

# 巴拉水电站溢洪洞开挖支护施工设计

张强, 杨洋, 徐琨武

(四川足木足河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**巴拉水电站溢洪洞“裁弯取直”布置于大坝左岸,洞轴线与坝轴线呈 $85^{\circ}04'03''$ 夹角,作为宣泄规划库容所不能容纳洪水的重要泄洪建筑物,具有洞室断面大、水流速度快等特点。进口布置于坝轴线上游约 575.0 m 处,采用开敞式进口明流泄水隧洞,由进水引渠段、控制闸室段、泄槽段及出口消能段组成。受地质条件影响,溢洪洞进口段围岩稳定性差、垂直埋深浅,最小垂直埋深仅 2.8 m,不足 1 倍洞径,属于超浅埋洞段,成洞条件差,且位于高寒地区,施工难度极大。为保障施工安全,已在进口段采用预固结灌浆等措施,本文基于溢洪洞进口及浅埋洞身段已处理稳定的基础上就桩号 0+074~1+233 洞身段开挖支护技术进行分析。

**关键词:**巴拉水电站;溢洪洞;洞身;开挖;支护

**中图分类号:**[TM622];TV651.3;U455.41+2

**文献标志码:** B

**文章编号:**1001-2184(2023)05-0106-06

## Construction Design of Excavation and Support of Spillway Tunnel for Bala Hydropower Station

ZHANG Qiang, YANG Yang, XUN Kunwu

(Sichuan Zumuzu River Basin Hydropower Development Co., LTD., Chengdu Sichuan 610041)

**Abstract:** The spillway tunnel of Bala Hydropower Station is "cut and straightened" on the left bank of the dam. The angle between the tunnel axis and dam axis is  $85^{\circ}04'03''$ . As an important flood discharge structure that releases excess flood for the reservoir, the spillway tunnel has large cross-section and permits high-speed water flow. The inlet is arranged about 575.0 m upstream of the dam axis. It adopts an open inlet open-flow drainage tunnel, which consists of water inlet canal, control chamber, discharge chute and outlet energy dissipator. Affected by the geological conditions, the surrounding rock stability of the inlet canal is poor, and the vertical burial depth is shallow. The minimum vertical burial depth is only 2.8 m, which is less than one times of the tunnel diameter. The tunnel belongs to ultra-shallow buried tunnel, and because of its poor cave formation condition and the cold temperature, the construction is extremely difficult. To ensure construction safety, measures such as pre-consolidation grouting have been adopted in the inlet section. Based on the stable treatment of the inlet and shallow buried sections, the excavation and support technology for 0+074~1+233 sections is introduced and analyzed in this paper.

**Key words:** Bala Hydropower station; Spillway tunnel; Tunnel body; Excavation; Support

### 1 工程概况

巴拉水电站溢洪日调节电站,开发任务为水力发电并兼顾生态用水需要。巴拉水电站为二等大(II)型工程,壅、泄水建筑物为 1 级建筑物,引水发电建筑物为 2 级建筑物,次要建筑物为 3 级建筑物。枢纽建筑物主要由首部枢纽、引水建筑物和厂区建筑物等组成。工程采用混合式开发,为日调节电站,开发任务为发电并兼顾生态用水需要。

电站溢洪洞为偏压型隧洞,洞室断面大,进口

埋深浅,地质条件复杂,施工难度极大。隧洞布置于左岸,采用开敞式进口明流泄水型式,由进水引渠段、控制闸室段、泄槽段及出口消能段组成,洞身横断面采用城门洞型,总长 1 233.0 m。进口底板高程 2 886.00 m,出口底板高程 2 803.74 m,进口桩号 0+000~0+034 为闸门控制段,0+034~0+074 段为进口浅埋洞身段,0+074~1+233 为洞身段,洞身全长 1 199.0 m;桩号 0+574.18 处与坝轴线帷幕灌浆桩号重合,此桩号前主要坡降  $i=2.0\%$ ,此桩号后主要坡降  $i=11.07\%$ ,灌浆平洞兼作 1 号通气洞,与桩号 0+594.18 处通

收稿日期:2023-08-23

气竖井连接贯通;桩号 0+948 设置 2 号通气洞,桩号 1+233~1+246 为出口明渠段。洞身全断面衬砌,衬后净断面尺寸 13.0 m×18.0~17.0 m 和 13.0 m×13.0 m(宽×高)。

## 2 工程地质

洞身 0+034~1+233 除进口浅埋洞身段外垂直埋深 55.0~110.0 m。围岩为燕山期中粒黑云母二长花岗岩,岩石风化以构造裂隙风化夹层为主要特征。岩体中主要发育四组优势裂隙:(1)  $N20^{\circ}\sim 40^{\circ}W/NE(SW)\angle 65^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ,延伸长大于 10.0 m,间距 0.2~0.5 m,裂面多平直粗糙,部分形成挤压破碎带;(2) 近  $EW/S(N)\angle 60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,延伸长 5.0~15.0 m,间距 0.1~0.5 m,裂面多平直,个别起伏、粗糙;(3)  $N50^{\circ}\sim 70^{\circ}E/SE(NW)\angle 70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 间距 0.1~0.5 m,裂面多平直,个别起伏、粗糙;(4)  $N20^{\circ}\sim 60^{\circ}E/SE(NW)\angle 10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,走向变化大,延伸长 5.0~20.0 m,间距 0.2~0.5 m,多平直、粗糙。岩体完整性较好,呈块状~次块状结构。因构造风化夹层较发育,岩体稳定性差,以 IV、V 类围岩为主。III 类围岩约占 5%、IV 类围岩约占 53%、V 类围岩约占 42%,具备成洞条件。桩号 0+650 和 0+750 附近有 fz6 和 Fz1 断层通过,出露宽度分别为 2.0 m 和 8.0 m,破碎带多由断层泥、糜棱岩及全~强风化的碎块岩组成,地下水较活跃,围岩主要为 V 类,稳定性极差。

## 3 开挖设计

### 3.1 开挖程序

开挖程序为:施工准备→施工测量→洞脸支护→洞身第一层开挖支护→洞身第二层开挖支护→洞身第三层开挖支护→保护层开挖支护。

### 3.2 施工原则

溢洪洞开挖按照新奥法原理组织施工,软岩地段施工坚持“弱爆破、短进尺、强支护、早封闭、勤测量、紧衬砌”的原则,加强监测,控制围岩变形。在施工中积极推广应用国内外隧道施工新技术、新工艺,投入先进的施工机械设备,组成钻、爆、挖、装、运、锚、衬等机械化作业线。

施工中进行超前地质预报,采用先进的量测、探测技术取得围岩状态参数,通过对数据的分析和处理,及时反馈信息指导施工。

### 3.3 分层设计

溢洪洞洞身开挖断面最大高度 20.6 m,最小

断面高度 13.32 m,最大断面分 3 层及保护层,最小断面分 2 层及保护层,第一层高度 9.0 m、第二层高度 3.12~5.0 m、第三层高度 3.8~5.4 m,保护层厚度 1.2 m。0+074~0+094 段高度 20.6 m、0+094~0+200 渐变段高度由 20.6 m 渐变到 19.0 m、0+200~0+574.18 段高度 19.0 m、0+574.18~0+749 段高度由 19.0 m 渐变到 15.0 m、0+749~1+246 段高度 15.0 m。分层开挖示意分别见图 1、2。

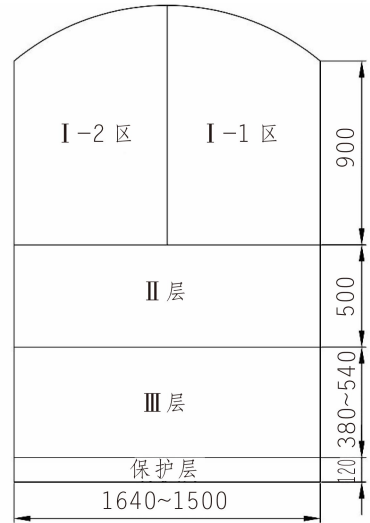


图 1 分三层开挖示意图(单位:cm)

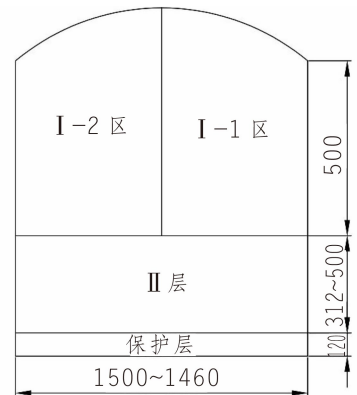


图 2 分两层开挖示意图(单位:cm)

### 3.4 施工组织<sup>[1]</sup>

溢洪洞洞身段开挖设置进口段、施工支洞控制段、出口段共 4 个开挖作业面,分别向上、下游推进。先进行出口洞洞身第一层开挖,待施工支洞开挖支护完成后进行中间段洞身第一层开挖,在进口浅埋段 0+034~0+074 处理完成后进行进口洞身第一层开挖,第一层分 1、2 区先后开挖,

先施工中间导洞,后两侧开挖;第一层开挖贯通、初期支护完成即进行第二、三层开挖,第三层开挖滞后第二层开挖 100.0 m;最后进行保护层开挖,保护层开挖滞后第三层开挖 100.0 m<sup>[1]</sup>。

## 4 爆破设计

### 4.1 爆破程序

爆破程序为:施工准备→开挖断面测绘→超前支护→钻孔→爆破→通风散烟→初期支护→出渣→下一循环开挖施工。

### 4.2 开挖工艺

#### 4.2.1 第一层开挖

洞身第一层[I-1)、I-2)]高度 9.0 m,采用中壁法将隧洞分隔为两个区域,区域 I-1 区

与 I-2 区爆破对称设计,参数相同。采取中部导洞超前、导洞开挖及两侧保护层开挖跟进的方式,平面上成品字形推进。为保证施工安全,导洞超前正洞 5.0~10.0 m。第一层开挖主要采用钻爆台车配合 YT-28 手风钻造孔,Ⅲ类围岩地段每台阶每次循环进尺 2.5 m,Ⅳ、Ⅴ类围岩地段第一层台阶每循环进尺 0.8~2.0 m,Ⅳ、Ⅴ类围岩开挖前做好超前支护,开挖后及时按照设计支护参数进行系统支护,确保隧洞围岩稳定<sup>[2]</sup>。第一层爆破设计见图 3。

第一层Ⅲ类围岩各区爆破参数见表 1,Ⅳ类围岩各区爆破参数见表 2,Ⅴ类围岩各区爆破参数见表 3。

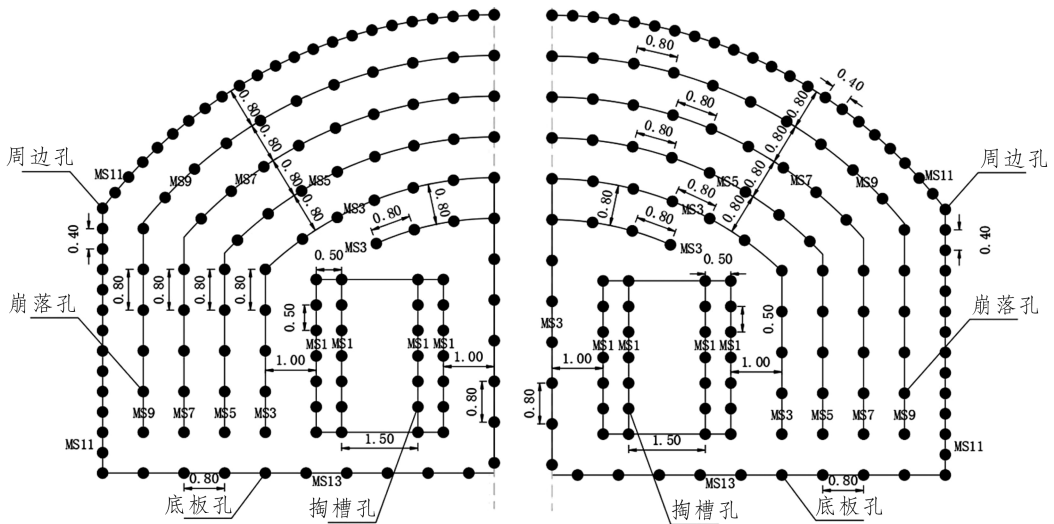


图 3 第一层爆破设计图(单位:m)

表 1 第一层Ⅲ类围岩各区爆破参数表

名称	段别	孔径/mm	孔深/cm	孔数/个	药卷直径/mm	装药长度/cm	堵塞长度/cm	单孔药量/kg	线装药密度/kg·m <sup>-1</sup>	单响药量/kg
掏槽孔	MS <sub>1</sub>	42	360	28	32	270	90	2.7	/	75.6
	MS <sub>3</sub>	42	330	22	32	240	90	2.4	/	52.8
崩落孔	MS <sub>5</sub>	42	330	13	32	240	90	2.4	/	31.2
	MS <sub>7</sub>	42	330	14	32	240	90	2.4	/	33.6
	MS <sub>9</sub>	42	330	16	32	240	90	2.4	/	38.4
周边孔	MS <sub>11</sub>	42	330	36	32	270	60	0.75	0.28	27
底板孔	MS <sub>13</sub>	42	330	9	32	240	90	2.4	/	21.6

#### 4.2.2 第二、三层开挖

第一层开挖支护贯通后,按设计断面尺寸先后进行第二、三层开挖。先开挖第二层、待掌子面推进 100.0 m 后开挖第三层,第二、三层每循环进尺 3.0 m。采用 100B 潜孔钻配合 YT-28 手

风钻造孔,周边孔光面爆破。出渣机械采用 3.0 m<sup>3</sup> 装载机(龙工 850)、2 台(1.2 m<sup>3</sup>/1.6 m<sup>3</sup>) 液压反铲挖装,配 25 t 自卸汽车出渣<sup>[3]</sup>。第二、三层爆破设计见图 4。

第二、三层爆破参数见表 4。

表2 第一层Ⅳ类围岩各区爆破参数表

名称	段别	孔径 /mm	孔深 /cm	孔数 /个	药卷直径 /mm	装药长度 /cm	堵塞长度 /cm	单孔药量 /kg	线装药密度 /kg·m <sup>-1</sup>	单响药量 /kg
掏槽孔	MS <sub>1</sub>	42	270	28	32	180	90	1.8	/	50.4
	MS <sub>3</sub>	42	240	22	32	150	90	1.5	/	33.0
	MS <sub>5</sub>	42	240	13	32	150	90	1.5	/	19.5
崩落孔	MS <sub>7</sub>	42	240	14	32	150	90	1.5	/	21.0
	MS <sub>9</sub>	42	240	16	32	150	90	1.5	/	24.0
	MS <sub>11</sub>	42	240	36	32	180	60	0.6	0.33	21.6
底板孔	MS <sub>13</sub>	42	240	9	32	150	90	1.5	/	13.5

表3 第一层Ⅴ类围岩各区爆破参数表

名称	段别	孔径 /mm	孔深 /cm	孔数 /个	药卷直径 /mm	装药长度 /cm	堵塞长度 /cm	单孔药量 /kg	线装药密度 /kg·m <sup>-1</sup>	单响药量 /kg
掏槽孔	MS <sub>1</sub>	42	130	28	32	90	40	0.9	/	25.2
	MS <sub>3</sub>	42	100	22	32	60	40	0.6	/	13.2
	MS <sub>5</sub>	42	100	13	32	60	40	0.6	/	7.8
崩落孔	MS <sub>7</sub>	42	100	14	32	60	40	0.6	/	8.4
	MS <sub>9</sub>	42	100	16	32	60	40	0.6	/	9.6
	MS <sub>11</sub>	42	100	36	32	90	10	0.2	0.22	7.2
底板孔	MS <sub>13</sub>	42	100	9	32	60	40	0.6	/	5.4

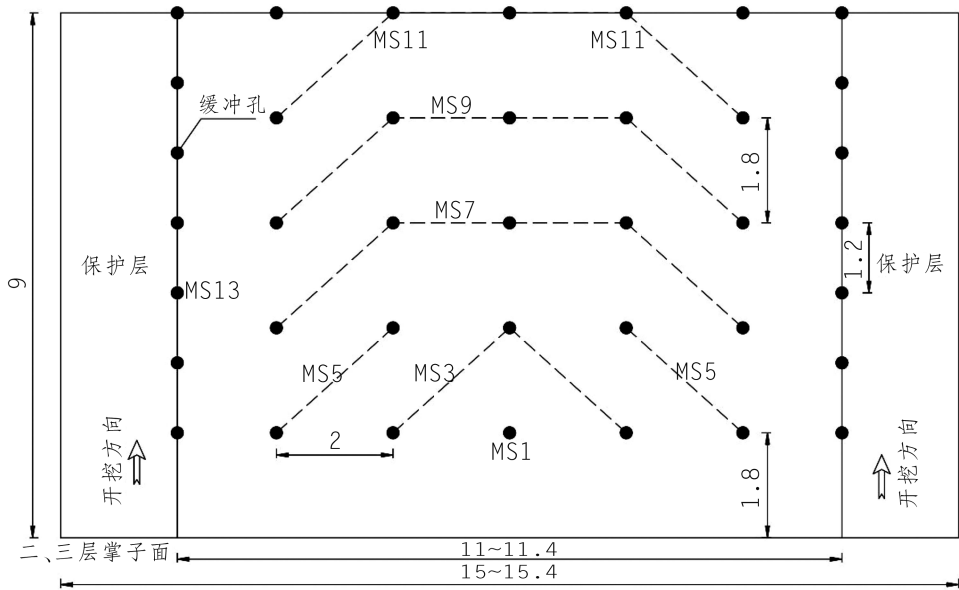


图4 第二、三层爆破设计图(单位:m)

#### 4.2.3 保护层开挖

第Ⅱ、Ⅲ层开挖及支护完成后,按设计断面尺寸进行保护层开挖,保护层厚1.2m,采取水平钻孔,在结构线进行光面爆破,爆破石碴采用反铲挖装,25t自卸汽车通过溢洪洞出口及下支洞运输至碴场。循环进尺3.0m。保护层爆破设计见图5。保护层爆破参数见表5。

## 5 支护设计

### 5.1 设计参数

Ⅲ类围岩采用挂网喷混凝土+系统锚杆支护形式,挂网采用 $\varphi 8@20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 参数,喷C20混凝土,厚10cm,锚杆采用直径28mmHRB400钢筋,长6.0m,入岩5.5m,间排距1.5m<sup>[4]</sup>。

Ⅳ类围岩采用挂网喷混凝土+系统锚杆+钢

表 4 第二、三层爆破参数表

名称	段别	孔径 /mm	孔深 /cm	抵抗线 /cm	孔数 /个	药卷直径 /mm	装药长度 /cm	堵塞长度 /cm	单孔药量 /kg	线装药密度 /kg·m <sup>-1</sup>	单响药量 /kg
主爆孔	MS <sub>1</sub>	90	500	70	1	70	390	110	26	/	26
	MS <sub>3</sub>	90	500	70	3	70	390	110	26	/	78
	MS <sub>5</sub>	90	500	70	4	70	390	110	26	/	104
	MS <sub>7</sub>	90	500	70	5	70	390	110	26	/	130
	MS <sub>9</sub>	90	500	70	5	70	390	110	26	/	130
	MS <sub>11</sub>	90	500	70	5	70	390	110	26	/	130
缓冲孔	MS <sub>13</sub>	42	500	70	16	32	450	50	1.35	0.27	21.6

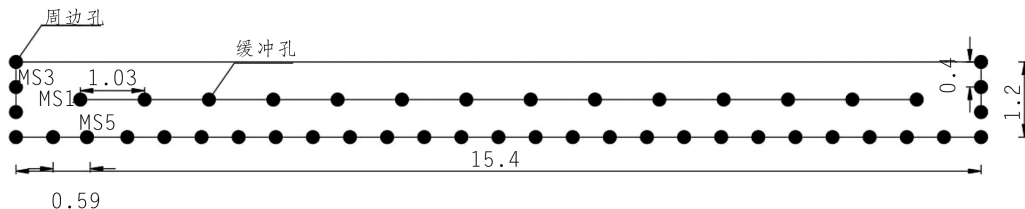


图 5 保护层爆破设计图(单位:m)

表 5 保护层爆破参数表

名称	段别	孔径 /mm	孔深 /cm	抵抗线 /cm	孔数 /个	药卷直径 /mm	装药长度 /cm	堵塞长度 /cm	单孔药量 /kg	线装药密度 /kg·m <sup>-1</sup>	单响药量 /kg
主爆孔	MS <sub>1</sub>	42	330	60	14	32	240	90	2.4	/	33.6
周边孔	MS <sub>3</sub>	42	330	60	6	32	270	60	0.75	0.28	4.5
底板孔	MS <sub>5</sub>	42	330	/	27	32	240	90	2.4	/	64.8

支撑支护形式,挂网采用  $\Phi 8@20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$  参数,喷 C20 混凝土,厚 15 cm,锚杆采用 HRB400 钢筋,长 6.0 m,入岩 5.5 m,间排距 1.5 m。钢支撑采用 I 20 a 工字钢,间距 1.0 m,连接筋采用  $\Phi 20$  钢筋,间距 1.0 m;锁脚锚杆采用  $\Phi 28$  HRB400 钢筋,长 6.0 m,每榀钢支撑布置 14 根。

V 类围岩采用挂“网喷混凝土+系统锚杆+钢支撑”支护形式,挂网采用  $\Phi 8@20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$  参数,喷 C20 混凝土,厚 20 cm,锚杆采用  $\Phi 28$  HRB400 钢筋,长 6.0 m,入岩 5.5 m,间排距 1.0 m。钢支撑采用 I 25 a 工字钢,间距 0.75 m,连接筋采用  $\Phi 20$  钢筋,间距 1.0 m;锁脚锚杆采用  $\Phi 28$  HRB400 钢筋,长 6.0 m,每榀钢支撑布置 14 根。

## 5.2 施工工艺

锚杆施工采用“先插锚杆后注浆”的施工工艺,Ⅲ类、Ⅳ类围岩永久支护顺序为:开挖→初喷 3~5 cm 厚 C20 混凝土→系统锚杆施工→挂网→复喷;Ⅴ类围岩支护顺序为:开挖→初喷 3~5 cm 厚 C20 混凝土→工字钢拱架安装→系统锚杆施

工→挂网→复喷。Ⅲ类围岩施工时,随机支护紧跟开挖面,滞后 10.0~15.0 m 实施系统支护,Ⅳ级、Ⅴ类围岩施工时,系统支护应紧跟开挖面,整个洞身施工过程中若遇特殊地质段需按设计要求进行处理。锚喷支护跟进的关系及滞后的控制距离将根据现场情况及地质状况适当调整。当开挖与支护相冲突时,优先保证支护,确保围岩稳定与施工安全。

## 5.3 支护措施施工<sup>[2-3]</sup>

### 5.3.1 超前锚杆施工

超前锚杆主要设置在隧道Ⅳ类、Ⅳ类加强及Ⅴ类围岩地段,超前锚杆长度 4.5 m,外插角 5~10°,环向间距 40 cm,纵向间距 3.0 m,搭设长度不小于 1.0 m。超前锚杆采用 YT-28 型手风钻进行钻孔,钻孔达到设计深度后,利用高压风进行清孔,清孔结束,采用风钻将锚杆顶入,锚杆尾部外露长度适中,超前锚杆外插角严格按设计要求施工,尾部与搭设并焊接在钢拱架外缘,成为一体。超前锚杆与线路中线方向大致平行,孔位钻设偏差不超过 10 cm,孔径符合设计要求。超前锚杆采用

注浆机注浆,注浆压力为1~1.5 MPa,锚杆注浆后,在砂浆凝固前,不得敲击、碰撞和拉拔锚杆。

### 5.3.2 超前小导管施工

超前小导管设置在洞身段V类及V类加强围岩地段,采用外径48 mm,壁厚4 mm,长450 cm的热轧无缝钢管,在钢管距尾端0.3 m范围外钻 $\phi 8$  mm压浆孔。钢管环向间距约35 cm,排距3.0 m,外插角控制在5~10°,尾端支撑于钢架上或焊接于系统锚杆的尾端,每排小导管纵向搭接不少于1.0 m。施工时采用YT28气腿钻钻孔,顶推法入孔。注浆前对掌子面喷浆封闭,避免因岩石裂隙而漏浆。用注浆泵进行压浆,超前注浆小导管注浆材料为水灰比为1:1的水泥浆,注浆压力1~2 MPa,注浆结束后对孔口进行填充封堵。注浆管的外露端支撑于钢拱架上,共同组成预支护体系。注意确保每环间的搭接长度不小于1.0 m。

### 5.3.3 超前管棚施工

超前管棚设置在洞身段V类及V类加强围岩地段,采用外径125 mm,壁厚6 mm,长450 cm的热轧无缝钢管(入岩4.5 m,外露0.5 m)。沿开挖轮廓线周边测量放样布孔。管棚钻机进入工作面,调整就位后,钻架顶紧掌子面,使用顶驱液动锤把套管与钻杆同时冲击回转钻入第一节钻杆和套管。当第一节钻杆和套管钻入岩层,尾部剩余20~30 cm停止钻进,用液压夹头夹紧钻杆和套管,钻机低速反转,脱开钻杆和套管。钻机沿导轨退回原位,装入第二节钻杆和套管,并在钻杆和套管前端安装好联接套,钻机低速送至第一节钻杆和套管尾部,方向对准后连接成一体,继续钻进。按同样方法继续接长钻杆和套管。钻孔达到要求深度后,先把套管内孔注水清洗干净,才按与钻进相反步骤拆卸钻杆,套管留在孔内供护孔用。将钢花管插入套管内,钢管用丝扣联接,钢管终端密封。钢花管在插进到位后,分节取出套管。继

续钻进其他孔,直至所有钢花管安装完毕。钢管口端与孔口周壁用喷射混凝土密封作止浆墙。用高压将浆液压入钢花管内,浆液通过钢花管孔渗入孔壁的缝隙内,固结附近岩土层,注浆采用先灌注“单”号孔,再灌注“双”号孔的方法。

## 6 结语

巴拉水电站溢洪洞“裁弯取直”布置于大坝左岸,洞轴线与坝轴线呈85°04'03"夹角,开挖断面最大高度达20.6 m,最大宽度达16.4 m,是非常典型的超大断面洞室。溢洪洞进口段围岩稳定性差、垂直埋深浅,最小垂直埋深仅2.8 m,不足1倍洞径,属于超浅埋洞段,成洞条件差,且位于高寒地区,施工难度极大。为保障施工安全,已在进口段采用预固结灌浆等措施。洞身段在开挖过程中坚持“弱爆破、短进尺、强支护、早封闭、勤测量、紧衬砌”的新奥法开挖原则,虽然在整体进度安排上亮点并不突出,但洞室超挖量小,半孔率高,开挖质量与安全均得以保证,未发生任何安全、质量事故,节省了大量的隐患处理时间,总体进度可控。

本文对巴拉水电站溢洪洞开挖支护方式进行分析,针对高寒地区复杂地质条件下特大断面洞室的成功开挖经验进行分享,为其他类似工程提供参考借鉴。

### 参考文献:

- [1] DL/T 5201-2004. 水电水利工程地下工程施工组织设计导则[S].
- [2] NB/T 10391-2020. 水工隧洞设计规范[S].
- [3] DL/T 5135-2013. 水电水利工程爆破施工技术规范[S].
- [4] 曾鸣. 巴塘水电站溢洪洞特大断面洞室开挖支护技术[J]. 四川水力发电, 2020, 39(增1): 48-49.

### 作者简介:

张强(1998-),男,四川攀枝花人,学士,从事现场工程管理工作;

杨洋(1997-),女,四川兴文人,学士,从事工程建设管理工作;

徐琨武(1982-),男,青海乐都人,学士,从事水电工程建设管理、流域开发工作。(责任编辑:卓政昌)

## 足木足公司举办2023年度职工运动会

为深入学习贯彻党的二十大精神,营造团结和谐、聚力发展的良好氛围,10月3日至5日,足木足公司举办了“践行二十大,奋进新征程”2023年度职工运动会,进一步振奋精神、凝聚力量。公司干部职工共计60余人参加比赛。本次运动会设有健步走、羽毛球、乒乓球、气排球和棋牌5个比赛项目,集竞技性、协作性、挑战性和趣味性于一体,既强调个人能力,又检验团队协作;既是力量的角逐,又是智慧的较量。三天的比赛中,选手们坚持友谊第一、比赛第二的原则,发扬团结拼搏、奋勇争先的精神,秉持乐观积极、自信顽强的态度,尽显竞技风采,经过多轮角逐,最终评选出了各项比赛的冠、亚、季军。

(摘自中电建水电开发集团有限公司官网)