

太平驿水电站调压室穹顶支护设计

欧先进 陈清波

(成都勘测设计研究院,成都,610072)

提要 太平驿水电站调压室是目前国内规模最大的地下埋藏式调压室之一,大井开挖直径达28.6m,其穹顶附近分布有 f_1 、 F_1 两条断层交汇及多组结构面,对穹顶围岩的稳定极为不利。在穹顶支护设计中,运用壳体薄膜理论进行分析,结合工程类比法及实践经验,采用了锚喷加圈梁的联合支护方式。经开挖后的围岩监测证明,穹顶是稳定的。

关键词 穹顶 壳体薄膜理论 锚喷加圈梁 联合支护

1 工程概况

太平驿系岷江上游的一个引水式水电站。枢纽建筑物由拦河闸、引水系统及地下厂房三部分组成。设计引用流量 $250\text{m}^3/\text{s}$,设计水头108m,装机4台共260MW,保证出力105MW,多年平均发电量 $1.720\text{GkW}\cdot\text{h}$ 。

引水系统有取水口、引水隧洞、埋藏式调压室、压力管道等建筑物。引水隧洞全长10481m,除有一段352m长的无压沉砾隧洞外,其余均为压力隧洞,断面为圆形,内径9.0m,其末端接调压室。

调压室型式为地下差动式,大井开挖直径28.6m、内径25.6m,高68.5m,其内布置2个与闸门井相结合的升管,高56.4m,阻力孔布置于井筒底板上,内径3.3m。调压室穹顶型式为一旋转壳体,跨度28.6m,矢高9.2m。目前调压室施工开挖已经结束,穹顶支护亦实施完毕,本文就处于不利地质条件下大跨度穹顶的联合支护设计作一总结。

2 穹顶的地质情况

调压室位于厂房上游的花岗闪长岩体内,垂直埋深大于150m,水平埋深大于

250m。根据检修洞和7°平硐揭露的地质情况,穹顶位于 f_1 及 F_1 两条断层的下盘(如图1),同时受到6组结构面的切割,使穹顶处于弱风化卸荷带,岩体呈块裂结构,属Ⅲ类围岩。

2.1 断层

f_1 : NW 20° , NE $\angle 20^\circ$,距井边约120m,断层带出露宽约8m。

F_1 : NW $80^\circ \sim \text{EW}$, NE $\angle 30^\circ \sim 38^\circ$,距井边约19m,断层带出露宽约25m。

断层由糜棱岩、构造角砾岩、碎裂岩组成,局部充填辉绿岩和石英脉,挤压紧密,潮湿。

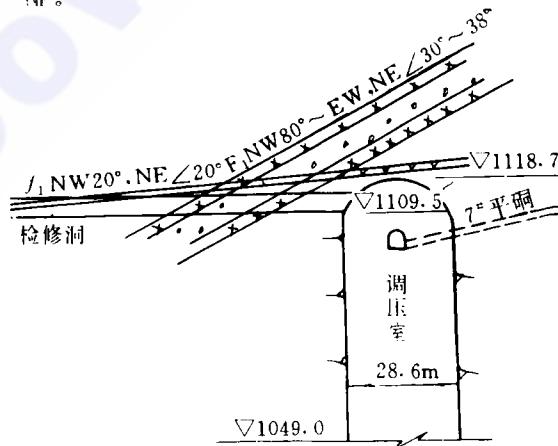


图1 穹顶上方的 f_1 、 F_1 断层

2.2 结构面

a. NW $60^\circ \sim 75^\circ$, NE $\angle 30^\circ \sim 35^\circ$;

- b. 近 SN, W $\angle 50^\circ \sim 70^\circ$;
 - c. NE $30^\circ \sim 40^\circ$, NW $\angle 50^\circ \sim 70^\circ$;
 - d. 近 SN, E $\angle 20^\circ \sim 30^\circ$;
 - e. NE $30^\circ \sim 50^\circ$, SE $\angle 30^\circ \sim 40^\circ$;
 - f. NE $60^\circ \sim 80^\circ$, SE $\angle 50^\circ \sim 70^\circ$ 。
- 裂面平直、粗糙，局部锈染，延伸 3~10m，间距 6~60cm，潮湿。

2.3 岩石力学指标

Ⅰ类围岩： $f=3\sim 5, K_0=2940\sim 4900 \text{ N/cm}^3$

断层带： $f=0.2\sim 2, K_0=196\sim 490 \text{ N/cm}^3$

在检修洞开挖揭露处 f_1, F_1 断层时，对穹顶的开挖、支护曾进行多次研究，并在挂网锚喷支护的基础上提出了一系列加强措施，包括固结灌浆、设置十字形钢筋混凝土拱肋、拱脚设钢筋混凝土圈梁、预应力锚索等。在施工方法上曾建议先挖环形导坑，进行固结灌浆，再十字形开挖，挂网锚喷支护，施工十字形钢筋混凝土拱肋和圈梁，最后开挖 4 个岩柱。但随着施工进展，进一步掌握了地质资料，同时考虑到调压室工期要求的紧迫性，最后确定拱脚设置圈梁，加强围岩监测，并根据监测结果再确定是否实施其它加固支护措施。

3 穹顶的支护设计

3.1 支护型式选择

调压室穹顶为一旋转壳体，其中部为一球壳，如图 2 示。根据壳体薄膜理论，若球壳承受均匀的垂直荷载，其内力为：

$$N_\theta = R \cdot q \left(\frac{1}{1 + \cos \varphi} - \cos \varphi \right) \quad (1)$$

$$N_\varphi = -R \cdot q / (1 + \cos \varphi) \quad (2)$$

式中 N_θ 为水平面上的法向内力，拉为正；

N_φ 为子午面上的法向内力，拉为正；

R 为球体半径；

q 为垂直荷载，这里为山岩压力与壳

体自重之和；

φ 为子午面上的圆心角。

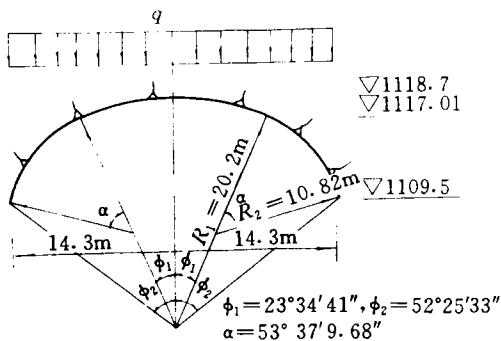


图 2 穹顶型式

由(1)、(2)式可知，只有当 $\varphi > 51^\circ 50'$ 时，球壳才出现受拉状态，否则均处于受压状态。若山岩压力按普氏理论计算，取 $f = 3, \gamma = 25.48 \text{ kN/m}^3$ 。在忽略衬砌自重的情况下，则 $q = 121.5 \text{ kN/m}^2$ ，当 $R = 20 \text{ m}$ 时，衬砌厚度取为 0.2m，球壳内力及应力计算结果列于附表。

附表 球壳内力及应力分布

φ	0°	10°	20°	30°	40°	$51^\circ 50'$	$52^\circ 25' 33''$
$N_\theta (\text{kN/m})$	-1215.2	-1225.0	-1254.4	-1303.4	-1372.0	-1502.3	-1510.2
$N_\varphi (\text{kN/m})$	-1215.2	-1166.2	-1029.0	-803.6	-490	0.0	+28.4
$\sigma_\theta (\text{MPa})$	-6.2	-6.25	-6.40	-6.65	-7.00	-7.67	-7.70
$\sigma_\varphi (\text{MPa})$	-6.2	-5.95	-5.25	-4.10	-2.50	-0.0	+0.145

由附表可知，采用衬厚 0.2m 时，最大压应力为 7.7MPa，最大拉应力为 0.145MPa（发生在拱脚附近），普通混凝土衬砌就能满足强度要求。但这是现浇混凝土衬砌不易实现的，若增加衬厚，就要增大荷载（衬砌自重），且其施工复杂，影响工期。

另一方面，穹顶虽然位于断层 f_1 及 F_1 的下盘，且存在 6 组贯通性结构面，但围岩仍属于块裂结构。通过空间赤平投影稳定性初步分析，穹顶不存在较为不利的“坠落”块体，采用锚喷支护是可行的。锚喷支护能及时、有效地阻止围岩进一步变形，减小山岩压力，减轻自重，而且施工简单，可加快施工速度。

综上分析，穹顶采用锚喷支护。

3.2 锚喷支护参数选择

锚喷支护比现浇混凝土衬砌具有许多优越性,但目前锚喷支护的设计计算方法尚不成熟,而且也较难准确地获得围岩的力学指标,因此锚喷支护参数主要还是依靠工程实践经验进行选择。

对于锚杆,若其支护长按蹋落拱高度考虑,当 $f = 3 \sim 5$ 时,按普氏理论计算蹋落拱高度,并计入 $30d$ 的锚固长度,则锚杆长度 $L = (2.86 \sim 4.77) + 30d$ 。 $d = 25\text{mm}$ 时, $L = 3.6 \sim 5.5\text{m}$ 。

按国内外部分水电站厂房锚喷支护的统计资料估算,锚杆长度与洞室跨度 B 以及洞室高度 H 的关系: $L/B = 0.2 \sim 0.26$, $L/H = 0.12 \sim 0.13$, 则穹顶锚杆长度分别为: 5.7 ~ 7.4m, 8.4 ~ 9.0m。

按挪威爆破技术协会公式估算,锚杆长度 $L = 1.4 + 0.184B$, 式中 B 为洞室跨度, 则穹顶锚杆长度为 6.7m。

按澳大利亚雪山工程提出的锚杆长度 L 经验公式估算, $L = 1.8 + 0.013B^2$, 则穹顶锚杆长度为 12.4m。

按照“Q”系统围岩分类,参照N·巴登等建议采用的支护型式和参数,则穹顶锚喷支护参数:系统锚杆间距1~2m,长度为3、5.2m三种,喷厚10~20cm,挂网。

根据上述工程实践经验,结合壳体薄膜理论分析,穹顶锚喷支护参数为:

- a. 锚杆: $d = 25\text{mm}$, $L = 3, 5, 6\text{m}$, 沿壳面径向梅花形布置, 间、排距 1.5m ;
 - b. 喷混凝土厚 20cm ;
 - c. 钢筋网 $\varphi 12 @ 20$ 。

3.3 圈梁设计

由于穹顶是一旋转壳体,而不是一个完整的球壳体,且与检修洞交汇,同时受到结构面的切割,其上荷载分布也不是均匀的,因此,穹顶结构必然存在着弯矩。设置圈梁,其主要作用:一是使上部荷载能够均匀地传至壳体;二是加强壳的边缘,承担壳的水平推力;三是对井筒起锁口作用,利于井筒施工安全,同时可利用它形成施工环向平台,安装施工辅助设施,便利施工。

圈梁断面的大小要合理,过大则壳中的径向弯矩相对增大;过小则在壳的边缘处将产生很大的环向拉应力,且圈梁承担的水平推力减小,不能充分发挥圈梁的作用。一般情况,其宽度不小于1.5倍壳面厚度。圈梁的断面型式以设计成正方形最为合适,这时壳面上的径向弯矩最小。但结合施工实际情况,采用的是五边形,底宽60cm。其上配置13Φ22的钢筋,配筋率为0.97%。同时为加强圈梁,使之与基岩及后期井筒衬砌混凝土紧密结合,布置了两排加强锚杆(Φ25@80)。

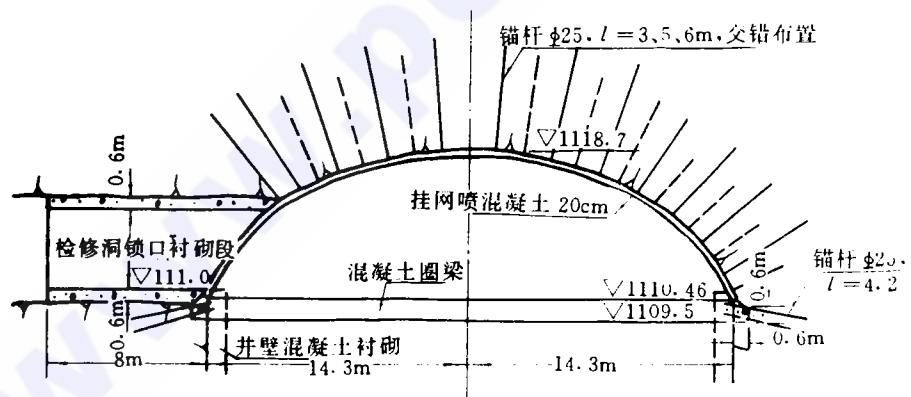


图 3 穹顶联合支护

$L = 4.2\text{m}$ 。

3.4 其它

由于穹顶位于 f_1 与 F_1 断层的下盘,其中 F_1 断层距井边只有 19m,且穹顶结构面相互切割,对检修洞与穹顶交叉口处围岩稳定极为不利,为确保施工安全和穹顶稳定,对交叉口处的洞段进行了混凝土衬砌。检修洞为方圆型断面,宽高均为 5m,交叉口处衬砌 8m 长,衬厚 60cm,配置双层钢筋,配筋率为 0.82%。

穹顶的联合支护设计见图 3。

4 围岩监测情况

为了监测 f_1 和 F_1 断层在开挖后的变位,检验支护设计的合理性,指导施工以及确定是否进一步采取加强支护措施,并提供定量的信息,在穹顶布置了两支 30m 深的多点位移计,穿过断层,设置了一些收敛标点,进行围岩变位收敛监测。但由于工期较紧,多点位移计未能实施,只进行了收敛监测。

根据 1993 年 3~8 月圈梁断面 4 点收敛标点的持续观测,收敛位移曲线已趋于收敛,最大收敛值为 5.42mm,围岩变位在大井开挖结束后已趋于基本稳定。

(上接第 33 页)

Abstract Based on research achievement from preliminary study on transmitting electricity from West China to East China by Xiluodu and Xiangjiaba Waterpower Stations and feasibility study on Xiluodu and Xiangjiaba Waterpower Stations, the disadvantages and advantages and the existed problems are compared in two schemes, e.g. construct Xiluodu first or construct Xiangjiaba first. Finally, the proposition of constrcting Xiluodu first was provided for the reference to leaders and higher authorities when decisions are made.

Key Words developing sequences, current price of capital cost, economy benifit, flood control, reservoir sediment, navigation.

5 结语

1、应用壳体薄膜理论分析,调压室穹顶设计成近似球壳的旋转壳体是合理的,壳体基本上处于内力不大的受压状态。

2、穹顶采用锚喷支护是可行的,目前调压室已开挖完毕,围岩基本上稳定,且比现浇混凝土衬砌施工简单,工期短。

3、在拱脚设置圈梁,不仅使穹顶的锚喷结构构成一完整壳体,有利于穹顶围岩的稳定,而且对井筒的开挖和混凝土浇筑都起着巨大作用。

4、穹顶虽然采用锚喷加圈梁的联合支护后围岩基本稳定,但鉴于大井开挖跨度大,工程还未竣工,地质条件亦比较复杂,必须加强观测,并根据观测资料,确定是否进一步加固。

参 考 文 献

- 1 范钦珊著.《轴对称应力分析》.高等教育出版社,1985 年
- 2 潘家铮主编.《水工隧洞和调压室》.水利电力出版社,1990 年
- 3 王建宇编著.《喷锚支护原理和设计》.中国铁道出版社,1980 年
- 4 胡育林等著.《硬质岩中浅埋地下洞室围岩稳定和支护设计和探讨》.地下工程技术,1992(3)

(收稿日期:1993.11.05)