# 锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 施工监理实践

李 卫 国
（四川二滩国际工程咨询有限责任公司，四川 成都　611130）

**摘　要**：锦屏二级水电站 1#、3#引水隧洞具有埋深大、洞线长、洞径大的特点，地质条件复杂，岩爆问题突出，最终采用大直径 TBM 进行掘进施工。作为一种完全不同于钻爆法的 TBM 隧洞施工系统，由于其施工系统的复杂性和施工方法具有的特点，加之该工程 TBM 设备采用由业主采购提供给承包商使用的模式，给监理工作带来了新的认识和更高的要求。介绍了 TBM 施工监理对设备管理、质量控制、进度管理、岩爆段的安全管理及其信息管理采取的控制措施。

**关键词**：TBM；监理；设备管理；岩爆；锦屏二级水电站
**中图分类号**：TV7；TV554；TV554 + .2；TV523　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1001-2184(2015)增 2-0035-03

## 1　工程概述

锦屏二级水电站是雅砻江干流上的重要梯级电站，电站引水系统采用 4 洞 8 机布置形式，从进水口至上游调压室的平均洞线长度约为 16.67 km，中心距 60 m，引水隧洞洞群沿线上覆岩体一般埋深 1 500 ~ 2 000 m，最大埋深约为 2 525 m，具有埋深大、洞线长、洞径大的特点，为世界上规模最大的水工隧洞工程。

东端 4 条引水隧洞采用钻爆法与 TBM 相结合的方法进行施工，其中 1#、3#引水隧洞采用 TBM 法施工，2#、4#引水隧洞采用传统钻爆法施工。采用 TBM 施工的引水隧洞段开挖直径为 12.4 m，引水隧洞初期采用喷锚支护，系统布置中空注浆锚杆，混凝土衬砌厚度为 60 cm，衬后隧洞洞径为 11.2 m，洞内流速为 4.72 m/s。

## 2　TBM 设备及施工情况

锦屏二级水电站 1#、3#引水隧洞采用的 TBM 直径为 12.4 m，居国内第一、世界第三，针对锦屏山地质特点专门设计，采用世界上最先进的刀盘变频电驱动技术、PPS 激光导向和 BEAM 实时地质监测技术，主机设有超量涌水快速排泄机构，后配套采用台架、外包壳体式稳定结构。为满足洞内的排水要求，后配套轨道架高 1.5 m。锦屏二级水电站引水隧洞 2 台 TBM 均由业主负责采购，在制造商指导下，由承包商负责进行组装调试，试掘进长度为 2 km，在完成试掘进并通过设备性能验收后，由业主移交给承包商使用，使用完成后由承包商负责进行恢复性修理，恢复性修理完成并经验收合格后移交业主。

1#引水隧洞 TBM 累计掘进达 5 859 m，3#引水隧洞 TBM 累计掘进达 6 295 m。在此期间，TBM 掘进不仅成功穿越了轻微至强烈岩爆区，还成功穿越了部分潜在极强岩爆区，克服了流量达 3.6 $m^3/s$ 的突涌水，创造了单台日掘进 34.08 m 和月掘进 682 m 的骄人成绩，是同等直径在同样的地质条件下世界上的最好成绩，实现了单工作面年独立掘进 3 860 m 的好成绩。

TBM 施工不仅保证了 1# 、3#引水遂洞的顺利贯通，还在不干扰 2#、4#引水隧洞施工的前提下，为钻爆施工提供了有力的通风、排水和交通条件，很大程度上保证了引水遂洞洞室群的正常施工，在 4 条引水隧洞掘进高峰期的整体施工组织和布局中发挥了积极作用。TBM 良好的施工环境、工厂化的生产模式、人性化的施工管理使得 TBM 在高风险的岩爆段施工无一人伤亡，其现场良好的文明施工赢得了各方的认可，大大提升了工程建设形象。其相对标准的隧洞成型和较小的围岩扰动最大限度地发挥了洞室的自身稳定，减少了隧洞超欠挖的后期处理量，有利于隧洞的后期衬砌和永久结构安全。

经过锦屏二级水电站 TBM 在施工中克服高地应力、强岩爆、突涌水的实践，大大地提高了硬岩掘进机的施工、设计和管理水平，有力地推动了大直径硬岩掘进机在水电工程中的应用，为我国掘进机的应用和发展积累了宝贵经验。

**收稿日期**：2015-07-20

## 3 TBM 施工监理实践

作为一种完全不同于钻爆法的 TBM 隧洞施工系统,由于其施工系统的复杂性和施工方法的特点,加之该工程 TBM 设备采取由业主采购提供给承包商使用的模式,给监理工作带来了新的认识和更高的要求。TBM 施工监理紧紧围绕“地质是基础,设备是关键,维护是前提,管理是核心”的监理思路,设置了 TBM 设备管理专业组和 TBM 现场组,配备了经验丰富的设备和土建监理工程师,按照组装调试、试掘进、正式掘进、拆除及恢复性修理各个阶段设备验收及管理的特点,做好设备的组装调试质量控制、试掘进后的验收移交管理、设备的优化改造工作、设备的正常保养维护以及拆除后的恢复性修理的监理工作。根据 TBM 施工连续性强、工序组织紧凑的特点,监理工程师采取了 24 h 的机上值班制度,对 TBM 掘进施工全过程进行跟踪监理,通过标准化的施工记录表格,对施工过程及其掘进参数进行准确、真实、可靠的记录。

### 3.1 对 TBM 设备采取的监理控制措施

(1)严格控制各个阶段的设备性能考核和验收管理,注重设备的优化改造。

设备验收主要包括:设备组装前 TBM 设备的进场验收、设备组装调试完成后的安装验收、试掘进的设备性能考核和移交验收(制造商向业主移交后,业主向承包商移交)、拆除后恢复性修理的移交验收(承包商向业主移交)。在各个验收阶段,监理工程师均根据设备采购合同、土建承包合同规定的技术要求,组织业主、供应商、承包商进行了设备的性能考核验收。对于在性能考核和验收中发现的问题,督促各方予以解决或予以持续关注,或在掘进过程中加强检查和处理。

TBM 试掘进阶段是全面考核 TBM 设备性能的阶段,也是暴露设备缺陷和不足的阶段。锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 试掘进长度为 2 km,试掘进历时近 1 a 时间,TBM 碰到了如塌方、岩爆、突涌水等前所未有的复杂施工问题,TBM 设备的部分性能不能很好的适应现场施工条件,在一定程度上制约了 TBM 的施工进度。监理工程师通过与业主沟通,会同制造商、承包商一起研究解决方案并根据合同责任的不同,督促制造商或承包商予以解决。在 1#、3#引水隧洞分别围绕减少设备本身的缺陷、降低设备故障率、提高设备利用率、完善设备使用性能与保证施工安全等四个方面展开了设备优化改造工作。其中 3#引水隧洞 TBM 完成了包括 L1 区支护平台、L1 区喷混凝土系统、L1 区出渣方式、L2 区移动支护及动态优化、工业用水系统优化、3#皮带机、刀具运输系统等 13 项内容的优化改造,优化改造后的设备较最初设计的设备在使用率、适应性方面均得到了一定程度的提高。

(2)严格执行 TBM 主机操作手、喷混凝土操作手、设备检修维护工程师等关键工种实行上岗培训制度和执证上岗制度(由制造厂家培训并经过掘进操作考核合格后颁发)。

在试掘进和掘进阶段,主机操作手原则上不允许承包商进行更换,按月执行关键工种人员定期考核评价制度,通过考核评价不断提高操作手的水平。

(3)在 TBM 组装阶段,重点审查 TBM 大件运输、大件吊装、TBM 刀盘焊接、TBM 步进、TBM 组装等技术方案。

组装前,组织制造商专家对承包商的技术人员进行培训,使组装人员理解并掌握 TBM 的性能、操作、检验、修理和维护技术;组织制造商和承包商对组装方案、组装工艺、组装标准、组装循序和进度、质量控制进行充分的讨论,以便于参与人员理解和掌握;在组装过程中,对关键工序,由监理工程师、厂家代表、业主代表组织验收小组进行检查验收,所灌注的油料必须经监理工程师检查合格后才能灌注。

(4)在 TBM 试掘进和掘进阶段,建立了 TBM 设备监理工程师的平行巡视检查制度和设备状况分析制度。

通过设备监理工程师平行检查,及时发出书面指令,督促承包商按照 TBM 操作规程、保养规程、维修制度、机况监测制度、刀具管理制度等进行设备的良好操作、保养维护,通过设备状况分析制度,及早发现设备出现的异常情况,有针对性的采取措施进行处理。TBM 掘进时,由现场监理值班工程师对掘进参数进行平行监督管理,以保证 TBM 按照合理的掘进参数进行掘进。

### 3.2 对 TBM 掘进采取的施工质量监理控制措施

TBM 掘进施工质量控制主要包括隧洞轴线

的控制、掘进偏差的控制及支护施工质量的控制。

TBM 施工隧洞轴线的控制取决于隧洞基本控制导线精度和 TBM 自身激光导向系统运行的好坏,基本控制导线由监理工程师独立平行测量,全站仪激光独立测站由监理工程师旁站进行联合测量,TBM 自身激光导向系统的运行情况由监理工程师定期检查。

锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 隧洞轴线水平和竖向的误差要求控制在 ±100 mm 和 ±60 mm 之内。掘进偏差的控制是 TBM 掘进过程中的重中之重,其偏差控制主要取决于操作手的掘进操作水平、地质情况、设备性能状况,在 TBM 掘进的全过程,现场监理工程师通过随时检查、监视 TBM 姿态和方向并督促承包商进行控制。

喷混凝土前,监理工程师实施的检查验收主要包括:开挖面有无浮石和堆积物,喷混凝土面是否冲洗干净;钢筋网是否符合设计要求,厚度标记埋设情况,受喷面有水情况下的引排水处理情况,喷混凝土的设备、操作人员就位等;在喷混凝土过程中,监理工程师主要对作业过程中采用的分段分片、喷射顺序自下而上进行监控。现场要求承包人根据地质情况及时调整喷头距离和速凝剂泵的流量,并要求保证喷射混凝土输送泵的供料连续、泵送速度、压力稳定均匀,不能出现突然的压力变化,避免影响到喷射头的稳定作业。喷混凝土完成后,采取钻孔以及取芯相结合的方式进行喷混凝土厚度、强度指标的检查。

TBM 掘进过程中,为满足快速掘进和安全需要,优先施工顶拱部分系统锚杆以及部分临时支护锚杆,后期由新增的锚杆补打台车进行遗留锚杆的补打。施工完成后,主要采用无损检测的方法进行施工质量检查,针对单根不合格锚杆,及时督促承包人进行补打。

### 3.3　对岩爆洞段掘进采取的安全监理控制措施

(1)根据锦屏二级水电站引水隧洞所具有的特点,在现场组建了岩爆防治地质预报、岩爆防治和动态支护领导小组和工作小组。

工作组组长由总监理工程师担任,成员包括承包商、设计、业主、微震监测单位及岩爆咨询专家。工作组每周组织参建各方召开岩爆周例会,指出岩爆重点防护工作面和措施,协调解决岩爆防治中遇到的问题,对于岩爆引起的重大问题,提请领导小组决策。该组织机构的设立有效统筹了各方的力量,形成了“技术支持—科学决策—有效执行”三位一体的系统工作决策体系。

(2)充分利用业主引进的微震监测系统以及设计院的地质预测预报成果,为安全施工提供岩爆预警。通过微震监测,对施工掌子面前后的岩体微震活动进行实时连续监测和分析预报,有效预报了岩爆的类型、震级和位置,使支护、规避措施更具针对性。

(3)积极开展 TBM 岩爆洞段支护方案、施工措施以及与岩爆有关的新材料、新工艺的研究、探索和试验。

TBM 岩爆洞段的支护方案不能影响 TBM 快速施工,同时要求其能够快速发挥作用。在锚杆方面,先后试验了中空涨壳式锚杆、水涨式锚杆、恒阻大变形锚杆、普通砂浆锚杆,最终选择以中空涨壳式锚杆为主,水涨式锚杆为辅的支护方案。对于强岩爆洞段,采取了钻爆法部分断面先行,TBM 部分断面再行掘进通过的施工措施,该措施降低了岩爆的风险,提高了工程和人员设备的安全。

(4)严格执行掘进一循环,支护一循环的作业要求。掘进过程中,需加强对掌子面、出露岩石、护盾油缸压力、出渣块度的观察,不断地总结施工经验,合理调整掘进参数,必要时停机待避。

### 3.4　对 TBM 施工进度采取的监理控制措施

(1)建立了 TBM 掘进进度的目标考核奖励办法,对施工日进尺、月进尺进行考核奖励。

月度进尺以 400 m 为基础,达到了即予以奖励,每超过 10 m 追加额外奖励。同时开展了 1#、3#引水隧洞掘进施工的劳动竞赛活动,设置了优胜奖。通过目标考核办法、奖励及其劳动竞赛的开展,有效地调动了承包商的积极性,创造了大直径隧道掘进日进尺 34.08 m 和月掘进 682 m 的成绩。

(2)按周召开进度专题会议。

根据 TBM 施工运行记录,对本周 TBM 设备的利用率及其影响进度的因素进行分析,并采取有针对性的措施。锦屏二级水电站 1#、3#引水隧洞影响进度的主要因素是地质因素(表现为:岩爆引起的大量坍塌的处理)、洞外皮带机的影响、设备故障影响以及钢拱架安装时间长的影响。针对这些因素,通过 L1 区尽早支护、在撑靴部位

(下转第 87 页)

15 ~30 击的速度贯入试验地层中。先打入 15 cm,不记锤击数;继续贯入 30 cm,记录锤击数。若砂层较密实、贯入击数较大时,也可记录小于 30 cm 进尺的锤击数然后将其换算成贯入 30 cm 的锤击数。

(3)静载试验。

试验采用模拟建筑物地基竖向受荷实际工作条件的试验方法:慢速维持荷载法。即逐级加荷,每级荷载达到相对稳定后加下一级荷载,直到试验进行到满足试验规范的要求时方可终止加载条件,然后分级卸荷到零。

### 5.2　检测及计算成果

基于试验成果,根据《建筑地基基础设计规范》等得到的计算成果见表 1。在实施振冲碎石桩处理砂层地基后,复合地基的抗剪强度、变形模量等物理力学特性均满足设计要求。标贯试验亦表明复合地基均为不液化土。

## 6　结　语

**表 1　复合地基力学指标计算成果表**

| 间距 /m | 部位 | 变形模量 $E_o$ /MPa | 压缩模量 $E_s$ /MPa | 承载力[$f_k$] /kPa | 抗剪强度 $\varphi_s$ | $d$ /m | 置换率 /m | $n$ | 复合地基抗剪强度 $\varphi_{sp}$/° | 复合地基压缩模量 $E_{sp}$ | 复合地基承载力 $F_{sp}$ | 复合地基变形模量 $E_{op}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.8 | 桩间土 | 27.4 | 26.8 | 273 | 37.3 | 1 | 0.28 | 4 | 35.7 | 49.3 | 481 | 34.2 |
| | 桩体 | 51.52 | | 1 016 | 38 | | | | | | | |
| 2 | 桩间土 | 26 | 25.2 | 270 | 36.5 | 1 | 0.227 | 4 | 35.4 | 42.3 | 437 | 31.6 |
| | 桩体 | 50.52 | | 1 006 | 38 | | | | | | | |
| 2.5 | 桩间土 | 22.1 | 20.4 | 263 | 34.1 | 1 | 0.145 | 4 | 33.8 | 29.3 | 377 | 27 |
| | 桩体 | 55.78 | | 1 051 | 38 | | | | | | | |

(1)黄金坪水电站坝基在特定的地质背景下,河床覆盖层分布有规模较大的砂土层,在地震、动力荷载或其它外力作用下,可能存在砂土地震液化及地基变形等工程地质问题。

(2)振冲碎石桩对砂土层等软弱地基的挤密效果与置换作用明显,可有效解决软弱地基砂土液化问题、承载力问题及抗剪问题。黄金坪水电站坝基通过振冲碎石桩形成复合地基,在承载力、压缩模量等方面较明显地提高并达到设计要求。

(3)振冲碎石桩施工时,根据复勘孔勘探成果,对砂层等软弱地基进行了分区处理,既达到了补充查明软弱地层空间展布的目的,同时亦方便了施工,又节约了工程量。

(4)黄金坪水电站采用振冲碎石桩处理坝基软弱地层,既减少了坝基开挖的工程量,又解决了基坑由于涌水量大而产生的施工难度大问题。

**参考文献:**

[1]　水电水利工程振冲法地基处理技术规范,DL/T5214 - 2005[S].

**作者简介:**

谷江波(1976-),男,山西芮城人,高级工程师,硕士,从事水电工程地质勘察技术工作;

刘永波(1981-),男,河南许昌人,工程师,学士,从事水电工程地质勘察技术工作;

闵勇章(1981-),男,湖北孝昌人,高级工程师,学士,从事水电工程地质勘察技术工作.

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 37 页)

增加水涨式锚杆、设备优化改造、使用局部钢拱架、加强洞内洞外皮带机的联系等措施予以妥善解决。

(3)加强协调管理工作。

监理部专门成立了洞外皮带机运行监理组,一方面实现了洞内外现场监理工程师 24 h 跟踪作业,及时协调解决掘进过程中皮带机出现的问题;另一方面,通过规范的管理,大大提高了洞外连续皮带机的运行保障率,有力地促进了 TBM 的顺利掘进。

### 3.5　TBM 施工信息的管理

在 TBM 施工和监理过程中,对各种信息的采集和积累显得特别重要,如地质、设备状况、开挖与支护状况、刀具、油料消耗、遇到的不良地质情况与处理措施和结果、循环进尺、日进尺数据等,这些资料和数据是合同管理的基础,也是技术分析的基础,监理工作要做得扎实、系统。

## 4　结　语

TBM 法施工在我国是最近二十多年出现的事情,是地下工程工厂化施工模式,其施工技术与监理工作的内容、方法、规律、措施等方面都具有其特点和不同要求,监理工程师应加强对 TBM 施工管理知识的学习和再培养,并应根据这些特点和不同要求实施监理,尤其是 TBM 设备维修、TBM 穿越不良地质段的施工技术和监理,以进一步促进 TBM 施工技术与管理的发展和完善。

**作者简介:**

李卫国(1972-),男,四川宣汉人,副总经理,高级工程师,学士,从事水利水电工程建设监理工作.

(责任编辑:李燕辉)