

抽水蓄能电站建筑物施工技术及质量控制措施研究

赵亮

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i9.9033

[摘要] 在“双碳”目标稳步推进的背景下，抽水蓄能电站凭借调峰填谷、储能调频、事故备用等多元功能，已成为推动能源结构绿色转型、保障电网安全稳定运行的关键电源设施。但当前其建筑物施工仍面临诸多棘手难题：复杂地质条件下传统施工技术适应性欠佳，易诱发地下洞室围岩失稳、边坡滑坡、渗漏等问题，威胁工程进度、质量与安全；同时电站向高水头、大容量、深埋式方向发展，对建筑物结构性能与施工质量提出更严苛要求，传统施工手段已愈发难以满足。输水隧洞穿越软岩、硬岩及破碎带时易变形坍塌，需借助超前小导管注浆等支护手段；地下厂房开挖存在岩爆、突水突泥风险；压力管道焊接质量更直接关系到结构密封性与强度。鉴于此，深入探究抽水蓄能电站建筑物施工技术应用及质量控制措施，具有重要的工程实践意义。

[关键词] 抽水蓄能电站；施工建设；质量控制

Research on Construction Technologies and Quality Control Measures for Pumped Storage Power Station Structures

Zhao Liang

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

[Abstract] Against the backdrop of steady progress toward the "dual carbon" goals, pumped-storage power stations—leveraging diverse functions such as peak shaving and valley filling, energy storage and frequency regulation, and emergency backup—have emerged as critical power facilities for advancing the green transformation of the energy mix and ensuring the secure and stable operation of power grids. However, the construction of these facilities currently faces numerous challenging issues: traditional construction techniques exhibit limited adaptability under complex geological conditions, which can easily lead to issues such as instability of the surrounding rock in underground caverns, slope failures, and water seepage, thereby jeopardizing project progress, quality, and safety; meanwhile, the trend toward higher head, larger capacity, and deeper burial configurations imposes stricter requirements on the structural performance and construction quality of these facilities, making conventional construction methods increasingly inadequate. Water conveyance tunnels traversing soft rock, hard rock, and fractured zones are prone to deformation and collapse, necessitating support measures such as advance small-diameter pipe grouting; excavation of underground power houses carries risks of rock bursts and sudden water or mud inrushes; and the welding quality of pressure pipelines directly impacts structural sealing integrity and strength. Given these challenges, conducting in-depth research on the application of construction technologies and quality control measures for pumped-storage power station structures holds significant practical value for engineering practice.

[Key words] Pumped-storage power stations; Construction; Quality control

1. 抽水蓄能电站的建筑物施工特点

抽水蓄能电站建筑物多依山而建，施工特点集中体现于地质、安全与质量三个层面。就地质条件而言，站址多处于构造活动较活跃的山地，输水隧洞穿越的岩性并不单一，软岩、硬岩与断层破碎带常交替出现，围岩类别沿洞线频繁切换。软岩洞段自身强度低、流变特性明显，开挖后易收敛变形甚至局部坍塌，须紧跟掌子面施作超前小导管注浆等预支护，并辅以短进尺、弱爆破的开挖方式，方能兼顾施工安全与隧洞成形质量。就安全风险而言，上、下水库堤坝的高边坡开挖可能诱发边坡

失稳与滑坡；地下厂房洞室群埋深较大，开挖后围岩应力重分布，高应力集中部位易出现岩爆，断层与富水带附近则存在突水突泥可能，一旦发生将直接威胁人员与设备安全。就质量要求而言，建筑物长期承受水压力与高速水流冲刷，压力钢管焊接的密封性与强度尤为关键，须按焊接工艺规程作业，并对焊缝接头采用超声波探伤、射线探伤等无损检测手段，确保质量合格。

2. 抽水蓄能电站建筑物施工技术应用

2.1 上水库施工技术要点

2.1.1 大坝施工

大坝是上水库的关键挡水建筑物,其施工质量直接关系到电站整体安全与稳定。就钢筋混凝土面板堆石坝而言,施工通常须严控基础处理、模板安装与混凝土浇筑三个环节。基础处理方面,坝址基岩多为粗粒黑云母花岗岩,断层与节理常呈陡倾角且充填有蚀变岩,须彻底清除松动、破碎及风化岩体,再施作固结灌浆与帷幕灌浆,使水泥浆充分填充孔隙裂隙并形成稳固结石,以保证坝基具备足够的承载与抗渗能力。模板安装须依测量放样边线精准定位。滑模拼装后由轮胎吊吊至侧模,以手拉葫芦保险绳固定并穿好卷扬机牵引系统,试滑两三次确认牵引稳固后卸下手拉葫芦。侧模多采用钢木组合结构,外侧以角钢三角支架支撑,内侧用短钢筋与结构钢筋网焊接固定。混凝土集中拌制后运至坝顶下料,采用P.042.5普通硅酸盐水泥,水灰比控制在0.5以内,选用二级配骨料并掺引气剂、减水剂使含气量达4%,入仓坍落度3~5cm。浇筑分层布料,滑模前沿用插入式振捣器振捣,侧模与止水片部位改用软管振捣器;模板由坝面慢速卷扬机牵引滑升,滑升过程须保持平衡、匀速、同步,以确保浇筑质量。

2.1.2 库盆防渗施工

抽水蓄能电站上水库多采用全库盆沥青混凝土防渗体系,防渗材料选配与施工工艺控制是决定库盆整体防渗效果的核心环节。防渗材料方面,沥青混凝土因变形适应性强、防渗性能稳定而得到广泛应用,其配合比设计需兼顾工程需求与运行环境条件。库盆防渗护面一般采用筒式结构,自下而上由整平胶结层、防渗层与封闭层构成,各层功能定位不同,配合比须依其受力与渗控要求分别确定沥青、骨料及填料的用量比例。通常需经室内试验与现场验证反复优化,方能使配比同时满足防渗、适应基础变形及长期耐久性要求,保证各类工况下防渗性能保持稳定。施工工艺方面,沥青混凝土的摊铺与碾压是关键控制点。摊铺宜选用专用摊铺设备,按设计厚度与坡度连续均匀布料,严格控制摊铺温度,避免出现离析与裂缝,保障面层平整度与施工连续性。碾压采用双钢轮振动压路机与轮胎压路机组合,按初压、复压、终压的顺序分层施作,并对压路机行驶速度、碾压温度及碾压遍数逐项严控,确保压实度达到设计要求,最终形成连续致密的防渗体系。

2.1.3 进出水口施工

进出水口是输水系统与水库衔接的关键部位,结构体型复杂、埋件密集且过流要求高,其施工质量直接影响电站的过流条件与结构安全。施工一般按测量准备、模板工程、钢筋施工与混凝土浇筑四个环节依次展开。施工测量准备阶段,须先精确测量放线,确定进出水口的位置、高程与轮廓线。鉴于其体型复杂,宜采用高精度测量仪器并结合三维坐标法定位,依据设计图纸在现场标出中心线、边界线及各结构部位转折点等控制点,确保结构位置与尺寸准确无误。模板工程方面,因结构复杂、制作安装难度大,多用定制钢模板按各部位形状与尺寸设计加工。安装时严控平整度、垂直度与拼接缝严密性,如闸室段可采用对拉螺栓与钢管脚手架结合的支撑体系防止变形位移,拼接处用密封条密封以防漏浆。钢筋施工须依设计图纸精确下料加工,保证长度、直径与弯曲角度达标;安装时严控间距、数量与保护层厚度,顶板与底板处钢筋间距控制在10~

15cm,采用双层钢筋网片并在层间设置足量拉结筋稳固骨架,垫块间距不超过1m且呈梅花形布置,使钢筋充分受力。混凝土浇筑须防范冷缝、蜂窝与麻面,采用分层浇筑振捣,每层厚度约0.5m,按从低向高、从中间向两侧的顺序推进,振捣以插入式与附着式振捣器结合,严控振捣时间、半径与深度,浇筑完成后洒水或覆盖养护不少于两周,确保强度与耐久性达标。

2.2 地下厂房施工技术要点

2.2.1 地下洞室群开挖技术

抽水蓄能电站地下洞室群规模庞大、地质条件复杂,通常包含主副厂房、主变洞、母线洞、尾水闸门洞及尾水洞等,部分洞室最大开挖跨度可达30m以上、高度超过58m,属大型地下洞室群,其开挖顺序的合理性直接决定围岩稳定与施工安全。此类工程多采用“平面多工序、立体多层次”的开挖法。先分层分序开挖主厂房:先挖顶拱层,以先导洞领先支护,中导洞先行、两侧扩挖跟进,随后再依次开挖中层与底层。开挖中须将爆破振动速度控制在5~10cm/s以内,并借助微差爆破、预裂爆破技术削弱对围岩的扰动。主厂房开挖至一定阶段后,再相继开挖主变洞、母线洞等洞室;主变洞开挖滞后于主厂房以避免相互干扰,开挖方法与其类似,交叉部位采取加强支护。母线洞断面较小,多选用小型机械化设备开挖以适应空间限制。

2.2.2 地下厂房混凝土施工技术

地下厂房空间狭窄,设备与人员活动受限,混凝土的运输、浇筑与振捣均不便,加之结构复杂,对浇筑质量要求较高。施工中宜依据厂房结构特点与混凝土供应能力,将结构划分为若干浇筑层与浇筑块,如底板可按伸缩缝或后浇带位置分块后分层浇筑,并遵循先深后浅、先重后轻、先主后次的原则,以保证结构整体性与稳定性。养护则需结合季节与环境条件,分别采取洒水、覆盖或喷涂养护剂等措施,使混凝土在规定养护期内保持湿润,达到设计强度要求。

2.3 输水系统施工技术要点

2.3.1 压力管道施工技术

压力管道承担输送高压水流的任务,其选材需综合考虑工作压力、水流特性、地质条件及耐腐蚀性能等因素。高水头抽水蓄能电站多选用符合ASTM A537或ASTM A691等标准的高强度合金钢管道。制作与安装环节,须先按设计要求对钢板精确切割,并对切边打磨处理,以保证焊接坡口质量;随后用卷板机将钢板卷制成管节,卷制中严控管节直径、圆度与壁厚偏差。焊接是管道制作的核心工序,高水头压力管道常采用手工电弧焊打底,再以埋弧焊或气体保护焊进行填充与盖面的多层多道焊接工艺,过程中严格控制焊接电流、电压与焊接速度等参数,确保焊缝质量。防腐环节,压力管道长期处于潮湿环境并受高压水流冲刷,易发生腐蚀,常用涂层防腐与阴极保护两类方法。涂层防腐即在管道表面涂刷防腐涂料,施工前须严格除锈清洁,清除油污与铁锈等杂质以保证涂层附着力,涂层厚度一般控制在200~500 μm ;阴极保护则通过在管道周围设置牺牲阳极或外加电流阴极保护系统,使管道成为阴极,从而抑制腐蚀发生。

2.3.2 尾水隧洞施工技术

尾水隧洞作为抽水蓄能电站输水系统的末端通道,施工涵

盖开挖与衬砌两大主要环节,其断面型式、纵坡参数与围岩条件共同决定着工艺路线与支护方案的选取。此类隧洞横断面一般设计为圆形,开挖半径较衬砌后半径留有一定余量以供支护结构占用,洞身纵坡沿水流方向缓降,穿越围岩多以IV、V类为主,岩体自稳能力偏弱,对开挖时序与支护时机提出了较高要求。

开挖阶段宜实行分层推进、即时支护的作业方式。上层先行开挖,其高度结合围岩稳定状况与设备作业能力取值,通常控制在3~5m,钻进以钻爆法为主,钻孔直径多在34~100mm区间;爆破出渣后应迅速施作初期支护,内容涵盖喷射C20混凝土、布设长2~4m且间距1~2m的全长粘结型锚杆以及架设钢拱架,用以封闭岩面并提升围岩整体稳定性。中层开挖在初期支护到位、围岩收敛趋于平稳后再行展开,层高一般3~4m,采用台阶法推进,并对爆破参数从严控制以减轻对周边岩体的扰动,随后开展二次支护,通过增补锚杆、缩小钢拱架间距等方式补强。下层开挖临近洞底,操作需格外审慎,防止超挖与欠挖,确保底面平整并满足承载需求。

衬砌阶段采用先边顶拱、后底拱的次序。边顶拱衬砌借钢筋台车完成钢筋制安,经测量放线控制高程与平面位置,受力筋以单面搭接焊接连接、分布筋绑扎成形,接头错开布置以稳固骨架;模板选用定制钢模,由钢模台车自下而上装配龙门架、横梁及液压系统与侧顶模,严控平整度、垂直度与拼缝严密性。混凝土以输送泵入仓,分层浇筑振捣,插入式与附着式振捣器配合使用以保证密实。待边顶拱达到规定强度后转入底拱衬砌,借助针梁底模台车先组底模后装针梁,模板置于两条12.5m钢轨上以保证底面平顺,钢轨须平直、轨距一致且支撑可靠。

2.3.3 调压井施工技术

调压井是输水系统的关键调节设施,常见形式有阻抗式、差动式与气垫式等,多呈垂直或倾斜井状结构,深度大、作业空间受限,施工一般包含开挖、混凝土浇筑与连接施工等环节。开挖多采用先导井后扩挖的方法。钻孔时借助高精度导向装置与实时监测系统,将孔斜偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内;先导井贯通后以钻爆法扩挖,依围岩条件选取合理爆破参数,周边孔采用光面爆破以减轻扰动,并及时支护防止围岩坍塌。混凝土浇筑前须清理井壁,保证平整且无松动岩块与杂物,采用分层浇筑振捣,每层厚30~50cm,插入式与附着式振捣器结合,坍落度控制在12~16cm、入模温度不超过 28°C ,顶部设下料口与 $30^\circ\sim 45^\circ$ 溜槽保证输送顺畅。连接施工须精确测量放线,钢筋布置与焊接符合设计要求,接头采用焊接或机械连接并保证质量,同时注意与相邻建筑物的浇筑顺序与振捣配合,避免冷缝与不密实,浇筑后加强养护以防裂缝。

3.抽水蓄能电站建筑施工质量控制策略

抽水蓄能电站建筑结构复杂、隐蔽工程多、危险源集中,质量控制须以标准规范为纲、以流程管控为线、以风险防控为底,构建覆盖施工全过程的管控体系。

质量控制标准方面,施工应严格依据《水电工程施工质量检验与评定规程》(DL/T 5113)等规范执行。该规程对原材料检验、工序质量控制及单元工程评定等环节均有明确规定:以混凝土工程为例,原材料检验对水泥、骨料的关键指标要求严格;工序质量控制则规范搅拌、运输、浇筑等操作流程,并

对分层厚度、振捣时间与半径提出量化要求,以保证混凝土的密实性与均匀性。

质量控制流程与方法方面,可归纳为三个抓手。材料控制上,对钢筋、水泥、砂石料等主要原材料严格检验,如钢筋须核查屈服强度、抗拉强度与伸长率等力学指标,同时检测直径、外形尺寸及重量偏差,确保其符合设计要求。工序控制上,通过自检、互检、专检三级联动实现,如地下厂房混凝土浇筑,班组自检重点核查坍落度(控制在设计值 $\pm 2\text{cm}$ 内)、分层浇筑高度(每层不超过50cm)与振捣情况,班组间互检施工工艺与质量,专业质量人员则对配合比、浇筑顺序与振捣密实度作全面核验。隐蔽工程验收上,固结灌浆、帷幕灌浆等施工完成后须钻孔取芯,检查浆液结石密实度及其与岩石的胶结状况,芯样抗压强度应达到设计要求、检查孔透水率不大于规定值,并经监理验收合格后方可进入后续工序。

重大危险源防控方面,施工中的塌方、透水、火灾等风险须分类施策。塌方风险可借助TSP、TRT等地质超前预报手段探明掌子面前方地质条件,据此调整开挖方法与支护参数,并通过安装锚杆、喷射混凝土、架设钢支撑强化围岩稳定;透水风险则依托地质勘探资料分析与施工期水文观测,施工前预测可能的突水部位,施工中加强涌水量与水压监测,一旦出现异常及时采取堵水、排水措施,从而将风险控制在事故发生之前。

4.结束语

抽水蓄能电站以其调峰填谷、储能调频与事故备用的独特功能,在提升电网运行安全水平、优化水能资源配置等方面发挥着难以替代的作用。本文围绕抽水蓄能电站建筑物施工,梳理了大坝、库盆防渗、进出水口、地下洞室群、地下厂房、压力管道、尾水隧洞及调压井等关键部位的施工技术要点,并从标准规范执行、材料与工序控制、隐蔽工程验收及重大危险源防控等层面探讨了质量控制策略。实践表明,施工技术的合理选用与质量管控体系的严密落实,是保障工程安全、提升建造质量的关键。相关施工人员应持续深化对施工技术的研究与分析,在推动技术创新的同时不断提升施工质量,为水电行业的安全稳定发展提供支撑。

[参考文献]

- [1]武玉森,申思远.河南嵩县抽水蓄能电站引水系统工程1号施工支洞顺利贯通[N].铁路工程报,2026-09-04(001).
- [2]张毅.浅谈抽水蓄能电站引水系统斜井扩挖安全管理[J].四川水利,2025,46(4):149-153+165.
- [3]马琪琪,周金鸣.水电站水下建筑物结构建造施工技术[C]//中国土木工程学会总工程师工作委员会.中国土木工程学会总工程师工作委员会第四届总工论坛论文集.2024:169-172.[4]王建帮.哈密抽水蓄能电站地下洞室不良地质段大管棚施工技术[J].四川水力发电,2024,43(4):37-40.
- [5]景茂贵,邓闻杨.定向钻在天台抽水蓄能电站工程长斜井施工中的应用[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S1):115-121.
- [6]周兴波,周建平,杜效鹄.新时期抽水蓄能电站高质量发展的思考[J].水电与抽水蓄能,2023,9(6):20-24+36.

作者简介:赵亮(1991年5月),职务:副经理,职称级别:工程师。