金沙江白鹤滩水电站地下厂房玄武岩洞室群施工技术创新

樊启祥^{1*}, 汪志林¹, 何炜¹, 林鹏², 王红彬¹, 徐建荣³, 段杭¹

1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038;

2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084;

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122

* E-mail: qx_fan@chnng.com.cn

收稿日期: 2021-02-02; 接受日期: 2021-05-07; 网络版发表日期: 2021-09-02

摘要 白鹤滩水电站地下厂房基本对称布置在金沙江下游高山峡谷河段左右岸的玄武岩山体内部, 各安装8台单机1000 MW的水轮发电机组, 其单机容量、总装机容量、主厂房跨度(34 m)、穹顶型尾调室直径(最大48 m)及地下洞室群规模均居世界地下厂房之首。厂房洞室群布置复杂、相互关联、挖空率高, 位于以水平构造应力为主的高地应力区, 围岩隐裂隙发育、坚硬性脆、起裂强度低, 局部发育柱状节理玄武岩, 多处围岩被长大软弱缓倾角错动带切割, 洞室群开挖施工的安全稳定面临严峻挑战。针对高地应力环境下白鹤滩地下厂房脆硬玄武岩内部破裂、错动带不连续变形、洞室群围岩时空变形联动效应的响应特征和演化规律, 遵循地下厂房洞室群“认识围岩、利用围岩、保护围岩、监测围岩、反馈优化”的建设思路和“开挖一层、分析一层, 预测一层, 验收一层”的工作程序, 提出了“超前预控制、垂直薄分层、平面细分区、进尺短步长、爆破精细严、快速强支护、全程勤量测、数据快反馈、动态反演优化”的玄武岩洞室群围岩时空变形调控全过程施工技术, 确保了白鹤滩地下厂房的安全优质有序建设, 促进了中国水电工程建设技术进步, 对同类工程具有指导意义。

关键词 地下工程, 白鹤滩水电站, 玄武岩洞室群, 时空变形调控, 施工技术

1 引言

中国西南地区水能资源丰富, 是中国最重要的水电开发区域。受青藏高原新生代碰撞隆升的影响, 该地区河谷狭窄深切, 地质条件复杂, 水电工程发电厂房常采用地下型式布置, 如乌东德^[1]、溪洛渡^[2]、向家坝^[3]、小湾^[4]、锦屏I级^[5]等一系列地下厂房洞室群。

由表1所示的近期主要水电工程地下厂房规模可见, 洞室跨度已突破30 m, 高度接近或超越80 m。白鹤滩水电站安装有世界上最大单机容量1000 MW的水轮发电机组, 地下厂房洞室群建在一个非常典型的脆硬性玄武岩与柱状节理发育、长大错动带贯通的高地应力复杂地质环境中。从总体尺寸、主厂房跨度及洞室群相互关系看, 白鹤滩地下厂房洞室群的工程规模和集中

引用格式: 樊启祥, 汪志林, 何炜, 等. 金沙江白鹤滩水电站地下厂房玄武岩洞室群施工技术创新. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1088–1106
Fan Q X, Wang Z L, He W, et al. Technological innovations in construction of underground caverns in basaltic rocks at Baihetan Hydropower Station on Jinsha River (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1088–1106, doi: 10.1360/SST-2021-0053

表 1 中国近20年来建设的主要大型水电站地下厂房特征参数及岩性

Table 1 Characteristic parameters and lithology of underground powerhouses of major large hydropower stations built in China in the past 20 years

电站名称	机组台数×单机容量 (MW)	主厂房长×宽×高 (m)	埋深 (m)		最大主应力 (MPa)	岩性	围岩质量等级
			水平	垂直			
三峡 ^[6]	6×700	311.3×32.6×88.62		60~80	11	花岗岩	II类为主
向家坝 ^[7]	4×800	255.4×33.4×85.2	130	120~240	12.2	砂岩	II类为主, 少量III类
溪洛渡 ^[2]	左岸	384.03×31.9×75.6	300~450	340~480	21.06	玄武岩	II, III类为主
	右岸	387.6×31.9×75.6	330~450	380~460	20.49		II, III类为主
白鹤滩 ^[8]	左岸	438×34×88.7	600~1000	300~330	33.39	玄武岩	III ₁ 类为主, 少量II类
	右岸	438×34×88.7	420~800	420~540	30.99		III ₁ 类为主, 部分III ₂ 类
乌东德 ^[9]	左岸	333×32.5×89.8	75	160~540	11.6	灰岩、大理岩、白云岩	II, III类为主
	右岸	333×32.5×89.8	66	210~390	8.2		II, III类为主
锦屏一级 ^[10]	6×600	276.99×28.9×68.8	110~300	180~350	35.65	大理岩	III ₁ 类为主, 部分III ₂ 类
锦屏二级 ^[11]	8×600	352.4×28.3×72.2	170	180~320	22.9	大理岩	III类为主
小湾 ^[12]	6×700	298.4×30.6×84.88	350~550	300~500	28	黑云花岗片麻岩	II~III类为主
龙滩 ^[13]	9×700	388.8×30.3×74.5		100~280	13	砂岩、泥板岩、灰岩	II~III类为主

布置程度当属世界首位; 从围岩稳定控制难度与质量安全风险看, 其综合建设难度位居世界前列。

白鹤滩水电站场区广泛分布着隐晶质玄武岩, 其在地应力作用下表现出非常显著的脆硬性特征^[14], 容易造成开挖过程中出现片帮、岩爆等围岩破坏现象^[15]。刘国锋等人^[8]采用现场调查与原位测试等方法, 揭示了白鹤滩水电站施工过程中围岩片帮破坏特征和机理, 阐明了开挖施工顺序和支护时机与围岩片帮破坏之间的密切联系。白鹤滩水电站场区还发育众多的层间和层内错动带, 部分长大错动带充填泥夹岩屑等软弱物质, 遇水易软化, 并贯通整个地下厂房的顶拱和高边墙等不同位置。由于白鹤滩场区错动带材料抗剪强度低, 在地应力条件下易发生塑性变形, 导致错动带上下盘岩体的不连续变形^[16], 洞室群围岩在开挖过程中出现以塑性挤出型拉伸破坏、结构应力型塌方和剪切滑移破坏等模式为主的变形破坏现象^[17]。针对白鹤滩场区错动带的不连续变形特征, Zhao等人^[18]和程普等人^[19]讨论了通过锚索、置换洞等加固措施

来控制长大层间错动带引起的围岩不连续变形的合理性与有效性, 为错动带斜切的地下厂房洞室群变形控制和安全施工提供了参考。

岩石和岩体在工程扰动下的变形明显地表现出与时间有关的特性^[20], 加之地下洞室自身的三维空间效应, 地下洞室围岩施工变形呈现出显著的时效特征, 这是地下洞室施工变形预测必须考虑的问题。国内外众多学者通过分析隧洞围岩时空变形规律, 揭示了开挖卸荷应力释放与单个洞室时效变形及稳定性的关联关系^[21~24]。对于复杂洞室群的开挖成型过程, 不仅要考虑单个洞室开挖空间效应引起的时效变形, 更要关注洞室之间围岩施工联动和洞室群效应带来的围岩时效变形。这就要求在洞室群设计时关注洞室之间的合理间距以及洞室的结构形式, 在洞室群施工中关注洞室之间的施工顺序与支护体系和施工进度之间的关系。

白鹤滩地下厂房洞室群具有高边墙、大跨度和集中布置、立体交叉、相互关联的结构特点, 且玄武岩洞室群位于以水平构造应力为主的高地应力区^[25], 隐

裂隙发育、岩质坚硬性脆, 围岩内发育多条长大软弱错动带, 局部有柱状节理玄武岩, 洞室群施工过程中的围岩变形时空效应显著, 给洞室群的稳定控制带来严峻挑战. 本文结合现场揭示的地质条件、设计与施工方案和监测数据, 通过理论分析、室内试验与现场测试、数值分析与工程类比、实时监控与反馈优化等多种手段, 系统研究多种因素联合作用下的围岩时空变形特征和规律, 形成了围岩变形时空调控的施工技术, 为地下厂房洞室群布置优化、支护设计、施工时序及建设管理提供技术支撑.

2 工程概况与特点

2.1 白鹤滩水电站工程及地下厂房洞室群

白鹤滩水电站为金沙江下游河段水电梯级开发的第二个电站, 位于四川省宁南县和云南省巧家县境内, 电站总装机容量16000 MW, 电站多年平均发电量625.21亿kW h, 是“西电东送”的骨干电源点之一. 水库总库容206.27亿 m^3 , 仅次于三峡工程; 枢纽工程主要由289 m高混凝土双曲拱坝、二道坝及水垫塘、岸边泄洪洞和地下引水发电系统等构筑物组成(图1)^[26]; 坝身布置有6个泄洪表孔和7个泄洪深孔; 泄洪洞共3条, 均布置在左岸; 左岸、右岸地下厂房各布置8台单机容量1000 MW的水轮发电机组^[27,28].

白鹤滩地下引水发电系统采用首部开发方案, 左右岸基本对称布置(图1). 地下厂房四大洞室(即主副厂房、主变洞、尾水管检修闸门室、尾水调压室)平行布置(图2). 左右岸主副厂房洞长438 m, 高88.7 m, 岩壁梁以下宽31 m、以上宽34 m. 主变洞布置在主副厂房洞下游侧, 净间距60.65 m, 主变洞总长368 m、宽21 m、高39.5 m. 尾水管检修闸门室布置于主变洞与尾水调压室之间, 每条尾水连接管设一道检修闸门, 闸门室跨度12.1~15 m, 长374.5 m, 直墙高30.5~31.5 m. 尾水调压室两机共用一室, 采用圆筒阻抗式独立布置形式. 两岸厂房1[#]~8[#]尾水调压室开挖直径为43~48 m, 调压室竖井开挖高度为57.92~93 m.

白鹤滩地下厂房洞室群数量众多、立体交叉、密集布置、相互关联, 四大洞室开挖边界空间范围内挖空率高达37%, 地下厂房的单机容量、总装机容量、主厂房跨度及洞室群规模、尾调室直径均居世界已建、在建水电工程之首, 综合技术难度在世界水电史上名列前茅.

2.2 工程地质条件

2.2.1 脆硬玄武岩

白鹤滩地下厂房洞室群赋存区岩性为玄武岩, 单斜岩层, 左岸岩层总体产状为 $N42^\circ\sim45^\circ E$, $SE\angle 15^\circ\sim 20^\circ$, 右岸岩层总体产状为 $N48^\circ\sim 50^\circ E$, $SE\angle 15^\circ\sim 20^\circ$.

图1 (网络版彩图)白鹤滩水电站枢纽及地下厂房洞室群布置图^[26]

Figure 1 (Color online) Layout of pivotal and underground caverns of Baihetan Hydropower Station ^[26].

图 2 (网络版彩图)白鹤滩左岸地下厂房洞室群纵剖面图
Figure 2 (Color online) Longitudinal profile of the Baihetan underground caverns in the left bank.

工程场区玄武岩分为熔岩类、火山碎屑岩类(凝灰岩)、火山碎屑熔岩类(角砾熔岩)三大类。熔岩类又分为块状玄武岩、柱状节理玄武岩两个亚类;块状玄武

岩细分为隐晶质玄武岩、杏仁状玄武岩和斜斑玄武岩。隐晶质玄武岩为致密块状构造,主要分布于岩流层的中下部。工程场区玄武岩属坚硬岩,各类玄武岩特征各异,微新隐晶质玄武岩、杏仁状玄武岩和斜斑玄武岩饱和单轴抗压强度平均值分别为112, 99和9 MPa,抗拉强度分别为5.5, 4.5和4.5 MPa^[29]。

2.2.2 柱状节理玄武岩

白鹤滩场区柱状节理玄武岩呈灰黑色,主要为隐晶质玄武岩及含斑玄武岩,斑晶及微晶为斜长石、辉石,基质为玄武玻璃。根据柱体直径大小及微裂隙发育情况可分为三类,具体特征可见文献[28]。左岸主厂房区地层为 $P_2\beta_3^3 \sim P_2\beta_3^1$ 层,岩性为块状玄武岩、角砾熔岩,夹薄层凝灰岩,柱状节理不发育。右岸主厂房区地层为 $P_2\beta_3^3 \sim P_2\beta_6^1$ 层,岩性主要为块状玄武岩、角砾熔岩, $P_2\beta_3^3$ 层第一类柱状节理玄武岩在地下厂房北侧底部局部小范围出露(图3), $P_2\beta_6^1$ 层第二类柱状节理玄

图 3 (网络版彩图)右岸主厂房工程地质条件。(a) 地层分布;(b) 开挖揭露柱状节理;(c) 错动带
Figure 3 (Color online) Engineering geological conditions of underground powerhouse in the right bank. (a) Stratigraphic distribution; (b) excavation-exposed columnar joints; (c) shear zones.

武岩在南侧8#尾水调压室穹顶局部小范围出露, 夹薄层凝灰岩。

2.2.3 层间错动带

白鹤滩地下厂房围岩缓倾角层间、层内错动带等结构面发育(图3), 长大软弱结构面与左右岸地下厂房洞室群的关系见图4。左岸 C_2 层间错动带沿 $P_2\beta_2^4$ 层凝灰岩中部发育, 错动带厚度10~60 cm, 平均厚约20 cm。右岸 $P_2\beta_4^3$ 层凝灰岩中发育 C_3 , C_{3-1} , C_4 , C_5 层间错动带。其中, C_3 和 C_{3-1} 斜切主厂房高边墙, C_4 斜切地下厂房南侧顶拱, C_4 和 C_5 在尾水管检修闸门室和尾水调压室边墙或顶拱出露。两岸错动带以泥夹岩屑型为主, 具有软弱破碎、裂隙发育、遇水软化等特点, 物理力学参数低、抗剪切能力差。

2.2.4 地应力及围岩分类

白鹤滩地下厂房区地应力以构造应力为主^[25], 左岸、右岸地下厂房第一主应力分别为19~23 MPa和22~26 MPa, 走向分别为NWW向和NNE向。左右岸岩体强度应力比(R_b/σ_1)分别为3.22~5.89及2.85~5.09, 均属高应力区, 具备应力型破坏发生条件。由图1可见, 左岸地下厂房区最大主应力方向与主厂房轴线大角度($50^\circ\sim 70^\circ$)相交, 右岸地下厂房区最大主应力方向与主厂房轴线小角度($10^\circ\sim 30^\circ$)相交。

根据中国水电工程围岩分类方法和标准^[30], 左岸地下厂房围岩以III₁类为主, 占62%, II类围岩占25%, IV类占10%, 其余为III₂类围岩; 右岸地下厂房围岩类别以III₁类为主, 占80%, II类占5%, IV类占10%, 其余为III₂类。总体看, 白鹤滩左右岸地下厂房围岩完整性较好。除层间错动带等构造影响部位局部为IV类围岩外, 其他洞段都为II, III₁和III₂类围岩, 且以III₁类围岩比例最高。

2.3 围岩变形特征与控制要求

2.3.1 脆硬玄武岩变形特性

从玄武岩岩块、岩体及工程岩体的三层次力学特性看, 白鹤滩玄武岩隐裂隙发育, 峰值强度高、极限应变小, 峰后跌落快、残余强度低, 尤其是隐晶质玄武岩脆性破坏最为典型, 属脆硬性玄武岩。从完整岩体到碎裂破坏体的压缩试验揭示起裂强度约40 MPa, 起裂应力值明显低于其峰值强度, 约40%左右。另外, 白鹤滩厂房玄武岩强度应力比低, 开挖重分布应力最大值位于完整的坚硬岩体内, 达到60 MPa, 浅层围岩破裂后岩体力学性质劣化, 导致围岩破裂逐步向深层发展。前期勘探平硐施工出现的围岩片帮现象, 在各岩层内均有发育, 并以隐晶质玄武岩和斜斑玄武岩层内最为显著。

2.3.2 层间错动带变形特性

白鹤滩长大缓倾错动带的变形特性, 直接影响着洞室群尤其是主厂房的围岩稳定性。以左岸 C_2 层间错动带为例, 围岩变形仿真分析结果^[31]表明: 无错动带时, 边墙变形规律表现为中部变形最大, 上游大于下游, 最大变形值在70 mm量级; 考虑 C_2 错动带后, 边墙围岩变形深度有所增加, 整体变形超过100 mm量级, 其中 C_2 错动带沿线变形最大, 达120 mm; 受 C_2 错动带影响, 下游边墙的大变形范围和量级大于上游边墙。总体上, C_2 错动带的存在加剧了厂房高边墙围岩松弛变形, 导致了错动带扰动区整体性劣化, 引起上下盘围岩不协调变形及边墙整体变形量增大, 成为左岸地下厂房边墙变形的控制性边界。

2.3.3 洞室群围岩变形联动关系

白鹤滩地下厂房洞室群围岩变形联动效应显著,

图4 (网络版彩图)白鹤滩地下厂区别错动带分布。(a) 左岸地下厂房洞室群; (b) 右岸地下厂房洞室群

Figure 4 (Color online) Distribution of shear zones in the Baihetan underground area. (a) Underground caverns on the left bank; (b) underground caverns on the right bank.

主要表现在两个方面. 第一是大跨度洞室与相邻小洞室的关系. 大跨度主厂房开挖导致的围岩应力调整范围大, 影响周边小洞室的变形响应; 周边交汇小洞室如上游墙引水平洞、下游墙主变洞、相邻排水廊道的开挖施工也会作用于地下主厂房围岩变形. 例如, 主厂房开挖易引起主变洞围岩变形缓慢增长, 两者在变形发生时间点上具有吻合特征. 第二是立体交叉洞室相互开挖时序关系. 洞室间的贯通是分隔的小洞群向大洞群转变的过程, 当洞群间承受围岩荷载的隔墙开挖卸荷后, 洞室群围岩应力及变形发生较大调整. 例如, 尾水闸门井的下部开挖贯通, 使右岸主厂房南端顶拱和下游边墙、主变洞上游围岩出现明显的联动变形.

2.3.4 白鹤滩洞室群围岩变形控制相关要求

为减少地下洞室开挖成型过程中应力集中分布的程度, 在满足电站功能要求的基础上, 需要结合地应力场的特性, 对建筑物的布置方式及结构体型进行研究, 如集中布置和分散布置, 如长廊型与圆筒型结构, 如不同洞室的间隔距离, 以及洞室轴线方向等, 即以合理的布置方式及结构形式减少高应力集中和大范围松弛变形.

为了限制洞室围岩变形破坏萌生与发展, 开挖施工要坚持小扰动、快封闭、及时支护且支护适应围岩应力调整等原则. 同时, 针对层间层内错动带等特殊地质问题, 要采取专门的加固措施以控制其不协调变形. 例如, 采用置换洞方案, 对错动带出露口区域上盘岩体提前进行深层锚索加固, 对 C_2 层间错动带出露区及时进行浅层锚杆及深层锚索等锁口处理, 配合错动带的排水、防渗处理, 可以有效抑制高边墙的深部及浅表部错动变形, 围岩变形范围和量级均大幅减小, 不连续变形基本控制在20 mm以下^[17].

针对白鹤滩地下厂房洞室群洞群效应带来的围岩联动变形问题, 需要在洞室群结构体型和布置优化的基础上, 进行洞室群开挖顺序与支护措施的动态调整, 不同洞室开挖应注意空间上错距、时间上错时, 支护及时跟进, 加强交汇洞室贯通及保留隔墩岩体的支护, 从而获得地下洞室群的最优开挖组合方案, 以减少围岩破裂深度和程度. 洞室间贯通开挖顺序遵循“先洞后墙”原则, 如尾水支管进入主厂房下部岩体时, 要对尾水支管之间的隔墙及主变洞下部岩体进行对穿锚索及端头锚索的系统支护; 尾水闸门井的下部开挖时, 要及

时加固挖空率最大的主厂房、主变洞、尾水闸门井及施工支洞等交汇的下部区域, 为控制厂房洞室群围岩的整体变形提供保证.

3 洞室群围岩变形时空调控技术

白鹤滩地下厂房洞室群围岩时空变形规律复杂, 洞室群围岩变形综合调控与稳定控制难度大, 质量安全风险突出, 综合建设难度位居世界前列. 地下厂房洞室群的开挖成型一般持续4~5年, 大洞室分层分区分步逐步扩大和连续下挖的施工特性, 对洞群应力重分布影响大, 加上层间错动带的作用, 洞室群各开挖面及其影响区的变形具有很强的时空联动演变特性, 其变形随自身开挖和周边开挖呈现出增长、收敛、稳定, 再增长、再收敛、再稳定的演化过程. 白鹤滩地下厂房洞室群的建设过程也是逐步增强高地应力环境及层间错动带作用下脆硬玄武岩洞室群围岩变形时空联动规律的认识过程.

在水电岩石力学工程长期实践的基础上, 白鹤滩地下厂房工程遵循“认识围岩、利用围岩、保护围岩、监测围岩、反馈优化”的建设思路和“开挖一层、分析一层、预测一层、验收一层”的工作程序^[32], 采用勘查试验、理论分析、监测反馈、专家诊断等多种研究方法, 从围岩变形速率、变形趋势的分析中, 掌握复杂地质环境中洞室群围岩应力重分布、岩体特性和施工方法时效等因素的综合作用, 从时空次序及联动效应上优化开挖和支护体系, 控制卸荷梯度、减少开挖扰动、快速恢复围压, 限制浅层岩体松弛开裂, 控制深层岩体破裂变形, 基于“立体分层、平面分区、先洞后墙、及时支护”的施工原则, 形成了“超前预控制、垂直薄分层、平面细分区、进尺短步长、爆破精细严、快速强支护、全程勤量测、数据快反馈、动态反演优化”的高地应力脆硬玄武岩洞室群围岩时空变形调控全过程施工技术, 确保了地下厂房围岩变形稳定和洞室群整体安全. 白鹤滩地下厂房洞室群围岩变形时空调控技术体系如图5所示.

3.1 超前预控制

基于岩石力学特性及洞室群变形联动效应, 通过对不同支护体系、不同施工次序下洞室群围岩变形安全的整体、系统和动态分析, 在建筑结构体型外部和

图 5 (网络版彩图)地下厂房洞室群围岩变形时空调控技术体系
Figure 5 (Color online) Control techniques for the spatio-temporal deformation of the Baihetan underground caverns.

体型开挖出露之前, 主动对控制厂房区整体变形安全的关键部位与地质构造, 采取超前加固、置换等措施进行预先处理, 主要体现在洞室群布置优化、洞室群开挖时空次序优化、施工过程超前开挖支护以及长大层间错动带大变形预控等技术措施上, 具体有断层与错动带预置换体系、长大结构面深层超前锚固体系、岩壁梁成型预支护预灌浆体系、局部不利地质条件部位超前灌浆体系、机坑隔墩岩体预固结灌浆和超前锚索锚桩体系和地下厂区长大软弱地质构造防渗排水体系等措施。

岩壁梁区岩体预支护技术是在开挖分层分区分序及严格爆破控制的基础上, 一是对岩台区(III₆区)预留保护层岩体进行预保护, 对保护层临时暴露面紧跟掌子面喷射一定厚度(8 cm)的钢纤维混凝土(CF30)进行封闭, 限制保护层岩体松弛和垮塌, 并抑制岩台区围岩表层开裂; 二是对岩台区(III₆区)围岩及预留保护层进行预支护, 在裂隙发育或高地应力洞段施工三排全螺旋纤维增强树脂锚杆, 抑制围岩卸荷松弛和内部开裂。

地下厂房高边墙贯穿开挖遵循的“先洞后墙”原则也是超前施工的典型案列, 如与主厂房下部机坑相交

的尾水管提前贯入厂房高边墙2~3 m, 完成平洞内系统支护、锁口支护, 并在平洞内沿地下厂房边墙进行环向预裂, 减轻平洞开挖对高边墙的扰动, 提升平洞与高边墙交岔口的成型质量及变形能力。主厂房下部机坑间隔墩的完整性对降低厂房边墙高度, 限制应力调整, 减小厂房边墙变形, 保证厂房围岩稳定具有重要作用。制定了机坑隔墩岩体保护措施, 包括顶部预设50 cm厚盖重混凝土、竖向和水平双向锚索、系统沉头锚杆、锁口锚杆和灌浆预固结等。

3.2 垂直薄分层

地下厂房高边墙分层开挖高度的确定, 既要考虑一次开挖卸荷量和卸荷梯度, 实现分级卸荷缓和应力调整, 更要结合施工设备的工作特性和效率, 有利于锚索锚杆等支护措施的快速施加。近20年以来中国同等规模地下主厂房的开挖一般分为10层, 高边墙分层高度6~10 m。白鹤滩地下厂房设计阶段基本遵循了这一经验, 主厂房分10层、主变洞分5层、尾水管检修闸门室分4层、尾水调压室分3层。薄层开挖卸荷增量相对较小, 对围岩的损伤也相对较小, 且有利于提供

更好的支护时机和支护条件,以控制卸荷变形速率与增量.薄分层是面对白鹤滩主厂房下挖过程中顶拱及边墙围岩持续变形及岩体内部破裂特征而采取的主要措施,按照系统锚索设计排距并结合结构特征及施工设备能力进行开挖分层,一般为4~5 m.实施阶段,白鹤滩主厂房由10层细分16层,其中第IV~VII层为岩壁梁层以下、机坑以上的高边墙部位,高程602.3~562.4 m,开挖总高度39.9 m,分为7个4~5.5 m高的薄层.主厂房实施阶段开挖分层及岩壁梁和高边墙部位细部如图6所示.

3.3 平面细分区

在垂直薄分层的基础上,对每一层岩体的开挖支护在平面上细化分区分序,满足错时、错距和错层的要求.通过对不同分层高度及不同开挖爆破方式的数值分析^[32],结合顶拱实际施工成果,确定白鹤滩地下厂房高边墙各层开挖主要采用中间抽槽、两侧预留4~5 m厚保护层光面爆破的施工方案.保护层滞后中

部拉槽不超过20 m,上游侧保护层一侧开挖支护完成后方可进行下游侧开挖支护.具体来讲,顶拱层分为“三区四序”,岩壁梁层分为“三区六序”,高边墙大多数层分三个区并在立面上错层,机坑部位在平面间隔、立面错层的基础上分为“三层六序”.白鹤滩地下厂房高边墙部位分层分区分序开挖支护关系见图7,保护层开挖后紧跟掌子面初喷钢纤维混凝土,随后进行系统支护施工.

岩壁梁层(III层)的开挖爆破控制包括与岩壁梁成型质量密切相关的上一层(II层)和下一层(IV层)岩体的施工,具体见图7.其上一层岩体采用中间抽槽、两侧预留保护层竖向光面爆破的方案,其下一层岩体采用薄层光面爆破或两侧预裂、分半开挖方案,岩壁吊车梁层采用中部拉槽、保护层、岩台的“三区六序”精细化开挖爆破方案.

3.4 进尺短步长

在分层分区分序的基础上,发挥开挖、支护等施

图6 (网络版彩图)白鹤滩主厂房实际开挖分层及岩壁梁和高边墙细部图

Figure 6 (Color online) Diagram of actual excavation layers of the Baihetan underground powerhouse and detail drawings of the crane beam and high side wall.

图7 (网络版彩图)主厂房高边墙开挖分层分区及支护时序剖面图。(a) 开挖分层分区图; (b) 支护时序图

Figure 7 (Color online) Profiles of excavation partitions and support sequences of the underground powerhouse side wall. (a) Excavation partitions; (b) support sequences.

工设备的能力及作业方式的效率, 优化开挖爆破作业、出渣作业及支护作业的施工强度, 合理确定中间抽槽及两侧保护层的开挖进尺, 做到弱爆破、缓开挖, 为及时支护提供良好的作业条件。高边墙V₁层保护层开挖分步进尺为3 m时, 大型反铲配合自卸车出渣2 h, 反铲清面及初喷混凝土4 h; 每循环间隔布置系统砂浆锚杆与预应力锚杆各6根, 锚杆施工时间为3 d, 其中大型多臂钻钻孔1 d、插杆注浆0.5 d、待强张拉1.5 d; 每循环系统锚索约2束且单束锚索施工用时4.7 d, 合计每3 m进尺循环用时约8~10 d。

3.5 爆破精细严

通过数值分析和现场试验揭示的地下洞室开挖爆破扰动机理及响应特征, 确定了大跨度高地应力地下厂房个性化爆破技术标准。爆破质点振动速度在岩壁梁、机坑等关键部位不大于7 cm/s, 在顶拱、高边墙等部位不大于10 cm/s。制定了地下厂房顶拱、岩壁梁、高边墙、机坑等部位的精细化开挖爆破技术方案, 满足弱爆破、少扰动的控制要求。例如, 岩壁梁岩台区(III₆区)正式开挖爆破前, 选取地质条件相一致的非岩壁梁洞段进行了1:1开挖爆破模拟试验, 优化调整爆破参数。首先确定岩壁梁爆破质点振动速度不大于7 cm/s。由此, 光爆孔竖向孔线装药密度48~58 g/m, 斜向孔线装药密度65~85 g/m, 岩壁梁岩台最大单响药量按照60~70 kg进行控制(起爆段长约15 m)。其次确定爆

破成型质量控制标准。II类及III₁类、II₂类和IV类围岩半孔率分别达90%以上、60%~90%和40%~60%, 相邻两排炮之间台坎不大于10 cm, 相邻两周边孔之间平整度不大于10 cm, 爆破孔壁无明显爆震裂隙。为避免欠挖处理对已成型岩壁梁基岩面的次生破坏, III₆区垂直与斜面光爆孔钻孔分别按孔口超挖5 cm和孔底超挖10 cm进行控制。第三制定钻孔质量标准。钻孔孔位偏差周边孔不大于2 cm、主爆孔和缓冲孔不大于5 cm, 钻孔角度偏差要求周边孔不大于1°、主爆孔和缓冲孔不大于2°, 钻孔孔深偏差要求周边孔不大于3 cm、主爆孔和缓冲孔不大于5 cm。第四是对岩台区采用竖向和斜向双向手风钻钻孔、同时起爆的光爆开挖方式。第五是采用测量放样定位、设置钻孔样架和导向管、严格钻进工艺等措施, 使岩台上下直面和斜面的炮孔在一条线上, 确保爆破钻孔质量。

3.6 快速强支护

结合白鹤滩地下厂房洞室群开挖支护施工次序时效与围岩变形程度和深度, 确定白鹤滩地下厂房洞室群围岩支护设计。采用了超前加固和随层支护相结合的多方法支护体系, 以及系统性支护与针对性支护及随机支护相结合的喷锚支护体系, 来控制开挖变形。预应力锚索和锚杆是大型洞室开挖过程中用来控制围岩变形的的主要支护技术。锚索布置及锚索类型(对穿锚或端头锚)按一般地质条件洞段和特殊地质洞段, 结合

周边洞室进行个性化设计(表2), 以快速提供支护力。

例如, 高边墙第VI层保护层开挖每3 m进尺爆破开挖后24 h内完成初喷纳米钢纤维混凝土, 3 d内完成系统砂浆锚杆, 7 d内完成预应力锚杆, 锚索距掌子面不超过80 m。图8反映了左岸主厂房0+076 m上游侧边墙高程572 m围岩开挖支护变形时空协调关系, 开挖后围岩变形增大, 随支护措施的实施, 变形速率得到控制和减缓, 并在下一层开挖前保持稳定。同时, 改进湿喷台车和锚索施工工艺, 通过室内和现场试验, 掺入10%无机纳米硅粉(颗粒直径<350 nm), C25硅粉钢纤维混凝土的抗压强度(7 d强度36.3 MPa, 28 d强度52.1 MPa)、抗拉强度(28 d强度5.25 MPa)、黏结强度(28 d强度2.21 MPa)均较普通CF30钢纤维喷射混凝土有显著提高, 且一次喷射厚度从普通混凝土的5 cm增加至20 cm以上, 达到23.5 cm。为实现锚索快速成孔、快速张拉, 及时为卸荷岩体提供支护作用力, 研发大型高效锚索钻孔钻机, 制作整体移动式锚索作业台架, 并使用速凝高强水泥砂浆, 将传统锚索平均施工历时从9.75 d缩短至4.7 d。总体上, 白鹤滩主厂房高边墙爆破开挖后, 7 d内快速跟进砂浆锚杆支护和预应力锚杆支护等浅层支护, 一个月内完成预应力锚索深层支护, 即通过控制爆破开挖速度、及时快速施加各种支护, 对围岩开挖卸荷变形增长速率及变形稳定进行有效调控。

3.7 全程量测

建立完整的安全监测系统, 全过程、多物理量、多手段获取变形初始值和过程数据。地下厂房洞室群的开挖过程就是岩体应力的再调整重分布过程, 直观表现为岩体自身特性、围岩变形以及支护系统锚固力

的变化。一是开展爆破质点振动速度监测、岩体爆破前后声波试验, 开展锚杆注浆饱满度第三方试验; 二是通过代表性断面系统埋设多点位移计、位错计、锚杆锚索测力计等, 获取围岩变形及支护结构应力变化数据; 三是结合实际揭露的地质条件和监测异常情况, 采用岩体内部钻孔摄像、微震监测等多种手段, 进一步对岩体变形特征进行专项试验, 获取深部岩体变形破裂演化情况; 四是在厂房顶拱上部或其他部位增设必须的锚固观测廊道和设施, 如厂房顶拱预埋多点位移计, 厂房上、下游侧岩壁梁第III层开挖前在第5层排水廊道预埋多点位移计, 高边墙下部上游侧第VII层开挖前在引水下平施工支洞预埋多点位移计; 五是获取初始值, 及时调整监测数据的获取频率, 时刻把握工程现场的实施进展和安全要求。

3.8 数据快反馈

监测数据、施工数据和现场问题要及时快速反馈到各参建单位, 尤其是地质、设计及同步仿真分析的科研单位, 以发挥产学研用协同工作机制的作用。随着信息化、数字化技术的发展, 白鹤滩工程开发了喷锚支护现场试验检测管理系统、爆破开挖动态监测与反馈信息系统、施工期安全监测自动化与管理信息系统、支护自动预警控制系统等实时数据的感知传输共享系统, 可视化地捕捉洞群分层分区分步开挖过程中岩体卸荷变形、支护结构受力、长大错动带剪切位移的时空特征, 为动态反馈优化提供依据。建立安全监测预警机制, 由主体设计院结合科研单位计算分析成果, 提出围岩安全监测管理标准, 左岸主厂房第VI层开挖围岩稳定管理标准值见表3; 当地下洞室群安全监测数据变化达到“预警/危险”等级时, 由监测中心分析判

表2 主厂房锚索与锚杆布置主要参数

Table 2 Main layout parameters of anchor cable and rock bolt of the Baihetan underground powerhouse

支护类型	预应力锚索				锚杆	
	间距 (m)	排数	长度 (m)	锚固力 (kN)	砂浆锚杆	预应力锚杆
顶拱	3.6~4.8	4~6	25~29.5	2000	Ø 28 mm, 长6 m, 间隔1.2 m布置	
岩壁梁	5.6	1	25	2500	Ø 28 mm, 长6 m, 间隔1.2 m布置	
边墙一般洞段	10	间排距 3.6*3.8 m	25、30	2500	Ø 28 mm, 长9 m, 间隔1.2 m布置	Ø 32 mm 长度9 m 张拉力120 kN
边墙特殊洞段	11~12	间排距 3.6*3.8 m	25、30	2500	Ø 28 mm, 长9 m, 间隔1.2 m布置

图 8 (网络版彩图)左岸主厂房0+076 m断面上游边墙围岩变形与开挖支护关系
Figure 8 (Color online) The relationship between surrounding rock deformation of the upstream side wall and excavation and support at the mileage of 0+076 m of the underground powerhouse in the left bank.

断后发出预警并加密观测,必要时由业主建设部组织查勘现场,分析数据,查找原因,制定措施。

3.9 动态反演优化

结合白鹤滩地下洞室群开挖的地质信息、支护方案和监测成果,对比每一层开挖后的变形预测值与实测值,反演地应力与岩体力学相关参数,动态更新地质模型和分层分区序开挖模型,优化设计及施工措施,预测后续开挖响应,提高开挖支护措施的有效性,从而实现洞室群变形时空调控技术的动态反演优化。例如,右岸主厂房开挖时,0+076 m断面多点位移计和钻孔摄像表明顶拱围岩在一定程度内围岩内部变形与浅层变形量值相当,顶拱围岩变形破裂呈现出向深部

转移的特点,并得到右岸厂房26%多点位移计结果的证实^[31]。基于此,结合洞室开挖揭示的地质条件、锚杆应力等监测资料,在对高地应力环境下脆性玄武岩进行系统支护的基础上,对不利地质构造部位采取喷锚支护为主、钢筋拱肋支护为辅的局部加强支护措施,并及时修正设计支护参数。考虑施工过程中不同部位尤其是第三层岩锚梁及其以下层开挖中主厂房顶拱喷混凝土层开裂及边墙围岩变形速率持续增大等实际情况,优化了分层高度、分区范围及分步进尺与爆破技术,并通过每个开挖爆破循环和支护后的围岩变形及支护应力的监测分析,根据顶拱变形及高边墙变形的增量减少、变形趋势收敛,来进一步调整这套时空变形协调控制技术。

表 3 左岸主厂房第VI层开挖围岩变形安全稳定预警管理标准

Table 3 Management standards for the early warning of stability and surrounding rock deformation during the excavation of the sixth floor of the underground powerhouse in the left bank

部位	安全等级		预警等级		危险等级	
	变形增量 Δ (mm)	变形速率 δ ^{a)} (mm/d)	变形增量 Δ (mm)	变形速率 δ (mm/d)	变形增量 Δ (mm)	变形速率 δ (mm/d)
顶拱	$\Delta \leq 3$	$\delta \leq 0.2$	$3 < \Delta < 8$	$0.2 < \delta < 0.4$	$\Delta \geq 8$	$\delta \geq 0.4$
上游边墙	$\Delta \leq 15$	$\delta \leq 0.2$	$15 < \Delta < 25$	$0.3 < \delta < 1.0$	$\Delta \geq 25$	$\delta \geq 1.0$
下游边墙	$\Delta \leq 25$	$\delta \leq 0.2$	$25 < \Delta < 35$	$0.3 < \delta < 1.0$	$\Delta \geq 35$	$\delta \geq 1.0$

a) 变形速率指开挖爆破卸载24 h后,每7 d内的平均变形速率。

综上所述,通过运用上述措施,对大洞室顶拱部位,形成了“锚固观测洞超前成型+预埋监测设备实时监控+分区分步短进尺开挖+对穿锚索快速跟进+顶拱台车动态加强支护”为主要特征的围岩变形控制技术;对岩壁梁部位,形成“三层三区六序精细开挖+保护层预保护+树脂锚杆预加固+精准钻孔+壁座深层锚索加强”的精准成型精细化控制技术;对高边墙长大错动带部位,形成了“主洞与支洞联合抗剪+上盘岩体超前深层锚索+出露区深浅交叉锁口+封闭喷护”的大变形调控技术;对机坑部位机组之间的隔墩,形成了“预锚固+平面三区六序间隔开挖+立面错层开挖”的调控技术.这套精细化的施工技术,以地下电站主厂房安全稳定控制为核心,以洞室群联动影响范围岩体的变形速率、变形趋势及变形总量控制为目标,把握超前预控措施施工顺序、分层分区分步尺度、爆破控制指标参数、支护强度密度时机、变形增长速率的时空协调关系,通过开挖爆破步进长度、出渣系统能力、支护系统能力的设备配置及其作业方式的协调,解决爆破、支护、变形之间的时空失配问题,使每一步施工过程及效果都得到有效控制.

4 洞室围岩变形调控案例

4.1 主厂房顶拱变形控制

4.1.1 顶拱锚固观测洞

地下洞室顶拱变形稳定是地下厂房施工安全的关键.

针对左岸厂房顶拱发育多条层间错动带、C₄层间错动带斜切右岸厂房顶拱等情况,结合洞室群开挖围岩变形及时空联动特性,在主厂房及尾调室顶拱上部预设锚固观测洞进行对穿锚索加强支护,见图9(a).

主厂房顶拱上部30 m处设置2条锚固兼观测洞,断面尺寸宽4.5 m、高5 m,两洞相距16.5 m.锚固观测洞在厂房顶拱开挖前形成,一是预先埋设变形观测设备,以便在主洞室开挖前获取围岩初始变形值及开挖全过程变形值;二是预先完成顶拱中间4排对穿锚索的钻孔,尽早实施顶拱对穿锚索;三是锚固观测洞与厂房区第四层灌排廊道相连,在厂房开挖前预排水,改善围岩条件;四是针对高地应力脆硬玄武岩时效变形特征,结合实际情况动态采取加强支护等措施.

4.1.2 顶拱分层分区分步开挖支护

地下主厂房第I层为顶拱,开挖跨度34 m.为避免一次开挖跨度过大且便于支护结构快速施工,中导洞率先施工,两侧扩挖及支护施工采用两区四序方案.受地应力倾向河谷的影响,左岸主厂房一区扩挖过程中上游侧拱肩附近形成局部应力集中,部分洞段上游侧拱肩位置出现了高应力破坏的片帮现象.为此,扩挖次序上确定先上游侧再下游侧,错距进行扩挖,实现顶拱围岩分级卸荷、缓和应力调整,保证锚索和锚杆分序尽早跟进,如图9(a)所示.

顶拱中导洞和上、下游侧扩挖分区分序开挖后,及时完成浅表层支护体系,跟进实施深层对穿锚索和

图9 (网络版彩图)主厂房顶拱第I层开挖分区与支护措施及施工顺序. (a) 开挖分区及支护措施; (b) 支护体系时空次序

Figure 9 (Color online) Excavation zoning, support measures and sequences of top arch of the main powerhouse. (a) Excavation zoning and support measures; (b) support sequences.

端头锚索,使锚索与锚杆支护形成整体.主厂房顶拱上游侧为岩爆片帮区,每开挖完成一循环,立即进行“L”型随机锚杆(长度3 m,端部弯折20 cm)支护,再初喷8 cm厚钢纤维混凝土保证施工安全,9 m长普通砂浆锚杆滞后掌子面1~2个循环跟进,预应力锚杆滞后掌子面距离不大于20 m,一区扩挖施工前完成中导洞顶部中间2束对穿锚索张拉及两侧剩余2束对穿锚索造孔,一区和二区扩挖施工过程中锚索施工距离开挖掌子面不超过60 m且同一桩号处一侧的锚索施工完才能进行另一侧的扩挖,一区开挖出露的锚索施工完成才能进行二区开挖,见图9(b).

变形监测表明^[31],中导洞开挖成型后,二区扩挖的每一区的变形量差别不大,顶拱分区开挖完成到下一层开始开挖前的总变形量28~37 mm,变形量的差异与开挖间隔时长相关.

4.1.3 主厂房下挖过程中围岩变形控制

主厂房下挖过程中,顶拱围岩松弛深度随时间逐渐发展,表现为厂房顶拱喷层开裂及剥落范围的不断增加.顶拱围岩发育错动带时,顶拱变形范围会随开挖下降及时间逐步增大.右岸主厂房南侧顶拱有C₄错动带出露,右岸厂房0~075~0+100 m段C₄下盘岩体与顶拱间厚度约0~34 m,控制顶拱和边墙围岩的稳定.基于安全监测成果,结合现场情况及孔内摄像,该部位深层破裂在于玄武岩隐裂隙发育及分层持续下挖过程中C₄错动带下盘局部地应力与开挖二次应力场使围岩深部局部应力集中.这个部位的变形过程主要体现在下面三个阶段.

第一阶段是右岸主厂房第III层开挖期间.受下挖后应力集中影响,2015年9月26日右岸厂房0+040~0+140 m段上游侧拱肩、顶拱中导洞与上游侧拱肩交接处陆续发生喷层开裂、脱落,开裂时间、脱落范围和规模相对集中(图10),同时伴有强烈响声.

为限制围岩变形向深部扩展,对右岸厂房0~40~0+140 m段顶拱进行锚索加强支护.首先是提高下挖过程中顶拱的整体安全度,利用锚固观测洞对右岸厂房0+102.4~0+203.2 m段顶拱增设4排无黏结型对穿预应力锚索,锚固力为2000 kN,间排距均为480 cm,对称矩形布置.其次是提高浅表层破裂围岩的稳定性,对局部部位原有支护体系进行加强.右岸厂房0~028.25~0+120.25 m段上游侧拱肩新增预应力锚杆(直径 Φ

图10 (网络版彩图)右岸厂房上游拱肩喷层开裂脱落照片
Figure 10 (Color online) Photo of cracking and shedding of concrete spray layer on upstream spandrel of the powerhouse in the right bank.

32 mm、长度9 m、张拉力100 kN),矩形布置,间排距为1.2 m×1.5 m.右岸厂房0+043.6~0+100 m段中导洞顶拱,在原有系统锚杆基础上内插预应力锚杆(直径 Φ 32 mm、长度9 m、张拉力100 kN),间排距为1.2 m×1.2 m,并利用新增锚杆孔对顶拱围岩进行低压注浆加固.右岸厂房0+35~0+140 m段加强锚索支护于2017年5月中旬完成,右岸厂房0+076 m和0+133 m断面围岩变形周变化量随顶拱加强锚索的实施逐渐减小.

第二阶段是第III层开挖基本结束,第IV层开挖未全面进行的3~6个月时间段.这个时间段正是主厂房岩壁梁混凝土的浇筑期,总体变形增量尤其是深层变形增量较大,喷层开裂掉块,及时加强支护.

对下游拱肩部位11 m深度处围岩变形10 mm以上且呈缓慢增长趋势的部位,增加1排长25 m锚固力2500 kN的压力分散型预应力锚索.对喷混凝土层开裂的右岸厂房0+226~0+251.2 m段上游侧拱肩部位增加长9 m张拉力100 kN的预应力锚杆.对顶拱上游侧及拱肩新增2处开裂、21处掉块的右岸厂房0~038.6~0+157.6 m段C₄顶拱,增加3排长25 m锚固力2000 kN的有黏结型预应力锚索.上述措施在岩壁梁混凝土浇筑施工期完成,促进了主厂房的继续下挖.

第三阶段是2017年10月下旬第VII层开挖期.该层开挖启动后,C₄影响段顶拱及下游边墙围岩变形和锚索荷载快速增长,有四个断面围岩变形超过预警值,下游边墙、南端墙混凝土喷层进一步开裂,下游边墙主变室母线洞混凝土衬砌开裂.对该洞段下游边墙及厂房顶拱采用了应急加固措施.在顶拱部位,增加

1000 kN有黏结型预应力锚索,长度20~25 m,与 C_4 层面大角度相交,排数为3~5排,间距3.4~4.8 m,排距4.3~4.8 m,具体布置密度根据 C_4 与顶拱的距离确定,见图11. 2018年4月下游边墙加强锚索施工完成,2018年7~10月顶拱加强锚索完成,并在8月份对该部位岩体进行了低压注浆.加强支护措施实施后,下游边墙及顶拱围岩变形增长趋缓,变形曲线趋于平稳,见图12.

4.2 高边墙层间错动带变形控制

4.2.1 置换主支洞联合抗剪系统

结合左岸厂房 C_2 层间错动带变形分析成果,针对 C_2 层间错动带引起的围岩剪切错动变形及周边局部岩体大变形,采用主洞+支洞联合抗剪的钢筋混凝土置换洞,实现不连续变形的前端控制.由此,制定了以置换洞体系为核心的“系统防渗排水+主支洞联合抗剪+上盘岩体深层锚索+出露区深浅交叉锁口及封闭喷护”的控制技术方案.

主支洞联合抗体系由主厂房上下游各一条置换主洞和主厂房下游侧置换主洞上游侧10条置换支洞组成.在距离主厂房上、下游边墙13 m处,追踪 C_2 走向,超前实施混凝土置换主洞,下游侧受错动带影响显著部位布置了10条置换支洞,具体见图13.置换洞开挖断面为6 m×6 m,先进行一期钢筋混凝土衬砌,然后进行固结灌浆,再进行中间二期混凝土回填.在主厂房开挖前完成置换洞的开挖和回填混凝土施工.置换洞回填混凝土施工遵循从低到高的回填顺序,确保混凝土回填密实.置换洞开挖支护、混凝土浇筑及固结灌浆于2016年5月份全部完成,岩壁梁混凝土浇筑2016年6月份完成.

4.2.2 超前深层锚固及锁口加固系统

对层间错动带高边墙影响区采取提前深锚、出露区深锚索浅锚杆交叉锁口及喷混凝土封闭技术,主动限制上盘岩体屈服范围和下盘岩体压裂区域,快速封闭错动带影响带,降低错动带影响区围岩的破裂松弛.由此,增加深层锚索支护,并加长加密锚索,左厂0-039.6-0+088.8 m段下游边墙 C_2 层间错动带部位,在原布置的有黏结型预应力锚索附近针对性地增加3排压力分散型预应力锚索,其中2排上倾 10° ,1排下倾 10° ,新增的3排锚索长度均由原部位的25 m增加到35 m、间距由原部位的3.8 m加密至2.4 m、锚固力为2500 kN,见图14.

4.2.3 层间错动带 C_2 处理效果

在主变室3[#]母线洞和4[#]母线洞内埋设了穿过 C_2 层间错动带的测斜仪直接监测 C_2 层间错动带的错动变形,高边墙下挖过程中 C_2 层间错动带的变形过程见图15.

监测成果表明,错动带变形控制技术有效减小了浅层错动变形(减小23.5~41.4 mm),并限制其向深部扩展.随着错动带所在区域开挖和支护完成,剪切变形速率开始减小,并最终收敛.无置换洞情况下,厂房下游边墙沿 C_2 层间错动带剪切变形计算值一般为50~80 mm,局部大于90 mm;设置置换洞后厂房下游边墙沿 C_2 层间错动带剪切变形计算值一般为35~60 mm,实测值26.5~38.6 mm,说明 C_2 层间错动带不连续变形得到有效控制^[31].母线洞内靠近主变洞侧(置换洞以外)的测斜仪显示 C_2 上下盘围岩垂直于边墙

图 11 右岸厂房顶拱与 C_4 错动带不同间距下的新增锚索布置示意. (a) 距离较近; (b) 距离较远

Figure 11 Layout of the newly added anchor cables regarding different distance between top arch and shear zone C_4 in the right bank. (a) Short distance; (b) long distance.

图 12 (网络版彩图)白鹤滩右岸主厂房南侧顶拱围岩变形月变化量过程线

Figure 12 (Color online) Monthly deformation of the surrounding rock on top arch of the south side of the underground powerhouse in the right bank.

方向的相对变形较小, 说明置换洞限制 C_2 上下盘围岩相对变形的作用明显, 阻断了沿 C_2 的错动变形向围岩

深部扩展, 错动变形主要发生在厂房下边墙至置换洞间的围岩。

5 结论

本文针对白鹤滩地下厂房洞室群脆硬玄武岩、柱状节理、长大缓倾角错动带和高地应力等诸多复杂地质条件协同作用所带来的立体交叉地下厂房洞室群开挖施工技术挑战, 综合运用理论分析、室内试验与现场测试、数值分析与工程类比、实时监控与反馈优化等方法, 创新了关键施工技术, 得到了如下结论。

(1) 揭示了地下厂房洞室群高地应力环境下脆硬玄武岩多层次力学响应、层间错动带不连续变形、立体交叉地下厂房洞室群围岩变形联动效应的特征和演化规律。白鹤滩地下厂房玄武岩起裂强度低, 开挖重分布应力导致浅层围岩变形破裂, 并诱发一定程度的深部围岩破裂松弛; C_2 层间错动带等通过产生非连续错动变形及应力叠加作用的方式, 进一步加大厂房顶拱

图 13 左岸地下厂房 C_2 层间错动带置换洞平面布置与横剖面图

Figure 13 Layout and cross section of replacement tunnels for shear zone C_2 at the underground powerhouse in the left bank.

图 14 (网络版彩图)左岸主厂房高边墙 C_2 层间错动带影响区处理。(a) 处理措施;(b) 实施效果

Figure 14 (Color online) Treatment for the affected area of shear zone C_2 at the high sidewall of the underground powerhouse in the left bank. (a) Treatments; (b) implementation effect.

图 15 (网络版彩图)左岸厂房3#母线洞内 C_2 层间错动带测斜仪布置及监测成果

Figure 15 (Color online) Inclinator layout and its monitoring results of shear zone C_2 at bus bar tunnel #3 of the underground powerhouse in the left bank.

及边墙围岩的变形破坏风险。

(2) 提出了“超前预控制、垂直薄分层、平面细分区、进尺短步长、爆破精细严、快速强支护、全程勤量测、数据快反馈、动态反演优化”的高地应力脆硬玄武岩洞室群围岩时空变形调控全过程施工技术,有

效解决了高地应力及长大错动带作用下脆硬玄武岩百万机组大型地下洞室群安全建设的工程问题,确保了地下厂房洞室群安全优质高效建成。洞室群开挖成型尤其是岩壁梁成型质量得到了有效的控制,平整度、超欠挖、半孔率等指标及位移、应力均在安全范围

内, 白鹤滩地下厂房岩体变形稳定, 工程安全可靠。

(3) 建立的玄武岩洞室群围岩时空变形控制施工技术以地下电站主厂房安全稳定控制为核心, 以减少围岩破裂深度和程度为目标, 围绕洞室群开挖部位及其联动影响范围岩体的变形速率、变形趋势及变形总量等控制指标, 把握超前预控措施施工顺序、分层分区分步尺度、爆破控制参数、支护强度密度时机、变形增长速率的时空协调关系, 创新支护设备、工艺及施工组织, 通过开挖爆破步进长度、出渣系统能力、支护系统能力的设备配置及其作业方式的协调, 解决

爆破、支护、变形之间的时空失配问题, 使每一步施工过程及效果都得到有效地控制, 突破了复杂地质条件下建造大型地下洞室群的技术难题。

2020年10月5日, 白鹤滩地下厂房机组段最后一仓混凝土浇筑完成, 左右岸地下厂房水轮发电机组正在安装, 电站将于2021年5月蓄水, 7月按期投产发电, 清洁水电资源将支撑中国经济社会高质量发展。白鹤滩地下厂房洞室群施工技术的创新与实践, 有力推进了中国水电工程建设技术进步, 对同类地质背景条件下的工程具有指导意义。

致谢 衷心感谢白鹤滩地下厂房工程设计、施工、监理、监测等建设者及产学研用联合创新团队的共同努力。感谢中国岩石力学与工程学会钱七虎院士、陈祖煜院士、马洪琪院士、张超然院士、何满潮院士、冯夏庭院士及国内外专家团队对本工程的技术咨询。他们的宝贵意见促进了建设者对工程岩石力学本质问题的认识, 提高了工程措施的针对性和有效性。感谢华东勘测设计研究院万祥兵教授级高级工程师、浙江大学庄端阳博士和硕士生雷盼在稿件编辑整理过程中给予的大力帮助。

参考文献

- 1 Fan Q X, Zhang C R, Chen W B, et al. Key technologies of intelligent construction of Wudongde and Baihetan super high arch dams (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2019, 38: 22–35 [樊启祥, 张超然, 陈文斌, 等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术. 水力发电学报, 2019, 38: 22–35]
- 2 Fan Q, Zhou S, Yang N. Optimization design of foundation excavation for Xiluodu super-high arch dam in China. *J Rock Mech Geotechnical Eng*, 2015, 7: 120–135
- 3 Fan Q X. Review of construction management and technical innovation of Xiangjiaba Hydropower Station (in Chinese). *Yangtze River*, 2015, 46 (2): 1–4 [樊启祥. 向家坝水电站工程建设管理与科技创新综述. 人民长江, 2015, 46(2): 1–4]
- 4 Wang S L, Li C G, Shi G C, et al. Analysis of underground powerhouses in Xiaowan Hydropower Station by elastic-brittle-plastic constitutive models (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24: 4449–4454 [王水林, 李春光, 史贵才, 等. 小湾水电站地下厂房洞室群弹脆塑性分析. 岩石力学与工程学报, 2005, 24: 4449–4454]
- 5 Wu S, Shen M, Wang J. Jinping hydropower project: Main technical issues on engineering geology and rock mechanics. *Bull Eng Geol Environ*, 2010, 69: 325–332
- 6 Fan Q, Zhu H, Chen X. Key issues in rock mechanics of the Three Gorges Project in China. *J Rock Mech Geotechnical Eng*, 2011, 3: 329–342
- 7 Tang J F, Xu G Y, Tang X M, et al. Surrounding rock mass stability analysis by using 3DEC and informational construction of Xiangjiaba underground cavern group (in Chinese). *J Hunan Univ Sci Technol (Nat Sci Edit)*, 2009, 24: 67–72 [唐军峰, 徐国元, 唐雪梅, 等. 向家坝地下洞室群围岩稳定3DEC分析与信息化施工. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2009, 24: 67–72]
- 8 Liu G F, Feng X T, Jiang Q, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse caverns in Baihetan (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35: 865–878 [刘国锋, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究. 岩石力学与工程学报, 2016, 35: 865–878]
- 9 Xiao Y H, Huang X Q, Liu C P, et al. Study on engineering geological problems of underground powerhouses of Wudongde Hydropower Station (in Chinese). *Yangtze River*, 2015, 46(14): 1–3, 35 [肖云华, 黄孝泉, 刘冲平, 等. 乌东德水电站地下厂房主要工程地质问题研究. 人民长江, 2015, 46(14): 1–3, 35]
- 10 Lu B, Wang J M, Ding X L, et al. Study of deformation and cracking mechanism of surrounding rock of Jinping I underground powerhouse (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29: 2429–2411 [卢波, 王继敏, 丁秀丽, 等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究. 岩石力

学与工程学报, 2010, 29: 2429–2441]

- 11 Jiang Q, Hou J, Feng X T, et al. Dynamic feedback analysis and engineering control of surrounding rock local instability in underground powerhouse of Jinping II Hydropower Station (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2008, 27: 1899–1907 [江权, 侯靖, 冯夏庭, 等. 锦屏二级水电站地下厂房围岩局部不稳定问题的实时动态反馈分析与工程调控研究. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27: 1899–1907]
- 12 Yang Y W, Chen S H, Zhao Z Y, et al. Study of key technical issues of rock-bolt crane girder for Xiaowan Project (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32: 251–257 [杨宜文, 陈胜宏, 赵志勇, 等. 小湾工程岩壁吊车梁的关键技术问题研究. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32: 251–257]
- 13 Mei S H, Sheng Q, Feng X T, et al. Back analysis of 3D *in-situ* stress field of underground powerhouse area of Longtan Hydropower Station (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2004, 23: 4006–4011 [梅松华, 盛谦, 冯夏庭, 等. 龙滩水电站左岸地下厂房区三维地应力场反演分析. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23: 4006–4011]
- 14 Liu Z, Zhang C, Zhang C, et al. Deformation and failure characteristics and fracture evolution of cryptocrystalline basalt. *J Rock Mech Geotechnical Eng*, 2019, 11: 990–1003
- 15 Jiang Q, Feng X, Fan Y, et al. *In situ* experimental investigation of basalt spalling in a large underground powerhouse cavern. *Tunnelling Underground Space Tech*, 2017, 68: 82–94
- 16 Xu D P, Feng X T, Cui Y J, et al. A comparative study on the shear behavior of an interlayer material based on laboratory and *in situ* shear tests. *Geotech Test J*, 2012, 35: 103742
- 17 Duan S Q, Feng X T, Jiang Q, et al. Failure modes and mechanisms for rock masses with staggered zones of Baihetan underground caverns under high geostress (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2017, 36: 852–864 [段淑倩, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下白鹤滩地下洞室群含错动带岩体破坏模式及机制研究. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36: 852–864]
- 18 Zhao J S, Feng X T, Jiang Q, et al. Microseismicity monitoring and failure mechanism analysis of rock masses with weak interlayer zone in underground intersecting chambers: A case study from the Baihetan Hydropower Station, China. *Eng Geol*, 2018, 245: 44–60
- 19 Cheng P, Wan X B, Fang D, et al. Influence of interlayer staggered zone on the stability of surrounding rock of baihetan hydropower station underground powerhouse. *Water Resour Power*, 2019, 37: 115–118 [程普, 万祥兵, 方丹, 等. 层间错动带对白鹤滩水电站地下厂房围岩稳定性的影响. *水电能源科学*, 2019, 37: 115–118]
- 20 China Association for Science and Technology. Report on Advances in Rock Mechanics and Rock Engineering for 2009–2010 (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 2010 [中国科学技术协会. 2009–2010岩石力学与岩石工程学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2010]
- 21 Bian Y W, Xia C C, Xiao W M, et al. Visco-elastoplastic solutions for circular tunnel considering stress release and softening behaviour of rocks (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2013, 34: 211–220 [卞跃威, 夏才初, 肖维民, 等. 考虑围岩软化特性和应力释放的圆形隧道黏弹塑性解. *岩土力学*, 2013, 34: 211–220]
- 22 Cai Y Y, Zhang J Z, Yu J, et al. Nonlinear displacement solutions for deep tunnels considering whole process of creep and dilatation of surrounding rock (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2015, 36: 1831–1839 [蔡燕燕, 张建智, 俞缙, 等. 考虑围岩蠕变全过程与扩容的深埋隧洞非线性位移解. *岩土力学*, 2015, 36: 1831–1839]
- 23 Tran Manh H, Sulem J, Subrin D, et al. Anisotropic time-dependent modeling of tunnel excavation in squeezing ground. *Rock Mech Rock Eng*, 2015, 48: 2301–2317
- 24 Birchall T J, Osman A S. Response of a tunnel deeply embedded in a viscoelastic medium. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2012, 36: 1717–1740
- 25 Jiang Q, Feng X, Chen J, et al. Estimating *in-situ* rock stress from spalling veins: A case study. *Eng Geol*, 2013, 152: 38–47
- 26 Fan Q X, Li Y, Wang H B, et al. Discussion on ventilation technique during construction of ultra-large underground caverns for Baihetan Hydropower Station (in Chinese). *Water Resour Hydropower Eng*, 2018, 49: 110–119 [樊启祥, 李毅, 王红彬, 等. 白鹤滩水电站超大型地下洞室群施工期通风技术探讨. *水利水电技术*, 2018, 49: 110–119]
- 27 Fan Q X, Zhang C R, Wang Z L, et al. Introduction of key technologies for constructing Baihetan Hydropower Station (in Chinese). *Chin Water Resour*, 2019, 18: 9–14 [樊启祥, 张超然, 汪志林, 等. 白鹤滩水电站工程建设关键技术进展和突破. *中国水利*, 2019, 18: 9–14]
- 28 Fan Q, Wang Z, Xu J, et al. Study on deformation and control measures of columnar jointed basalt for Baihetan super-high arch dam foundation. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51: 2569–2595
- 29 POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited. Construction bidding documents for civil engineering and metal structure installation of the diversion power generation system in the left bank of Baihetan Hydropower Station on Jinsha River: Engineering geology (in

- Chinese). Hangzhou: POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, 2013 [中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站左岸引水发电系统土建及金属结构安装工程施工招标文件参考资料: 工程地质. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2013]
- 30 Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower (GB 50487-2008) (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2009 [中华人民共和国水利部. 水利水电工程地质勘察规范(GB 50487-2008). 北京: 中国计划出版社, 2009]
- 31 Jiang Q, Feng X T, Li S J. Dynamic feedback analysis of the stability of the large-scale underground powerhouse caverns of Baihetan Hydropower Station on Jinsha River during construction period (the 7th) (in Chinese). Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015 [江权, 冯夏庭, 李邵军. 金沙江白鹤滩水电站大型地下厂房洞室群施工期稳定性动态反馈分析研究(第7次). 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2015]
- 32 Fan Q X, Lin P, Jiang S, et al. Review on the rock mechanics and engineering practice for large hydropower stations along the downstream section of the Jinsha River (in Chinese). J Tsinghua Univ (Sci Technol), 2020, 60: 537–556 [樊启祥, 林鹏, 蒋树, 等. 金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60: 537–556]

Technological innovations in construction of underground caverns in basaltic rocks at Baihetan Hydropower Station on Jinsha River

FAN QiXiang¹, WANG ZhiLin¹, HE Wei¹, LIN Peng², WANG HongBin¹,
XU JianRong³ & DUAN Hang¹

¹ China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

² Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³ PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China

The two underground powerhouses on the left and right banks of Baihetan Hydropower Station (BHT-HS) are symmetrically arranged inside basaltic rocks in the alpine gorge reach of the lower Jinsha River. Each of them is equipped with 8 sets of 1,000 MW hydraulic turbine generators, with the largest unit capacity, total installed capacity, span of main powerhouse (i.e. 34 m), diameter of dome-shaped tail-regulating chamber (max diameter of 48 m) and scale of underground caverns around the world. Due to complex layout, interaction between caverns and high hollowing rate, the construction process of the underground cavern group is faced many challenges. For example, the cavern excavation is located in the high ground stress area dominated by horizontal tectonic stress; the underlying basalt fractures are well developed, and the rock is hard and brittle, with low crack initiation strength; columnar jointed basalts develop locally; a number of large and weak gently-sloped shear zones develop diagonally cutting the main powerhouse. Following the construction ideology of “understanding, utilization, protection, monitoring, and feedback analysis on the surrounding rock masses during the construction period”, and with the engineering construction procedure of “the excavation, analysis, prediction and inspection of each rock layer”, this paper proposes a set of innovation construction technologies including “advanced pre-control, thin vertical layer, small planar partition, short excavation progress, fine blasting, strong and quick support, short interval monitoring, quick feedback, precise dynamic optimization” to control the internal cracking of the hard and brittle basaltic rocks, discontinuous deformation of staggered zones and spatio-temporal deformation of underground caverns in high geostress. It has promoted the safe and orderly construction of BHT-HS, the technical progress of the construction of hydropower station projects in China, and may also be applicable to the design and construction of similar projects worldwide.

underground engineering, Baihetan Hydropower Station, cavern group in basalt, spatio-temporal deformation control, construction technologies

doi: [10.1360/SST-2021-0053](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0053)