

小断面浅埋软岩隧洞悬臂掘进机施工成本管理

杜进军

(中国水利水电第五工程局有限公司,四川 成都 610066)

摘要:四川省向家坝灌区北总干渠一期一步工程内江供水管道工程自贡段石塔村隧洞为小断面浅埋软岩长引水隧洞,采用悬臂掘进机进行开挖施工,通过提高设备完好率、合理确定运转时间、合理配备出渣设备、不同围堰类别洞段采取不同时段进行锚喷支护、优化临时设施、降低消耗等精细化管理措施,在进度、断面控制、对围岩的扰动、降低通风排烟等方面取得了一定成效,达到了缩短工期、降低成本的目的,可供类似隧洞开挖借鉴。

关键词:小断面;浅埋;软岩;长隧洞;悬臂掘进机;成本;管理

中图分类号:TV554+.2 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2023)02-0140-05

Construction Cost Management of Cantilever Roadheader for the Small
Section Tunnel Shallowly-buried by Soft Rock

DU Jinjun

(Sinohyro Bureau 5 Co.,Ltd,Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: The Zigong Shita Village tunnel, part of Neijiang Water Supply Pipeline Project that belongs to the First-step-first-phase of the North Main Canal of the Xiangjiaba Project Irrigation Area in Sichuan Province, is a headrace tunnel with small section shallowly-buried by soft rock, which is excavated by cantilever roadheader. With fine management measures such as improving the integrity rate of equipment, reasonably determining the operation time, reasonably equipped with slag discharge machines, adopting different intervals for various types of cofferdam to carry out shotcreting support, optimizing temporary facilities and reducing consumption, some achievements have been made in progress, section control, disturbance to surrounding rock, reduction of ventilation and smoke exhaust, etc., shortening the construction period and reducing the cost, which can be used as a reference for similar tunnel excavations.

Key words: small section; shallowly-buried; soft rock; long tunnel; cantilever roadheader; cost; management

1 概 述

向家坝灌区北总干渠一期一步工程开发任务是以灌溉为主、兼顾城乡生活、工业供水的引水工程,由取水枢纽、输水及灌溉渠系、围蓄水库、提水工程及田间工程五大部分组成。涉及宜宾、泸州、自贡、内江 4 市 12 个县(区),线路所在区域为平原微丘陵地带,其中内江供水管道工程自贡段线路长 26.81 km,设计 15 条隧洞总长 6 766.3 m,3 座管桥总长 689.2 m,8 段顶管总长 644.7 m,27 段埋管总长 18 710 m。沿线村庄、村道密布,穿越 9 处公路、铁路、高铁等交通干线,3 处河流,多处高压电线塔等,实施环境条件复杂。

2 隧洞特性

隧洞最大埋深 40 m,平均埋深 20 m,最小埋深 9 m,地层岩性为 J2S 粉砂质泥岩+泥质粉砂岩的软岩,各类围岩长度占比为Ⅲ类 1%、Ⅳ类 36%、Ⅴ类 64%、Ⅴ类加强 9%,设计流量 5 m³/s,隧洞坡降 1:627~1:1 259,为典型的小断面、浅埋、软岩、有压引水隧洞。

隧洞开挖初支护后为马蹄形断面,底宽 2.4 m,腰线直径 3.2 m,高 3.2 m;初支护后交通界限宽 2.4 m,高 2.55 m;衬砌后为圆形,直径 2.4 m。

隧洞开挖初支护后断面见图 1,初支护后交通界限断面见图 2,衬砌后断面见图 3。

3 隧洞开挖成本管理

3.1 隧洞开挖方案对比

根据实际情况,拟定了钻爆法、普通机械(挖

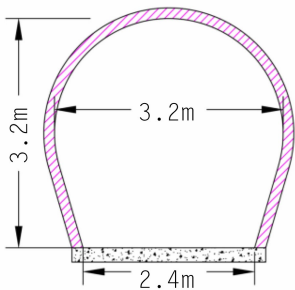


图 1 隧洞开挖初支护后断面

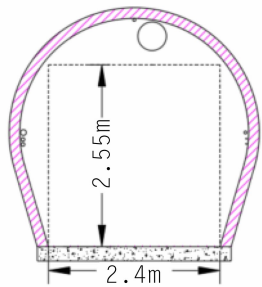


图 2 初支护后交通界限断面

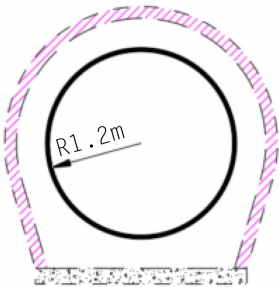


图 3 衬砌后断面

机)开挖法、悬臂掘进机开挖法,三种隧洞开挖方案对比^[1]见表 1。

综合分析:该工程隧洞断面小,埋深浅,以Ⅳ

类Ⅴ类围岩为主,围岩软,沿线环境条件复杂,爆破实施条件困难。石塔村隧洞洞口 20 m 段,项目部选用小挖掘机开挖,工效低,悬臂掘进机通过前方的切割头切削石方,并喷雾降温降尘,切削下的石渣由铲板上的扒渣设备扒到传送皮带,直接装到出渣车上运到洞外。悬臂掘进机开挖方案整体优于普通机械(挖机)开挖方案。项目策划 15 条隧洞选用 XTR4/132 型悬臂掘进机,机身宽 2.25 m、高 1.55 m,根据该项目隧洞断面及岩层特性,该设备适合该项目使用。

经综合分析,悬臂掘进机开挖可降低成本 25 元/m³,每月降低成本 25 元/m³ × 100 m/月 × 10.41 m³/m = 26 025 元/月。

3.2 悬臂掘进机掘进成本影响因素

主要包括悬臂掘进机能源消耗、材料消耗、设备完好率、合理确定悬臂掘进机运转时间、多工作面掘进、出渣车辆配备、优化临时设施等,通过相关分析资料,逐步改进,实施精细化管理,为后续隧洞开挖支护总结经验。

4 悬臂掘进机掘进成本管理措施

4.1 降低消耗

此消耗主要为材料、配件、能源的消耗,其他消耗虽然也有一定的影响,但非主要矛盾。笔者结合石塔村隧洞实际情况,就如何降低材料消耗、设备配件消耗等进行介绍。

4.1.1 降低能源消耗

该项目隧洞工程使用大量的电动机械设备(悬臂掘进机、通风机、空压机等),隧洞施工初期洞口没有供应网电阶段,采用柴油发电机自发电,

表 1 隧洞开挖方案对比表

	钻爆法开挖	普通机械(挖机)开挖	悬臂掘进机开挖
方案简述	利用手风钻钻孔装药爆破,装载机装渣,小三轮车出渣	小型挖掘机挖斗掘进;小型挖掘机加装钎挖头、松土器、破碎锤等开挖;装载机端渣出洞或洞内装小出渣车出渣	电动悬臂掘进机前部配钎挖头、底部配扒渣盘、尾部输送带,同步完成挖、装渣作业
可行性分析	该工程不适用爆破法	有可操作性	有可操作性
主要优点		对岩层扰动小,可应对复杂多变地层岩性,局部硬岩可采用破碎锤施工;支护用的型钢拱架等材料可直接运到掌子面,不发生人工抬运	设备集成率高、可靠性高,智能化程度高;挖、装渣合为一体同时作业效率高;对岩层扰动小,初支护小、超挖超填成本小;洞内无油烟雾,空气好,改善洞内作业环境,通风成本低
主要缺点		隧洞断面小,装渣可供选择的挖掘机(50 以下)挖斗容量小,装渣速度慢;掘进时不能同时出渣;国内这类设备几乎全部是油动,洞内油烟多,通风成本高;超挖超填成本高	开挖机具单一,遇局部较硬岩层开挖速度较慢;隧洞断面小,支护用的型钢拱架跨过掘进机时转运困难;循环作业时间短

自发电是能源消耗^[2]控制的重点,采取了以下切实可行的措施。

(1)请厂家售后服务人员对悬臂掘进机操作人员、辅助人员、维修专工进行系统理论培训和实操技能培训。培训包括悬臂掘进机性能参数、适用范围、机身结构、油水电系统、操作注意要点(电气操作、掘进作业)、机身装拆、保养维修(日常检查、定期检查、低温高温运转注意事项、冷却水、液压系统等)、故障分析与排除、配件选择及储备、安全操作要点、不同软硬的围岩提高工效的经验、提高悬臂掘进机施工工效和降低用电消耗等方面。

(2)通风机选型。石塔村隧洞长 1 227 m,单头掘进,洞口安装 2×55 kW 通风机(直径 1.2 m),进洞 600 m 处加 2×37 kW 接力通风机,风筒选用直径 400 mm 的 PVC 双层波纹管,每天 24 h 通风,洞内空气监测合格,温度合格。

仰天坝隧洞长 813 m,单头掘进,洞口安装 2×30 kW 通风机,进洞 400 m 处加 2×22 kW 第 1 台接力通风机,进洞 600 m 处加 2×15 kW 第 2 台接力通风机,风筒选用直径 400 mm 的 PVC 双层波纹管,每天 24 h 通风,洞内空气监测合格,温度合格。

石塔村隧洞 2×55 kW 的通风机与风筒变径太大(由 1 200 mm 变为 400 mm),风阻大,通风损失大,相对电能消耗大。而仰天坝隧洞选择了接近风筒直径的风机,变径小,风阻小,通风损失小,相对电能消耗小。建议该项目其他单头掘进洞长 800 m 以下的隧洞参照仰天坝隧洞通风方案。对于单头掘进大于 800 m 的隧洞,建议洞口安装 2×55 kW 的通风机,进洞口 300 m 段采用大直径风筒,或者全洞段加大风筒直径。

经统计,石塔村隧洞每月通风机电费 63 504 元,仰天坝隧洞每月通风机电费 43 470 元,仰天坝隧洞风机配置节约电费 20 034 元/月。

(3)对空压机压力设置等信息进行统计分析,提出对电动空压机出厂设置的加载压力、卸载压力参数进行调整以降低用电消耗。

(4)出渣车辆,选用山东时风 7Y9—11750S 出渣车,减少出渣趟数,节约柴油。

(5)其他油动机械设备,主要通过各种手段和措施提高设备的利用率来控制消耗。

4.1.2 降低材料消耗

(1)隧洞初支护为临时支护措施,结合施工期变形观测数据分析的情况,在隧洞围岩变形受控、安全评估无风险的前提下,适当减小初支护参数(Ⅳ类围岩设计 15 cm 喷混凝土厚度,如喷混凝土厚度每减小 1 cm,节约混凝土料 $0.01 \times 9 \times \text{Ⅳ类总长 } 2\,480 = 223 \text{ m}^3$,降低成本 $223 \text{ m}^3 \times 900 \text{ 元/m}^3 = 200\,880 \text{ 元}$,开挖量出渣量及洞挖成本也相应减小)。

(2)对于粉砂质泥岩隧洞,底板设计 20 cm 厚垫层混凝土,在渗水量小的隧洞,可以控制在 10 cm,节约混凝土料:厚度 $0.1 \text{ m} \times \text{宽 } 2.7 \text{ m} \times \text{总长 } 1\,227 \text{ m} \times 550 \text{ 元/m}^3 \div 10 \text{ 个月} = 18\,221 \text{ 元}$ 。

(3)严格控制超挖^[3]。超挖控制好,超填混凝土量就大大减少,降低混凝土浇筑成本。

4.1.3 降低机械设备及配件的消耗

加强对施工机械设备周检、月检,对设备及时进行保养维护,坚持“以养代修”的管理理念,重视保养环节,杜绝带病作业,进而降低了设备的故障率,节约了设备的维修配件消耗成本。

4.2 提高设备完好率

隧洞掘进支护主要施工机械设备为悬臂掘进机、出渣车、工字钢锚杆加工设备、混凝土喷射机、手风钻、空压机、通风机等,其中最关键设备为悬臂掘进机。

石塔村隧洞施工初期,对悬臂掘进机日常检查保养、定期检查保养、运转记录进行了整理分析,容易发生故障的部位主要有切割电机、减速机、高压管等。采取的措施:

(1)现场储备部分易损件,与厂家建立密切联系,紧急情况空运配件。

(2)日常检查主要包括:切割头、伸缩臂、减速机、行走机构、铲板、皮带机、喷水系统、高压管;开机前检查油量、水量、信号报警装置且空载检查各部位声音和温度。

(3)日常检查处理措施包括:磨损或损坏件更换,齿座裂纹补焊,打黄油,及时添加润滑油,检查油量,异常温升;履带板松弛度,转动轮是否转动,销子是否松动,链条松弛度,过滤器清洗,高压管漏油及时紧固或更换 O 型圈,螺栓紧固。

(4)制定的强制性规定:杜绝设备带病运行,及时维修;配件计划及储备,缩短维修时间;限时强制性拆检;运行 250 h 强制日常检查项目;运行

1 000 h 更换浮动油封;运行 1 500 h 强制拆检伸缩部、切割减速电机、补焊铲板、拆检履带、拆检行走减速机、更换液压油、更换液压滤芯、检查电气部分绝缘;运行 3 000 h 为切割减速电机和轴承加注电机黄油、拆检行走驱动轮。

通过采取措施提高设备完好率^[4],每月至少减少 2 d 的停机维修时间,挽回直接损失 $2\text{ d}\times(25\text{ 人}\times8\,000\text{ 元/人月}+48\,000\text{ 元/月})\div30\text{ d}$

表 2 IV 类围岩每天正常掘进支护时间安排

项目	单位	掘进	支护:挂网+锚杆	支护:喷混凝土	合计
作业人员数量	人	5	4	4	13
作业时间	h	11	6	4	21
完成掘进支护进尺	m	6.1	6.1	6.1	6.1

表 3 V 类围岩每天正常掘进支护时间安排

项目	单位	掘进	支护:立拱架+连接筋+挂网+锚杆	支护:喷混凝土	合计
作业人员数量	人	5	4	4	13
作业时间	h	11	7	4	22
完成掘进支护进尺	m	4.3	4.3	4.3	4.3

表 4 V 围岩加强段每天正常掘进支护时间安排

项目	单位	掘进	支护:小导管+立拱架+连接筋+锚杆+挂网	支护:喷混凝土	合计
作业人员数量	人	2	3	4	9
作业时间	h	9	8	3	20
完成掘进支护进尺	m	0.7	0.7	0.7	0.7

按照上述原则,最大限度提高设备、人员利用率,每月至少增加 2 d 的进尺,降低直接成本 $2\text{ d}\times(25\text{ 人}\times8\,000\text{ 元/人月}+48\,000\text{ 元/月})\div30\text{ 天}(\text{人员和施工机械设备费用})=16\,533\text{ 元/月}$ 。

4.4 多工作面掘进

方案 1:如隧洞较短,为非关键工期项目,单头掘进方向需考虑便于自流排水。

方案 2:如隧洞较长,为关键工期项目,中间不具备支洞条件,且两个洞口间场内施工便道较长,可考虑从两头同时掘进,每个洞口各投入 1 套设备及临设系统,加快施工进度,降低管理成本。

方案 3:如隧洞较长,为关键工期项目,中间不具备支洞条件,且两个洞口间场内施工便道较短,可考虑从两头同时掘进,在每个洞口各投入 1 套设备及临设系统,可考虑 2 个洞口共用 1 套出渣车辆,提高部分设备利用率,加快施工进度,降低掘进支护机械成本、管理成本。

方案 4:如隧洞较长,为关键工期项目,中间

(人员和施工机械设备费用)=16 533 元/月。

4.3 合理确定运转时间

根据隧洞围岩类别及支护工作量大小,悬臂掘进机每天最佳运转 10 h 左右。一是及时完成支护,确保作业面施工安全;二是有足够时间检查保养维修;三是掘进支护作业人员达到最佳配置数量。不同围岩每天正常掘进支护时间安排见表 2~4。

有支洞条件,且支洞较短,在地质条件允许的情况下,可增加 1 条或多条施工支洞,每条支洞上下游两头同时掘进,在支洞口投入 1 套设备及临设系统,在单头掘进人员配置基础上增加部分人员,提高设备利用率,降低掘进支护人工成本、机械成本和管理成本。

石塔村隧洞长 1 227 m,采用方案 1 单头掘进,后续如有类似石塔村隧洞长度的隧洞,建议选用方案 3 两头掘进,可节约成本 4 000 元/月。

4.5 合理配置出渣车辆

石塔村隧洞管线布置后交通界限断面:底宽 2.4 m,高 2.55 m。通过对比,跃进 NJ130、山东时风 7Y9—11750S 两种运输车满足洞内出渣要求。

跃进 NJ130 整车尺寸长 5 538 mm×宽 2 344 mm×高 2 165 mm,货箱内部尺寸长 2 880 mm×宽 2 140 mm×高 540 mm,空车重量 2.71 t,载重 2.5 t。山东时风 7Y9—11750S 整车尺寸长 5 505

mm×宽 2 075 mm×高 2 370 mm,货箱内部尺寸长 3 190 mm×宽 1 870 mm×高 650 mm,空车重量 1.3 t,载重 3 t。

考虑到洞内已浇筑混凝土垫层,纵坡平缓,为减少出渣趟数,降低出渣成本,减少洞内燃油尾气排放,改善洞内环境条件,降低通风成本,木板加高货箱 0.25 m。

经对比,山东时风 7Y9—11750S 比跃进 NJ130 每趟多装 0.5 m³,建议后续其他隧洞选用山东时风 7Y9—11750S。经计算,山东时风 7Y9—11750S 可降低出渣成本 3 元/m³×100 m/月×10.41 m³/m=3 123 元/月。

4.6 优化临时设施

石塔村隧洞和仰天坝隧洞洞口临时设施包括:临设场地平整、洞口道路、生活生产用房、材料库棚、加工棚、空压机、变压器及配电室棚、拌和机、高位水池、通风机等系统的采购、土建施工、设备安装、完工拆除、场地恢复等。根据石塔村隧洞和仰天坝隧洞临设布置及运行情况,建议其他隧洞根据洞长,适当作以下优化:

- (1)加大风筒直径,或减小风机功率配置;
- (2)高位水池建议用钢板焊接水箱,多个工地周转使用;
- (3)临时设施系统尽量布置在红线内;
- (4)结合柴油价格高、自发电成本高的实际情况,尽量用网电;
- (5)应使用储气罐(建议 2 m³),尽量选小风量空压机;
- (6)洞内供风、供水、供电、排水、通风、照明等选用的管径和线径结合隧洞单头掘进长度、洞内用风量大小、用水量大小、渗水量大小和用电设备负荷等选择合适的管径。石塔村隧洞单头掘进长度 1 227 m,选择的供风管(Φ80 mm 无缝钢管法兰盘连接)、Φ50 mm 供水管(Φ50 mmPVC 管软连接)、排水管(Φ50 mmPVC 管软连接)、1 140 V 专用高压电缆、380 V 动力电缆、照明灯带及电线、风筒(Φ400 mmPVC 双层波纹管软连接)。其他类似隧洞可以参照石塔村隧洞的经验选择。

综合分析,每个洞口可节约成本 20 000 元÷10 月=2 000 元/月。

5 实施效果

石塔村隧洞和仰天坝隧洞悬臂掘进机开挖支护期间通过精细化且规范化管理,经估算,降低成本 106 469 元/月,悬臂掘进机施工成本管理实施效果见表 5,实现了加快进度、降低项目成本等目的。

表 5 悬臂掘进机施工成本管理实施效果表

序号	项目	单位	估算月降低成本 /元
1	开挖方案比选	月	26 025
2	降低能源消耗	月	20 034
3	降低材料消耗	月	18 221
4	提高设备完好率	月	16 533
5	合理确定运转时间	月	16 533
6	多工作面掘进	月	4 000
7	合理配置出渣车辆	月	3 123
8	优化临时设施	月	2 000
合计		月	106 469

6 结 语

对向家坝灌区北总干渠一期一步工程内江供水管道工程自贡段线路小断面浅埋软岩长引水隧洞采用悬臂掘进机开挖施工成本管理进行总结,取得了一定成效,可供类似隧洞工程借鉴。

石塔村隧洞拟定并评审出渣方案为自卸汽车,未考虑有轨出渣方案。该项目隧洞平缓且洞径小,掌子面采用悬臂掘进机皮带直接装渣,具备有轨出渣条件。经分析,有轨出渣将加快施工进度,降低掘进支护材料成本、机械成本、管理成本,可供类似隧洞工程借鉴。

参考文献:

[1] 杜进军,左祥. 浅谈海外 EPC 水电项目降本增效管理[J]. 四川水力发电,2016,35(183):78-82.

[2] 杜进军,左祥. 浅谈海外 EPC 水电项目降本增效管理[J]. 四川水力发电,2016,35(183):78-82.

[3] 杜进军,左祥. 卡鲁玛隧洞钻爆施工超挖原因分析及控制措施[J]. 科研,2016,(6):225-226.

[4] 杜进军,左祥. 服务指导监督共赢理念在境外分包管理的应用[J]. 工程技术,2016,(5):107-108.

作者简介:

杜进军(1970-),男,甘肃靖远人,中国水电五局第二工程公司向家坝灌区项目副经理,高级工程师,中级爆破工程师,现从事水电工程施工技术及经营管理工作。

(责任编辑:吴永红)