

# 地下工程新技术的实践

马洪琪

(云南澜沧江水电开发有限公司, 昆明 650011)

**[摘要]** 广蓄电站高压岔管的  $P \cdot D$  值达  $5.8 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 未采用常规的钢岔管, 在钢筋混凝土岔管设计原则上, 主要依靠围岩承担水压力。施工中从控制爆破、混凝土质量、高压灌浆等方面实现设计意图。这种结构安全可靠, 投资省, 效益好。广蓄斜井引进了一套间断式的斜井滑模, 经改进和完善, 获得了成功。在天荒坪抽水蓄能电站长斜井施工中, 研制了自主知识产权的 XHM-7 型斜井滑模设备, 实现了斜井混凝土衬砌的连续滑升, 显示了该设备结构新颖、安全可靠、速度快、造价低的优势。以上两项新技术的成功实践, 为我国类似工程的推广和应用提供了有益的经验。

**[关键词]** 水电; 地下工程; 岔管; 斜井; 新技术

**[中图分类号]** TU94<sup>+</sup>2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)11-0037-05

改革开放以来, 由于扩大了对外的交流与合作, 在水利水电工程中引进了不少先进的技术和管理经验, 加上我国水电建设者的努力创新, 水电建设快速发展, 经济效益显著。在地下工程中采用无钢衬高压钢筋混凝土岔管、长斜井滑升模板等技术, 就是成功的实例。

## 1 高压钢筋混凝土岔管

广蓄电站一期工程, 经业主慎重研究, 决定采用一洞四机的布置方案, 并积极组织实施无钢衬高压钢筋混凝土岔管新技术, 由美国哈扎公司承担设计咨询。

广蓄主、支管分岔处内径由 8 m 变至 3.5 m, 体型结构复杂, 岔管承受最大静水头 610 m, 最大动水头 725 m,  $P \cdot D$  值达  $5.8 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。按常规设计需要采用厚度 60 mm 左右的高强钢板, 施工困难, 价格昂贵。广蓄钢筋混凝土岔管设计 28 d 混凝土抗压强度 29.4 MPa, 抗渗标号 S12, 混凝土厚 60 cm, 单层钢筋(环向筋  $\phi 36$ , 纵向筋  $\phi 28$ ), 主管长 62.845 m, 呈圆台形, 4 个支管内

径 3.5 m, 总长 32.2 m, 支管与主管交角为  $60^\circ$  (见图 1)。

高压钢筋混凝土岔管的设计原则是: 内水压力由混凝土传递到围岩的应力应小于该处地应力场的最小主应力, 围岩承受绝大部分内水压力。钢筋混凝土衬砌主要起保护围岩、降低糙率和便于高压灌浆作业。通过高压固结灌浆, 加固了围岩, 提高围岩特别是构造带的抗渗性及整体性; 水道放空时, 外水压力由混凝土衬砌及围岩联合承担, 围岩的计算厚度等于混凝土衬砌厚度。

1) 高压岔管开挖爆破的要点。要有较好的开挖体型, 尤其要保护岔口相贯处的岩体; 要减轻爆破振动影响, 要求锚杆跟进掌子面 1.5 m, 以抑制围岩变形。由于广蓄岔管段围岩地质条件好, 开挖方法得当, 并将哈扎公司原要求采用的预应力锚杆改为普通砂浆锚杆。

2) 岔管钢筋施工技术。岔管体型是一个大圆台和 4 个小圆台相交, 环向钢筋的加工特征呈三维空间弯曲, 钢筋加工参数用椭圆方程近似, 很难一次加工到位。因此, 在绑扎时用自制模具调整到

**[收稿日期]** 2002-06-17

**[作者简介]** 马洪琪 (1942-), 男, 上海市人, 中国工程院院士, 云南澜沧江水电开发有限公司教授级高级工程师

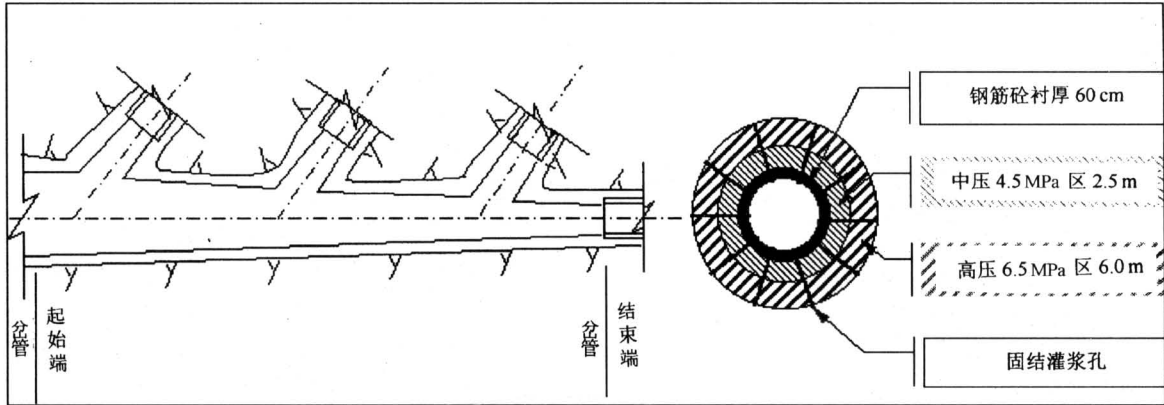


图 1 广蓄高压钢筋砼岔管结构图

Fig.1 Structure of high-pressure reinforcement concrete manifold in Guangzhou pumped-storage project

位，绑扎质量做到曲线圆顺，表面平整，间距均匀（见图 2）。

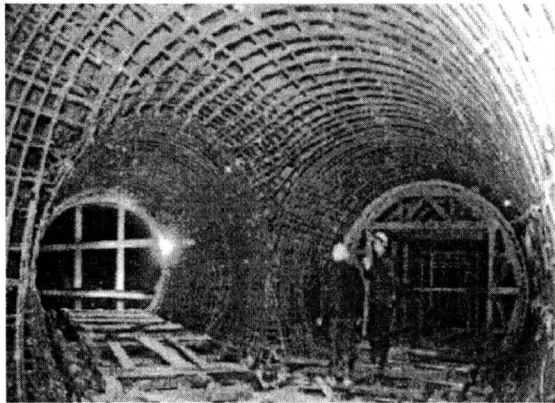


图 2 高压岔管钢筋绑扎

Fig.2 Steel bar binding of high-pressure manifold

3) 岔管衬砌材料。最初，岔管衬砌模板采用的是木模板上贴胶合板，由于胶合板的隔水隔气，混凝土泌水和排气不畅，养护水又无法接触混凝土，拆模后发现底拱出现密集的气泡孔及泌水痕迹，边顶出现环向裂缝。此后通过试验采用利于排水透气的模板，并加强养护到设计龄期，消灭了上述缺陷（见图 3）。

4) 岔管灌浆的程序、方法和技术。高压灌浆是钢筋混凝土岔管施工的重要环节。岔管共设有顶拱回填灌浆、浅孔接触灌浆、帷幕灌浆和高压固结灌浆 4 种，并按此顺序进行，但每一个岔支管又相对形成一个独立的施灌小区。

在灌注方法上，接触灌浆改变以往分序的灌注方法，而把一个施灌区内的所有孔全部打完后开

灌，如在灌浆过程中发生多孔串浆，则将串浆孔实行联灌。实际上这是一种群孔注浆又便于浆液渗透扩散的施工方法，其目的是浆液渗透扩散的面积越广，灌浆效果越好。

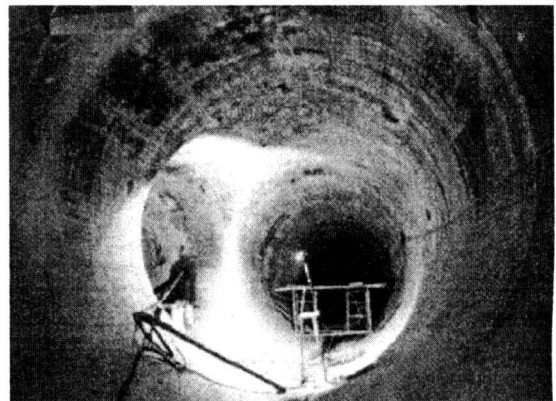


图 3 浇筑成型的高压钢筋砼岔管

Fig.3 Finished shape of high-pressure reinforcement concrete manifold

固结灌浆的技术要点是：把一序孔钻至设计孔深，栓塞置于混凝土衬砌中，以 2.5 MPa 压力施灌，然后以 4.5 MPa 压力施灌二序孔。实际上是用低压固结混凝土衬砌周边围岩的松弛圈，再用中压加固衬砌相邻的内圈围岩，使其与衬砌联合受力承担更高的灌浆压力。最后把灌浆栓塞于距衬砌内侧 1.5 m 的岩石中，用 6.5 MPa 压力施灌外圈围岩，形成外圈围岩高压区，并对衬砌施加一定的预压应力。

我国水工隧洞的围岩固结灌浆，长期维持在中、低压水平，不能充分利用围岩的承载能力。广蓄高压水道洞径大，水头高，均采用了高压固结灌

浆技术，并摸索了“低压慢灌、逐步升压、控制灰量、浓浆待凝、封堵密实”的 20 字灌浆工艺。

广蓄一期工程高压岔管充水期间的原型观测表明，充水前 89 % 的测点处于预压状态，平均单点预压应变量为  $-85 \mu\text{m}$ 。当内水压力升到约 2.5 MPa 阶段，预压应力几乎损失殆尽。主管各断面极少有超过  $100 \mu\text{m}$  的受拉点，纵向裂缝主要出现在压力为 1.6~2.5 MPa 阶段，超过 2.5 MPa 后纵缝很少发展，岔管中钢筋应力仅为 48.5 MPa。经过三次放空检查，岔管及高压水道衬砌均完好，也未见新的裂缝。

广蓄一期工程高压岔管及高压灌浆的工程实践，为广蓄二期、天荒坪抽水蓄能电站的推广应用提供了有益的经验。

## 2 高压长斜井施工

高压水道采用斜井布置方式通常比竖井经济，但斜井的施工方法，尤其是混凝土衬砌模板技术是施工的难点。广蓄一期工程引水系统采用二级斜井布置，其中上斜井长 406.22 m，下斜井长 347.459 m，总长 753.661 m，倾角  $50^\circ$ ，开挖直径 9.7 m，衬砌直径 8.5 m。如此规模的斜井施工，国内首例，国际罕见，是电站建设的关键工程（见图 4）。

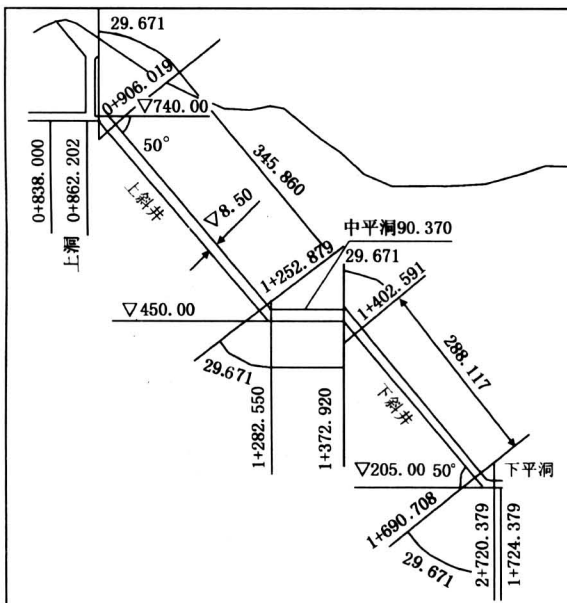


图 4 广蓄斜井设计布置图

Fig.4 Inclined shaft layout of Guangzhou pumped storage project

### 2.1 导井开挖

广蓄上、下斜井导井开挖，均采用正反井同时掘进的方法。上口用下山法，手风钻开挖，人工装渣，卷扬机牵引斗车出渣；下口用阿力马克爬罐打反导井，自重溜渣。上斜井平均日进尺 4.2 m，总历时 129 d；下斜井平均日进尺 3.3 m，总历时 127 d。阿力马克爬罐在鲁布革工程首次采用，导井开挖速度快，月进尺达 80 m。但通风排烟困难，掌子面作业环境差。传统的下山法施工，工人劳动强度大，工作面排水困难，进度慢。

20 世纪 90 年代中期，煤炭系统研制了反井钻机，可以说是对下山法开挖导井的一次革命，已在水电系统运用，但限于钻机的性能，在坚硬岩石内钻进长度只能在 200 m 内。

### 2.2 扩大开挖与支护

扩大开挖在自行研制的台车上进行。为了实现掌子面垂直于洞轴线的开挖，这种作业台车共设 4 层，高达 10 m，以便钻手能打平行于洞轴线的周边孔和爆破孔，测量精度则由设在斜井上口轴线的激光束控制。台车在设于底部的两条 20# 槽钢上行走，卷扬机牵引，爆破器材和喷锚支护材料由送料小车提供。广蓄斜井的扩挖与支护，上斜井历时 248 d，下斜井历时 238 d，平均日进尺 1.55 m。

### 2.3 混凝土滑模衬砌

广蓄电站高压斜井混凝土衬砌厚度 60 cm，设计标准 30.6 MPa，单层钢筋。衬砌施工自下而上进行，分下弯段、直线段和上弯段施工。水电十四局研制了 XDM-8.5 m 多功能模板，可实现平、弯、斜施工，但平均日进尺 1 m，不能满足直线段衬砌速度。为此，业主从英国 CSM 公司及瑞典 BU 公司引进了斜井滑模设备。滑模由中梁、上下锁定架、模板系统、工作平台及爬升悬吊系统组成（见图 5）。

中梁长 30 m，截面为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  的组合钢桁架，是滑模及工作平台爬升的定向机构。上下锁定架是中梁定位、导向及锁定机构，由千斤顶支撑在斜井岩壁和已衬砌的混凝土上，中梁沿底部轨道行走。

模板截面为椭圆形，在  $50^\circ$  倾角的斜井内形成水平浇筑面。模板支撑架是组合桁架，支撑架下装 4 组行走轮，沿衬砌好的混凝土面行走。滑模系统设有 4 层工作平台，从上到下分别为卸料平台、浇筑平台、钢筋绑扎及混凝土振捣平台、混凝土抹灰及养护平台，各平台与模板支撑架连成整体。在中

梁四周布置 4 条矩形高强爬杆，模板爬升千斤顶沿爬杆牵引模板系统滑升。中梁由液压爬爪沿 4 条悬吊高强钢缆爬行，钢缆上端固定于井口平台。

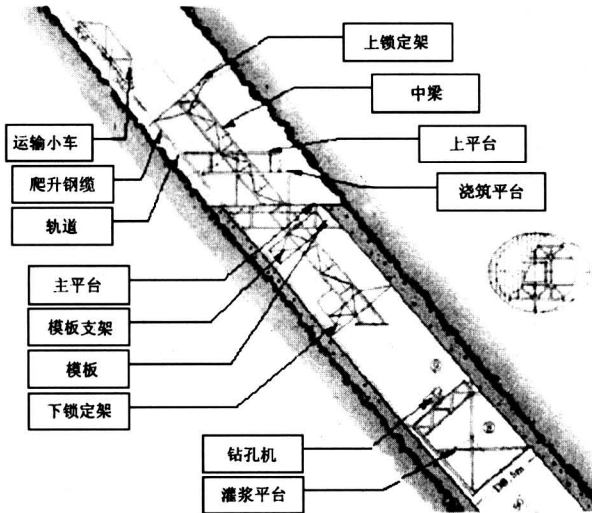


图 5 广蓄斜井滑模结构图

Fig.5 Structure of inclined-shaft slipform for Guangzhou pumped-storage project

另外设置了一套运输系统，运送人员、材料及工具，由液压高速卷扬机牵引。运输系统设有灯光信号、电话联系、无线遥控及电脑信号识别系统，以保证施工安全。

这种滑模属于间断性滑模，模板在长 30 m 的中梁上可连续滑升 12.5 m。当移动中梁时，停止混凝土浇筑，中梁沿钢缆爬行到位并固定调正后，再进行下一循环的浇筑滑升。

混凝土配合比是控制滑模施工速度及出模混凝土质量的重要因素。混凝土配合比的设计既要使混凝土凝结时间与滑升速度相匹配，又要满足不同气温条件、不同滑升速度对混凝土凝结时间的要求。经大量试验后提出了 5 个混凝土配合比，实践效果很好。

广蓄斜井混凝土衬砌滑模施工总历时 115 d，日平均滑升速度 3.4 m，最高 9.5 m；月平均滑升速度 102 m，最高 149 m。

广蓄斜井从 1990 年 11 月 10 日开始进行导井开挖，到 1992 年 11 月 30 日完成混凝土衬砌，历时 2 年零 20 天，综合成洞率为每天 1.0 m。如此大直径、陡倾角的长斜井施工速度，在国内和国际上都是一流的。

有了广蓄的实践经验，水电十四局自己研制了

XHM-7 型斜井滑模，在天荒坪工程中与 CSM 公司竞标。由于 XHM-7 型滑模质量比 CSM 公司的轻一半，价格仅为该公司的 1/3，并可实现连续滑升，因而竞标成功，并有了自主知识产权的斜井滑模技术。

天荒坪抽水蓄能电站斜井直线段长 697.37 m，倾角 58°，混凝土衬砌厚度 50 cm，衬砌直径 7 m，共两条，并规定，1 号斜井从中支洞进入向上滑升，完成上段衬砌后，爆通岩塞，将滑模下移到下斜段向上滑升，在支洞处与已衬砌好的上斜段对接后，再把滑模下移至井底拆除。对 2 号斜井则要求自下而上一次衬砌到位，最后在上井口拆除。可见天荒坪电站对滑模使用的运行工况更为复杂。

XHM-7 型滑模的模板结构与广蓄的基本相似（见图 6），其核心技术是滑模的驱动设备，即

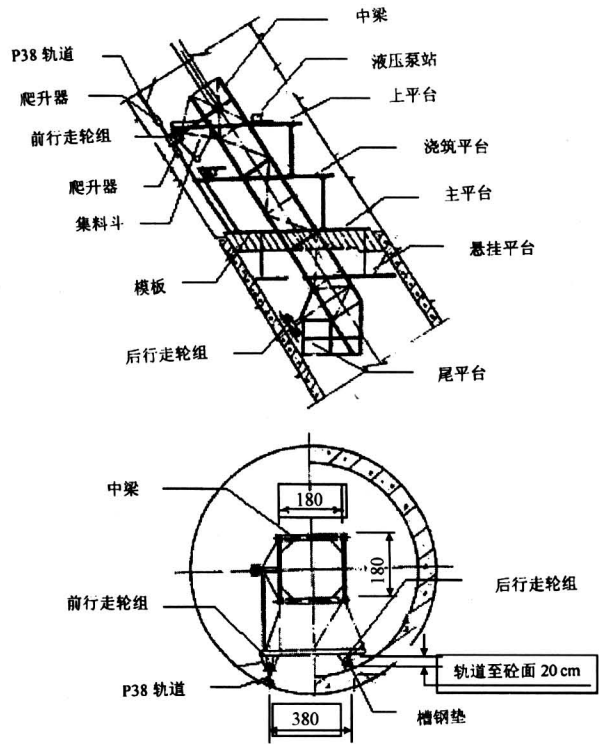


图 6 XHM-7 型滑模结构

Fig.6 Structure of XHM-7 Slipform

依附在 P38 钢轨侧壁的液压爬升器（见图 7），在前行走轮的上、下，各布置一对爬升器。爬升器的主要部件是：上下联系梁，一对液压油缸和活塞杆，前后带齿的夹爪及弹簧。其工作原理是：前进时压力油进入上腔，下回油，在压力油作用下，与缸筒连接的前端和与活塞连接的后端分别有向上和向下的运行趋势，由于夹爪带齿面在小弹簧的作用下始

终与钢轨接触，其另一面加工成斜面，在活塞杆推力下后夹爪紧紧地夹住钢轨，此时，缸筒上行使前夹爪松开，从而带动模板上滑；反之，下腔进油，

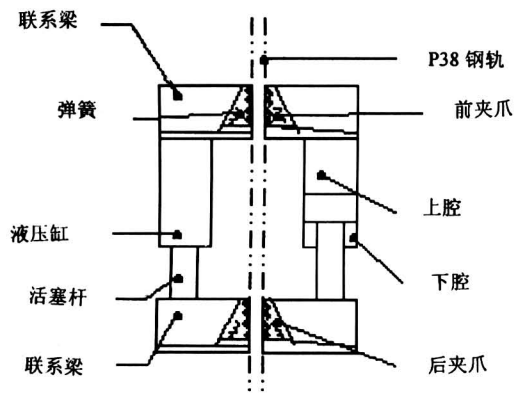


图 7 爬升器工作原理

Fig. 7 Working principle of climber

上腔回油，缸筒下行，使上夹爪夹紧不能后退下滑，活塞杆上行缩回油缸，松开下夹爪，这样爬升器就完成一个工作循环，滑模实现一次滑升。从工作原理可以看出，滑模的自重下滑力可使爬升器自锁，而且下滑力越大，锁紧力也越大，因此安全可靠是爬升器的突出特点。液压系统的设计既可使左右爬升器同步动作，也可单独动作，以便对模板纠偏，使滑模沿斜井中心线爬升。为防止模板系统上浮，在行走轮架上装有防止上浮的反向托轮。

XHM-7 型斜井滑模系统构思新颖，操作方便，安全可靠。1 号斜井滑模施工历时 253 d，2 号斜井历时 117 d。1 号和 2 号斜井滑模分别创造了日滑升 12.08 m、月滑升 227 m 与日滑升 11.88 m、月滑升 230.3 m 的记录，超过了广蓄斜井滑模滑升速度。

## Application of New Technology in Underground Engineering

Ma Hongqi

(Yunnan Lancang River Hydropower Development Co. Ltd., Kunming 650011, China)

[Abstract] Although the PD value of high-pressure manifold in Guangzhou Pumped-storage Project reaches 58 000 kN.m, the reinforcement concrete manifold is applied in the project instead of the conventional steel manifold. The design principle for such kind of manifold is based on bearing the water pressure mainly by the surrounding rock. Measures such as blasting control, concrete quality control and high-pressure grouting have been taken in construction to achieve the design requirement. The practice proves that this kind of manifold is reliable in performance, efficient in cost and excellent in benefit. Slipforming technology used in the concrete lining construction of high-pressure long inclined-shafts becomes the tough point, and no successful experience was available from both home and abroad at that time. Successful performance has been achieved in inclined-shaft construction of Guangzhou Pumped-storage Project by improving and bettering a set of interval inclined-shaft slipform imported. The self-innovated and patented XHM-7 inclined-shaft slipform equipment used in the long inclined-shaft construction of Tianhuangping Pumped-storage Project has realized the consecutive rising of the concrete lining in the inclined-shaft, which shows the advantages of novel structure, reliability, faster concreting and lower cost of the equipment. The successful application of the two above-mentioned new technologies will provide useful experiences to the promotion and application in the similar future projects.

[Key words] hydropower; underground engineering; manifold; inclined-shaft; new technology