

文章编号:0559-9342(2005)04-0057-03

龙滩水电站地下厂房开挖技术

李善忠¹, 杨天吉², 曾浩¹

(1.龙滩水电开发有限公司, 广西南宁 530023; 2.中国水利水电第十四工程局, 云南大理 650041)

关键词: 地下厂房; 开挖技术; 龙滩水电站

摘要: 龙滩水电站左岸地下厂房规模大, 与之相贯通的洞室较多, 与其平行布置的主变洞、尾水调压井之间的岩柱较薄, 工程地质条件复杂, 开挖过程中围岩稳定及快速施工问题是难点和重点。为此, 龙滩水电站根据其特点, 采用了“平面多工序”、“立面多层次”、“先洞后墙”, 以及设置预裂缝、预留保护层、浅孔小药量爆破等技术措施, 较好地完成了地下厂房的开挖与支护。

Summary on excavation technology about underground powerhouse of Longtan Hydropower Station

Li Shan-zhong¹, Yang Tian-ji², Zeng Hao¹

(1. Longtan Hydropower Development Co., Ltd., Nanning Guangxi 530023;

2. China Water Resources and Hydropower Engineering Bureau 14, Dali Yunnan 650041)

Key Words: underground powerhouse; excavation technology; Longtan Hydropower Station

Abstract: The underground powerhouse of Longtan Hydropower Station is the largest in the world at present and there are many caverns connected with it. Rock stratum in main transform cavern and surge tank, which are parallel with main powerhouse, are lighter, thus the geologic conditions of project are complicated. The difficult and focal points are how to solve rock stability and construct quickly. This paper expounds the construction methods, orders and surrounding rock monitoring, furthermore, it provides some experience and reference for the similar projects.

中图分类号: TV731.6; TV544.12(267)

文献标识码: B

龙滩水电站位于广西壮族自治区天峨县境内的红水河上。其地下主厂房主要由主、副安装场及主机间组成, 上部开挖跨度为 30.7 m, 岩锚梁以下开挖跨度为 28.9 m, 开挖高度为 76.4 m, 长度为 388.5 m。主厂房开挖工程于 2001 年 11 月 23 日正式开工, 2004 年 7 月 20 日开挖支护工作全部结束, 历时 31 个月。

1 厂房开挖特点及总体施工方案

1.1 厂房开挖施工特点

该地下厂房开挖支护的特点有: ①厂房跨度大, 洞室较长; ②开挖、支护工程量大, 施工强度高(其中石方洞挖达 66 万 m³, 喷混凝土 1.0 万 m³, 使用锚杆 3.06 万根, 锚索 21 840×1 000 kN·m); ③支护类型多, 施工技术含量高; ④与主厂房交叉洞室多, 交叉段洞室高边墙稳定问题突出; ⑤工程地质条件复杂, 龙滩水电站岩体为层状岩体, 岩性不均, 主要由厚层砂岩、粉砂岩、泥板岩互层和少量凝灰岩、硅质泥灰岩组成, 另外, 选定的厂房轴线方向为 NW50, 与岩层走向的夹角为 35°~40°, 交角较小, 对高边墙稳定不利。

1.2 总体施工方案

根据以上特点, 制定总体施工方案为:

(1) 在设计已规划好的永久施工通道的基础上, 适当增加临时施工通道, 扩大母线排风廊道(3号施工支洞)及第三层排水廊道(4号施工支洞)。利用合理的施工通道实现分层平行流水作业, 从厂房两端形成对挖工作面, 支护滞后 15~30 m 跟进, 做到“平面多工序”; 另在整个立面进行交叉施工, 利用主厂房较长的特点, 相邻两层相互搭接工期约为 1~2 个月, 形成“立体多层次”, 以实现地下洞室群的快速施工。

(2) 做好与主厂房交叉洞室岔口处的开挖与支护。开挖采用短进尺、弱爆破, 加强支护的原则, 在开挖主厂房边墙时, 与

收稿日期: 2005-03-01

作者简介: 李善忠(1969—), 男, 广西平乐人, 高级工程师, 主要从事水利水电施工管理工作; 杨天吉(1968—), 男, 云南大理人, 高级工程师, 主要从事水利水电施工和管理; 曾浩(1976—), 男, 广西浦北人, 工程师, 主要从事水利水电施工管理工作。

之相交的小洞室须先完成开挖与支护,做到“先洞后墙”,在母线洞、引水洞与厂房边墙相交段 10 m 范围内采用钢格栅加强支护,确保交叉段洞室稳定。

2 施工程序及主要开挖方法

2.1 主要施工程序

地下厂房分 9 层开挖,主要步骤为:①利用主厂房顶层施工支洞进入厂房 I 层开挖、支护,与此同时开挖母线排风廊道(3号施工支洞)至厂房另一端,形成两头对挖局面;②在 I 层右端开挖支护完成 100 m 后开挖 II 层,并进行岩壁梁施工;③从进厂交通洞和经主变室至厂房的另一端(联系洞)对挖 III 层,同样两端头降坡对挖 IV 层;④在厂房 III 层开挖的同时,从引水下平洞进入厂房下游侧 8 m 处,为加速 IV、V 层开挖创造条件;⑤在厂房 V 层开挖的同时,从尾水管进入开挖厂房 VIII、IX 两层;⑥从引水下平洞进入厂房开挖 V、VI 两层,最后爆通第 VII 层,从尾水支洞出渣,利用垫渣从尾水扩散段进入第 VII、VIII、IX 层,进行喷锚支护工作;⑦每层开挖、锚杆、锚索、挂网、喷混凝土等工序进行平行流水作业。

2.2 厂房顶拱层施工

原施工方案先进行两侧导洞开挖,支护好后,中间岩柱拆除跟进。但在实际开挖中由于支护试验和顶层排水廊道滞后,两侧导洞全部开挖支护结束后才进行中间岩柱拆除,因此首先对岩柱有监测仪器断面部位进行开挖,进行仪器造孔、安装,从而利用已形成的监测断面通道对岩柱进行分块开挖,增加开挖支护工作面,加快顶层施工进度。

开挖过程中,两侧平行导洞交错施工,掌子面相距 30 m 以上,以确保施工和工程安全。中间岩柱开始采用全断面开挖,由于断面较大,围岩又为层状岩体,两侧导洞开挖结束后,围岩应力进行了重分布,光面爆破效果较差。因此后来采用以下方法:①将中间岩柱分为左右半幅进行开挖,相互滞后 2~3 排炮;②减小爆破进尺,爆破进尺控制在 2.5 m 以内;③调整光面爆破参数,孔距控制在 50 cm 以内,线装药密度为 100~120 g/m;④在 III 2、IV 类围岩地段增加了导向孔,孔距 25 cm,隔孔装药;⑤支护及时跟进,II、III 类围岩支护滞后 15 m,IV 类围岩跟进掌子面。通过采取以上方法厂房顶拱开挖成型较好。

2.3 高边墙施工

高边墙施工主要采用了以下方法:

(1)采用两道预裂缝(双保险)确保中间拉槽梯段爆破对高边墙的爆破影响。在中间拉槽前,先对边墙轮廓线进行预裂,深度为 4~4.5 m,孔间距为 50 cm,线装药密度为 180~200 g/m,中间潜孔钻拉槽时对预留保护层同样进行预裂,预裂深度与梯段爆破深度相同。孔距 60~80 cm,线装药密度为 300~350 g/m。

(2)梯段爆破严格控制单响药量,为满足设计高边墙质点振动速度 $V_s \leq 7$ cm/s 的要求,采用单孔单响,孔间微差挤压爆破的施工方法。

(3)预留保护层采用手风钻开挖,每层开挖高度为 4 m,周边预裂,采用小药量弱爆破的开挖方法,最大单响药量小于 10 kg,尽量减小爆破对边墙围岩的影响。

(4)针对龙滩地下厂房比较长的特点,在分层施工中采用

层间接施工,搭接时间一般为 1~2 个月,当保护层较薄一侧剥离并支护好 100 m 后,下一层中间拉槽开始施工。

(5)充分利用新奥法原理适时进行支护,为使围岩及时得到支护抗力,防止围岩卸荷位移,在工程施工中针对层状岩体特点,II 类围岩支护滞后 30~50 m,III 类围岩支护滞后 15~30 m,IV 类围岩开挖支护紧跟掌子面,并在顶拱采用超前锚杆、小导管进行加强支护,在边墙下卧过程中减少层高,将分层高度减少至 3~4 m。

(6)岩锚梁采用预留保护层手风钻开挖,用垂直孔+斜孔双向同时光爆的方法进行开挖。采用该方法在层状岩体中取得了良好的开挖效果,岩锚梁成型较好。

(7)采用先进的施工设备加快施工进度。针对龙滩地下厂房开挖强度高最高达 6.5 万 $\text{m}^3/\text{月}$ 、支护工程量大,且均为长锚杆、喷射钢纤维混凝土和微纤维混凝土,以及技术指标要求高的特点,在施工中采用了 2 台 353E 阿特拉斯三臂凿岩台车(1 台全电脑凿岩台车和 1 台迈斯特喷车)。先进的设备保证了工程进度、支护的及时性和工程质量,确保了工程安全。

(8)厂房边墙与相邻洞室交叉段施工。高边墙在不同高程与其他洞室相贯通,高边墙稳定问题尤为突出。在附属洞室与大洞室相通时,采用先洞后墙的施工工艺,在洞口锁口和系统支护后再开挖高边墙,并在洞与洞、洞与井等交叉部位提前做好超前支护和加强支护工作。

3 爆破振动控制

爆破振动控制是厂房开挖的重点之一,爆破振动直接影响高边墙的稳定和岩臂吊车梁结构的安全。按本工程开挖技术条款的要求,厂房爆破质点速度控制标准为:高边墙 $V_s \leq 7$ cm/s;锚杆和喷射混凝土 $V_s \leq 5$ cm/s;混凝土 3 d 强度时 $V_s \leq (1\sim 2)$ cm/s;混凝土 3~7 d 强度时 $V_s \leq (2\sim 5)$ cm/s;混凝土 28 d 强度时 $V_s \leq (5\sim 7)$ cm/s。由此可见,质点振动速度要求高,因此在厂房开挖时须通过爆破振动试验确定最初的爆破控制参数,并在施工过程中进行质点振动速度监测,通过监测数据对最初的爆破振动参数进行修正和数据分析,从而选择合理的施工方法和爆破参数,做到尽量减少对围岩的影响。

3.1 初期的爆破振动试验

为了了解龙滩地下厂房开挖爆破对高边墙的影响,在地下厂房 I、II 层开挖和主变洞、尾水调压井 I、II 层开挖中,进行了爆破振动试验,以确定厂房 II 层以下的爆破参数,从而对原投标爆破开挖方法进行优化。

根据初期试验成果分析,初步确定的爆破参数为:单响药量 25~48 kg,满足质点振动速度的距离为 20~30 m,如爆破距离在 10 m 以内,则单响药量控制在 5 kg 之内;为保证爆破质点振动速度不叠加,每段爆破延时不小于 50 ms。

3.2 施工期间爆破振动监测

龙滩地下厂房规模大,地质情况对高边墙稳定不利,为了有效控制爆破质点振动速度,对每排炮均进行监测,业主、监理、施工单位对监测数据共享,及时优化调整爆破参数,力争做到 $V_s \leq 7$ cm/s 的设计要求。在实际施工中除个别炮次超标(但小于 10 cm/s)外,其余均满足设计要求。

3.3 开挖过程中的爆破控制措施

(1)采用中间拉槽两侧预留保护层的开挖方法,设置周边和拉槽两道预裂缝(双保险),中间拉槽采用单孔单响孔间微差挤压爆破技术;预留保护层(3.5~4 m),采用手风钻开挖,采用浅孔小药量减少最大单响药量的方法,从而控制质点爆破振动速度。

(2)增大爆破距离。在岩锚梁混凝土浇筑前,对岩锚梁下部的Ⅲ层(10 m),先进行Ⅲ1层(6 m)爆破,爆破后不出渣,待岩锚梁混凝土达到28 d强度后进行Ⅲ1层出渣和剩余Ⅲ2层开挖,通过增加了爆破距离,控制了质点爆破振动速度。

4 施工期围岩稳定初步分析

4.1 工程地质条件对围岩稳定的影响

根据前期地质勘测资料,主厂房地质情况为:埋深120~240 m范围围岩强度较高,砂岩饱和抗压强度130 MPa,泥板岩40~80 MPa, V_p 值为5 000~5 600 m/s;主厂房布置区实测地应力的最大主应力平均值为8.5~12 MPa,方向 $N20^\circ\sim W80^\circ$, $\sigma_h > \sigma_v$,属中等量级原岩应力场;选定厂房轴线与地应力最大主应力方向夹角为 30° 左右,垂直边墙方向的水平应力为5.8~10.5 MPa,侧压力系数为1.5~1.9。主厂房围岩主要软弱结构面为层间错动和 F_1 、 F_{30} 、 F_{13} 等陡倾角断层。断层与层间错动节理(少量缓倾角节理长5~20 m)组合,在洞室周壁和洞室交叉口构成一些随机分布的楔体,主厂房上游边墙受 F_1 等断层切割,存在不稳定块体,楔体高度达18 m左右。主厂房围岩类别按面积百分比统计:Ⅳ类围岩占10%,Ⅲ类围岩占63%,Ⅱ类围岩占27%。总体来说,围岩成洞条件和稳定性较好,但要及时做好洞室区的排水和围岩系统喷锚支护,特别是高边墙、断层等软弱结构面与洞室交汇切割处、岩锚吊车梁、洞室交叉口和洞室间岩柱等处的及时支护。

4.2 主厂房围岩松弛变形对围岩稳定的影响

劈理发育带和缓倾角隐节理密集区围岩松弛变形,加上由于支护滞后和爆破振动引发的掉块现象一般不易发现,从而在顶拱或边墙处呈薄层块体,在爆破振动的诱导下,易产生大面积掉块。对该类型的掉块,只要及时进行系统锚杆支护和喷射钢纤维混凝土,制约围岩变形,即可减小发生的机率较小。从开挖到目前跟踪检测成果可以看出,主厂房层状岩体中,松弛变形深度一般在0.4~1.2 m,塑性区深度为1.2~4.0 m,4.0 m以后为弹性区,原理论计算塑性区最大深度为6.0 m,远大于实际塑性区,说明主厂房爆破参数和支护是合理、及时的。系统锚杆长度均在6.0 m以上,支护强度、深度满足围岩松弛变形要求,洞室是稳定的。

4.3 厂房围岩监测

主厂房设置了7条主要监测断面,编号及位置为:A-A断面(HR0+035.750),B-B断面(HL0+000.250),C-C断面(HL0+051.250),D-D断面(HL0+0150.250),E-E断面(HL0+258.250),F-F断面(HL0+306.250)和G-G断面(HL0+328.700)。监测仪器有围岩多点位移计、锚杆应力计、锚索测力计,其点位按洞室径向分布。初始监测始于2002年5月,滞后主厂房开挖约6个月,目前各监测断面的监测已基本与施工同步。

截至2005年3月30日,主厂房最大位移发生在受 F_1 断层影响而形成不稳定楔体的B-B断面上的孔口至边墙内6 m处,高程为234.3 m,最大位移为83.4 mm;在12 m处位移值较小,仅为4.54 mm。C-C断面最大位移为57.74 mm。发生在234.3 m高程,距离边墙2 m处。D-D-G-G断面位移较小,除E-E断面在234.3 m高程处位移为31.77 mm外,其余为10~20 mm。从监测断面看,顶拱位移均小于10 mm,边墙除B-B、C-C断面在234.3 m高程受 F_1 断层影响的块体外,位移值均小于40 mm。

按岩石流变理论计算,龙滩主厂房最大岩石位移应发生在主厂房中部的D-D断面上,最大位移为40~60 mm。但从目前的岩石位移资料分析,D-D断面边墙最大位移仅为10.83 mm,远远低于理论计算值,但局部不稳定块体却出现了较大的位移值。由此说明,主厂房的边墙除个别不稳定块体外,其余均有岩石位移富余值,边墙是稳定的,对局部不稳定块体需加锚索进行深层加固。因而,设计在受 F_1 断层影响发生较大变形的块体处增设了16根2 000 kN级锚索进行加固。虽然B-B、C-C断面在234.3 m高程处位移较大,但目前变化速率较小,说明随着增设锚索加固和主厂房、引水洞混凝土的浇筑,围岩已趋于稳定。

5 结语

龙滩工程左岸引水发电系统地下厂房采用控制爆破,成型良好,平均径向超挖小于20 cm,目前顶拱、高边墙已趋于稳定,这些说明大规模地下厂房施工水平上了一个新台阶。总结龙滩水电站地下厂房开挖,有以下几点经验与建议:

(1)在中等岩石应力场的大规模地下厂房顶拱采用先开挖两侧导洞后拆除中间岩柱的施工方法是可行的,增加了工作面,减少了开挖与支护之间的相互干扰,加快了施工进度。

(2)位于层状岩体的高边墙的稳定是施工中的难点,必须减少爆破对边墙的振动影响,对爆破设计进行优化,选择合理的爆破参数;爆破后要及时进行支护,并应充分利用岩石弹性抗力。

(3)对如此大规模的地下洞室开挖,围岩变形没有明确的控制标准,而且根据岩体力学原理计算出的理论值与实际监测值相差较远,尤其是对不稳定块体,因此应尽快建立围岩变形数学模型,建立围岩位移稳定标准。

(4)充分利用各种监测设备仪器进行数字化、信息化施工和设计。利用每次爆破监测资料成果复核爆破设计是否合理,对爆破设计进行调整,根据围岩应力应变监测成果及时进行支护或加强支护,以确保围岩稳定。

(5)规范中对质点振动速度要求为7 cm/s,但没有指出爆源点与测点之间的距离,从质点振动速度公式可知,当距离接近零时,质点振动速度为无穷大,在实际爆破中,当距离小于15 m时,很难满足质点振动速度小于7 cm/s的要求,建议爆破振动测试时宜在15 m以外进行。

(6)支护是关键。支护是进度最大的制约因素,要加大支护力量的投入,确保支护紧跟开挖,在上层支护结束后再进行下一层开挖,以免围岩产生较大的突然变形。