

倾斜炮孔在大断面高强度围岩洞室开挖中的应用

林 开 盛², 涂 胜¹, 李 鹏 鑫¹

(1.中国葛洲坝集团第一工程有限公司,湖北 宜昌 443002;2.国家能源集团大渡河公司,四川 成都 610041)

摘 要:高强度围岩隧洞掘进过程中炮孔利用率低,是造成钻爆循环进尺较小的重要因素,增加了施工成本,延长了施工工期。对于大断面高强度围岩隧洞掘进施工,通过改变布孔方式,可显著地提高炮孔利用率,增大钻爆循环进尺,降低施工成本。本文以四川双江口水电站尾水调压室顶层、尾水洞等大型洞室为依托,通过对洞室钻爆施工工艺技术进行优化创新,全断面炮孔(周边孔除外)采用倾斜孔布孔方式,将炮孔利用率由 80%左右提高到 95%以上。大断面高强度围岩隧洞掘进采用倾斜孔布孔方式,在节能环保、降低施工成本,提高施工效率等方面取得了良好的效果,可为同类大断面高强度围岩隧洞钻爆施工提供实践经验。

关键词:大断面隧洞;高强度围岩;倾斜炮孔;钻爆循环进尺

中图分类号:P634.2;U455.41+2;U453.2 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2019)增 2-0095-06

Application of Inclined Blast Hole in Excavation of Large
Section and High Strength Surrounding Rock Cavern

LIN Kaisheng², TU Sheng¹, LI Pengxin¹

(1.China Gezhouba Group No.1 Engineering Co., LTD, Yichang, Hubei, 443002;
2. Dadu River Co., LTD, CHN Energy, Chengdu, Sichuan, 610041)

Abstract: n the process of high-strength surrounding rock tunnel excavation, the low utilization rate of blast hole is an important factor that causes the small drilling and blasting cycle footage, which increases the construction cost and prolongs the construction period. For the tunneling construction under the condition of large section and high strength surrounding rock, the utilization ratio of blast hole can be significantly increased, the drilling and blasting cycle footage can be increased, and the construction cost can be reduced by changing the mode of hole layout. Based on the large-scale caverns such as the top floor of tailrace surge chamber and tail-race tunnel of Shuangjiangkou Hydropower Station in Sichuan Province, this paper optimizes and innovates the drilling and blasting construction technology of caverns, and adopts inclined holes layout for full section blast holes (except the peripheral holes), so that the utilization ratio of blast holes is increased from about 80% to over 95%. The inclined hole layout method is adopted in the excavation of large section and high strength surrounding rock tunnel, which has achieved good results in energy saving, environmental protection, construction cost reducing, and construction efficiency improving, etc., and can provide practical experience for the drilling and blasting construction of similar tunnels.

Key words: large section tunnel; high strength surrounding rock; inclined blast hole; drilling and blasting cycle footage

1 工程概况

双江口水电站尾水系统采用两机一室一洞的布置格局。1~4[#]尾水连接管过调压室后分别连接1~4[#]尾水支洞,1[#]与2[#]尾水支洞合并为1[#]尾水主洞,3[#]与4[#]尾水支洞合并为2[#]尾水主洞,两条尾水主洞独立平行布置。尾水支洞洞轴线方

收稿日期:2019-11-15

向 N80°E,洞轴线间距 30.02 m;尾水主洞洞轴线方向 S41°3'14"E,洞轴线间距 41.82 m。

1[#]、2[#]尾水洞长度分别为 1 001.564 m、890.498 m,洞型为圆形,标准断面半径尺寸为 7.05 m。尾水洞进口底板高程 2 218.00 m,尾水洞出口底板高程为 2 234.50 m。1[#]尾水隧洞(尾₁)0+163.481~(尾₁)0+666.914 段坡比为 0.02086、(尾₁)0

+666.914~(尾₁)0+713.914 为水平段、(尾₁)0+713.914~(尾₁)0+933.914 段坡比为 0.02181; 2[#] 尾水隧洞(尾₂)0+150.817~(尾₂)0+597.348 段坡比为 0.02351、(尾₂)0+597.348~(尾₂)0+644.348 为水平段、(尾₂)0+644.348~(尾₂)0+824.348 段坡比为 0.02537。

本文以四川双江口水电站尾水调压室顶层、尾水洞等大型洞室为依托,通过对洞室钻爆施工工艺技术进行优化创新,全断面炮孔(周边孔除外)采用倾斜孔布孔方式,将炮孔利用率由 80% 左右提高到 95% 以上。

2 地质条件

2.1 工程地质条件

1[#]、2[#] 尾水隧洞洞向 N80°E→S41°03'14"E, 其中 1[#] 尾水隧洞垂直埋深 35 m~550 m, 2[#] 尾水隧洞垂直埋深 38 m~500 m。围岩为似斑状黑云钾长花岗岩,局部伟晶岩脉发育,岩石致密坚硬,为微风化—新鲜岩体,岩石单轴抗压强度达 130 MPa 以上,局部达 168 MPa。岩体中地下水不丰,以渗滴水为主,局部见线状流水,岩体以块状—整体状结构为主,局部镶嵌结构,考虑高地应力折减后,围岩以Ⅲa 类为主,成洞条件较好。但需注意随机分布的小断层对洞室稳定的不利影响, J₁、J₂、J₄ 缓倾角结构面对顶拱以及 SPD9—2—f₂、J₃ 中陡倾角裂隙对左洞壁稳定的不利影响,应加强支护措施。尾水隧洞深埋洞段为高地应力区,施工中应加强岩爆预报预防等处理措施。深埋洞段地应力量级高,为高地应力区,局部接近 40 MPa,施工中应加强岩爆预测预报和防护等处理措施。

2.2 水文地质条件

根据引水发电建筑物区地下水的赋存条件,可分为第四系松散堆积层孔隙水和基岩裂隙水两种类型。第四系孔隙水主要分布于河谷地带的松散堆积物中,受大气降水、河水及两岸地下水补给,向下游排泄;引水发电建筑物区基岩为微风化—新鲜似斑状黑云钾长花岗岩,岩体完整,含水性和透水性微弱,仅断层带和个别陡倾长大裂隙具一定透水性。由于河谷深切,岸坡陡峻,地表水入渗困难,补给水源有限,岸坡排泄条件较好,因此,地下水位埋藏较深,总体上地下水补给河水。岩体中地下水不丰,据平洞勘探揭示,洞壁多干燥或

潮湿,局部渗滴水,个别线状流水。

3 开挖方法

3.1 施工方案选择

尾水隧洞分为上下层开挖,上层开挖高度为 9.0 m,下层开挖高度为 5.10 m(以尾水隧洞Ⅲ类围岩开挖断面计算)。两条尾水隧洞开挖采用错距开挖,掌子面开挖错开距离大于 30 m。两条尾水隧洞长度不同,1[#] 尾水洞较长,尾水上支洞贯入尾水洞后,先进行 1[#] 尾水洞上游段开挖,待满足安全错开距离后,再进行 2[#] 尾水洞上游段开挖。

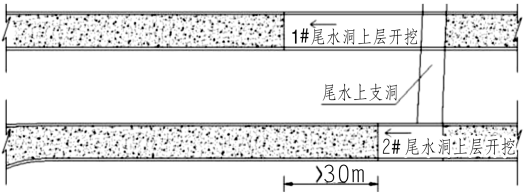


图 1 尾水隧洞开挖顺序

两条尾水隧洞上层断面采用一次性全断面钻爆法施工^[1,2],设计开挖轮廓面采用光面爆破技术,毫秒微差起爆网络联网。上层断面面积为 105 m²,宽度为 14.10 m,采用楔形掏槽方式。为加快施工进度,提高钻爆施工质量,辅助全部采用倾斜炮孔。地下厂房区域围岩岩体结构完整,且随着开挖卸荷裂缝有扩张趋势,这充分说明了裂缝的形成并不是由既有结构面导致的,而是在开挖后由应力重分布驱动下岩体中的微裂隙萌生、扩展和贯通而成。

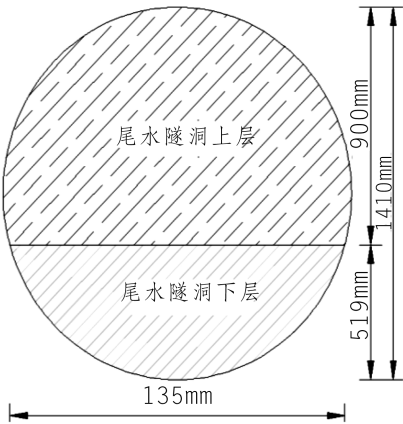


图 2 尾水隧洞开挖分层

3.2 爆破效果要求

(1) 炮孔痕迹在开挖轮廓面上均匀分布,半孔

率:完整岩石 85%以上,较完整和完整性差的岩石不小于 60%,较破碎和破碎岩石不小于 20%;

(2)相邻两孔间岩面平整,孔壁不应有明显的爆震裂隙;

(3)相邻两茬炮之间的台阶或钻孔的最大偏斜值,应小于 10 cm;

(4)采用光面爆破是控制尾水隧洞开挖规格的重要因素,光面爆破的好坏将直接决定尾水隧洞开挖的优劣,同时洞挖渣料作为骨料料源,考虑到破碎系统的生产能力,最大爆破粒径需小于 75 cm。

3.3 洞身开挖方法

两条尾水隧洞上层开挖采用全断面钻爆法进行开挖施工^[1,2,6,7],上部开挖完成后,进行下层开挖,下层采用水平孔爆破法施工。

3.3.1 设备选型

尾水隧洞开挖采用 YT28 手风钻钻孔,利用自制台车为施工平台进行钻爆施工^[1,2];开挖设计轮廓线采用光面爆破,利用液压反铲进行危石清理;开挖石渣采用侧卸装载机配合 15 t 自卸汽车出渣。

3.3.2 钻爆参数

3.3.2.1 掏槽孔

尾水隧洞上层开挖尺寸为 14.10 m×9.0 m (底宽 13.55 m,面积 105.3 m²),采用双楔形掏槽法。本工程岩石强度达到 130 MPa 以上,为坚硬岩。正常情况下,每对掏槽孔^[1,2,4,7]孔间距为 0.2~0.6 m,孔间距为 0.12~0.2 m,掏槽孔与工作面的夹角为 58°~60°,掏槽孔个数为 3 对(6 个)。

自制钻爆台车重达数吨,需要用装载机搬运。中部预留 5 m×6 m 宽门洞,以便装载机移动钻爆台车。钻爆造孔时,作业面中部 5 m×6 m 作业面无施工平台,重新搭设将增加施工工序,加大安全风险。根据钻爆台车中部预留宽门洞宽度,将第一重掏槽孔每对孔孔间距扩大为 5 m,掏槽高度为 6 m,掏槽孔与工作面的夹角降低至 42°,孔径 40 mm,孔深 2.2 m,掏槽孔数量增加到 20 个(10 对)。第一重掏槽孔每对孔间距为 5 m,孔间距为 0.5~0.65 m,掏槽孔与工作面的夹角为 42°,掏槽孔个数为 10 对(20 个),单孔装药量 2.7 kg。

第二重掏槽孔^[1,2,4,7,8]每对孔间距为 6.8 m,与第一重掏槽孔每对孔间距为 92 cm,孔径 40 mm,孔深 3.7 m(超深 0.2 m),孔间距为 50~120 cm(根据钻爆台车作业平台调整),掏槽孔与工作面的夹角为 49°,掏槽孔个数为 8 对(16 个),单孔装药量 3.3 kg。

3.3.2.2 辅助孔(崩落孔)

辅助孔全部采用斜孔^[5,7],孔径 40 mm,孔间距为 70~125 cm(根据钻爆台车作业平台调整),排间距为 80~100 cm,孔深 3.5 m,掏槽孔与工作面的夹角为 49°,掏槽孔个数为 8 对(16 个),单孔装药量 3.0~4.2 kg。

3.3.2.3 缓冲孔

距周边孔 40 cm 布置一排缓冲孔,孔径 40 mm,孔间距为 110 cm,排间距为 40 cm(孔口),底盘抵抗线 95 cm,孔深 3.5 m,掏槽孔与工作面的夹角为 84°,单孔装药量 2.4 kg。

3.3.2.4 周边孔

沿周边轮廓线布置一排周边孔^[1,2],孔径 40~50 mm,孔间距为 110 cm,排间距为 50 cm(孔口),底盘抵抗线 85 cm,孔深 3.5 m,线装药密度为 170 g/m,单孔装药量 0.6 kg。

3.3.3 爆破起爆网路

采用非电毫秒塑料导爆管起爆网路^[1,2,4],击发针击发导爆管起爆。掏槽孔、辅助孔、缓冲孔孔内装入单发导爆管雷管延时起爆破。周边孔用导爆索入孔,炸药绑扎在竹片上,导爆索孔外用 T 型结与主索连接,4~5 个起爆点接入高段导爆管雷管。采用簇连法将 20 发导爆管与双发 MS1 导爆管连接,最后与 2 发 MS1 导爆连接引出,击发针击发起爆。最大单响药量为 46 kg,为掏槽孔。

4 爆破效果分析

尾水隧洞采用常规炮孔布孔、倾斜布孔两种

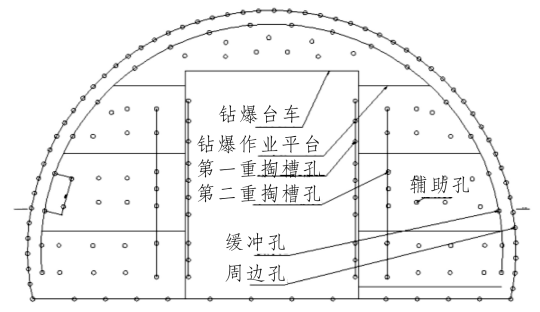


图 3 爆破布孔图

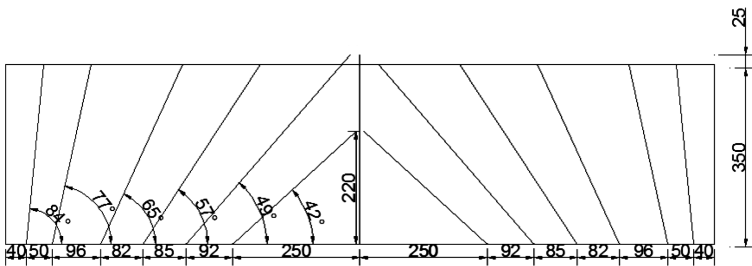


图 4 爆破孔钻孔示意图(单位:cm)

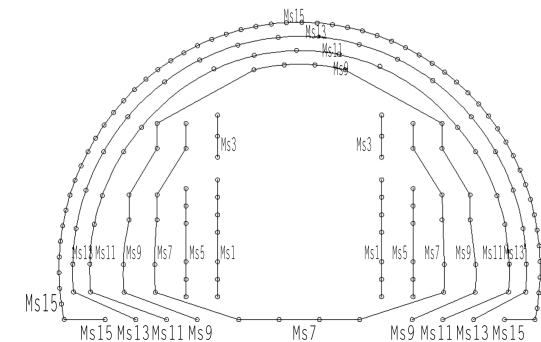


图 5 起爆网络图

方式进行了爆破试验。两种布孔方试爆破效果进行试验分析对比。

表 1 隧道爆破技术指标对比表

布孔方式	炸药单耗 /kg·m ⁻³	炮孔深度 /m	孔数 /个	炮孔利用率 /%	循环进尺 /m	循环装药量 /kg
倾斜布孔	1.01	3.5	155	98%	>3.4	361.4
常规布孔	1.35	3.0	189	80%	2.4	340.8

表 2 爆破每立方岩石经济指标对比表

布孔方式	炸药单耗 /kg·m ⁻³	延米爆破量 /m ³ ·m ⁻¹	雷管利用率 /发·m ⁻³	延米导爆索爆破量 /m ³ ·m ⁻¹	循环爆破量 /m ³
倾斜布孔	1.01	0.66	0.304	0.663	357.68
常规布孔	1.35	0.45	0.566	0.828	252.48

1#、2#尾水洞长度分别为 1 001.564 m、890.498 m,上层开挖岩石工程量为 19.89 万 m³,至少可节省费用 258.6 万元。

倾斜布孔每循环进尺达 3.4 m 以上,可节省通风排尘、除险、放样、出碴等大量的辅助时间,可加快施工进度,减小固定施工成本。

5 开挖爆破安全监测

5.1 爆破监测

尾水隧洞开挖过程中,多次进行爆破振动安全监测^[1,2,6],检测结果均符合安全要求。其中 2019 年 06 月 03 日对 1#尾水洞爆破试验振动监测,爆破装药及网路分段情况:小掏槽孔 MS1 段 9.6 kg、大掏槽孔 MS3 段 50.4 kg、主爆孔 MS5 段

4.1 技术指标对比分析

由表 1 可知,倾斜布孔与常规布孔相比,炸药单耗降低 0.34 kg/m³,每循环炮眼利用率提高 18%,循环进尺增加了 1.0 m。

4.2 经济指标对比分析

由表 2 计算可知,倾斜布孔相比常规布孔,倾斜布孔开挖岩石节省炸药 4.08 元 /m³,节省钻孔费用 3.15 元 /m³,节省导爆管雷管费用 1.83 元 /m³,节省导爆索费用 0.66 元 /m³。上述各项可节省费用 9.72 元 /m³,如加上各种辅助费用,倾斜布孔相比常规布孔,倾斜布孔开挖岩石节省炸药 13 元 /m³左右。

36 kg、主爆孔 MS7 段 55.2 kg、主爆孔 MS9 段 31.5 kg、主爆孔 MS11 段 33.6 kg、缓冲孔 MS13 段 30 kg、周边孔和底孔 MS15 段 57.6 kg、总装药量 303.9 kg。共布置 5 个测点,测点布置在距离爆区 11~34 m 范围内,测点间距 5~7 m,各测点按水平径向、水平切向和竖直向布置传感器。仪器距爆源分别为 1#测点 11 m,2#测点 16 m,3#测点 21 m,4#测点 27 m,5#测点 34 m。测点布置如图 6。

1#尾水洞爆破试验振动监测典型波形图(1#测点)如图 7 所示。

本次试验共设置 5 个监测点,获得 12 点次有效数据(30#仪器未采集到数据),监测部位为 1#



图 6 爆破振动监测测点布置

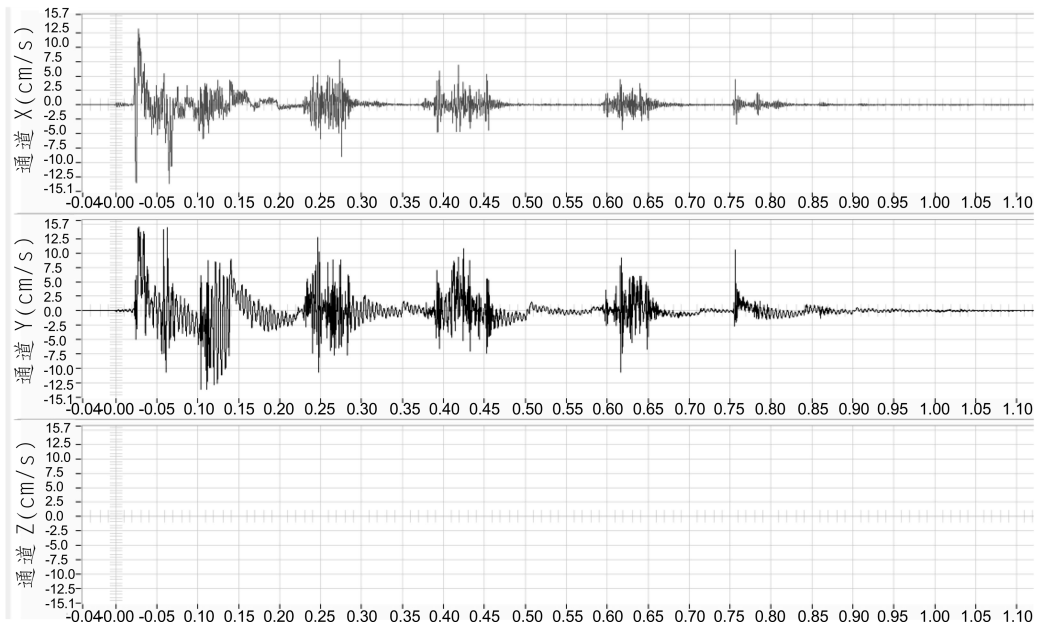


图 7 1#尾水洞爆破试验振动监测典型波形图(1#测点)

尾水隧洞 0+240.2 m,根据监测结果有:

(1)在距离试验爆源 11 m 的 1# 测点实测最大振动值为 14.59 cm/s,对应主振频率为 52.6 Hz,振动方向为水平切向,回归得到各振动方向的爆破振动衰减规律及振速预报公式,对不同水平距离条件下,最大可能振动速度值进行反演,距试验爆源 10 m 处,可能最大峰值质点振速值为 16.67 cm/s,大于爆破振动安全允许值 10 cm/s (设计值)。与《爆破安全程》(GB6722—1014)规定值 10~15 cm/s 上限相同。实际上,爆破振动往往大于安全允许值 15 cm/s,但水工隧洞也是安全的。

(2)从实测爆破试验振动波形分析,最大峰值爆破振动速度是由掏槽孔爆破引起的,各段爆破振动基本分隔开,振动峰值没有出现叠加现象,说明开挖爆破网路基本合理。

5.2 爆破试验声波监测成果

根据水电工程岩体质量监测技术规程(NB/T35058—2015),采用声波监测法判断爆破破坏或基础岩体质量的标准。通过孔口的弹性波纵波

的波速与孔底稳定波速对比,以纵波波速曲线的拐点来判断围岩松动圈深度。

尾水洞开挖爆破试验声波监测中^[6],平均波速均在 5 075 m/s 以上,各声波孔波速除局部有一定起伏外,总体相对比较稳定,说明爆破试验区岩石相对比较完整。检测结果显示,尾水洞围岩松动圈深度不超过 1.2 m,表明围岩松弛范围较小,说明爆破对围岩损伤小,爆破振动速度值偶尔大于 15 cm/s 也是安全的。在爆破开挖后,及时对围岩进行锚喷支护,锚喷支护起到了提高围岩完整性、加固围岩的效果,抑制了围岩的劣化扩展。

6 结 语

大断面高强度围岩隧洞掘炮孔(周边孔除外)采用倾斜斜布孔方式,将极大地提高炮孔利用率,在节能环保、降低施工成本,提高施工效率等方面取得良好的效果,可为同类大断面高强度围岩隧洞掘进提供实践经验。

参考文献:

[1] 汪旭光,爆破设计与施工[M].北京:冶金工业出版社,2014. 453—479.

[2] 郭进平,新编爆破工程实用技术大全[M]. 北京:光明日报出版, 2012.1325—1350.

[3] 唐军峰,复杂开挖条件下大断面洞室围岩的变形及力学研究[J]. 北京:地质力学学报,2009.vol.15.No.3. 45—49.

[4] 贵州省岩石力学与工程协会 2013 年度学术交流论文集 [A].胡中阔,缓倾角薄层围岩下大断面洞开挖与支护施工 [C]. 昆明市:贵州省岩石力学与工程协会: 2013.120—124.

[5] 章朝峰,玛尔挡水电站地下厂房洞室围岩稳定三维有限元分析[J]. 南昌市:科技市场经济,2017 (5).

[6] 王勇,某电站地下厂房洞室围岩稳定性研究[J].北京:低碳世界;2016, (13):73—75.

[7] 张福宏,大楔形掏槽在隧道全断面开挖中的应用[J]. 乌鲁木齐:西部探矿工程;2001, (2):47—51.

[8] 刘国山,楔形掏槽爆破技术在青岛滨海公路仰口隧道全断

面开挖中的应用[J]. 科技创新导报,2010, (1):32—35+65

作者简介:
林开盛(1983-),男,汉族,福建上杭人,工程师,学士,现于国电大渡河流域水电开发有限公司从事水电工程建设技术及其管理工作;
涂 胜(1973-),男,汉族,湖北宜昌人,高级工程师, 学士,现于中国葛洲坝集团第一工程有限公司,从事水利水电工程施工爆破技术工作;
李鹏鑫(1993-),男,汉族,甘肃陇南人,助理工程师,学士,现于中国葛洲坝集团第一工程有限公司从事水利水电工程施工工作.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 75 页)

[10] 胡振邦,沈凯,彭冰.某坝肩边坡开挖优化设计方案研究.水利与建筑工程学报.2017.8.15.

[11] 涂扬举.建设智慧企业 推动管理创新[J].四川水力发电. 2017.2.15.

[12] 段斌,李善平,严锦江等.300m 级心墙堆石坝可研阶段筑坝关键技术研究[J].西北水电.2017.3.14.

[13] 张世殊,杨建,田雄等.大渡河双江口水电站区域构造稳定性评价[A].2011 年全国工程地质学术年会论文集.2011. 8.3.

[14] 张继宝,陈五一,李永红.双江口土石坝心墙拱效应分析

[J].岩土力学.2008.11.10.

[15] 许峰,金沙江叶巴滩水电站左坝肩岩体质量评价[J].成都理工大学.2014.5.1.

作者简介:
康向文(1981-),男,湖南新化人,高级工程师,硕士,主任工程师,主要从事水电工程建设项目及技术管理工作;
李 鹏(1980-),男,湖北钟祥人,高级工程师,硕士,副总经理,主要从事水电工程建设项目及技术管理工作;
刘成友(1990-),男,河南商丘人,硕士,专责,主要从事水电工程建设项目及技术管理工作.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 80 页)

双江口水电站高坝泄洪消能研究成果较为丰富,并明确了实施阶段泄洪系统工程技术研究方向和主要内容。以上研究成果和思路,为双江口水电站泄洪系统建设奠定坚实的技术基础,可供 300 m 级高坝泄洪建筑物设计和建设参考借鉴。

参考文献:

[1] 孙双科. 我国高坝泄洪消能研究的最新进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2009,(02):249—255.

[2] 戴会超,许唯临. 高水头大流量泄洪建筑物的泄洪安全研究 [J]. 水力发电,2009,(01):14—17.

[3] 谢省宗,吴一红,陈文学. 我国高坝泄洪消能新技术的研究和创新[J]. 水利学报,2016,(03):324—336.

[4] 郑林平. 国内泄洪隧洞洞内消能工的研究及应用进展[A]. 中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会. 2004 年水工专委会学术交流会议学术论文集[C]. 中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会:,2004: 6.

[5] 王晓鹏. 我国高坝泄洪消能研究现状[J]. 中国水运(下半

月),2015,(05):164—165+167.

[6] 李善平,段斌. 建设中的世界第一高坝——双江口心墙堆石坝[J]. Engineering,2016,(03):30—33.

[7] 陈五一,余挺,李永红等.四川大渡河双江口水电站可行性研究报告[R]. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司.2014.

[8] 张岩,肖培伟,邢丹. 双江口水电站泄洪系统的关键技术问题及解决方案[J].四川水力发电,2017,(02):140—143.

作者简介:
严沁之(1992-),男,四川汉源人,工学硕士,助理工程师,主要从事水电工程建设技术和管理工
邹 婷(1992-),女,湖北天门人,工学硕士,助理工程师,主要从事水电工程建设技术和管理工
段 斌(1980-),男,四川北川人,工学博士,高级工程师,主要从事水电工程建设技术和管理工
雷厚斌(1983-),男,重庆渝北人,工程硕士,高级工程师,主要从事水电工程建设技术和管理工
魏雄伟(1987-),男,湖北天门人,工学硕士,工程师,主要从事水电工程建设和技术管理工作.

(责任编辑:卓政昌)