



悬臂掘进机在岩溶地层输水隧洞开挖中的应用实践 ——以贵阳市花南花中输水工程隧洞为例

叶生华¹²

(1 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2 贵阳水资源开发投资有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 花南花中输水工程隧洞为三类、四类、五类围岩隧洞, 穿越喀斯特岩溶、地下暗河、临近水库等不良地质段, 复杂的、特殊的地质状况, 导致隧洞开挖施工安全风险非常高; 该隧洞邻近既有建筑、桥梁桩基、穿越市政道路路基, 施工难度大, 安全要求高, 钻爆法不能够满足城区施工的安全要求。本文通过悬臂掘进机工法开挖对比钻爆开挖法的优点, 研究了悬臂掘进机掘进施工技术, 通过实际工程案例在开挖技术、工程进度方面的工程实际应用, 悬臂掘进机工法在水工隧洞施工中具有非常广阔的工程应用前景。

关键词: 岩溶, 输水隧洞, 引水发电, 悬臂掘进机法, 钻爆法

岩溶又名喀斯特, 以贵州高原为中心的西南岩溶地区, 是全球面积最大、接连成片、分布集中的喀斯特地貌, 分布面积约 50 万平方公里。贵州喀斯特地貌 10 余万 km², 占西南地区的 20%, 这些岩溶地质给隧道与地下工程建设带来了很大的难度和考验。

岩溶地区输水及引水发电隧洞常采用钻爆施工, 钻爆法通过定位放线测量、掌子面钻孔、孔内安装炸药、连线、点火爆破、排烟、清运渣土等施工工序环节, 爆破引起的冲击

作者简介: 叶生华(1981—), 男, 汉族, 博士生, 高级工程师, 研究方向: 输调水工程建设与结构安全。

E-mail: 308971721@qq.com

2790-5446 /© Shuangqing Academic Publishing House Limited All rights reserved.

Article history: Received March 13, 2023 Accepted April 26, 2023 Available online April 28, 2023

To cite this paper: 叶生华(2023). 悬臂掘进机在岩溶地层输水隧洞开挖中的应用实践——以贵阳市花南花中输水工程隧洞为例. 工程科学与技术研究, 第1卷, 第2期, 1-9.

Doi: <https://doi.org/10.55375/estr.2023.2.1>

对隧洞和临近的工程结构产生振动、炸药单耗大、超挖及欠挖等一些弊端。盾构法施工可以有效解决钻爆法施工存在的问题，但其一次性投入成本高，组装、操作和检修技术要求高，适用范围相对局限(王士民，何川 &高云龙，2012)。采用悬臂掘进机开挖可最大限度的避免许多不利因素，使得工期及安全总体可控(谢达文，2013)。悬臂掘进机开挖的方法是指开挖截割头装在悬臂上的部分断面掘进机，同时实现切割岩层、装载运出、机身行走、喷雾除尘等功能的一体化隧洞开挖方法。

本文通过实际工程(花南花中输水工程)为例，介绍了悬臂掘进机工法的工程实际应用，演示了悬臂掘进机工法在水工隧洞施工中具有非常广阔的工程应用前景。

1. 工程概况

花南花中输水工程隧洞全长 12.3km，开挖断面为 4.2m×4.1m(高×宽)，隧洞衬砌后为直径 3m 的钢筋混凝土有压隧洞，由花溪输水隧洞、花南输水隧洞、花中输水隧洞组成，沿线设计 5 条辅助施工支洞，隧洞最大埋深约为 85m，最浅埋深 8m，花溪输水隧洞是重点控制工程，该隧洞工程建成后向南郊水厂输水 25m³/d, 向中曹水厂输水 20m³/d, 同时在隧洞末端利用 60m 左右的水头设置小水电 800KW 发电消能后向中曹水厂供水。输水隧洞布置图见图 1、输水隧洞开挖图见图 2。



图 1：输水隧洞布置图



图 2：输水隧洞开挖图

花南花中输水工程隧洞位于贵州贵阳岩溶地区，隧洞喀斯特岩溶发育地区，地形地貌起伏较大，溶腔较多、溶洞发育、地面落水洞及洼地强发育分布。隧洞临近花溪水库为微风化灰岩，岩溶非常发育，中段主要为中风化灰岩、泥质白云岩，出口为强风化灰岩夹泥岩、岩体较为破碎。

(1)花溪输水隧洞:HX0+000~HX7+225 段已完成开挖 6955m,三类围岩 4373m 占 60.5%、四类围岩 2031m 占 28.1%、五类围岩 510m 占 7.1%，特殊不良地质洞段 36m 占 0.5%，隧洞围岩强度 20MPa 至 40MPa，个别最大 60MPa，灰岩薄层发育，灰岩及泥质白云岩发育，局部地段有裂隙、岩溶管道等不良地质；

花溪输水隧洞：HX7+225~HX8+187.387 段，三类围岩 378m 占 40.1%、四类围岩 420m 占 44.5%、五类围岩 144m 占 15.3%，特殊洞段 36m 占 0.5%，隧洞围岩强度 20MPa 至 40MPa，局部洞段裂隙、岩溶管道、大溶洞发育。

(2)花南输水隧洞(HN0+000~HN3+352.762)，三类围岩 2034m 占 60.69%，四类围岩 421m 占 12.56%，五类围岩 875m 占 26.10%，特殊洞段 22m 占 0.65%，隧洞围岩强度 10MPa 至 40MPa，局部洞段裂隙、岩溶管道发育。

(3)花中输水隧洞(HZ0+000~HZ0+799)，三类围岩 275m 占 34.5%，四类围岩 311m 占 38.9%，五类围岩 197m 占 24.6%，特殊洞段 16m 占 2.0%，隧洞围岩强度 20MPa 至 40MPa，局部洞段裂隙、岩溶管道、大溶洞发育。

3. 工程重难点问题

(1)隧洞距离既有桥梁桩基、建筑基础较近，沉降及振动控制要求高。

(2)临近花溪水库 HX0+265、HX0+752、HX1+126 桩号，这一地带地质以三类围岩为主，在开挖过程中碰到了溶洞、岩溶管道、地下暗河与花溪水库联通，施工风险很大。

(3)在花溪隧洞穿越地下暗河段，岩溶裂隙发育，汛期每年来水十分丰沛。整个穿越过程都是与地下主暗河平行或与暗河支流相交，隧洞位于地下 40 米、水下 25 米，在穿越暗河段的过程中，要时刻考虑到水会灌通到隧洞里来的风险。

4. 悬臂掘进机与钻爆法对比

通过对悬臂掘进机施工与钻爆法施工的对比，悬臂掘进机施工有几个方面的优点(谢达文,2015)：

(1)悬臂掘进机施工开挖对围岩振动小，围岩不易被爆破破坏，缩短钻爆法爆破排烟的时间，隧洞能够及时支护，降低垮塌的风险，掌子面的安全稳定得到及时控制。

(2)悬臂掘进机掘进开挖和隧洞出渣可以做到同步进行，有效提高隧洞开挖、出渣运输速度 1.5 倍左右。

(3)悬臂掘进机开挖隧洞可以有效降低超挖量 15%左右，隧洞支护工程量相应可以减少 15%左右。

(4)悬臂掘进机开挖，采用一送一吸的通风方式，极大地改善了隧洞施工的作业环境。

5. 悬臂掘进机施工技术

5.1 悬臂掘进机及参数介绍

悬臂掘进机(徐工 XTR260 型号)：由切割、装载、行走、液压、电气、机架等系统组成，如图 3 所示，其技术参数见表 1，配套施工设备见表 2。

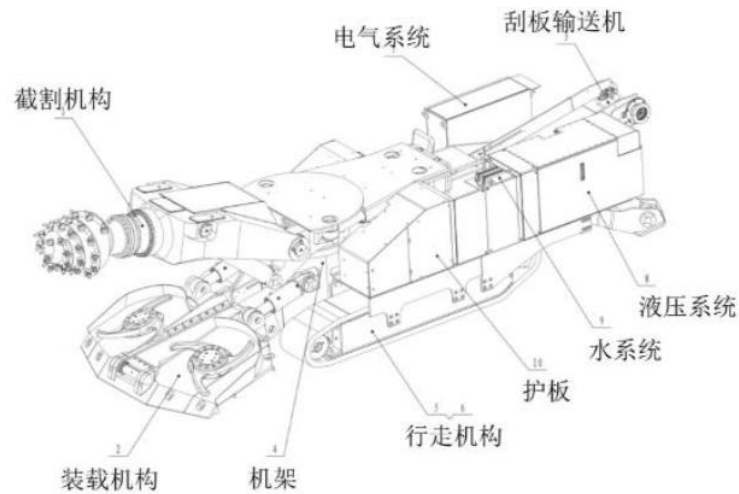


图 3 悬臂掘进机结构示意图

表 1 徐工 XTR260 悬臂掘进机技术参数

编号	名称	技术参数	编号	名称	技术参数
1	定位切割高度/mm	7100	7	整机长/mm	18000
2	定位切割宽度/mm	7500	8	铲板宽/mm	3400
3	爬坡能力/(°)	±18	9	机身宽/mm	3200
4	切割硬度/MPa	≤90	10	机身高/mm	3200
5	切割电机功率/kW	260	11	供电电压/V	1140
6	卧底深度/mm	440	12	总重量/t	75

5.2 隧洞初支配套设备

悬臂掘进机向前掘进开挖完成一段隧洞开挖后，需要及时判定开挖的围岩级别，及时作锚杆或钢拱架支护施工，确保隧洞围岩的稳定(周黎明,et.al.,2018)、(张 杨,et.al.,2018)。根据设计要求四类围岩可以采用打 3m 深的锚杆，挂钢筋网片，然后用 C20 喷射混凝土喷射支护；五类围岩段应采用安装钢拱架支护，挂钢筋网片，然后用 C20 喷射混凝土喷射支护(宋战平,et.al.,2020)、(王 震,et.al.,2019)。

表 2 悬臂掘进机配套设备

序号	配套设备	规格和数量
1	混凝土湿喷机	CHP25B, 1 台
2	出碴运输设备	JC3B1000EM, 3 台
3	出碴装料设备	ZL50 装载机, 1 台
4	混凝土搅拌车	8 方罐车, 2 台
5	喷射混凝土生产设备	HZS120 搅拌站, 1 座
6	移动式变压器	10kV 转 1140V, 容量 630kVA
7	变压器-掘进机	3×95+1×3 铜线电缆
8	变电站-移动式变压器	铜线电缆(3×35+1×16)
9	供水管道	常温水, 水流量≥60L/min
10	通风设备	通风机 KCS-1500D-B, 1 台
11	水泵	污水泵、潜水泵, 若干台

5.3 出渣设备及配套运输车辆

悬臂掘进机的机头前部铲板和尾部圆形星轮联合出渣,通过旋转切割下来的隧洞岩石渣土送入掘进机输入口,由刮链板、运输皮带系统,将隧洞岩石渣土输送到掘进机尾部的输出口,最后进入运输车辆的车厢内。出渣运输一般根据隧洞大小、长度、坡度等选择自动卸车车辆。隧洞出渣示意如图 4 所示。

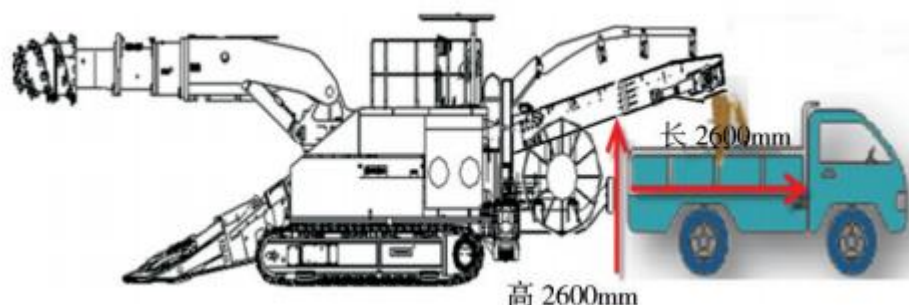


图 4 隧洞出渣示意图

5.4 隧洞电、水、风配套技术

根据隧洞大小及围岩强度,选用的悬臂掘进机(徐工 XTR260 型号),需要两台变压器供电,一台变压器 1140V, 630kVA 供掘进机开挖供电,另一台变压器 380V 供其它配套设备使用;供电电缆根据隧洞长度合理选择,通过操作液控电缆卷筒按钮控制线缆的伸缩。当洞外变压器与隧洞内掘进机之间的距离大于 1.2km 时,电压不满足掘进开挖的供电电压要求,需要设置一台升压装置升压。另外,为了应急准备需要配置 2 台柴油发电机,以满足隧洞施工临时应急抽水、照明供电的需求。380V 的变压器供电布置与其它隧洞一样。

隧洞内设置多级抽水设施，根据隧洞高程和泵的扬程接力抽排水，采用污水泵或渣浆泵将掌子面积水抽至交叉口集水坑或通过排水沟自流至交叉口集水坑，再通过 25kW、50kW、75kW 的多级泵向洞外沉淀池排水。隧洞外设置水处理沉淀设施对隧洞抽出来的水进行沉淀、净化处理，达到排放标准进行排放或循环使用。采用钢管将自来水安装至掘进机作用的掌子面，流量大于 50L/min，通过一定流量的供水对悬臂掘进机水雾化除尘、液压系统、截割头进行冷却。

隧洞内采用一送一吸的通风方式，掘进机掘进施工过程中，通风采用外轴流风机送风和吸(抽)风系统进行通风及降尘，极大地改善了隧洞施工的作业环境。

5.5 悬臂掘进机掘进技术

根据花溪水库至南郊、中曹水厂输水工程隧洞围岩强度及隧洞大小，施工采用全断面开挖，边开挖边支护，开挖支护循环进行施工，如图 5 所示。

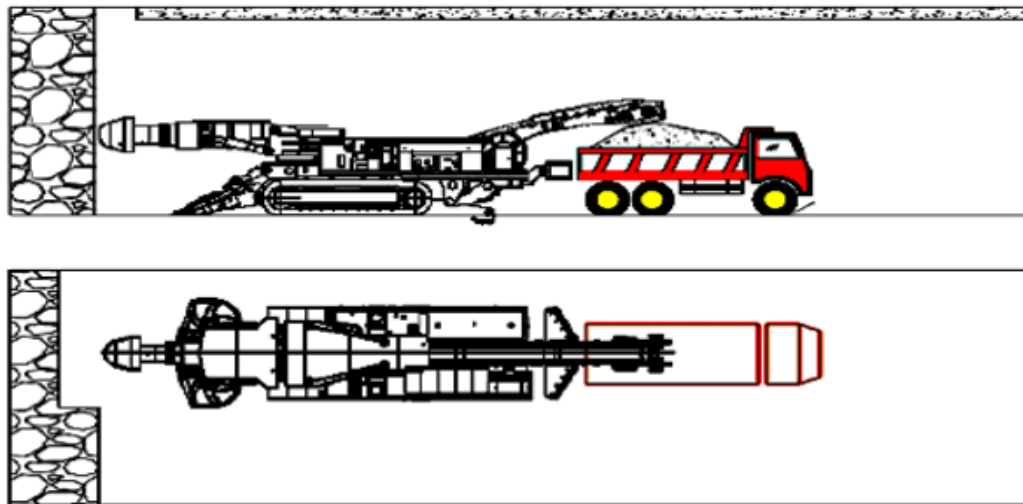


图 5 悬臂掘进机掘进施工示意(单位：mm)

悬臂掘进机在掌子面开挖就位，切割头 36 个截齿开始从掌子面的下部水平方向切割出一条槽，切割头按照 Z 字型或 S 型采取左右循环、自下而上的截割路线逐级切割掌子面围岩。如图 6 所示。

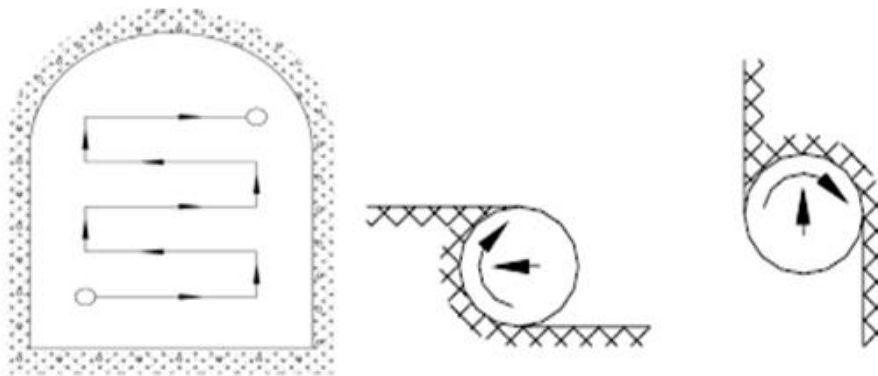


图 6 悬臂掘进机切割方式示意

在隧洞施工过程中，每个循环掘进开挖不超过 2 榀钢拱架的安装长度，进尺 2 米，开挖约 32 立方米，掌子面的中间部分围岩开挖完成后，对周边轮廓进行开挖修整，满足隧洞设计尺寸要求。针对隧洞岩石强度大小，厂家可以根据岩石强度定制不同的截齿强度，确保切割头截齿有更好的掘削能力。

6. 施工工效统计研究

钻爆法通过定位放线测量、掌子面钻孔、孔内安装炸药、连线、点火爆破、排烟、清运渣土，平均每个循环需 18~22 个小时，悬臂掘进机掘进施工平均每个循环需 11~12 个小时。钻爆法施工，月进度一般为 80 米左右，隧洞节点工期严重滞后；悬臂掘进机施工，月进度三类围岩 179m、四类围岩 138m、五类围岩 79m，掘进效率较钻爆法施工相比有较大提高。

表 3 三类围岩施工用时统计表

序号	工序	项目	每次用时 (小时)	20m 用时 (小时)	月进尺 (m)	备注
1	掘进	开挖	9	45		
2		测量复核、安全检查	1	5		
3		进、退设备		2		
4	素喷砼	转运喷浆机、接风管、搭设支架		2		
5		喷砼		8		
6		收设备、拆除支架		2		
7	其他	地质预报		3		
8		75mm 超前钻 4 孔验证，15m	8	4		50%进行
9		其他原因	2	4		
10	总时间		10	75	179	28 天

表 4 四类围岩施工用时统计表

序号	工序	项目	每次用时 (小时)	8m 用时 (小时)	月进尺 (m)	备注
1	掘进	开挖	7	14		
2		测量、复核、放线断面检查	1	2		
3		退设备		2		
4	支护	转运喷浆机、接风管、支架 材料运输及搭设	1	2		
5		锚杆及钢筋网	3	6		
6		喷砼		6		
7		收设备、拆除支架		1		
8	其他	地质预报		2		16m 一次
9		56mm 超前钻验证		1		钎探增加
10		其他原因	2	3		
11	总时间		14	39	138	28 天

表 5 五类围岩施工用时统计表

序号	工序	项目	每次用时 (小时)	20m 用时 (小时)	月进尺 (m)	备注
1	掘进	开挖	5	50		
2		测量、复核、放线断面检查	0.5	5		
3		退设备	0.5	5		
4	支护	转运喷浆机、接风管、支架 材料运输及搭设	1	10		
5		钢架安装	3	30		
6		锚杆及钢筋网	2	20		
7		喷砼	3	30		
8		收设备、拆除支架	1	10		
9	其他	地质预报	0.5	3		16m 一次
10	其他	56mm 超前钻验证		3		钎探
11	其他	其他原因	2	4		
12	总时间		18.5	170	79	28 天

说明：施工用时统计表未考虑错车道开挖及支护、封堵涌水用时、极端地质情况处理施工时间。

7. 结语

(1)采用悬臂掘进机施工工法，解决了对既有建筑物附近围岩振动控制的施工难题。

(2)采用掘进机工法对提高三类、四类、五类围岩隧洞施工速度和工效具有实际意义。相较于钻爆法开挖，悬臂掘进机工法能更准确控制开挖轮廓，避免超挖、欠挖，减少了超挖部分的回填浇筑工程量，有利于项目成本控制。

(3)悬臂掘进机采用自动喷雾降尘装置,改善了掌子面的作业空气质量环境,通过吸风和送风循环,更符合安全、健康的文明施工要求。对于单方向掘进 1.5km 以上的隧洞,采用悬臂掘进机开挖可以提高隧洞通风效果,是隧洞开挖比较适用的工法。

(4)悬挖掘进机工法对硬质围岩($\geq 80\text{MPa}$)时,掘进难度及截齿消耗量很大,建议要从掘进机功率、扭矩、截齿强度进行研究合理选择。

(5)悬挖掘进机工法在地下水位以下施工,遇到隧洞突泥涌水时,设备淹没维修费用较高,建议今后要从掘进机设备改进入手,增加设备防水措施的研究改进。

总之,悬臂掘进机工法,减小隧洞施工过程对周边建筑物的振动影响,适用于城市市区等复杂的施工环境,非常适用于地下水位以上、围岩不太硬的隧洞工程,对今后在隧洞掘进施工中具有广阔的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 王士民, 何川, 高云龙(2012). 高水压条件下盾构隧道联络通道及集水井施工力学行为研究[J]. 铁道学报, 34(7): 108-114
- [2] 谢达文(2013). 城市浅埋及超浅埋隧道非爆技术设备选型与配套研究[J]. 现代隧道技术, 50(1): 40-45
- [3] 谢达文(2015). 悬臂式掘进机与控制爆破组合式隧道开挖技术试验研究[J]. 现代隧道技术, 52(3): 216-220
- [4] 周黎明, 付代光, 张杨, 等(2018). 典型不良地质体地质雷达探测正演试验研究[J]. 现代隧道技术, 55(04): 53-58+64
- [5] 张杨, 杨君, 周黎明, 等(2018). 在隧道工程施工中的常见干扰和对岩体裂隙水及软弱夹层等的预报研究[J]. 地球物理学进展, 33(2): 892-899
- [6] 宋战平, 田小旭, 周冠南, 等(2020). 隧道洞内管棚超前预支护力学行为的理论分析[J]. 中国公路学报, 33(4): 89-98
- [7] 王震, 仇峰涛, 陈龙龙, 等(2019). 隧道开挖超长管棚超前支护机理及效果分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 36(11): 85-92