for Small-section Hydraulic Tunnels in Water Conservancy Projects

Sufeng Pan Datai Qin Jiwei Zhu Dongwei Chai

China Aneng Group First Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] Small-section hydraulic tunnels feature restricted clearance and intensive interference among excavation, mucking and support operations. Drill-and-blast excavation may also cause vibration, overbreak, underbreak and long ventilation downtime. Drawing on recent mechanical excavation practices in diversion and water-conveyance tunnels, this paper defines the applicability of boom-type roadheaders and develops a construction system covering geological verification, equipment selection, zoned cutting, continuous mucking, rapid support and environmental control. The analysis shows that successful application depends not merely on cutting power, but on identifying rock strength and joint conditions, checking machine dimensions and maneuverability, dynamically adjusting cutting parameters, and matching excavation with support and haulage. A technical review of a small-section irrigation tunnel in Guangxi is presented, with measures for weak interlayers, water-rich zones, cutter protection in hard rock and safety management in confined spaces. The proposed methods provide a reference for non-blasting construction in Class III–V surrounding rock.

[Key words] water conservancy project; small-section hydraulic tunnel; boom-type roadheader; mechanical excavation; initial support

引言

小断面水工隧洞广泛用于输水、灌溉、导流及检修通道,断面多呈城门洞形或马蹄形。受净空和单通道条件限制,设备避让、转身、检修以及开挖、出渣、支护、管线延伸常在同一空间内交叉进行。钻爆法设备投入灵活,但每循环均需完成钻孔、装药、警戒、起爆、排烟和危石处理;邻近建(构)筑物、生态敏感区及禁限爆区域还会增加审批与安全组织难度。悬臂式掘进机兼具截割、装载、转载和行走功能,可连续剥落岩体,具有无爆破冲击、轮廓易控制等特点,已用于小断面水工隧洞施工^[1]。

现有研究主要讨论设备应用效果、现场常见问题和复杂地质条件下的无爆破开挖技术^[1-3],但小断面场景中的关键矛盾并非单纯提高截割功率。围岩强度、磨蚀性和完整性升高时,截齿磨耗、机身振动与单位能耗随之增加;节理密集、软硬互层或地下水发育时,又易发生片帮、卡头、底板泥化和履带打滑。狭窄空间还放大了散热、除尘、运输车及人机交叉风险,设备选型偏大、喷雾降尘不足和后配套能力失配均会削弱机械开挖优势^[2]。为此,本文结合小断面引水隧洞、导流洞公开工程资料,从地质适用性、空间校核、分区截割、出渣通风、初期支护及

异常工况处置等方面归纳关键技术,并以广西桂西北治旱百色水库灌区东蚕—东笋隧洞为对象复盘施工组织,以期为同类工程的无爆破方案比选和现场控制提供参考。

1 适用性评价与设备配置

1.1 地质适用性分区

施工前应在勘察成果基础上复核掌子面岩性、完整性、节理产状、地下水和围岩类别,并结合洞口试验段进行可掘性验证。评价不能仅采用完整岩块强度。节理切割形成的结构面会降低实际破岩阻力,而高磨蚀矿物、硅质胶结和孤石会迅速损伤截齿。建议将掌子面划分为正常截割区、降载截割区和辅助处理区:岩体较软且节理发育时连续截割;软硬互层或局部完整硬岩降低摆速、减小切深;连续硬岩、巨块或设备剧烈振动时暂停作业,采用液压破碎、静态致裂或其他经审批的辅助工艺。复杂地质隧洞无爆破施工实践表明,围岩分级与支护参数联动是控制坍塌风险的前提^[3]。

1.2 设备选型与空间校核

设备选型应以截割能力、外形尺寸、接地比压、爬坡能力、转弯半径和供电条件为依据。先将运输状态宽度、高度与洞口、渐变段及最小净空逐点比对,再校核截割头覆盖范围是否满足拱顶、边墙和底角成形。设备名义功率只代表能力上限,若转载机、胶带或车辆运输能力不足,提高截割功率反而会增加空转等待。下水库导流洞采用EBZ260型设备的公开案例显示,机械法优势需要从安全、质量、进度和经济性整体评价^[1]。小断面设备配置要点见表1。

表1 小断面悬臂式掘进设备配置与校核要点

系统	主要校核内容	控制要求
截割系统	岩性、强度、磨蚀性、截割范围	先试切后定参数,异常振动立即降载
行走系统	最小净空、坡度、底板承载、转弯半径	两侧保留检修与应急撤离空间
装运系统	铲板宽度、转载高度、车辆或胶带能力	出渣能力不低于平均截割排渣需求
供配电	电压等级、电缆长度、漏电与接地保护	电缆随进尺规范延伸,设置机械防护
除尘通风	产尘点、风量、喷雾水压、污水排放	截割头内外喷雾与局部通风协同

2 施工关键技术

2.1 超前预报与掌子面确认

掘进前以地质素描为基础,记录岩性变化、节理开度、渗水位置及掉块特征。富水、断层破碎或岩溶风险段,应按设计要求组合使用超前钻孔、地质雷达或其他物探手段,探孔同时承担验证水压、水量和填充物性质的任务。每循环将实际揭露情况与预报结果比对,出现涌水突增、岩粉颜色变化、截割电流持续抬升或异常空腔时停机复核,不得依靠加大切深强行通过。岩溶富水小断面长隧洞研究同样强调超前地质识别、开挖与排水组织的协同^[4]。

2.2 分区截割与轮廓成形

截割宜遵循“先软后硬、先下后上、分层分区、左右对称”的原则。先在掌子面下部形成自由面和集渣空间,再向两侧及上部扩展,拱部最后修整。单次切入不宜过深,摆动速度应随岩性、块度、电流和振动变化调整。遇软硬互层时,从软层切入释放硬层临空面,避免截割头正面冲击硬夹层;遇顺层结构或不利节理时,切割方向应减少对潜在楔形体的扰动。轮廓控制采用激光指向、断面放样和定期扫描相结合,拱肩、底角等设备盲区用小型机械修整。广西灌区引水隧洞的应用资料表明,小断面机械开挖需把设备适应性、轮廓质量和操作注意事项纳入统一控制链^[5]。

截齿状态直接影响成形质量。每班检查齿座、喷嘴和截齿转动情况,偏磨、断齿及齿座松动应及时处理;截齿更换不能仅按固定进尺执行,还应结合岩粉粒径、火花、切削声响及电流波动判断。截割头空转时禁止接触岩面,停机检修前必须断电、闭锁并释放液压能。推荐工序见图1。



图1小断面悬臂式掘进机施工闭环流程

2.3 出渣、通风与排水协同

小断面洞内难以设置常规会车道,应按洞长和断面选择连续皮带、梭式矿车或小型自卸车,并在洞外或扩挖段组织调度。车辆出渣时,掌子面设置固定装载区,人员不得进入铲板和转载机回转、挤压范围;长距离单洞运输可采用信号灯、定位或区段放行,防止倒车盲区冲突。运输道路及时整平并设排水沟,泥化底板铺设级配料或临时路面,减少履带打滑和设备姿态变化。

通风量应同时满足人员、新风、粉尘和设备散热要求。截割点采用内外喷雾抑尘,局部通风机和风管口随掌子面推进,避免风管过远形成粉尘回流;喷雾水与渗水经临时沟、集水坑和沉淀设施排出,禁止积水淹没电缆接头。水雾过大却无有效排水时,会造成视线受阻、底板泥化和电气风险,故除尘不能脱离排水系统单独考核。

2.4 开挖与初期支护衔接

表2 关键工况风险与现场控制措施

工况	主要征兆	控制措施
硬岩或高磨蚀带	电流升高、火花增多、截齿偏磨	减小切深与摆速,检查截齿,必要时辅助破岩
软弱夹层	片帮、掉块、轮廓失稳	先加固后开挖,缩短循环,及时封闭支护
富水破碎带	探孔出水、掌子面渗流增大	超前探排、分级泄压、预注浆并完善备用排水
运输受阻	铲板积渣、转载等待、道路泥化	调整车次,清沟整路,截割与运输联动限产
粉尘和热害	能见度下降、回风温升	恢复喷雾与通风,检查风筒距离,人员撤至安全区

机械开挖扰动较小,但不能据此延长危险围岩暴露时间。Ⅲ类围岩可在稳定性确认后按循环组织系统支护;Ⅳ、Ⅴ类围岩

应缩短进尺,遵循“短进尺、弱扰动、快封闭、勤量测”,必要时布置超前小导管或管棚。停机后先处理松动块体,再实施锚杆、钢筋网、钢架和喷射混凝土。支护台架与掘进机在同一作业区时实行空间隔离和能源闭锁,严禁截割、吊装与人员近机作业同时进行。表2列出主要风险及控制动作。

3 工程案例技术复盘

广西桂西北治旱百色水库灌区东蚕一东笋1号、2号隧洞属于典型小断面引水隧洞,公开研究已对悬臂式掘进机的施工特点、质量控制及适应性进行分析^[5]。公开资料未披露产量和成本等量化数据,本文仅围绕同类工程的工艺组织进行技术分析。该类工程洞径小、运输通道单一,围岩条件沿线变化,设备一旦进入长距离洞段,换机与大型维修困难。因此,进洞前的整机尺寸复核、试验段参数确定、易损件储备和后配套匹配,比追求单班最高进尺更重要。

正常围岩段可按“测量放样—设备就位—下部开槽—分区扩挖—轮廓修整—出渣清底—地质确认—初期支护—质量检测”循环推进。操作人员依据截割电流、振动和岩粉状态调整切深,不将设备额定能力直接作为现场控制值。软弱夹层段先核实产状;夹层与洞轴小角度相交、拱肩可能形成滑移体时,先施作超前锚固或小导管,再降低循环进尺。富水段坚持“探明后处置”,按水压和水量选择排水、泄压或注浆,配置双回路排水及备用电源。局部完整硬岩超过稳定截割能力时采用经论证的辅助破岩,不以持续超载换取短时进尺。

质量验收重点包括轴线、高程、断面轮廓、超欠挖、松动岩块处理和支护实体质量。每循环断面检测结果回传至下一循环放样;连续出现同一部位欠挖,说明截割轨迹或设备站位存在系统偏差,应校正定位,而非在衬砌前集中凿除。安全管理实行司机、指挥和支护负责人岗位确认,截割区设硬隔离或明显警戒,检修执行停电挂牌和机械防下落措施。上述组织将设备控制、地质决策与工序验收连成闭环,适合小断面长距离施工条件。

4 施工控制体系与评价

项目可建立“地质适应性—设备状态—循环效率—成形质量—职业健康”五类指标。地质适应性记录岩性、围岩类别、涌水和异常体;设备状态记录电流、油温、振动、截齿消耗及故障时间;循环效率分解截割、出渣、支护和等待时长;质量指标关注超欠挖与支护闭合时间;职业健康监测粉尘、噪声、

温度和风速。指标用于识别瓶颈,不宜只用日进尺评价班组。若截割时间缩短而运输等待增加,应优化后配套;若截齿消耗异常,应复核岩性和操作参数;若围岩变差导致支护时间上升,应主动下调循环进尺。

方案比选还应计算设备进退场、洞口拆装、供电增容、易损件、通风除尘和辅助破岩成本。短洞、极硬完整岩体或断面变化频繁时,悬臂式掘进机不一定经济;长距离、禁限爆、软至中硬且节理适度发育的隧洞,更能体现连续施工和轮廓控制优势。评价应覆盖全工期,并将安全风险、环境约束和后续衬砌超挖回填纳入,而非仅比较开挖单价。

5 结论

(1)小断面水工隧洞采用悬臂式掘进机的首要条件是完成地质可掘性与空间可达性双重校核。岩块强度、岩体结构、磨蚀性、地下水、设备外形和后配套能力共同决定方案可行性。

(2)分区截割应随岩性、电流、振动和截齿状态动态调整,并与出渣、通风、排水和初期支护同步组织。以单机功率或瞬时进尺代替系统匹配,容易造成等待、过载和安全风险。

(3)结合广西小断面引水隧洞公开资料与前述技术分析,试验段定参、软弱夹层预加固、富水段超前探排、硬岩辅助处理及轮廓闭环检测可作为机械开挖的控制重点。工程推广中仍需依托现场试验与施工台账验证其效果,并建立适合具体地质条件的参数阈值。

【参考文献】

- [1]罗小生.悬臂式掘进机在小断面水工隧洞施工中的应用[J].红水河,2024(4):128-131.
- [2]张红,林孝帆.悬臂式掘进机在小断面水工隧洞施工中的常见问题及分析[J].四川水利,2023(2):101-103.
- [3]张建斌,赵海龙,杨振刚.复杂地质条件下隧洞无爆破掘进技术研究[J].科技创新与应用,2024(23):175-180.
- [4]徐起.岩溶富水地质小断面长距离隧洞施工关键技术研究[J].建设机械技术与管理,2025(1):163-165.
- [5]毛建平.悬臂式掘进机在小断面引水隧洞开挖中的应用[J].广西水利水电,2022(2):86-89.

作者简介:

潘苏锋(1995--),男,汉族,河南信阳人,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向:岩土工程及施工管理。