

# Excavation Method of Milling Excavator for Small Cross-section Mudstone Tunnel

Zhijiang Shang

Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

To address challenges such as rock mass softening, weathering susceptibility, water-induced instability, excessive excavation, high safety risks, and severe dust pollution in small-section hydraulic mudstone tunnels, this study develops a milling excavator method for tunnel construction based on practical experience from Qinghai's Yindaji-Huangjiang West Canal Tunnels 33#, 36#, and 37#. The innovative approach employs modified milling heads for mechanical excavation, combined with full-face staged excavation and real-time support systems. Key advantages include minimal rock disturbance, high formation accuracy, enhanced construction safety, reduced dust emissions, and streamlined workflow. Field applications demonstrate that tunnel over-excavation is controlled within 5cm, monthly average progress rates significantly improved, and shotcrete over-consumption rates substantially decreased. The project delivers outstanding economic, social, and environmental benefits, providing reliable technical references for similar small-section soft mudstone hydraulic tunnel excavations.

## Keywords

small cross-section hydraulic tunnel; mudstone; excavator milling excavation; weak surrounding rock; non-blasting excavation

# 小断面泥岩隧洞铣挖机开挖工法

商志江

西南石油大学, 中国 · 四川 成都 610000

## 摘 要

针对小断面水工泥岩隧洞围岩易软化、易风化、遇水失稳及传统钻爆法扰动大、超挖严重、安全风险高、粉尘污染大等问题, 依托青海引大济湟西干渠33#、36#、37#隧洞工程实践, 形成小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法。该工法以改装铣挖头实现机械铣挖, 采用全断面分步开挖、及时支护工艺, 具有围岩扰动小、成型精度高、施工安全、粉尘少、工序紧凑等优势。工程应用表明, 隧洞超挖控制在5cm以内, 月均进尺显著提升, 喷射混凝土超耗率大幅降低, 经济效益、社会效益与环保效益突出, 可为同类小断面软弱泥岩水工隧洞开挖提供可靠技术参考。

## 关键词

小断面水工隧洞; 泥岩; 铣挖机开挖; 软弱围岩; 无爆破开挖

## 1 引言

目前我国水利工程项目越来越多, 在水利建设项目中常穿山开挖建成封闭式的输水道, 称为水工隧洞。在国家组织建设青海引大济湟水利项目地处青海省西宁市跨越大通县, 湟中县。地表起伏较大, 涉及引水隧洞多达 条。我单位承建的青海引大济湟西干渠工程二标 33# 隧洞出口段总长 1900m, 断面开挖面积 12.17m<sup>3</sup>, 属小断面长隧洞<sup>[1]</sup>。隧洞围岩以古近系砂质黏土岩为主, 砖红色, 泥质胶结, 易软化, 易风化, 属软岩。隧洞埋深在 8m-134m 之间, 隧洞地下水总体活动中等, 大部分隧洞有串珠状、线状流水, 断层及其影响带有涌水的可能性<sup>[2]</sup>。针对隧洞断面小, 围岩为

遇水易软化的泥岩特点我部在隧洞开挖过程中采用铣挖机进行开挖装渣, 避免了采用爆破对围岩的扰动破坏, 减少过程中粉尘, 既保证了施工安全方便, 又有效控制作业过程中粉尘, 保障了工人的作业环境。

## 2 工法特点

小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法工法特点主要有以下几点:

铣挖机开挖利用本身动力通过铣挖头对岩体进行铣削, 振动低, 扰动小, 相较钻爆法施工, 减少了对围岩的扰动, 避免了在开挖后围岩压力重新分布的过程中由于被扰动围岩范围过大不能自稳引起的大面坍塌, 掉块, 因此能够减少因围岩不能自稳发生坍塌, 掉块造成的经济浪费<sup>[3]</sup>。

铣挖机在软岩中开挖, 能够精确控制开挖轮廓, 形成与设计较一致的圆顺轮廓线, 既避免了在围岩压力重新分布过

【作者简介】商志江(1980-), 男, 中国河北平山人, 本科, 高级工程师, 从事土木工程管理研究。

程中的应力集中造成的局部掉块，同时也能够有效避免隧洞开挖的大欠大超，减少人工处理超欠时间，节约施工成本<sup>[4]</sup>。

铣挖机开挖取代了人工在掌子面亲自施工，能够避免因开挖过程中围岩掉块，掌子面失稳对工人造成的伤害，极大的提高了工人施工的安全性，减小了人员伤亡的可能性<sup>[5]</sup>。

铣挖机开挖减少了因隧洞爆破过程中作业环境中产生的粉尘数量，保障了工人的身体健康。

### 3 适用范围

小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法工法适用于引水隧洞断面在 18m<sup>2</sup> 以下，隧洞宽度小于 5m，高度小于 4.5m 的软弱泥质，土质围岩引水隧洞及类同结构物的开挖。

### 4 工艺原理

小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法工艺原理为通过在扒渣机头部将扒渣机扒斗更换为铣挖头，采用电力提供工作动力，通过铣挖头对岩体的旋转切削达到对隧洞开挖及轮廓的控制，从而完成隧洞的开挖，并为后续工序提供作业条件。

### 5 施工工艺流程及操作要点

#### 5.1 施工工艺

对小断面水工隧洞采用铣挖机开挖主要采用全断面开挖工艺流程。

#### 5.2 施工工艺操作要点

开挖过程中对掌子面下部开始自下而上，自里向外进行铣挖，逐步扩大开挖范围与进尺，最后预留 30cm 左右进行修整，开挖过程中若岩石软硬不均，因先挖较硬部位，再挖软弱岩体。铣挖过程中根据开挖进尺确定每循环单次铣挖深度与次数，单次铣挖深度 30cm ~ 50cm，单次循环进尺与单次铣挖深度的比值即为铣挖次数，最后进行修整开挖轮廓。开挖完成后检查开挖轮廓，符合验标要求后，进行支护作业，及时对围岩按设计要求进行支护，避免长时间裸露造成围岩掉块，塌落。

### 6 质量控制

#### 6.1 质量控制标准

隧洞开挖及支护施工质量控制按 SL631-2012《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准 - 土石方工程》、SL378-2007《水工建筑物地下开挖工程施工规范》、GB50086-2015《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》执行。

#### 6.2 质量控制措施

实行工班自检、工序互检、质检人员专检的三级检查制度，按不合格工程，坚决返工重做，并对交接人员进行追查，按照奖优罚劣制度，做到奖罚分明。

开挖定位放样采用红外线导向仪进行准确定位，按土

质洞室开挖施工质量标准要求控制开挖轮廓

设计要求布设支护杆件，保证规格型号、数量和间距；采用湿喷工艺，保证喷锚强度、密实度和厚度。软弱破碎围岩地段支护及早封闭成环。

钢支撑及钢筋网片按设计材料、尺寸采用工厂集中制作。安装前根据施工图纸检查验收加工质量，确保钢支撑有足够强度、刚度。安装确保中线、标高、尺寸、安装垂直度与设计相符，安装稳固牢靠。保证钢支撑在衬砌断面以外。附件与腹杆安装位置准确，焊接牢固。初期支护的参数，施工中根据地质情况，确定施工方法，必要时适当调整支护参数。

喷射混凝土作业分片自下而上，分段进行。分层喷射时，后层喷射在前次喷射混凝土终凝后进行。喷射混凝土表面尽量平整，确保没有干斑、疏松、裂缝、脱空、漏喷、漏筋、空鼓、渗漏水等现象。按照规范要求对喷射混凝土进行养生。

### 7 安全措施

本工法严格执行《中华人民共和国安全生产法》、SL398-2007《水利水电工程施工通用安全技术规程》、《建设工程安全生产管理条例》等法律、法规、技术规程。

建立健全相应的岗位责任制，做好安全教育培训及技术交底落实班前安全教育。

严格执行隧洞用电安全规定，隧洞工作地段照明采用 36V 安全电压。

铣挖机电做好线路及接头的防护，做好设备的三级配电、两级保护措施，用电必须采用“一机一闸一漏一箱”。

用电线路采用“三相五线制”TN-S 接零保护系统，用电设备做好接地保护。

电工持证上岗，严禁无证上岗，私拉乱接，严禁带电进行设备修理维护

设备用电及高压电操作配备必须带绝缘手套，穿绝缘鞋，按用电规程进行操作。

做好围岩变形观测，出现险情立即撤离掌子面。

8.8 做好粉尘及气体检测，定期组织洞内作业人员进行体检。

### 8 环保节能措施

本工法严格执行《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国水污染防治法》。

项目部成立环境保护组织机构，针对隧洞施工过程中的噪音污染，粉尘污染，水污染制定详细的检测程序及控制指标，按要求安排专人落实。

洞口设置三级污水沉淀池，隧道排水经沉淀净化后排放。

对水质进行定期检测，保证排水达到规定要求。

通过检测噪声进行对比，超过规定的部位设置声屏障。

洞内气体与粉尘安排专人进行检测，记录，洞内采用

风管式通风，并在超过粉尘指标超过规定洒水降尘。

## 9 效益分析

小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法对软弱泥质土质围岩隧洞的开挖提供了一种避免采用爆破开挖的施工方法，因采用电力作为动力减少了因采用爆破施工造成的粉尘污染，避免了因爆破震动对附近居民的影响与爆破噪声对居民的干扰，同时在开挖过程中同时进行出渣作业，减少了工序时间，缩短循环时间，加快了施工进度。以引大济湟西干渠 33# 隧洞出口进行效益分析。

采用该工法施工对隧洞轮廓的控制精度可以达到 5cm 以内，减少隧洞超挖，与爆破法开挖对比每米可以节约回填喷射混凝土 0.5m<sup>3</sup>，33# 隧洞全长 1900m 共计节约施工成本 61.75 万元，同时因出渣与开挖同步进行节约工序循环时间 2 小时每天按两循环考虑，每循环人工 15 人，一天直接 60 小时人工，按 8 小时工作制，每天直接节省人工 7.5 工日，全隧洞共计减少人工 4453 工日，合计费用 89 万元。

## 10 应用实例

### 10.1 引大济湟西干渠 33# 隧洞

工程概况：33# 隧洞全长 3206.12m，出口施工任务 1900m，工程位于景阳镇中岭村。隧洞设计流量 9.25m<sup>3</sup>/s，设计纵坡 1/1500。隧洞采用城门洞型断面，初支采用 I16 钢拱架挂网波浪形喷锚，厚度 10cm，径空断面尺寸 2.80m×2.90m。围岩以砂质粘土岩为主，其中 V 类围岩 2275.76m，占隧洞总长的 70.98%。

施工情况：引大济湟西干渠 33# 隧洞出口采用小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法有效避免爆破施工引起的隧洞超挖，施工成本节约效果显著，隧洞自 2017 年 5 月 27 日开始施工至 2018 年 12 月 13 日结束施工，隧洞开挖 1900m，有效施工时间为 16 个月，月平均进度为 119m。

工程监测与结果评价：隧洞平均超挖 5cm，开挖轮廓圆顺，喷射混凝土超耗率月最高超耗 1.71 倍，月最低超耗率 0.29 倍，平均 1.1 倍与设计及允许超挖 10cm 的计算超耗率 1.6 倍相比显著节约喷射混凝土。

全隧洞在 16 个月的有效施工时间内完成 1900m 隧洞开挖支护，在引大济湟西干渠、北干渠的各个洞挖进度中最高，相比隧洞月平均 70m 进度开挖进度显著提高。

### 10.2 引大济湟西干渠 36#、37# 隧洞

工程概况：36# 隧洞、37# 隧洞全长 2482.19m，工程位于景阳镇下岗冲村。隧洞设计流量 6.48m<sup>3</sup>/s，设计纵坡

1/1500。隧洞采用城门洞型断面，初支采用 I16 钢拱架挂网波浪形喷锚，喷锚厚度 10cm，二次衬砌采用模筑钢筋混凝土，径空断面尺寸 2.50m×2.62m。围岩以古近系砂质粘土岩为主，其中 V 类围岩 1164.44m，占隧洞总长的 46.91%；IV 类围岩 1317.75m，占隧洞总长的 53.08%。

施工情况：引大济湟西干渠 36# 隧洞、37# 隧洞出口隧洞围岩为砂质黏土岩为主，前期隧洞超挖严重，施工进度较慢，隧洞自 2017 年 11 月 1 日开始采用小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法，月均进度 97m

工程监测与结果评价：隧洞超挖得到了有效控制，喷射混凝土超耗率由前期的 2.4 倍降至现在 1.5 倍，施工月均进度由前期的月均进度 70m 提高至月均进度 85m。取消了爆破开挖消除了对附近居民的影响，从而减少了外部施工环境的干扰。

## 11 结语

小断面水工泥岩隧洞铣挖机开挖工法，依托青海引大济湟水利工程实践验证，切实解决了小断面、软岩、易软化泥岩隧洞爆破开挖扰动大、超挖严重、安全风险高、粉尘污染大等难题。该工法以机械铣挖替代传统爆破，工艺成熟、可控性强、效益突出，既保障了隧洞施工安全与成型质量，又显著降低成本、提升进度，同时兼顾环保与作业健康，为同类小断面软弱围岩水工隧洞施工提供了可复制、可推广的实用方案，在水利地下工程建设中具备良好的应用前景与推广价值。

## 参考文献

- [1] 刘进,刘登学,黄书岭,等.第三系泥岩隧洞工程建设实践[J].长江技术经济,2025,9(02):87-92.
- [2] 裴成元,张思炀,李伯昌,等.蠕变影响下白垩系泥岩隧洞衬砌力学特性分析[J].四川建材,2024,50(11):64-67+91.
- [3] 杨朝帅,李达强.膨胀泥岩特性对隧道长期稳定性的影响[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册).中铁隧道局集团有限公司;广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室;中铁隧道勘察设计研究院有限公司,;2024:40-44.
- [4] 石广斌,魏娟娟,肖清,等.泥岩隧洞仰拱矢跨比对围岩稳定性的影响[J].矿业工程研究,2023,38(03):1-8.
- [5] 田洪铭,舒晓云,陈卫忠,等.泥岩大变形隧洞缓冲层让压支护应用研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S2):4121-4129.