

建筑施工

地下厂房大跨度顶拱支护系统施工技术研究与应用

吴小华 冀春辉

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8390

[摘 要] 本文结合河北抚宁抽水蓄电站地下厂房大跨度顶拱支护设计和实际地质情况,进行了围岩自稳、支护顺序、锚索、钢筋拱肋支护系统等关键技术的研究,从而提升地下厂房大跨度顶拱支护效率,希望本文为相关抽水蓄能电站地下厂房大跨度顶拱支护施工方案提供参考。

[关键词] 河北抚宁; 地下厂房; 大跨度; 顶拱支护

Research and application of construction technology for large-span arch support system of underground factory building

Wu Xiaohua Ji Chunhui

China Water Resources and Hydropower 11th Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] This article combines the design of large-span arch support for the underground powerhouse of Funing Pumped Storage Power Station in Hebei Province with the actual geological conditions, and conducts research on key technologies such as rock self stabilization, support sequence, anchor cables, and steel arch rib support system, in order to improve the efficiency of large-span arch support for the underground powerhouse. It is hoped that this article can provide reference for the construction plan of large-span arch support for the underground powerhouse of related pumped storage power stations.

[Key words] Funing, Hebei; Underground factory building; Large span; Top arch support

1 工程概况

河北抚宁抽水蓄电站主厂房洞由安装场、主机间和副厂房组成,呈“一”字形布置,安装场和副厂房分别布置在主机间的左、右两端,地下厂房总长164m,下部开挖宽度25m,上部开挖宽度26.5m,最大开挖高度为54.5m。其中主机间长度为102m,机组间距24m,副厂房侧端机组长度29m;安装场布置在主机间左端,开挖长度42m;地下副厂房布置在主机间右端,其开挖长度20m。主厂房布置两台250t/50t/15t的单小车桥机,桥机梁采用岩壁吊车梁结构。

地下厂房顶拱层采用 $\Phi 9.5\text{m}$ 直径中导洞先行、两侧预留岩体扩挖跟进的方式进行开挖,浅层系统支护及排水孔跟进开挖作业,预应力砂浆锚杆、无粘结式预应力锚索支护适时跟进,具体情况如下:

(1) 喷射混凝土分为初喷混凝土和复喷混凝土,喷射混凝土采用抗压强度较高的C30混凝土,并要求紧跟掌子面及时实施,以快速封闭掌子面围岩。初喷混凝土紧跟掌子面,锚杆支护和挂网复喷混凝土滞后掌子面一般不大于20m。预应力锚索支护滞后掌子面一般不超过50m;预应力锚索支护到位后才能进行同一洞段另一侧扩挖支护工作。

(2) 为了尽快对围岩施加一定的压力,限制围岩的破裂松弛,顶拱系统锚杆至少一半采用预应力砂浆锚杆。

(3) 针对大跨度顶拱缓倾角岩层及发育的层内错动带等复杂地质条件,副厂房顶拱系统设置30束预应力锚索,并在副厂房顶中导洞上设置6排单端张拉式预应力锚索,要求在上下游侧顶拱扩挖前实施。

(4) 为增加混凝土喷层刚度,在厂房顶拱设置双向龙骨钢筋拱肋。

2 顶拱支护施工关键技术

2.1 围岩自稳关键技术

充分发挥围岩的自承载能力是锚喷支护取得成功的关键,支护与开挖的间隔时间、施工顺序及相隔距离,应根据地质条件、爆破参数、支护类型等因素确定,应在围岩出现有害松弛变形之前把支护施工完毕。I类围岩喷护范围不超过掌子面15~30m,II类围岩喷护范围不超过掌子面10~15m,III类围岩为5~10m,IV、V类围岩支护应紧随掌子面的开挖。

2.2 支护顺序关键技术

在地质条件较好地段的锚喷支护可按“施工系统锚杆→挂钢筋网→喷混凝土至设计厚度”的顺序进行施工;如果遇断层

部位的岩石比较完整，可采用“施工加强支护锚杆→施工系统锚杆→挂钢筋网→喷混凝土至设计厚度”的顺序进行施工；如果岩石条件比较破碎，可采用“预先喷一层混凝土→施工加强支护锚杆→施工系统锚杆→挂钢筋网→喷混凝土至设计厚度”的顺序进行施工。

2.3 预应力锚杆-锚索、钢筋拱肋支护体系关键技术

地下厂房地质条件复杂且地应力水平较高，导致顶拱围岩破裂、片帮、喷层开裂等应力型破坏较普遍，顶拱受层内错动带影响洞段围岩变形和锚索荷载均较大，现场通过采用加密锚杆、增加预应力锚杆、预应力锚索、钢筋拱肋等综合措施进行动态支护，通过给围岩施加应力，改善支护处一定范围内的围岩物理力学性质，进而提高围岩自身承载能力，防止围岩发生大变形，有力地保证了顶拱围岩永久稳定安全。

3 顶拱支护施工主要创新点

3.1 一种新型钢筋拱支护形式

(1) 钻孔

主要采用阿特拉斯科普柯三臂钻进行锚杆钻孔，采用 JK468 履带式潜孔钻机进行锚索钻孔，钻杆尺寸、钻孔深度和钻孔角度等应符合设计要求。

(2) 清孔

钻孔完毕后采用高压风和水及时进行清孔，并做好孔洞保护。

(3) 锚杆注浆、安装、张拉

清孔结束后，孔口处用锚固砂浆找平，面积不小于 $30 \times 30\text{cm}$ ，最小厚度为 5cm 。抹平面应垂直于孔轴线。锚固段注浆采用“先注浆后插杆”法施工，注射锚固砂浆时，施工人员根据锚固段和张拉段的长度在注浆管上用胶带做好标记。

锚固砂浆注射完成后，开始安装锚杆杆体。锚固砂浆初凝后，开始安装锚杆体托板、垫圈和螺帽，并调整托板位置使之与锚杆轴线垂直。托板贴紧找平面后再拧紧螺帽。

锚固砂浆终凝后，采用扭力扳手进行张拉，试验先用小量程扭力扳手、后用大量程扭力扳手逐级张拉，同步检查锚杆是否松动以判定最大锚固力。

(4) 钢筋拱肋安装、预埋 PVC 套管

钢筋拱肋由钢筋及网片组成，首先将钢筋按照图纸要求的间距进行布设，并通过角筋与预应力锚杆进行焊接固定，钢筋与钢筋采用焊接工艺进行连接固定。然后编网形成系统网片，并与系统锚杆及钢筋形成联合支护。钢筋拱肋处存在锚索处，需预埋 PVC 套管，待喷混结束后进行锚索施工。

(5) 喷锚

喷射混凝土采用湿喷机进行施工。受喷面作业顺序采用自下而上分段分区分层的方式进行，区段间的接合部和结构的接缝处应妥善处理，后一层在前一层混凝土终凝后进行，喷射作业时，不得漏喷，连续供料，工作风压稳定。喷头应与受喷面垂直，喷射距离控制在 $0.6\text{m} \sim 1.2\text{m}$ 。完成或因故中断作业时，应将喷射机及料管内的积料清理干净。

(6) 锚索安装、注浆、张拉

采用 JK468 履带式潜孔钻机辅以人工下索。顶拱锚索安装前，将螺栓孔提前施打，孔深 90cm ，便于后期固定锚索，防止锚索下坠。顶拱锚索安装时，采用 JK468 履带式潜孔钻机顶住锚索上部加设的钢垫板，然后缓慢入孔，直至送至设计位置。待锚索推送就位后，立即安设垫板，并采用 $M20 \times 1000\text{mm}$ 螺栓进行固定。施工过程中操作平台及张拉平台采用正规厂家生产的成品脚手架进行拼装。

采用 SYB-70/4 双液注浆泵灌注。灌注前先压入压缩空气，检查管道畅通情况。灌注方法：采用孔口封闭灌注，浆液从注浆管向内灌入，气从回浆管直接排出。灌注结束标准：注浆压力为 $0.1 \sim 0.3\text{MPa}$ ，排出的浆液浓度与灌入的浆液浓度相同，即可进行屏浆，屏浆压力为 $0.3 \sim 0.4\text{MPa}$ ，屏浆时间为 $20 \sim 30\text{min}$ 。注浆取样试验：为给锚索张拉提供依据，注浆时对预应力锚索的灌浆浆液应取样做抗压强度试验。锚固注浆设备清洗：制浆结束后，应立即清洗干净制浆机、送浆管路等，以免浆液沉积堵塞。注浆结束后，应立即清洗干净注浆设备、管路等。

3.2 一种新型快速凝结预应力锚杆支护形式

(1) 说明

本工程预应力砂浆锚杆，设计张拉力：直径 $\Phi 28$ 、直径 $\Phi 32$ 锚杆均为 100kN 。预应力砂浆锚杆由杆体、灌浆管、回浆管、止浆塞、钢垫板、半球形垫圈及螺帽组成。

(2) 预应力砂浆锚杆的试验

预应力砂浆锚杆施工前应在现场选择有代表性的地段进行预应力砂浆锚杆性能试验，以达到验证所用材料的性能（包括砂浆凝固时间、锚固长度、杆体强度及伸长值等）、校验测力扳手、测试锚固力的目的。通过试验，确定砂浆锚杆施工工艺和经济有效的施工方案。

最大试验荷载取设计张拉力的 1.5 倍，锚固段长度按不小于 1m 控制，试验所用锚杆、砂浆、张拉机具及张拉工艺应与工程实际采用的相同。

(3) 预应力砂浆锚杆的钻孔

预应力砂浆锚杆钻孔直径不小于 76mm 。

钻孔的定位及误差与普通砂浆锚杆相同，钻孔深度不应小于杆体有效长度（不包括杆体尾端丝扣部分），也不应大于杆体有效长度 3cm 。

钻孔形成后，应在钻孔周围 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 范围内用 $M20$ 水泥砂浆抹平。

(4) 预应力砂浆锚杆组装和安放

锚杆安装前必须将孔内积水及岩粉用风管吹洗干净，并测量孔深。根据锚杆体设计长度下料，杆体设计长度不包含预留的长度，下料长度误差不大于 300mm 。沿杆体轴线方向每隔 $1\text{m} \sim 2\text{m}$ 应设置一个对中支架，灌浆管与锚杆杆体采用绑扎。锚杆自由段不做包裹处理。

(5) 预应力砂浆锚杆注浆

注浆材料一般宜选用灰砂比： $1:0.5 \sim 1:1$ ，水灰比：

0.38~0.45 的水泥砂浆或水灰比 0.5~0.55 的纯水泥浆, 水泥应按照国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB175-2007) 选用强度等级不低于 42.5R 的普通硅酸盐水泥。

注浆浆液应搅拌均匀, 搅拌时间不小于 2 分钟, 随搅随用, 防止发生离析现象, 浆液应在初凝前用完, 严防石块、杂物混入浆液。

使用自由段无套管的预应力锚杆, 需二次注浆。第一次灌浆时, 必须保证锚固段长度内灌满, 但浆液不得流入自由段, 锚杆张拉锚固后, 应对自由段进行第二次灌浆。对于上倾式锚杆, 排气管末端应设于孔底。

永久性预应力锚杆应采用封孔灌浆, 应有用浆体灌满自由段长度顶部的孔隙。

(6) 预应力砂浆锚杆张拉

锚杆张拉应进行原位试验, 通过试验确定合理的张拉工艺, 验证张拉指标, 避免强行张拉。

采用扭力扳手进行张拉, 张拉前应对张拉设备进行率定。张拉过程中应保持锚杆轴向受力, 必要时应在托板和螺帽之间设置球面垫圈。

预应力砂浆锚杆正式张拉前, 应取 20% 设计张拉荷载, 对其预张拉 1~2 次, 使其各部位接触紧密。

预应力砂浆锚杆正式张拉, 应张拉至设计荷载的 105~110%, 再按规定值进行锁定。

预应力砂浆锚杆锁定后 48h 内, 若发现预应力损失大于锚杆设计值得 10% 时, 应进行补偿张拉。

张拉时, 升荷速率每分钟不超过设计荷载的 1/10, 卸荷速率每分钟不超过设计荷载的 1/5。

张拉力的大小必须满足设计要求。张拉锚杆拧紧螺帽的扭矩不应小于 100N·m。

3.3 一种新型无粘结预应力锚索支护形式

(1) 造孔

钻孔的孔深、孔径均不得小于设计值, 钻孔倾角、孔向符合设计要求, 其允许误差值如下: 孔口孔位偏差不大于 10cm, 孔斜误差不得大于孔深的 2%, 钻孔孔径不应小于施工图纸和厂家产品说明书规定的要求。

在钻进过程中, 认真记录排碴、钻进速度等的变化情况, 钻孔要用风、水冲洗干净。钻孔完毕, 应将水管插入孔底, 通过大流量的水流, 从孔内向外进行冲洗, 直至回水清静延续 5~10 分钟, 结束后应观察孔内失水情况, 若有较明显失水的钻孔应按《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》的要求进行全孔一次固结灌浆。灌浆结束后 2d 进行扫孔作业, 并对钻孔进行全孔高压风吹干吹净。洗孔结束后, 对钻孔进行量测检查, 包括孔位、孔向、倾角及孔斜等。在安装锚束前, 应将钻孔孔口堵塞保护, 以免杂物和污水进入孔内。

(2) 锚索制作

按设计要求的尺寸或实际钻孔深度下料, 采用砂轮片切割

机对钢绞线切割下料, 实际切割下料长度=实际孔深+锚具厚度+张拉设备工作长度+千斤顶以外的外露长度+锚墩厚度。

按设计锚索结构图编制锚索, 根据锚索类型在规定位置安装外对中支架、对中隔离架、波纹管、定位止浆环、注浆管、排气管、导向帽等各种附件。每根钢绞线保持顺直不交叉不打绞, 保持两端钢绞线的严格对应关系。锚索制作完毕后妥善存放, 并登记、挂牌标明锚索编号、长度等。存放点要求防潮、防水、防锈、防腐蚀、防污染。对存放时间较长的锚索在使用前要进行严格的检查。

(3) 锚索运输及安装

锚束运输需确保其结构不受损, 水平与垂直运输均应设置合理支点及专用连接杆件承力。安装前核对孔号与孔深, 检查管道通畅。采用人工方式均匀推送入孔, 严格控制弯曲半径, 防止护层损坏。若遇阻需抽出, 必须对损伤部位进行修复。

(4) 注浆

用 L-3ZA 三柱塞式高压注浆泵对锚固段和自由段进行全孔一次性连续注浆。浆液采用高速搅拌机拌制, 其配比严格按锚索现场试验确定的配比进行控制。浆液应搅拌均匀, 随搅随用 (在初凝前用完), 并严防砂、石等杂物混入。注浆结束后关闭注浆阀, 卸下灌浆装置, 冲洗干净。清理钢绞线水泥结石。

(5) 张拉和锁定

张拉前需校准设备并计算理论伸长值, 确保锚具清洁对中。采用分级超张拉方式, 控制加载与卸载速率, 每级荷载持稳后检测伸长量。超张拉至规定值并保持稳压后锁定锚索。

(6) 封孔灌浆及锚头保护

在锚索张拉锁定后, 并经监理工程师检查验收合格后, 即可进行孔口段灌浆和锚头保护处理。灌浆采用相同配比水泥浆液, 锚头外钢绞线预留长度为锚具外 60mm, 多余的钢绞线进行切除, 然后进行二期混凝土浇筑。

4 结语

本工程地下厂房顶拱跨度大, 地质条件复杂且地应力水平较高, 为了确保大跨度顶拱围岩稳定安全, 根据其规模及基本地质条件, 参照类似工程经验, 辅助岩体力学数值分析, 广泛征求专家意见, 确定了地下厂房顶拱的系统支护参数, 并研究选择了合适的开挖支护施工方案, 施工期根据现场围岩变形破坏特征及监测反馈动态分析, 及时采取了针对性的加强支护措施, 确保了围岩稳定和施工安全。

[参考文献]

- [1]张春生, 褚卫江, 吴家耀, 等. 一种大跨度地下洞室群经验设计系统及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2861-2875.
- [2]张晓宇, 王露, 周文斌, 等. 复杂地质条件下大跨度地下厂房顶拱开挖技术[J]. 电力勘测设计, 2023, (06): 79-84.
- [3]郑治之. 大跨度超浅埋洞室变形稳定分析及开挖支护方案研究[D]. 四川大学, 2023.