

TBM 施工工艺对抽水蓄能电站建设工期影响

--TBM 导洞+钻爆法+钻爆扩挖法

刘光然¹ 王生潭²

1 新华(布尔津)抽水蓄能发电有限公司质量技术部 2 中国水利水电第五工程局有限公司

DOI:10.12238/hwr.v8i9.5742

[摘要] “十三五”以来,抽水蓄能电站建设迅猛,在其主要的上水库、下水库、输水系统、地下厂房和开关站等建筑物中,电站地下厂房是投产目标如期实现的关键建筑物。通过调查对比普通钻爆、TBM全断面掘进、TBM导洞+钻爆扩挖法施工工期的数据,研究出TBM导洞+钻爆法+钻爆扩挖法同时实施的施工工艺可节约电站建设关键线路中通风兼安全洞进入地下厂房的工期。

[关键词] 抽水蓄能电站; 工期; TBM下导洞; 钻爆扩挖法

中图分类号: TV743 文献标识码: A

Study on the influence of the technology of pumped-storage hydroelectricity ventilation and safety tunnel TBM pilot Tunnel + drilling-blasting + drilling-blasting expanding excavation on the construction schedule

Guangran Liu¹ Shengtan Wang²

1 Quality and technology department of Burqin County Pumped Storage Power Co., Ltd

2 China Water and Hydropower Fifth Engineering Bureau Co., Ltd

[Abstract] in recent years, pumped-storage hydroelectricity construction has been rapid. The pumped-storage hydroelectricity comprises buildings such as upper and lower reservoirs, water conveyance systems, underground power plants and switch stations. The underground pumped-storage hydroelectricity plant is the key line to achieve the plant's commissioning target on schedule. By investigating and comparing the construction period data of common drilling and blasting, TBM full-section excavation, TBM pilot hole + drilling and blasting and expanding excavation method, the construction technology of TBM Pilot Tunnel + drilling-blasting method + drilling-blasting excavation method can save the construction period of ventilation and safety tunnel entering underground powerhouse in the key line of power station construction.

[Key words] pumped-storage hydroelectricity; construction period; TBM lower pilot hole; drilling and blasting method

引言

《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035)》,制定了“到2025年,抽水蓄能投产总规模6200万千瓦以上;到2030年,投产总规模1.2亿千瓦左右”中长期发展目标。同时,抽水蓄能电站也是发展绿色能源和新能源消纳的最优方案。抽水蓄能电站建设中,为争取地下厂房能早日开挖,并为今后工序以及首台机组投产发电的及时运行,改进当前工艺并研究其对进入地下厂房工期的影响十分必要。为实现以上目标,解决缩短建设周期和增加效益,本文结合当前常规的工艺,提出改进工艺并研究该工艺对工期的影响。

1 抽水蓄能电站概况

抽水蓄能电站具有调峰、调频、调相、储能、系统备用和黑启动等“六大功能”,以及容量大、工况多、速度快、可靠性高、经济性好等“五大技术经济优势”;在保障大电网安全、促进新能源消纳、提升全系统性能中发挥着“三大基础作用”;是当前技术最成熟、全生命周期碳减排效益最显著、经济性最优且最具大规模开发条件的电力系统灵活调节电源;是保障大电网安全的“忠诚卫士”,促进清洁能源消纳的“友好伙伴”,是优化系统整体性能的“普惠使者”。

抽水蓄能电站工程的核心建筑物,即地下厂房一般由通风

兼安全洞和进厂交通洞与外交相连。两条洞室从山体外通过降坡开挖通往厂房吊车梁高程和安装间。在两洞进洞高程、纵坡坡比一致的情况下,通往厂房端墙顶部的通风兼安全洞的长度较小,开挖线路短。

2 抽水蓄能电站建设的关键线路

截至2022年底我国已建成投运的抽水蓄能电站有36座,根据施工经验,在满足输水系统的施工支洞筹建期开始施工并能为输水系统开挖、压力钢管安装提供充足的自由时差的条件下,关键线路如下:

厂房顶部通风兼安全洞施工→主副厂房上部开挖→岩壁吊车梁施工→主副厂房下部开挖→肘管安装→蜗壳水压试验→发电机层混凝土浇筑→机组安装→机组调试和试运行。

地下厂房开挖时分七层进行,以抚宁抽蓄电站为例,开挖分层如图3.1:

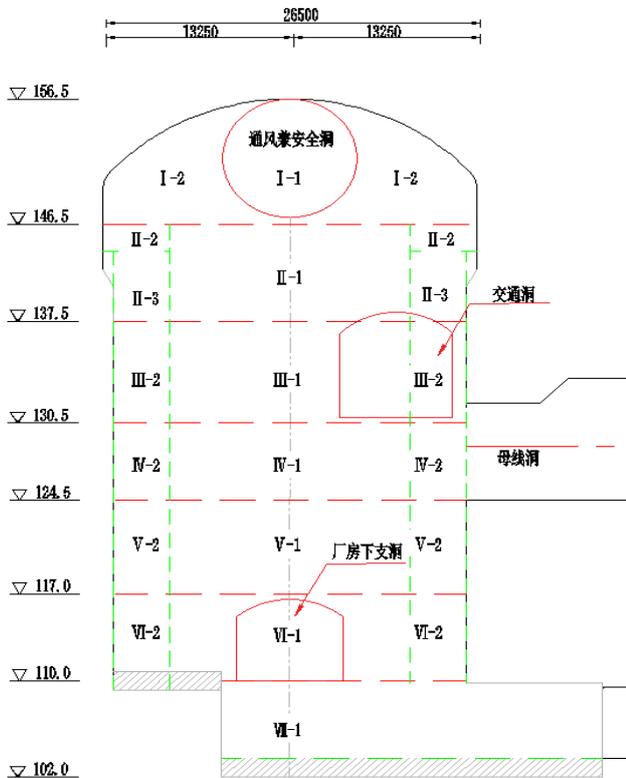


图3.1 抚宁抽蓄电站地下厂房开挖图

下-上导洞斜穿厂房方案纵剖示意图



图3.2 进厂交通洞与通风安全洞长度对比

两洞进入地下厂房的距离,如图3.2所示,在同等条件下通风兼安全洞的长度较小。按照两条洞同时施工、地质条件类似

进行推算,通风兼安全洞将先行进入地下厂房,为地下厂房的开挖创造出渣运输条件,是整个工程施工作业的关键。

3 当前抽水蓄能电站建设周期现状

抽水蓄能电站工程建设分四个阶段,即工程筹建期、工程准备期、主体工程施工期和工程完建期。早期建设的十三陵、广州抽水蓄能的工程,主体工程施工并全部机组投运需75~82个月;之后的桐柏、宜兴、张家湾抽水蓄能工程,主体工程施工并全部投运需58~69个月;最近的一些抽蓄工程,从厂房开挖至机组全部发电总工期为55~70月。以布尔津抽水蓄能电站可研阶段设计为例,厂房开挖至全部机组投运的总工期为66个月。工程各阶段工期如图3.1:



图3.1 布尔津抽蓄电站建设周期

由图3.1可知,抽蓄电站建设周期长达90个月,抽蓄电站建设周期过长,是当前抽蓄电站建设面临的普遍问题,也是抽蓄电站建设者一直在创新并努力改进的地方。

通风兼安全洞的施工工期与围岩类别以及地质情况关系密切,对于不同围岩类别每循环进尺不同,如遇到已探明的断层,需要进行预处理。考虑各种因素,统计文登抽蓄电站、五岳抽蓄电站、宁海抽蓄电站、洛宁抽蓄电站等电站通风兼安全洞开挖进度数据,施工进尺平均为96.3m/月。

4 几种常规施工工艺介绍

4.1 钻爆法

钻爆法是一种最传统的人工或机械打孔、装药并爆破隧洞掌子面岩石进行掘进的工艺,即新奥法。它利用围岩本身所具有的承载效能的前提下,采用爆破技术,进行断面开挖施工,并形成复合式内外两层衬砌来修建隧道的洞身,即以喷混凝土、锚杆、钢筋网、钢支撑等为外层支护形式,称为初次柔性支护或一次支护,系在洞身开挖之后必须立即进行的支护工作。该工艺在隧道、地铁、地下贮库、地下厂房、水电站输水隧洞、矿山巷道工程应用广泛,工艺技术成熟。具体工艺流程为:

测量放线→钻孔→装药并起爆→通风排烟→安全处理→出渣→围岩支护。按照作业流程循环爆破使洞挖逐步推进。

以IV类围岩为例,每循环进尺2m,作业时间如下表4.1:

表4.1 IV类围岩钻爆每循环作业时间

施工项目	时间 h	时间 (h)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
测量放点	0.5	■															
钻孔	2.5	■	■	■	■												
装药爆破	1.0				■	■											
通风排烟	0.5					■											
安全处理	0.5						■										
出渣	3.0							■	■	■							
围岩支护	8.0										■	■	■	■	■	■	■
合计	16.0																

4.2 TBM全断面掘进法

全断面隧道掘进机,用于岩石隧洞开挖,采用旋转并推进刀盘,通过滚刀破碎岩体而使隧洞整个断面一次成型的机器(简称“TBM”)。现代全断面隧道掘进机已演变成为一种高度智能化,集机、电、液、光、计算机技术为一体的大型地下工程机械装备。

(1)当采用TBM施工时,着重考虑关键部件刀盘中刀具的耐磨能力和不稳定围岩及浅埋、断层破碎带区域加强支护、提前采取有效措施的能力,这些可以从TBM本身的针对性设计和施工管理方面加强。

(2)从工期的保证性来看:掘进机施工比钻爆法施工有明显工期优势,在硬岩地层中,掘进机平均日进尺可达15-30m,平均月进尺可达300-600m,一条长3km的隧洞,采用掘进机施工,从掘进机组装、场地建设、隧洞掘进到设备拆卸撤离大约需要9个月时间,而钻爆法施工月平均进尺仅有100m,对于地质条件复杂的长隧洞,钻爆法施工工期具有较大的不确定性,且施工条件差,安全风险高。

(3)从设备的针对性来看:TBM直径范围多数在3.5m-12.4m,包括敞开式TBM、单护盾TBM和双护盾TBM。抽水蓄能电站交通洞和通风兼安全洞采用TBM施工与地铁、水利等工程施工工艺类似,技术成熟,具有广泛的应用案例。针对不良地质及要求,无论是断层破碎带、高岩石强度、高石英含量还是应对围岩变形发生的卡机风险,在TBM的设计之初均可以重点考虑并予以针对性加强,同时在施工过程中也有成熟的预案,因此在TBM的针对性设计上,均可以根据地质条件预留完善的应对能力。

(4)从施工组织的专业性来看:在复杂地层采用掘进机施工,选用有施工经验的专业施工队伍,熟练掌握设备的设计和性能参数,熟悉设备的操作要求,可以减少停机时间和缩短设备维修保养时间,增强应对复杂地层的能力,保持施工的连续性。

(5)最短施工周期选型方法。 $G_{Tmin} = \{ (L_{II} \times q_{\text{敞开式II}} + L_{III} \times q_{\text{敞开式III}} + L_{IV} \times q_{\text{敞开式IV}} + L_{V} \times q_{\text{敞开式V}} + L_{VI} \times q_{\text{敞开式VI}}), (L_{II} \times q_{\text{护盾式II}} + L_{III} \times q_{\text{护盾式III}} + L_{IV} \times q_{\text{护盾式IV}} + L_{V} \times q_{\text{护盾式V}} + L_{VI} \times q_{\text{护盾式VI}}) \}$

式中: G_{Tmin} —最短的隧洞开挖工期(月)。

$L = L_{II} + L_{III} + L_{IV} + L_{V} + L_{VI}$ (米)。

L —隧洞开挖长度(米)。

$L_{II}, L_{III}, L_{IV}, L_{V}, L_{VI}$ —隧洞II、III、IV、V与VI(即流泥流砂与强岩爆等)相应围岩的长度(米)。

$q_{\text{敞开式II}}, q_{\text{敞开式III}}, q_{\text{敞开式IV}}, q_{\text{敞开式V}}, q_{\text{敞开式VI}}$ —我国敞开式TBM在II、III、IV、V与VI(即流泥流砂,强岩爆)相应围岩的平均月进尺(米/月),依个人经验,建议分别可以按照300m-500m、400m-500m、200m-300m、100m-200m与10m-60m考虑。

$q_{\text{护盾式II}}, q_{\text{护盾式III}}, q_{\text{护盾式IV}}, q_{\text{护盾式V}}, q_{\text{护盾式VI}}$ —我国护盾式TBM在II、III、IV、V与VI(即流泥流砂与强岩爆等)相应围岩的平均月进尺(米/月)。依个人经验,分别可以按照300m-500m、400m-500m、600m-700m、300m-400m与10m-50m考虑。

从以上建议的两类TBM的月掘进强度值可以看出:敞开式和护盾式TBM在II、III和VI平均月进尺差别不大,主要差别为IV与V围岩的平均月进尺。这就是当隧洞的IV与V围岩长度较长时,应选择护盾式TBM的依据。

4.3 TBM导洞+钻爆扩挖法

抽水蓄能电站进厂交通洞和通风兼安全洞多数设计为城门洞型,假设净尺寸为8.5m×8.5m和7.5m×7.5m。为解决隧洞地质条件差、通风不畅、施工材料运输拥挤、施工进度慢等难题,已有在建抽水蓄电站采用TBM先行两洞贯通再实施钻爆法扩挖的工艺。

当前用于导洞的主流硬岩小TBM主要参数为:主机7m长,常规型号3.53m直径,单护盾机型,整机长度约75m,最小转弯半径30m,平均月进尺在500m-600m。最大部件重33吨。最小拼装场地要求20m×70m。设备后挂件可开展钢支撑支护、超前勘探钻进、锚杆施工、喷混凝土等作业。

机头部位配置有水泵以及紧急排水备用泵。出渣采用电瓶车轨道车。设备总功率1400kW,其中刀盘功率945kW。

小断面硬岩TBM掘进速度是传统方式的4倍以上,如内蒙古乌海抽水蓄电站两洞导洞施工月平均进尺570m,最高达到919m/月,安徽桐城700m/月,湖南平江也有602m/月。

后续钻爆扩挖工序以III类围岩为例,每循环进尺3.0m,每循环作业时间如下表4.2:

表4.2 钻爆扩挖工序时间

施工项目	时间 h	时间 (h)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
测量放点	0.5	█												
钻孔	2.5	█	█	█										
装药爆破	1.0				█	█								
通风散烟	0.5					█								
安全处理	0.5						█							
出渣	2.5						█	█	█					
围岩支护	4.5									█	█	█	█	█
合计	12.0	12.0												

5 TBM导洞+钻爆法+钻爆扩挖法

根据上述几种施工工艺的特点,本文提出一种将TBM导洞法与钻爆法和钻爆扩挖法相结合的新型施工工艺。

5.1 工艺介绍

如图5.1所示,抽水蓄能电站工程进厂交通洞开挖施工引进硬岩TBM导洞施工的同时,通风兼安全洞同时钻爆法施工,待两者贯通后TBM退回至排水廊道TBM掘进的始发位置开展排水廊道TBM掘进;而钻爆法工作面在贯通后转入钻爆扩挖。具体思路为利用钻爆法完成两洞洞脸明挖,完成交通洞TBM进洞始发段的开挖及支护工作,TBM从交通洞掘进至厂房中间顶拱高程,斜穿厂房形成导洞;到达厂房通风洞一侧时,TBM以上导洞继续掘进通风兼安全洞。以布尔津抽水工程为例,进厂交通1919m、通风兼安全洞1219m为例进行计算,TBM可以在通风兼安全洞内完成约600m的导洞施工。之后,TBM可后退至排水廊道始发位置,绕行厂房2圈半完成周边排水廊道开挖,优化线路后可完成下平段压力

钢管区域排水廊道开挖、主厂房和主变室之间的排水廊道开挖，可再次穿越厂房下部，在与厂房下部支洞交叉的位置拆卸TBM并运送出地下。为加强使用，可安装至开关站掘进排风竖井平洞和出线洞。

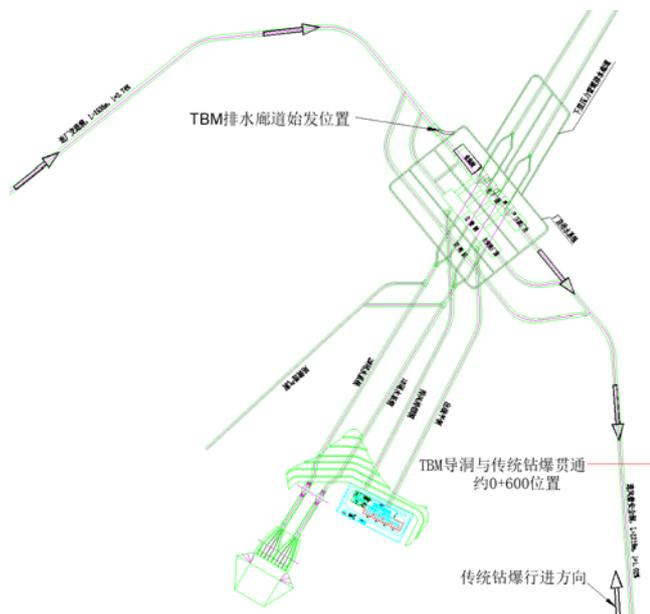


图5.1 TBM导洞+钻爆法+钻爆扩挖法

对重要地质界面、断层或物探异常地段宜采用地震波反射法或超声波反射法进行探测，必要时采用红外探测和超前水平钻孔。为保证能顺利通过破碎带，在刀盘设计时，可盾体预留超前注浆孔，超前地质加固或注浆止水。

5.2 该工艺对进厂交通洞的影响

TBM导洞施工与通风兼安全洞全断面人工开挖贯通后，后退至安装间一侧开始地下厂房周边排水廊道的开挖，在此期间，进厂交通洞无法进行扩挖，将推迟进厂交通洞扩挖开始时间约6个月。

5.3 对进厂交通洞工期影响的分析

尽管TBM在施工约3km的排水廊道时推迟了进厂交通洞的扩挖时间，即推迟了进厂交通洞全断面贯通的时间，但这样的施工方案并不影响地下厂房这条关键线路的施工。正常情况下，地下厂房的第I、II层开挖均可以通过通风兼安全洞出渣，在此期间的进厂交通洞的导洞起到了通风兼安全洞的作用。

进厂交通洞推迟6个月开始扩挖不影响地下厂房第三层开挖的出渣通道贯通(即进厂交通洞全断面贯通)如下：

通风兼安全洞工作面：在TBM与人工全断面接头位置至地下厂房端墙的扩挖施工时间需4个月(约600m)+地下厂房第一层开挖加支护6个月+第二层开挖加支护6个月=16月。

TBM工作面：TBM退回排水廊道始发位置并TBM掘进排水廊道随后拆除需6个月+进厂交通洞扩挖需7月(以布尔津抽蓄为例，为1919m，以两个工作面计算)+导洞和地下厂房安装间连接的交通洞支洞开挖和支护需1个月(约120m)=14月。

根据上面的分析，两者所用时间相差2个月，故此不影响地

下厂房第三层开始开挖时使用进厂交通洞出渣。

6 关键线路工期节约计算

为得出新型施工方案对关键线路工期的影响效果，需对关键线路工期进行计算。依据布尔津抽蓄电站进厂交通洞、通风洞以及地下厂房尺寸(181.5m×27.5m×60.9m=长×宽×高)计算如下。

(1) 关键线路及其工期如表6.1所示：

表6.1 关键线路及工期

项目	开工至通风洞开挖开始(月)	通风洞开挖至厂房端墙(月)	主体厂房I、II层施工洞开挖(月)	主体厂房开挖(月)	厂房混凝土浇筑至首台发电(月)	第2台机发电工期(月)	首台发电工期(月)	工程建设工期(月)
钻爆法	2.5	12.5	2	22	24	9	63	72
论题工艺	3.5	6+4	0	23	24	9	60.5	69.5

根据上表计算，可节约总工期2.5个月。

对于通风兼安全洞和交通洞两个分部工程，采用钻爆法和TBM导洞法+钻爆法+钻爆扩挖法工期对比如下表6.2所示，洞脸形成并TBM安装就位后，从交通洞始发，6个月后可与传统钻爆开挖的通风兼安全洞工作面贯通，随后扩挖通风兼安全洞，4个月后全断面贯通至地下厂房。传统钻爆方案开挖，开工至全断面贯通至厂房需15个月，而采用TBM导洞方案后，缩短为13个月，在该环节可节约2个月工期。

表6.2 钻爆法与TBM导洞法+钻爆法+钻爆扩挖法工期对比

项目	传统钻爆法			TBM导洞+钻爆法+钻爆扩挖法				对比工期(月)
	洞脸施工(月)	洞身施工(月)	合计(月)	洞脸施工(月)	导洞施工(月)	扩挖施工(月)	合计(月)	
通风洞	2.5	12.5	15.0	2.5	6.5(普通钻爆)	4.0	13.0	2.0
交通洞	2.5	19.0	21.5	2.5+1个月设备安装和调试	6.0(含厂房和600m通风洞)	7.0	16.5	5.0

(2) 正常进尺情况下TBM与人工钻爆开挖的通风兼安全洞将于0+600桩号贯通，随后有约600m的扩挖；节约时间是600m人工钻爆开挖的时间(需6个月)与该区段600m的扩挖所需时间(4个月)的工时差值6-4=2个月。

7 效益分析

通过计算可知，采用TBM导洞+钻爆法+钻爆扩挖法施工方案可使关键线路工期减少，由此带来的效益分析如下：

(1) 硬岩TBM掘进有效减少人员投入，免除火工材料投入，可直接减少资源投入。

(2) 提前快速进入地下厂房，可有效缩短整个工程的建设工期。减少项目建设管理成本，同时项目提前发电可提前创造效益，

缩短投资回收期。

(3) TBM在两洞导洞开挖结束后,可连续进入排水廊道的掘进施工。排水廊道的提前投入能有效减小地下厂房周边地下水压力和改善地下厂房施工条件,加快地下厂房施工进度,从而有助于缩短地下厂房的施工时间。

(4) TBM施工属于无爆破作业,有效解决了施工人员隧洞内作业安全问题,无形中为项目管理提质增效创造了很好的条件。

(5) 硬岩3.53m直径TBM设备当前市场价为3000多万,新购摊销费或租赁费用高。

假设项目投资期贷款利息4%和电站的经济内部收益率14.35%进行计算盈利经济净现值,能够满足不超项目概算。

8 结论

本文通过分析几种常见的施工工艺,提出将TBM导洞、钻爆法与钻爆扩挖法相结合的施工方案,计算采用该方案的关键线路工期并对产生效益进行分析,主要结论如下:

(1) TBM导洞+钻爆法+钻爆扩挖法的工艺在抽水蓄能电站建设工程中应用是可行的,结合工程地质特点采用的针对性破碎围岩穿越措施是可控的。基于众多类似工程的应用,TBM在超小曲线隧洞的掘进速度是人工钻爆法的4-5倍,对隧洞施工的质量、安全、环保等方面均展现出明显的优势。

(2) 根据关键线路工期的计算,进入地下厂房的工期是可以缩短的,为后续施工缓解工期压力,并能整体缩短工程总工期。

(3) 根据效益分析,采用该工艺相对单价最低的钻爆法施工,对于工程的概算额不会造成增加。

【参考文献】

[1]徐艳群,刘传军,刘永奎.文登电站TBM扩挖间隙对卡机的影响研究[J].建筑机械,2021(z1):62-64.

[2]周显刚,何冰,刘飞,等.TBM中导洞+爆破法扩挖技术[J].建筑技术开发,2023,50(5):56-58.

[3]王凯生,周应祥.TBM隧洞开挖施工过程中围岩稳定及初期支护三维仿真模拟[J].水利规划与设计,2022(7):165-174.

[4]潘福营.浅谈抽水蓄能电站工程建设的合理工期[J].水电与抽水蓄能,2016,2(4):90-94.

作者简介:

刘光然(1977--),男,汉族,河南新乡人,本科,职称:高级工程师,研究方向:水利水电建筑工程。

作者简介:

王生潭(1981--),男,汉族,甘肃省白银市人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电工程,单位:中国水利水电第五工程局有限公司。