

# 小断面隧洞全断面混凝土衬砌钢模台车设计

黄河 曾建军 杨华彬

(成都勘测设计研究院,成都,610072)

**提要** 羊卓雍湖水电站引水隧洞( $\phi=2.5\text{m}$ )全断面混凝土衬砌钢模台车设计,目前国内尚处于起步阶段,本文对小直径、小断面隧洞进行全断面混凝土衬砌设备的工作原理及相应的计算方法,作一探讨。

**关键词** 小断面隧洞 全断面混凝土衬砌 钢模台车设计

## 1 工程简介

羊卓雍湖水电站位于西藏自治区贡嘎县和浪卡子县境内,湖距拉萨市约110km,厂房距拉萨市约83km,为一抽水蓄能电站,整个枢纽由进水口、引水隧洞、压力钢管及电站厂房、尾水渠、抽水蓄能系统等部分组成。电站装机由4台2.25万kW的抽水蓄能机组及预留一台2.25万kW常规机组组成。电站最高水头1030m,其中引水隧洞为一有压圆形隧洞,内径2.5m,长度5889m,平均纵坡 $i=8.1\%$ 。预计1995年第一台机组发电,1996年底4台蓄能机组全部投入运行。

该隧洞沿线多为砂板岩互层,内有部份辉绿长岩。隧洞埋深在50~450m,成洞条件相对较好,故隧洞大部分为25cm厚的单筋混凝土衬砌(占全洞线82%),少部分为厚度50cm的双筋混凝土衬砌(占全洞线18%),为便于施工,隧洞开挖成平底马蹄形,底宽2.8m,整个工程隧洞洞挖6.34万 $\text{m}^3$ ,混凝土3.32万 $\text{m}^3$ ,回填灌浆1.2万 $\text{m}^2$ 。

该工程取水口海拔4400m,气候恶劣,空气稀薄,进水口多年平均气压仅580mPa,全年建议施工期仅为4~12月,同时高原施工,对人体的劳动能力和机械效率都将降低

(人体劳动能力的影晌系数为1.3,施工机械效率的影响系数为1.65),由此可见施工条件的恶劣程度对隧洞混凝土衬砌施工中的混凝土拌合、运输、入仓等各个环节都带来较大的影响。

根据羊湖电站施工总进度安排,按1995年底第一台机组发电要求,整个工程中引水隧洞的施工为本工程控制性项目,而在该项目中,混凝土衬砌又是除灌浆以外最后一个重要环节,故选择何种混凝土衬砌的方案和设备,对能否确保隧洞按期完成,从而保证1995年底发电,至关重要。

根据施工单位目前的施工进度要求,在混凝土衬砌设备设计中,按全断面混凝土衬砌进行钢模台车的设计。从整个工程的地质、气候、环境等因素出发,要求该设备混凝土衬砌月进尺不低于80m。

## 2 全断面钢模台车结构及设计计算

全断面钢模台车由钢模、台车及钢模外部支撑三部分组成。钢模即隧洞混凝土衬砌的模板,可以收缩于台车上,施工人员可在伸展开的模板内穿行;台车作为钢模拆卸、安装、运输的工具,又是混凝土浇筑时的移动支

架方便施工,台车在模板底部的轨道上行走,钢模外部支撑作为支承安装完成后的钢模和作为在混凝土浇筑状态下抵抗浮托力的杆件,其一端支撑在开挖好的洞壁上,另一端支撑在钢模上,见图 1、2。

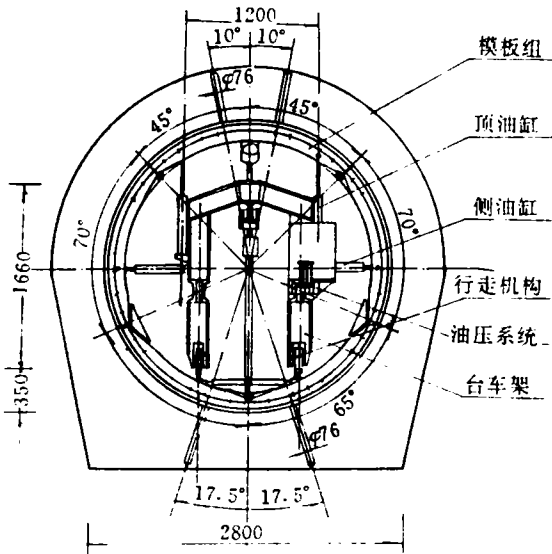


图 1 全断面衬砌钢模台车工作状态图

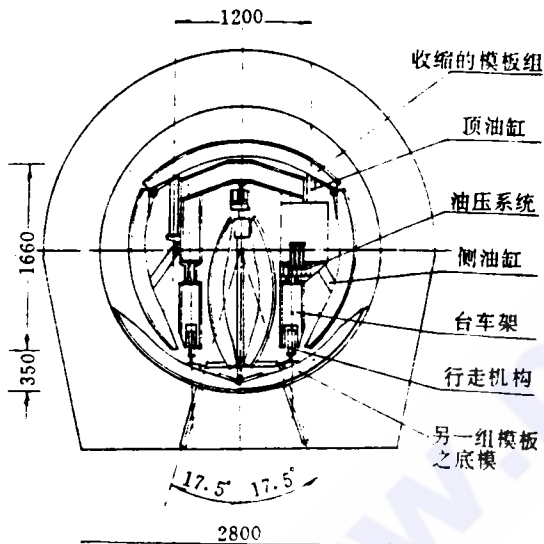


图 2 全断面衬砌钢模台车穿行状态图

### 2.1 钢模组成及其特点

钢模纵向长度由混凝土浇筑段长度决定。通常每个浇筑段由若干节模板组成,节与节之间采用 U 型卡或螺栓连接,钢模环向

(每节)又分为若干块,块与块之间采用铰和螺栓连接从而组成一个圆筒形模板,施工中根据实际浇筑工况可通过增加模板长度(即增加浇筑段长度)来提高混凝土衬砌月进尺。

在羊湖水电站引水隧洞钢模台车设计中,根据施工条件要求,浇筑段长度定为 12m,由 4 节钢模组成,每节长 3m。每节钢模环向又由 5 块模板组成,其中顶模一块(圆心角 90°),侧模两块(圆心角  $2 \times 70^\circ$ ),底模两块(圆心角  $2 \times 65^\circ$ )。顶模与侧模之间采用铰接,并辅以螺栓固定连接,便于使用中顶模和侧模的收缩,方便施工;两块底模之间也采用铰接并辅以螺栓连接型式,以适应于底模的起吊、收缩并在台车中部穿行;侧模与底模之间采用螺栓连接,便于拆卸转移时侧模与底模的分离。模板通过台车拼装成外径 2.5m 的圆筒形,重量 1 100kg/m。其工作状态下荷载通过面板、次梁传至拱梁。拱梁间距 0.75m,采用工字钢 I<sub>14</sub>,次梁间距 0.75m,采用槽钢 [8],面板采用 6mm 钢板。模板底模上固定有两条轻型钢轨(18kg/m),作为台车行走轨道,底模上还设有底模脱模简易装置,用于底模拆卸脱模。每节钢模设有三层孔口,用于混凝土入仓、观察混凝土浇筑情况及利用插入式软轴振捣器作业,当混凝土浇筑到相应窗口位置再关闭该窗口。由于浇筑振捣方法是软轴式振捣器配合附着式振捣器使用,故每节钢模还设有 6 个附着式振捣器基座。

### 2.2 设计计算

钢模承载传递方式是面板传递给次梁、次梁传给拱梁,故计算主要问题就是确定钢模荷载和拱梁计算。

2.2.1 钢模荷载计算 钢模荷载主要有新浇混凝土侧压力、振动荷载、混凝土浮托力及有关设备重量,钢模自重、施工活荷载等。

(1)新浇混凝土侧压力。混凝土侧压力,不仅随着混凝土浇筑高度变化,而且与混凝土容重、坍落度、入仓温度、混凝土的浇筑速

度、振捣方法等众多因素有关,准确计算十分困难,一般根据经验公式和试验确定。

当  $h \leq h_m$  时,  $P = k\gamma h$

当  $h > h_m$  时,  $P = P_{max}$

$$P_{max} = (0.8 + \frac{80v}{T+20})k_1 \quad (v \leq 2m/h)$$

$$h_m = P_{max}/\gamma k$$

- 式中  $P$  —— 混凝土侧压应力(Pa);  
 $P_{max}$  —— 混凝土最大侧压应力(Pa);  
 $\gamma$  —— 混凝土容重( $N/m^3$ );  
 $h$  —— 计算高度(m);  
 $h_{max}$  —— 有效压头(m);  
 $k$  —— 混凝土侧压力系数,与温度和坍落度有关;  
 $v$  —— 混凝土浇筑上升速度(m/h);  
 $T$  —— 混凝土入仓温度( $^{\circ}C$ );  
 $k_1$  —— 与混凝土控制坍落度、浇筑方法等有关的系数。

(2) 振动物荷载: 振动荷载的作用形式主要通过振动使混凝土塑性更为发达、密实,从而增大混凝土侧压应力,此部分用上式中系数  $k_1$  计入混凝土侧压压力中。

(3) 新浇筑混凝土浮托力: 混凝土浮托力是由钢模内新浇混凝土的压差形成,由上式所求得的混凝土最大侧压应力确定:

$$F_{浮托力} = P_{max} \times D \times L$$

- 式中  $F$  —— 浮托力(N);  
 $P_{max}$  —— 浇筑过程中混凝土最大侧压应力(Pa);  
 $D$  —— 钢模内径(m);  
 $L$  —— 钢模段长度(m)。

(4) 设备自重及施工活荷载: 由于模板本身重量、设备重量及施工时的活荷载相对于模板工作状态下混凝土侧压力较小,同时对模板工作状态下的抗浮有利,故该荷载在计算中可忽略不计。

简化后的钢模工作状态及荷载分布图、内力图见图 3。

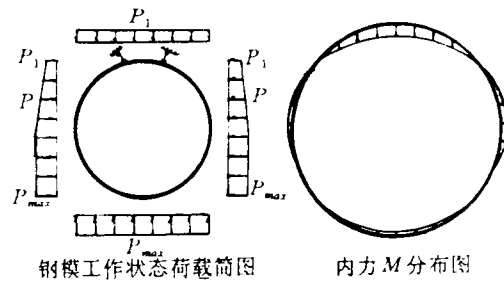


图 3

经计算后: 最大侧压应力  $P_{max} = 0.032MPa$ ; 模板承载最大浮托力  $Y = 68.6kN/m$ ; 模板承载最大侧压力  $X = 73.5kN/m$ 。

2.2.2 内力及应力计算 钢模板用  $P_{max}$  按双向板工作原理计算并结合构造、加工制作,运输及锈蚀等要求确定板厚,经过计算面板采用厚 6mmA<sub>3</sub> 钢板。

水平次梁由面板传递的荷载按简支梁计算。计算后,按照应力和挠度控制并且适当考虑钢模构造要求选用 [ ] 槽钢。

拱梁按照其荷载传递方式及图 3 的荷载分布简图进行计算,在计算时,应按照《钢结构设计规范》(GBJ17-88)中有关规定同时考虑面板共同承载,且为减少拱梁在使用过程中的变形及多次重复使用等因素,故在选用构件时应使构件本身刚度略为增大以增大模板的整体刚度。

经计算拱梁承载最大内力  $M = 16.07 kN \cdot m$ 。

### 2.3 台车

台车的作用是用来承担钢模拆卸、安装、运输等工作,由台车架、液压系统(千斤顶及液压油罐等)、起吊葫芦、行走机构几部分组成。

台车架作为台车骨架,由于仅承担模板及设备重量,故荷载相对较小,为方便加工,采用型钢组合连接而成,重约 11.76kN,台车架底部设有行走滚轮,在钢模轨道上行走。台车中央有一两端悬臂的型钢梁,并配有三个滑动葫芦,用于起吊、运输,安装底模,葫芦

起吊重量 9.8kN。台车架两端各设一组液压千斤顶,每组 4 个(其中 2 个用于侧模,2 个用于顶模),为方便操作,所有千斤顶均采用上、下极限工作,千斤顶用于拆卸、安装顶模及侧模,为减少体力劳动,方便施工,台车行走通过行起驱动机构进行。

#### 2.4 钢模外部支撑

外部支撑作为模板安装时的支撑构件和混凝土浇筑状态下钢模的支撑及抗混凝土浮托力的撑杆。为适应隧洞开挖中的超挖,方便施工外部支撑采用分段组合方式,可组合成若干个长度,同时还可用微量调节。

每节模板设有 2 组外部支撑构件,每组 4 根(其中上、下各 2 根),底模支撑部分主要用于安装钢模和支撑钢模在混凝土浇筑前的模板(包括台车)自重,顶部支撑则用于承担新浇筑混凝土产生的浮托力,其中以顶部支撑受力最大,据计算每根撑杆承载约为 49 kN。

### 3 钢模台车工作程序

钢模台车完成一个混凝土浇筑循环的工作程序如下:

1. 混凝土浇筑完成一定时间后(混凝土达到一定强度),退出外部支撑,拆除第一节钢模的 U 型卡及连接螺栓;

2. 台车行驶到准备拆卸的模板上,台车及千斤顶就位,首先利用侧模千斤顶收缩侧模就位,再利用顶模千斤顶收缩顶模,使侧模、顶模收缩于台车上;

3. 然后台车移动到第二节钢模上,利用底模脱模装置脱第一节底模。底模脱离混凝土后,利用葫芦收缩,起吊底模,清扫模板,刷脱模剂,滑行到台车中部;

4. 利用台车驱动装置移动台车穿过第二、三节模板,停靠就位在第四节底模上;

5. 利用台车悬臂安装底模,同时利用调节底部外部支撑杆准确就位,安装好底模连

接螺栓、U 型卡,对齐底模轨道,并用连接板及螺栓固定;

6. 底模安装完成后,台车移动到安装好的底模上就位,清扫顶侧模板,刷脱模剂后,伸展顶模、侧模千斤顶,使顶模、侧模就位,安装连接螺栓,U 型卡,然后安装顶部、外部撑杆,使千斤顶与模板脱离;

7. 最后通过外部撑杆作微量调节调整钢模板组,使钢模安装准确,并使外部撑杆与开挖面岩石顶紧;

8. 上述工作完成后,再拆除第二节钢模连接螺栓、U 型卡,台车退回到第二节钢模上,如此循环 4 次,整套模板便安装就位;

9. 进行浇筑段堵头封堵,由于此隧洞钢筋较多,同时还设有施工止水缝且隧洞爆破开挖面较不规则,故堵头板不作标准定型设计,视现场洞室开挖情况采用木板封堵;

10. 封堵完成后,即可浇筑混凝土,至此完成一个全过程的工作循环。

### 4 全断面钢模台车的特点

1. 全断面钢模台车能实现隧洞的全断面一次衬砌,因而避免了普通台车混凝土衬砌过程中经常出现的纵、横向接头缝及错台现象的发生,因而隧洞衬砌的施工质量得到了保证,并且施工进度有较大的提高,设计混凝土月衬砌进尺大于 80m,同时由于设备自动化作业的程度较高,作业空间相对同类设备较大,极大的改善了洞室衬砌作业条件,减少了作业过程中各工序的施工干扰,降低了劳动强度;

2. 全断面钢模台车重量轻、体积小,占用空间少。台车中部作为工作通道工作人员可以自如穿行,较适合于直径在 5m 以下的小洞室混凝土衬砌作业,较之全断面针梁钢模在小洞室混凝土衬砌作业时有更大的作业空间。同时钢模台车本身结构简单,安装、操作、维修均为方便,且模板组材料用量少,因而造



价相对较低,设计中对该套模板组考虑了多次重复使用,故降低了洞室混凝土的成本。

3. 全断面钢模台车可通过调节钢模长度来调节混凝土浇筑段长度,从而可以调整工程施工进度,运行较灵活方便;

4. 全断面钢模台车钢模安装准确与否,受底模安装精度影响较大,故对底模安装要求较高,设计要求采用激光束定位,利用外部支撑进行微量调节;

5. 全断面钢模台车较之针梁钢模拆卸、安装工序多,针梁钢模一个浇筑段模板只需一次脱模、收缩、运行、伸展即可到位,而全断面钢模板台车一个浇筑段模板分成若干节,同时还有侧模与底模分离,外部支撑等问题,较之针梁模每个浇筑段循环时间较长。

## 5 结束语

在水利水电工程建设中,对于引水式电站引水隧洞的混凝土衬砌设备及手段已日趋完善,从 50、60 年代使用的钢模台车到 80 年

代中期引进推广使用的针梁钢模,无论是先边顶拱后底板的分段衬砌还是全断面一次衬砌成型,对引水流量较大的大断面( $\varphi \geq 5.0$  m)隧洞,都积累了大量经验,但对于小断面的引水隧洞进行全断面混凝土衬砌的设备及经验,目前国内尚少。近年来随着高水头电站及各地小水电的蓬勃发展,小断面的引水隧洞在设计中将广为采用,因而采用何种施工方法及混凝土衬砌设备,以保证小洞室混凝土全断面衬砌,缩短直线建设工期就显得越来越突出。通过羊卓雍湖水电站引水隧洞采用全断面混凝土衬砌设备及相应的施工方法,不仅是可行的,而且在保证工期,保证施工质量、减少投资及施工运行操作等各方面都是合理的。羊湖电站钢模台车还有待于在今后工程施工中不断改进、完善,得以发挥更大的优势和作用。

注:本文在编写过程中,承胡志洪处长、熊道超主任工程师审阅,特致感谢!

(收稿日期:19930208)

## 只有重视科技进步才能促进安全生产

南桧河发电厂与四川电力科学试验研究院共同研究的“螺旋式水轮机主轴密封”和与武汉洪山电工技术研究所合作、改造的“ZL-088 型励磁装置推广应用”,分别荣获四川省电力工业局“1993 年度科学技术进步一等奖、三等奖”。四川省电力工业局已将“螺旋式水轮机主轴密封”推荐参加电力部 5 月份举办的科技成果展。

南桧河发电厂原 3 台水轮发电机组使用的是滑动架尼龙端面密封和水压活塞式密封,其密封效果差、漏水量大,造成停机次数多(每年每台机组事故停机高达 8 次),检修频繁,严重地影响了安全生产。为了解决这一老大难问题,他们于 1990 年与四川电力科学试验研究院合作,研制了旋转螺旋和静止螺旋组成的非接触式的螺旋泵水轮机主轴密封,于 1991~1992 年分别投入 3 台机组使用,1993 年 11 月通过鉴定。专家认为:螺旋式水轮机主轴密封技术属国内首创。这种主轴密封具有密封性能好、可靠性高、运行周期长(在一台机组大修周期内不需要维护检修)、安装方便(无需设置密封用水系统)等优点;完全避免了主轴密封的检修、调整和故障,减少了因检修及故障处理所造成的电量损失,保证了安全生产。

该厂原 3 台机组的励磁装置均系 70 年代的可控硅静

止式产品,其调节器均为单元件结构,脉冲部分为单极晶体管组成。这类调节器元件参数受温度变化影响而极不稳定,造成脉冲易丢失,易受干扰。因此,励磁故障频繁,有时日次数高达 10 多次,安全生产难以保障。针对这一情况,他们从 1990 年起,先后投资 108 万元,与武汉洪山电工技术研究所合作,将 1<sup>#</sup> 机和 2<sup>#</sup> 机励磁装置更新改造为 ZL-088 型励磁装置,分别于 1991~1992 年安装投运,1992 年通过鉴定。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 机励磁装置更新改造后投运至 1993 年底,已运行 32 167.5h。通过运行期证明,该装置设计技术先进,调节精度高,运行稳定、可靠、调整方便、投运率达 100%,强行退出比零,先后共启、停 41 次,成功率达 100%。1994 年初,又将 3<sup>#</sup> 机励磁装置进行了改造。

这两项研究成果应用于该厂后,彻底解决了过去因主轴密封和励磁装置所带来的事故频繁等问题,大大提高了机组设备健康水平,有显著的经济效益。

该厂在实践中体会到,只有重视科技进步,才能促进安全生产。他们决心坚持不懈地沿着学科学、用科学的道路勇往直前,继续组织工程技术人员攻克一个又一个技术难关努力保证机组安全、经济、满发、超发电,为国民经济的发展、腾飞作出更大贡献。(南桧河发电厂 段友凤)