

溪洛渡水电站特大型地下厂房洞室群开挖质量控制

伍文锋

(长江空间信息技术工程有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 溪洛渡水电站地下厂房洞室群规模居国内之首,洞室密集、边墙高、跨度大,玄武岩组内层间与层内错动带使岩体非连续性问题突出。为保证洞室群开挖施工达到高质量、高效益和良好的稳定性,施工过程中,采用大量的先进质量控制措施和检测手段,严格控制开挖对岩体的损伤范围,保证了洞室轮廓的良好成型;建立设计、科研、施工一体化的实时监测动态分析反馈系统,根据监测和反演分析成果对支护参数进行动态调整。开挖结束后,围岩最大变形与设计值吻合,洞室整体稳定性较好。总结溪洛渡水电站特大型地下厂房洞室群开挖方法和质量控制措施,对类似工程具有指导和借鉴作用。

关键词: 溪洛渡水电站;地下厂房;开挖;质量;控制措施

中图分类号: TU271.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0138—05

Quality Control for Excavation of Super Large Underground Powerhouse Caverns at Xiluodu Hydropower Station

WU Wen-feng

(Yangtze River Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: The scale of the underground powerhouse caverns in Xiluodu Hydropower Station is the first in China, which are intensive, and have high side wall, large span and more intersections. The discontinuous problem is serious because of the inner beddings of the basalt. In order to achieve the high quality, high efficiency and good stability during the caverns excavation, a large number of advanced quality control measures and detection methods are used to strictly control the damage range of rocks in excavation, and ensure the good contour of caverns; Simultaneously, the real time monitoring dynamic analysis feedback system of design, research and construction is established. According to the results of monitoring and inversion analysis, the supporting parameters during excavation are optimized dynamically. The results show that the greatest deformation of surrounding rocks after excavation is identical with the design value, and the cavern stability is well. Therefore, the summary for the excavation methods and quality control measures of the caverns in Xiluodu Hydropower Station could provide some references for similar projects.

Keywords: Xiluodu Hydropower Station; underground powerhouse; excavation; quality; control measures

1 工程概况

溪洛渡水电站位于四川省雷波县与云南省永善县接壤的金沙江溪洛渡峡谷中。枢纽由拦河大坝、泄洪建筑物、引水发电建筑物等组成。引水发电建筑物由电站进水口、引水隧洞,压力管道、主厂房、主变室、尾水调压室、尾水洞及其它附属建筑物组成。引水系统采用“单机单管”布置,地下厂区主厂房、主

变室、尾水调压室三大洞室平行排列,尾水系统采用“三机一室一洞”的布置格局。三维布置图见图1。

2 地质条件

地下厂区位于坝肩上游山体内,水平埋深 300 m~450 m,垂直埋深 340 m~480 m。围岩主要由 $P_2\beta_4$ 、 $P_2\beta_5$ 、 $P_2\beta_6$ 层的斑状玄武岩、含斑玄武岩、致密状玄武岩及各层上部的角砾集块熔岩组成,岩石坚

硬,新鲜完整。地下厂区地层产状平缓,无断层分布,主要结构面为层间、层内错动带和节理裂隙。岩层产状总体走向为 N20°~30°E,厂房下游端较缓,倾角一般 5°~10°;上游端倾角变陡,一般 10°~20°,局部可达 25°。区内地应力为 16 MPa~20 MPa,方向为 NW60°~70°,左厂房轴线与最大主应力 σ_1 方向呈 0°~10°相交,右厂呈 36°~46°的锐角相交。

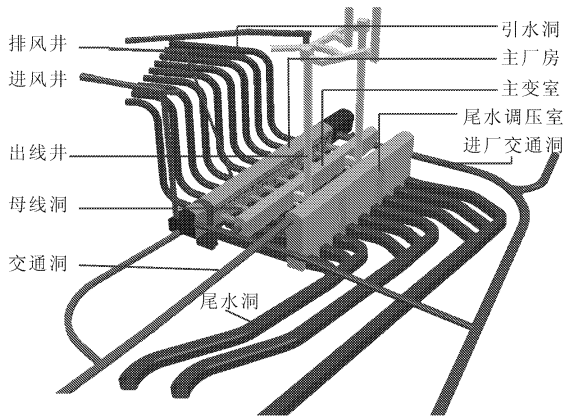


图 1 溪洛渡水电站地下洞室群三维布置图

溪洛渡水电站地下厂房洞室群规模居国内已建和在建工程之首,厂区洞室群洞室密集、边墙高、跨度大、交叉口多;厂区局部地质条件较差,玄武岩组内层间与层内错动带所造成的岩体非连续性和各向异性^[1]问题突出;洞室群开挖施工强度大,工期紧,开挖质量要求高。在这些不利组合和高要求下,如何针对工程的特点采取相应的措施,保证洞室的施工质量和围岩稳定,是施工的重点和难点。

3 洞室设计与施工

3.1 洞室群设计

引水发电建筑物主要洞室的工程特性见表 1。

表 1 地下洞室主要工程特性表

序号	名称	典型开挖尺寸/m	结构特点	数量
1	主厂房	439.74×75.6×28.4	城门洞型	2
2	母线洞	53.63×9.1×7.63	城门洞型	18
3	主变室	349.29×33.32×19.8	城门洞型	2
4	尾水调压室	317×95×25	上部城门洞型 下部矩形井	2
5	尾水扩散段	53.50×10; 53.5×15×19.03	圆形渐变为 城门洞型	18
6	尾水支洞	14×18.5	城门洞型	18
7	尾水洞	15×20	城门洞型	6
8	引水隧洞	Φ11.8	圆形	18
9	电缆竖井	Φ10~Φ11	圆形	4

3.2 施工组织

根据引水系统、厂房系统、尾水系统相对独立的情况,通过前期研究成果^[2-3],合理规划施工通道,形成既相对独立又相互联系的三大施工体系。①主厂房分十层开挖,主变室分四层开挖,尾调室分十五层开挖^[4]。分层分块做到“平面多工序,立面多层次”;②压力管道洞(竖井)、母线洞、尾水支洞及尾水管洞的施工按相邻两洞错开施工的原则进行,先开挖洞室支护完成后再开挖相邻洞室。③上一层开挖支护完成适当的距离后,开始下一层开挖支护施工^[5]。④围岩地质情况恶劣的洞段,采取“短进尺、弱爆破、强支护”的方案,必要时超前支护。

溪洛渡水电站左、右岸地下厂房洞室群开挖量均高达 1 700 万 m³,洞挖高峰强度单边达 15.1×10⁴ m³/月。

4 开挖质量控制

4.1 开挖质量控制标准

溪洛渡地下洞室根据现场地质条件及“精品工程”要求,对开挖质量形成标准。开挖轮廓控制标准见表 2。

表 2 地下厂房开挖轮廓控制标准统计表

项类	检查项目	质量标准	
主控项目	开挖岩面和壁面	无松动岩块、陡坎、尖角	
	不良地质处理	符合设计要求	
	洞井轴线	符合设计要求	
一般项目	平洞(径向、侧墙)/cm	-10 +20	
	竖井(径向、侧墙)/cm	-10 +25	
	底标高/cm	-10 +20	
	开挖面平整度(2m 直尺)/cm	15	
	平洞(径向、侧墙)/cm	0 +20	
	竖井(径向、侧墙)/cm	0 +25	
有结构要求有配筋	底标高/cm	0 +20	
	开挖面平整度(2m 直尺)/cm	15	
	半孔率/%	节理裂隙不发育的岩体	>80
		节理裂隙发育的岩体	>50
		节理裂隙极发育的岩体	>20

4.2 开挖质量控制措施

(1) 合理的施工程序和方法,确保洞室稳定

为确保施工过程中洞室的稳定,溪洛渡地下工程大型洞室采用分层开挖,及时支护,初喷混凝土和锚杆支护紧跟开挖工作面,预应力锚索、挂网和复喷混凝土滞后开挖面 60 m 左右,与开挖平行作业,下

层开挖在上层支护完成后方可进行。地下洞室开挖采用光面爆破、预裂爆破技术,严格控制预裂孔造孔精度和装药量的准确性,特别是预裂孔的药量和药卷的分布位置要准确^[6],减少爆破振动对围岩的影响,确保开挖轮廓准确,减小围岩应力集中。相邻洞室的开挖按照相互位置安排好间隔开挖,在洞与洞、洞与井等交叉部位提前做好超前支护,在交叉口二倍洞径的洞段范围内采用浅孔多循环短进尺的方式开挖,开挖后及时支护或视情况进行混凝土衬砌锁口。

(2) 爆破试验和声波监测

为确保地下洞室开挖爆破不过大损伤围岩,溪洛渡在多次爆破振动试验,基本摸清岩体爆破特性基础上,逐步进行了预裂爆破、光面爆破、梯段爆破、岩锚梁台保护层爆破与岩台光面爆破等一系列试验,安全质点振动速度控制在 10 cm/s 以内^[7]。根据已确定的分层分块方式和爆破试验数据,针对不同的部位设计个性化爆破方法和爆破参数。

爆破开挖过程中,进行大量的声波检测,得到围岩的松动圈范围,根据监测结果,对洞室下方开挖爆破参数进一步优化。最小程度损坏围岩。

(3) 爆破钻孔措施

造孔前先根据拱顶中心线和两侧腰线调整钻杆方向和角度,经检查确认无误后方可开孔。钻孔过程中要保证各炮孔相互平行,掏槽孔和周边孔严格按照掌子面上所标孔位开孔施钻,崩落孔孔位偏差不大于 5 cm,崩落孔和周边孔要求孔底落在同一平面上。开孔后进行中间过程的深度和角度校对,以便及时纠正偏差,确保钻孔在同一个平面上。

(4) 光面爆破和预裂爆破控制措施

开挖过程中开展爆破监测,确保爆破对边墙的震动控制在预计范围。残留炮孔在开挖轮廓面上均匀分布。完整岩石炮孔痕迹保存率在 80% 以上,较完整和完整性差的岩石炮孔痕迹保存率不少于 50%,较破碎和破碎岩石炮孔痕迹保存率不少于 20%。相邻两茬炮之间的台阶或预裂爆破孔的最大外斜值不大于 10 cm。相邻两孔间的岩面平整,孔壁没有明显的爆震裂隙。预裂爆破后,形成贯穿连续性的裂缝。预裂孔与光面孔采用 QZJ-100B 支架式钻机,利用样架导向控制孔向。

(5) 洞室顶拱层开挖及高边墙施工安全措施

① 拱顶先导洞支护,后扩挖跟进,周边光面爆破,光爆孔位偏差小于 5 cm。每次爆破后仔细排除松动岩块,及时做好喷锚支护。

② 顶拱下部的高边墙开挖采用光面爆破技术,孔位偏差小于 5 cm。

③ 所有地下洞室爆破采用非电雷管起爆。

(6) 岩锚梁开挖控制措施

在考虑开挖、锚杆、锚索和混凝土施工等因素,确定岩锚梁层范围。岩锚梁开挖支护精度要求高,岩锚梁开挖成型质量和爆破后岩体完整性直接影响到桥机的运行安全;施工过程中采用先进的技术、设备和工艺方法。

① 岩锚梁保护层采用手风钻进行垂直和仰孔“双向光面爆破”,一次“成型”^[8-9],严格控制岩壁及岩台面无欠挖,超挖值不超过设计规定。

② 保护层与中部槽挖采取预裂爆破分开,中部先行槽挖,用液压钻垂直钻孔梯段爆破,超前两侧保护层开挖 30 m 以上,保护层厚度 4.5 m。

③ 岩壁吊车梁保护层按爆破振动试验确定的爆破参数严格控制外侧直墙垂直钻爆的单响药量,钻孔时保证直墙面光爆孔垂直,孔与孔之间平行,孔底偏差小于 10 cm,岩台三角体上直墙面及斜面光爆钻孔间距 20 cm ~ 25 cm,严格控制钻孔深度及角度。

④ 岩锚梁施工中,精确测放轮廓线,采用地质罗盘控制钻孔方位角,水平钻孔用水平尺控制水平度、斜面倾斜孔仰(倾)角及深度用几何法和测斜仪控制,开孔前用全站仪测定每一孔位应钻深度。

(7) 洞与洞、洞与井交叉部位控制措施

① 压力管道下平洞、母线洞、进厂交通洞及尾水管等与主厂房高边墙交叉的洞口,在厂房开挖至上述交叉部位的上一层前,先挖进厂房 2 m,做好锁口和系统支护。

② 在开挖后的高边墙上开挖洞口时,采取超前锚杆支护,小导洞浅孔多循环爆破,浅孔密孔多段扩挖跟进,并及时跟进支护。

③ 在交叉口二倍洞径的洞段范围内,采用浅孔多循环短进尺的方式开挖。

④ 相邻两洞室间的岩墙或岩柱,及时做好支护。

(8) 基坑及岩埂开挖控制措施

① 开挖时先在周边进行预裂爆破,上、下层预裂爆破结合一起先行施工,形成预裂缝,以减小中部梯段爆破冲击波对岩壁振动破坏。

② 严格控制单响药量,确保爆破振动速度在允许范围内。

③ 每层开挖完成后及时喷 5 cm 混凝土进行覆盖,避免岩壁暴露过久,并及时对不稳定围岩体进行

临时支护。

④ 每层开挖完后及时进行锚杆、锚索及二次喷混凝土等支护施工,完成后才能进行下一层出渣。

(9) 爆破振动和超欠挖控制措施

① 设计轮廓线均采取预裂或光面爆破,对采取梯段开挖的直立边墙采取预裂爆破,对采取水平开挖的轮廓线采取光面爆破,对地质弱面和重要部位采取预留保护层,再实施弱爆破开挖。

② 采用红外激光定位技术精确放样,准确标出周边光爆孔的孔位及方向。

③ 所有的周边孔均在设计轮廓线上开孔,钻孔略向外倾斜 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$,各钻孔之间保持平行,孔底落在同一高程上。

④ 对弯段适当缩短钻孔深度,对弧线段和地质弱面,采用密孔、浅孔、短循环掘进,减小终孔偏差,将光爆岩面误差控制在允许范围内。

(10) 实时监测与反馈

在地下厂房开挖过程中,建立科研、设计、施工等单位一体化的大型洞室群动态反馈分析机制^[10]。每完成一层的开挖支护,均开展安全监测数据分析和监测数据反演分析,对比洞室群围岩应力、洞周变位、塑性区分布、锚杆锚索应力、耗散能等各项指标与科研成果、设计预计是否一致,评价开挖支护效果,确定优化支护或加强支护方案。

① 根据洞室上部开挖期间围岩变形量级较小及台阶式变化规律;反演计算成果预测洞室下部开挖过程,围岩变形及塑性区体积稳步、有限地增大,且随开挖高程下降趋于稳定,围岩卸荷较小。在确保洞室整体稳定的情况下,对洞室中下部支护参数进一步优化。

② 根据监测成果及反演计算成果,调整开挖分层高度,对监测和预测变形较大的部位及时支护,对应力相对集中部位进行超前及锁口支护。

③ 对洞室不同部位采用个性化爆破设计,减少爆破对洞周围岩的扰动。

④ 对层间、层内错动带及节理裂隙发育等地质缺陷部位及时加固。

4.3 开挖质量控制成果

(1) 开挖质量

通过相应的控制措施,溪洛渡地下厂房洞室群取得了较好的开挖质量。左岸地厂开挖单元,全部合格,优良率 92.2%;三大洞室平均不平整度 8.7 cm,平均超挖 11.4 cm(含技术性超挖),半孔率为 82.3%~96.9%。右岸地厂开挖单元,全部合格,优

良率 92.6%;三大洞室平均不平整度 5.9 cm,平均超挖 7.7 cm(含技术性超挖),半孔率为 90.8%~96.8%。岩锚梁开挖实际效果见图 2。



图 2 岩锚梁台及直立墙成型效果

(2) 围岩稳定

多点位移计成果显示,围岩松动圈一般在 6 m 范围,个别达到 12 m;声波检测成果显示,地下厂房围岩松弛深度一般在 1.0 m~3.0 m,局部深度在 3.0 m~5.0 m。开挖结束后,围岩变形渐趋收敛,三大洞室围岩松弛位移一般在 30 mm 以内,最大 60.2 mm(个别点);锚杆应力一般在 100 MPa 以内,最大拉应力为 293 MPa。洞室群围岩应力、洞周变位、塑性区分布、锚杆锚索应力、耗散能等各项指标与可研阶段计算成果基本吻合,支护参数合理,洞室围岩稳定性总体较好。监测成果、反演分析成果及可研阶段预期成果见表 3。

表 3 监测、反馈分析及可研阶段预期成果对比表

阶段	主应力/MPa		最大变位值/mm	最大锚杆应力/MPa	塑性区深度/m	
	最大	最小				
可研	3D 弹塑性损伤有限元	38.0	-1.5	38.0	250.0	4.0~7.0
	FLAC ^{3D} 拉格朗日元	32.0	-0.5	59.9	250.0	10.0
技施	反演分析(2D)	40.0	-2.5	42.3	49.0	11.8
	反演分析(3D)	30.0	0	15.0	44.5	12.8
监测	—	—	—	60.2	293.0	12.0

(3) 经济效益

通过大量的施工控制措施,在保证洞室稳定的前提下,根据监测和反演分析成果对支护工作进行适当优化,左、右岸锚索量分别由 3 799 根、3 799 根减少为 2 979 根、2 999 根,预应力锚杆量分别由 12 638 根、12 638 根减少为 11 753 根、11 962 根,取得可观的经济效益。

5 结 论

溪洛渡水电站地下厂房洞室群规模居国内已建

和在建工程之首,地下厂房洞室群洞室密集、边墙高、跨度大、交叉口多、开挖工程量大、施工强度高等特点。

(1) 施工前,进行大量的研究和计算,确定地下厂房洞室群合理的开挖方式和开挖顺序,是确保地下洞室群的施工工期、围岩稳定、施工质量的前提条件。

(2) 施工过程中,精心组织、合理布置,并采用大量的先进质量控制措施,取得较好的开挖质量,开挖单元优良率超过 92%。

(3) 针对洞室不同部位,进行个性化爆破设计;同时进行大量的声波测试,根据测试成果及时调整爆破参数,最小程度损坏围岩。

(4) 建立设计、科研、施工一体化的实时监测动态分析反馈系统,在保证洞室稳定的前提下,根据监测和反演分析成果对支护工作进行适当优化,取得可观的经济效益。

(5) 溪洛渡地下厂房开挖完成后围岩最大变形 60.2 mm,锚杆最大应力 293 MPa,与可研阶段预期值吻合较好,围岩稳定状态良好。

参考文献:

[1] 樊启祥,王义锋.溪洛渡水电站地下厂房岩体工程实践

[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2986-2993.

- [2] 张伟波,黄河,李景茹,等.复杂地下洞室群施工仿真与进度研究[J].系统工程理论与实践,2002,22(3):125-130.
- [3] 申明亮,赵彦贤,宋媛媛.溪洛渡地下洞室群施工通风方案仿真与优化[J].长江科学院院报,2008,25(4):36-39.
- [4] 伍文锋,税思梅.溪洛渡地下厂房三大洞室围岩稳定监控技术[J].人民长江,2011,42(增2):98-100.
- [5] 骆光杰,胡伟珍.三峡电源电站地下厂房开挖爆破质量控制[J].爆破,2006,23(4):35-37.
- [6] 李友华,黄应军,李景元.溪洛渡水电站左岸地下厂房大跨度高边墙开挖施工技术[J].水力发电,2008,34(9):9-11,14.
- [7] 刘美山,周绍武,张正宇,等.溪洛渡水电站右岸拱肩槽建基面开挖精细爆破施工[J].工程爆破,2009,15(4):24-28.
- [8] 漆爱捺.三峡电源电站地下厂房开挖施工技术[J].水利水电快报,2005,26(15):12-14.
- [9] 刘燕波,陈敦科,尹俊宏.三峡工程地下电站岩锚梁岩台开挖技术研究[J].水利水电快报,2006,27(20):16-18,23.
- [10] 樊启祥,刘益勇,王毅.向家坝水电站大型地下厂房洞室群施工和监测[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):666-676.