

瀑布沟水电站大型地下厂房快速开挖施工技术研究

陈 仁 峰

(四川省能投攀枝花水电开发有限公司,四川 成都 610071)

摘 要:瀑布沟水电站地下厂房开挖工程不仅规模大、地质条件复杂,而且对工期要求非常紧迫。通过技术方案优化,首台机组开挖的净工期不足 24 个月,对比国内同类型、同规模地下厂房工程,该工程首台机组创造了开挖时间最短的全国之最。依托该工程,开展了大型地下厂房安全快速施工技术研究,所取得的成果可为地下工程施工具有共性的施工组织、控制爆破、围岩稳定、施工安全等问题提供重要的参考经验,将有力提升地下工程设计、施工技术水平,具有广阔的应用前景。

关键词:大型地下厂房;快速开挖施工;技术研究;瀑布沟水电站

中图分类号:TV7;TV554;TV52;TV51 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2019)06-0064-05

Study on Fast Excavation Technology of Large-Scale Underground
Powerhouse of Pubugou Hydropower Station

CHEN Renfeng

(Sichuan Energy Panzhihua Hydropower Development Co., LTD,
Chengdu, Sichuan, 610071)

Abstract: The excavation work of the underground powerhouse of Pubugou Hydropower Station is not only large in scale and complex in geological conditions, but also very urgent in construction period. By optimizing the technical scheme, the net excavation period of the first generator is less than 24 months. Compared with the same type and scale of underground powerhouse projects in China, the first generator excavation has created the shortest excavation time in China. Based on this project, the research on safety and fast construction technology of large-scale underground powerhouse has been carried out. The results obtained can provide important reference experience for similar construction organization, controlled blasting, surrounding rock stabilization, construction safety and other issues in underground construction, which will effectively improve the level of underground engineering design and construction technology and have broad application prospects.

Key words: large-scale underground powerhouse; fast excavation; technology study; Pubugou Hydropower Station

1 概 述

瀑布沟水电站位于大渡河中游的四川省汉源县及甘洛县境内,工程等别为Ⅰ等,主要水工建筑物为 1 级,装机容量为 $550\times 6=3\,300(\text{MW})$ 。瀑布沟水电站地下厂房洞室群由主厂房、主变室、尾水闸门室、引水隧洞、母线洞、尾水连接洞和 2 条无压尾水隧洞组成。总开挖方量达 $245.42\times 10^4\text{ m}^3$,主副厂房开挖工程量为 $42.49\times 10^4\text{ m}^3$,主厂房岩锚梁以上的开挖跨度为 30.7 m,岩锚梁以下的开挖跨度为 26.8 m,长 294.1 m,在目前已开挖完工的地下厂房工程中位居第五(表 1)。地下厂房洞室群纵横交错、空间结构复杂、规模巨大,面

临洞室围岩稳定和高地应力岩爆灾害等工程难题。招标阶段首台机组发电工期为 65 个月,厂房开挖工期为 33 个月,混凝土浇筑及机电埋件安装阶段工期为 20 个月,机电安装阶段工期为 12 个月。

2 施工技术研究

根据该工程的实际施工特点及难点,业主多次组织国内有名的水电专家亲临施工现场,共同研究地下洞室快速施工技术,合理优化施工方案,并通过施工全过程系统仿真,为施工方案的优化提供了量化的技术依据,确保了技术方案的可行性。

瀑布沟水电站地下厂房系统由于洞室交叉多,结构复杂、厂房洞室断面大、顶拱及边墙结构

表 1 国内外主要已开挖完大型地下厂房特性表

地下厂房名称	主厂房长 /m	地下厂房宽 /m		地下厂房高 /m	工期 /月
		岩锚梁以上	岩锚梁以下		
龙滩地下厂房	388.5	30.7	28.5	76.4	36
三峡右岸地下厂房	311.3	32.6	31	87.3	35
小湾地下厂房	298.1	30.6	28.3	86.43	28.5
瀑布沟地下厂房	294.1	30.7	26.8	70.175	24
拉西瓦水电站地下厂房	311.75	30	27.8	75	26
二滩地下厂房	285	30.7	25.5	65	33.5
拉格朗德-2 级地下厂房	490	26.3		47.2	
丘吉尔瀑布水电站地下厂房	300	24.5		45.5	34

裂隙面较发育,对厂房大跨度围岩稳定造成不利影响。开挖过程中遇到不稳定楔形体时,特别是高边墙与洞室相贯通部位,为保证洞室群的整体稳定,必须科学、合理地安排开挖、支护施工程序,应用“新奥法”原理,遵循“预支护、短进尺、弱爆破,及时支护、早封闭、勤量测”的施工原则,开挖后适时喷锚支护,避免了因支护不及时而造成的坍塌^[1]。

2.1 平面多工序,立面多层次

在瀑布沟水电站大型地下厂房洞室群施工过程中,充分利用厂房长度长的结构特点和施工通道的布置情况,采用“平面多工序、立面多层次”的施工工艺组织施工,即在平面上将主副厂房以 5#机为界划分为左、右两个区域,右端包括 5#、6#机组、集水井及副厂房,左端为 4#~1#机组及安装间;在施工顺序上右端先下卧,左端跟进,即优先进行首台机组(6#机组)的开挖。

在同一立面上按上层开挖支护结束后开挖下一层;在平面上充分利用厂房的长度空间,实施开挖超前、支护跟进和上层支护与下层开挖错距平行交叉作业,有效实现了上、下层工序搭接,增加了单层开挖支护的有效时段,减少了施工干扰。对于穿过厂房边顶拱的断层、结构面及影响带,以及经分析可能存在的不稳定楔形体,开挖过程中采取了超前喷锚支护措施;对断层及软弱破碎带,开挖后按设计要求及时支护,及时埋设观测仪器,加密原型安全监测。

2.2 “先墙后洞”

通过武汉大学进行开挖仿真应力分析,对厂房高边墙采用了“先墙后洞”的施工程序,三大洞室平行施工,为厂房对穿锚索的施工创造了条件,

为厂房快速下卧提供了保障。

在厂房第Ⅲ层岩锚梁混凝土浇筑前,先进行了厂房第Ⅳ层边墙预裂和中部拉槽(不出渣),在混凝土浇筑完成后,直接组织运输车辆出渣,从而避免了厂房第Ⅳ层开挖爆破对新浇混凝土的爆破影响,确保了岩锚梁混凝土的浇筑质量,亦加快了开挖进度,缩短了开挖工期。

另外,在厂房开挖至第Ⅶ层之前,利用尾水管及其连接洞开挖的中导洞作为施工通道,先进行厂房底部机窝下导洞的开挖,一方面为厂房后期机窝开挖创造施工通道,一方面减小了后期机窝开挖的工程量,加快了施工进度。

2.3 岩锚梁岩台开挖施工技术

在岩壁梁层开挖中,将其划分成两大区开挖,即在岩壁梁部位预留一定宽度的保护层开挖区(2区),其余为拉槽开挖区(1区),将同一横断面划分成两区四块。根据具体的地质构造特性,保护层开挖区选择了小孔径水平孔浅孔全断面光面爆破^[2]。

瀑布沟水电站岩壁梁层拉槽区的每个开挖循环中首创采用“三步起爆一次开挖施工光面一预裂爆破”即:

第一步。起爆拉槽区中部梯段爆破孔——创造了临空面;

第二步。紧接着起爆拉槽区和保护层边界面施工光预孔——即在两个临空面条件进行预裂爆破;

第三步。起爆拉槽区剩余梯段爆破孔。

在岩壁梁部位预留一定宽度的保护层,可以解决中部主爆区拉槽爆破时对岩壁梁部位的损坏。保护层开挖采用“小孔径直孔和斜孔光面爆

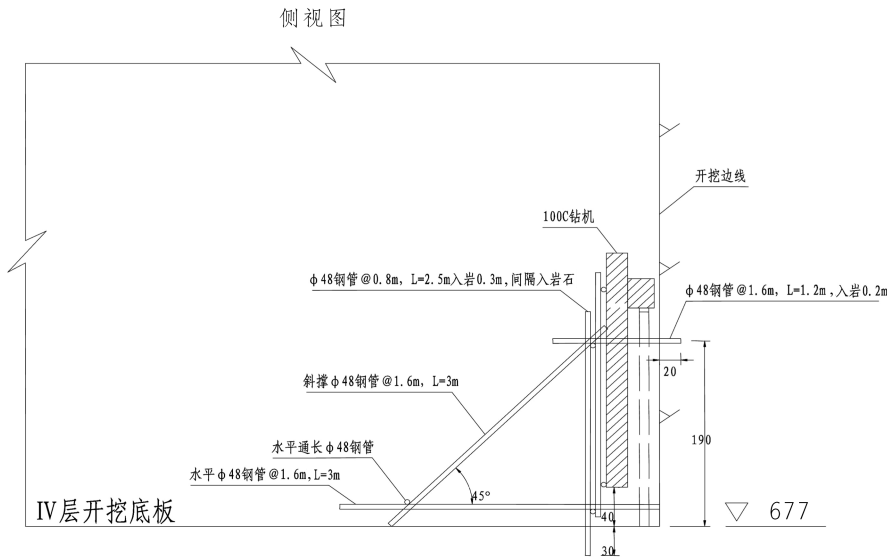
破一次开挖”和“岩壁梁岩台上拐点直墙和下拐点直墙双层光面爆破”方法,最大限度地减少了爆破震动对岩壁造成的损伤。在岩壁梁岩台部位钻孔时(直孔、斜孔),设置钻孔样架以提高钻孔的定位精度,确保岩壁梁岩台外形符合设计要求。所谓双层光面爆破,就是紧贴设计壁面的那排孔(精确光爆孔)和其前一排孔(粗光爆孔)均作为光爆孔,其余作为崩落孔(梯段爆破孔)进行延时松动爆破。粗光爆孔和精确光爆孔在装药结构形式、起爆方式和钻孔深度上相同,粗光爆孔间距、抵抗线和线装药密度约大于精确光爆孔。双层光面爆破和普通光面爆破(单层光面爆破)相比其优点在于:粗光爆起爆时可提前切断延伸到设计壁面里的地质结构面,这样设计光面爆破,可以进一步降低爆破震动对岩壁的破坏作用,从而取得比普通光面爆破更佳的壁面质量,进而减小了对岩壁的加固修补,确保了施工进度^[3]。

2.4 边墙深孔预裂

2.4.1 深孔预裂施工方法

厂房第 V 层开挖分层高度为 8.5 m,边墙预裂孔深为 9 m(超深 0.5 m)。由于边墙预裂孔钻孔深度深、精确度要求高,故采用了 YQ100C 潜孔钻机进行造孔(钻孔孔径 90 mm、孔距 80 cm)。由于 YQ100C 钻机的马达边线比钻杆的外边线超出 5 cm 的距离,造成钻杆不能直接靠住边墙。为了更好地控制钻机的钻孔质量及方便施工,在保证 9 m 深预裂孔底部超挖 20 cm 的范围以内的情况下以 88°的倾角造孔。

因钻孔精确度要求高,因此,钻机设备必须安装稳固。采用 $\Phi 48$ 钢管搭设三菱体进行支撑。首先用两根 50 cm 长的 $\Phi 48$ 钢管与钻机焊接以保证水平,再用两根长 2.5 m、 $\Phi 48$ 钢管与 50 cm 长的钢管用扣件连接形成一个整体。再在边墙上距离底板 1.9 m 的高度、间隔 1.6 m 造 20 cm 深的 $\Phi 50$ 孔,将 1.2 m 长的 $\Phi 48$ 钢管插入,然后搭设其他钢管以保证钻机的稳定(图 1)。



图中标注单位高程以m计, 其余以cm计

图 1 钢管支撑示意图

2.4.2 深孔预裂施工技术要点

- (1) 炮孔直径通常为 5~20 cm。浅孔爆破采用较小的孔径。为避免孔壁破坏,采用不耦合装药,不耦合系数一般取 2~4。
- (2) 炮孔孔距与岩石特性、炸药情况、缝壁平整度和孔径大小有关。孔距通常为 8~12 倍,小

- 孔径取较大的倍数,大孔径取较小的倍数;岩石均匀完整取较大的倍数,岩石破碎取较小的倍数。对于十分破碎的岩石,孔距与孔径比小于 8 才能够得到满意的预裂效果。
- (3) 线状分散装药,预裂炮孔内间隔装药。其单位长度装药量称装药密度,根据不同岩性,其值

取 200~400 g/m。为克服岩石对孔底的夹制作用,孔底药包采用线装药密度的 2~5 倍。

(4)钻孔质量是保证预裂面平整度的关键。应将钻孔轴线与设计开挖线的偏离值控制在 15 cm 之内。

(5)预裂炮孔孔口应用直径小于 10 cm 的砾石堵塞。起爆可用传爆线,亦可用毫秒雷管起爆,将起爆时差控制在 10 s 以内。利用微差爆破改善爆破效果。

(6)为阻隔主爆区传来的冲击波,应将预裂孔的深度 h_1 超过表 1 中开挖区炮孔的深度,预裂缝的长度应比开挖区排炮孔连线两端各长 b_1 ,同时应与排炮孔保持 a_1 的距离,开挖区内的排炮孔宜采用小直径药包,远离预裂缝的炮孔可采用大直径药包。前者为了减震,后者改善爆破效果^[4]。

表 预裂孔设计参数表			
药包直径 /mm	a_1 /m	b_1 /m	h_1 /m
55	0.8~1	6	0.8
90	1.5~2	9	1.3
100~150	2.5~6	10~15	1.3

2.4.3 深孔预裂质量控制标准

(1)预裂缝面的最小张开宽度为 0.5~1 cm,坚硬岩石取小值,软弱岩石取大值。

(2)预裂面的残留半孔率:对于坚硬岩石应不小于 85%;中等坚硬岩石不小于 70%;软弱岩石不小于 50%。

(3)钻孔偏斜度小于 10°,预裂面的不平整度不大于 15 cm。

2.5 解决锚索施工对开挖施工的制约关系

由于厂房跨度大且其上下游直立边墙高达 48.3 m,需在上下游直墙上布置锚索进行深层锚固,锚索分端头锚和对穿锚索两种形式,锚索主要采用 2 000 kN 级,长度为 15~44 m。设计工程量为 417 束,其中 $L=15$ m 的锚索 177 束, $L=20$ m 的锚索 186 束, $L=23.1$ m 的锚索 44 束, $L=44$ m 的锚索 10 束;地下厂房预应力锚索支护主要在直立边墙进行,因其工程量大、线直面广、结构复杂、工序干扰大、技术难题多,已成为地下厂房施工的难题之一。同时,锚索施工又必须跟进开挖适时进行,分层支护结束才能进行下层开挖,故预应力锚索的施工速度、强度制约着地下厂房

施工的总进度,亦为地下厂房施工的重点之一。为了加快开挖支护施工进度,同时兼顾高边墙的变形稳定和施工安全,项目部对锚索施工采取了以下施工措施:

(1)为了确保高边墙的安全稳定,首先对锚索进行有选择性的施工,即先进行对穿锚索以及岩体破碎带的端锚施工,之后在施工其他剩余非关键性的锚索时即可穿插进行下层的边墙预裂或局部的中部拉槽开挖以加快施工进度;

(2)为了加快厂房施工进度,缩短施工工期,锚索锚墩采用钢锚墩。分别用一块 35 cm×35 cm×5 cm、50 cm×50 cm×5 cm 钢板叠在一起作为锚具的基座,钢板与岩面的空隙用 M35 钢纤维砂浆填充。外锚头的保护采用 $\Phi 200$ 钢管做罩子,里面回填灌浆充实。整个钢垫墩表面用钢纤维混凝土封闭(边墙喷混凝土时一并完成)。由混凝土锚墩改为钢垫墩,大大简化了施工难度,锚索施工速度随之加快,使厂房边墙得到了及时有效的深层锚固。垂直边墙岩体的完整性得到了控制,开挖质量亦大大提高^[5]。

(3)为了能提前进行锚索张拉,在进行灌浆时加入了早强剂,以缩短等强时间,加快施工进度。

2.6 增设施工通道

厂房集水井紧靠首台发电机组(6#机组),为了避免集水井的开挖对 6#机造成施工干扰和影响,在副厂房底部布置了一条 14#施工支洞至集水井部位,该支洞全长 39.82 m,支洞开挖断面为 4.5 m×5 m(宽×高),主要作为厂房右端集水井开挖与支护的施工通道。

为减小主厂房第 V、Ⅵ、Ⅶ层开挖对六条引水隧洞下平段钢管安装造成的影响,从厂房安装间上游侧底部水平贯通至 1#机组左侧边墙而布置了一条 4#施工支洞,全长 90.004 m,支洞断面为 4.5 m×5 m。该施工支洞主要承担主厂房第 V、Ⅵ、Ⅶ层的开挖与支护。

为解决主厂房在机电安装开始后安装间的使用与大桥机运行对该标厂房内混凝土施工的干扰很大、材料运输难的问题,对布置在厂房上游侧的 2#排水廊道进行扩挖,兼作 3#施工支洞,以供厂房开挖和后期混凝土浇筑通道使用。

另外,增设 10#施工支洞与 1#、5#、8#施工支洞及副厂房右端墙对接,形成地下洞室循环

通道,在很大程度上提高了地下施工通道的通车能力,解决了材料运输、设备行走难等困难,为地下厂房快速开挖提供了保障。

2.7 周边增加防护,减小施工干扰

在右端副厂房顶部与 6#机邻近处有一条电缆竖井直通地面,按正常施工程序,该竖井应在主厂房Ⅱ层开挖后即完成开挖支护,但由于交面滞后,迫使竖井与主厂房 6#机开挖同时施工。

竖井顶部地面高程为 910 m,底部高程为 706.375 m,竖井深 203.625 m。竖井最大开挖直径为 9.6 m,混凝土衬砌后的成井直径为 8 m。1#电梯电缆竖井下部与副厂房顶拱相接,紧邻副厂房与集水井交界处,距首台发电机组(6#机组)的水平距离只有 15.3 m,竖井底部与 6#机肘管高差达 70 m,竖井的开挖出渣正好散落在 6#机、集水井和副厂房的工作面上,严重影响到 6#机及集水井的施工安全。为避免干扰,突进 6#机,对电缆电梯竖井采取了钢结构隔离防护措施,使 6#机组相对独立施工。

隔离防护结构采用多边形(7 边形)钢结构棱柱体加钢结构满堂脚手架,棱柱体为框式结构,整体结构在平面上呈井筒七边方型布置,靠副厂房端墙一侧的边长为 3.83 m,其它六边边长为 2.07 m(六边的内切圆直径为 5 m),防护高程从底板的 664.8 m 一直到竖井井口,高 41.575 m。内侧采用 $\delta 8$ 钢板做面板,背面用 $[14b]$ 型钢加固,横向槽钢间距为 100 cm,槽钢间用 $\angle 70 \times 8$ mm 角钢作斜撑,并在靠副厂房右侧边长为 3.83 m 的井筒上预留尺寸为 8 m $\times$ 3 m(高 $\times$ 宽,由于底部需垫渣 2 m 厚,故出渣口的净高为 6 m)的出渣口,并在出渣口两侧各布置一根 100 cm $\times$ 100 cm(长 $\times$ 宽)断面的型钢组合柱,以及在其他各边交汇处布置 5 根 80 cm $\times$ 80 cm(长 $\times$ 宽)断面的型钢组合柱,7 根型钢组合柱之间用 40 cm $\times$ 40 cm 的组合钢联系横梁组成框架,框架内侧与面板后的槽钢焊接、外侧与 60 cm $\times$ 60 cm 间排距、层高 1.5 m 布置的 $\Phi 48$ 钢架管连接形成一个整体,靠出渣口一侧的钢管架须搭设成龙门型,以供出渣通道使用。立柱采用 $\angle 125 \times 12$ mm 角钢焊接,中部采用 $\angle 70 \times 8$ mm 角钢连接,立柱与立柱之间的联系横梁采用 $\angle 75 \times 5$ mm 角钢焊接,立柱底部基础尺寸为 120(或 140)cm $\times$ 120(或 140)cm(长

$\times$ 宽),基础混凝土为 C20,钢板每 2 m 为一节,每节钢板之间采用螺栓连接,在安装时逐节上升。为增强棱柱体的整体稳定性,采取在柱体的三个方向拉缆绳并在副厂房下游墙处使棱柱体与其连接。

为解决竖井底部最后 5 m 开挖破坏的防护结构,在防护结构顶部增加了一层喇叭结构,喇叭边与直边夹角为 30° ,喇叭口顶部与厂房顶拱的系统锚杆和插筋焊接牢固,喇叭口底部与直筒段的面板焊接牢固,同时,在喇叭口外面板用 $[14b]$ 槽钢斜撑于立柱上,外面再与钢管架连接成整体,以确保结构的稳定性。前期的开挖防护主要还是利用喇叭口内侧的直段防护结构进行防护。当开挖竖井最后 5 m 时,先将顶部喇叭口内的垂直段防护结构拆除,借用外侧喇叭口进行防护,同时要求严格控制最后 5 m 竖井开挖的单响药量和排炮进尺,将每排炮进尺控制在 0.5~0.8 m 范围内,以确保安全。

另外,为保证竖井在开挖过程中的灰尘不扩散至主厂房,在主厂房和副厂房交界面拉了一道帆布,帆布布置从副厂房上游面边墙至下游面边墙,其防护高度从岩锚梁至副厂房底板高程,即 664.8 m。

2.8 采用“先插杆后注浆”锚杆施工工艺

在地质破碎带或者岩脉带采用“先插杆后注浆”的锚杆施工工艺,避免了破碎带或岩脉带造孔时反复出现锚杆塌孔而影响到施工进度。

2.9 厂房下部体型结构的优化

厂房 6#机坑与集水井之间的隔墙和 5#机坑与尾水管及连接洞相交部位由于受 f_{18} 断层切割,在开挖过程中该岩台很难保留,于是在该部位进行了控制性爆破对其予以整体挖除,对于底部排水廊道也由不规则的形状调整为 4 m $\times$ 4.5 m 规则的城门洞型,整体加快了开挖施工进度。

3 实际开挖工期

瀑布沟水电站地下工程主厂房首台机组(6#机)开挖于 2007 年 2 月 28 日完成,实际开挖净工期不足 24 个月,对比招标开挖工期 33 个月整整节约了 9 个月,对比国内同类型同规模地下厂房工程,该工程首台机组创造了开挖时间最短的全国之最。

(下转第 91 页)

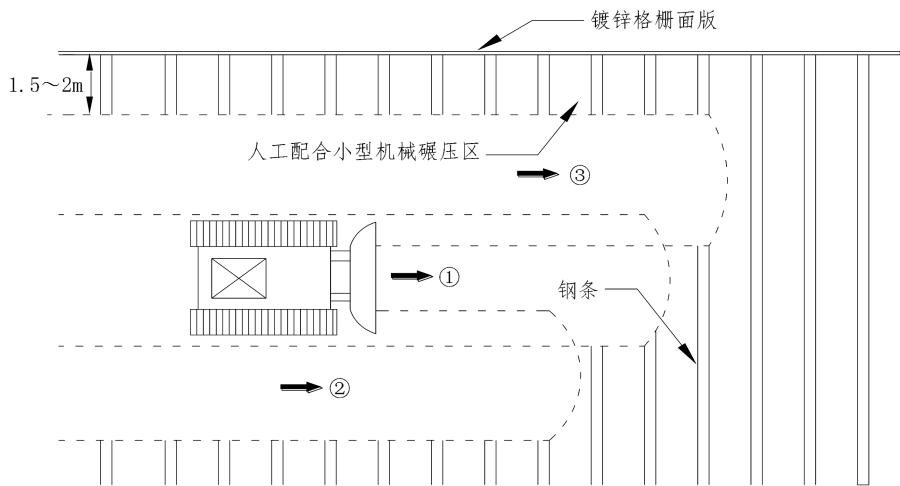


图 3 回填碾压次序示意图

季前后各观测一次。

5 结 语

笔者对镀锌格栅面板加筋土挡土墙的设计理论和施工技术进行研究的结果表明:该挡土墙具有结构新颖、造型美观的特点,同时还具有较重力式挡土墙和其他形式的加筋土挡土墙造价低、施工快捷等特点。

在地形、地质构造复杂的道路、桥梁、水电、矿山以及市政等工程建设中,软基等经常会遇到,镀锌格栅面板加筋土挡土墙为柔性体,具有一定的变形能力。另外,在石料缺乏的地段修建该型式的挡土墙也不受限制,且更能突出其优越性^[3]。对镀锌格栅面板加筋土挡土墙进行推广应用具有十分重大的意义,亦将会带来较大的社会和经济效益。

(上接第 68 页)

在创造开挖时间最短的同时,施工过程中的各种施工质量均满足设计要求,亦符合国家相关规范,监测数据显示:整个厂房的洞室变形在允许范围内,处于可控状态;施工期间,也未因快速施工发生重大安全事故。总之,依托该工程,安全、优质、快速、经济地完成了开挖任务,为同类工程工期设计标准的制定提供了重要技术依据,亦为类似大型、特大型地下厂房工程施工提供了很好的借鉴。

参考文献:

[1] DL/T5135—2013 水电水利工程爆破施工技术规范[S].

参考文献:

[1] 郑 华.加筋土挡土墙的应用[J].交通世界(建养·机械) 2011,18(5):104—105.
[2] 谢浩鸣,张 鸢.加筋土挡土墙施工技术应用[J].经济技术协作信息,2010,27(4):74.
[3] 李 鹏.浅谈加筋土挡土墙设计[J].工业设计,2012,8(3): 29 .
[4] 吴春陆.浅谈加筋土挡土墙在道路工程中的应用[J].建材技术与应用,2017,24(4):17—20.

作者简介:

杨运鹏(1976-),男,山东肥城人,工程师,从事建设工程施工技术与管理工作;
阿里木江(1985-),男,新疆喀什人,工程师,学士,从事建设工程施工技术与管理工作;
辜禹峰(1980-),男,四川仁寿人,工程师,从事建设工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

[2] 杨正云,李世春,柳富强.鲁地拉水电站地下厂房岩锚梁基础开挖爆破技术浅析[J].云南水力发电,2010,26(5):32—36.
[3] 陈桂闵,陈 翔,邓雨露.白鹤滩水电站左岸地下厂房岩锚梁爆破试验参数研究[J].水利水电技术,2017,59(增 2): 14—16.
[4] 赵利鹏.预应力锚索钢垫板锚墩结构设计[J].云南水力发电,2012,28(4):58—60.

作者简介:

陈仁峰(1978-),男,四川遂宁人,总工程师兼工程技术部部长,高级工程师,学士,从事水电工程建设施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)