

# 抽水蓄能电站上水库防渗体系设计与实践

张涛

浙江华东工程咨询有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6646

**[摘要]** 抽水蓄能电站是电力系统中调峰、填谷、储能的重要手段,能有效确保电网安全稳定运行,从而实现了对可再生资源的消纳作用。通常情况下,抽水蓄能电站上水库利用天然河道开挖、筑坝而成,其库底覆盖层为透水性较强的砂卵石层,并采用粘土铺盖护底、沥青混凝土护岸与沥青混凝土面板坝相结合而形成全库盆联合防渗形式。基于此,本文以宝泉抽水蓄能电站上水库防渗体系设计展开探究分析,旨在为同类型抽水蓄能电站工程提供必要的参考借鉴。

**[关键词]** 抽水蓄能电站; 上水库防渗; 体系设计

中图分类号: TV62 文献标识码: A

## Design and Practice of Seepage Prevention System for Upper Reservoir of Pumped Storage Power Station

Tao Zhang

Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd.

**[Abstract]** Pumped storage power stations are an important means of peak shaving, valley filling, and energy storage in power systems, effectively ensuring the safe and stable operation of the power grid and thus realizing the utilization of renewable resources. Typically, the upper reservoir of a pumped storage power station is constructed by excavating and damming natural river channels. The reservoir bottom cover layer is a highly permeable sand and gravel layer, and a combined system of clay paving, asphalt concrete revetment, and asphalt concrete face dam forms a comprehensive seepage prevention system for the entire reservoir basin. Based on this, this paper explores and analyzes the seepage prevention system design of the upper reservoir of the Baoquan pumped storage power station, aiming to provide necessary reference for similar pumped storage power station projects.

**[Key words]** pumped storage power station; upper reservoir seepage prevention; system design

### 引言

上水库是抽水蓄能电站的核心组成部分,其水密性关系到电站运行的效率和安全,一旦上水库出现渗漏等,不仅会造成水资源的大量浪费,甚至海水降低电站的有效库容量。由此可见,构建水库防渗体系是抽水蓄能电站建设中的关键,并根据不同地质条件精选防渗材料和结构,能保障抽水蓄能电站防渗能力,从而大幅度提高抽水蓄能电站的运行效率。

### 1 工程项目概述

本文以宝泉抽水蓄能电站项目为例,该抽水蓄能电站位于河南省辉县市薄壁镇,总装机容量120万Kw,安装4台单机容量30万Kw的可逆式水泵水轮发电电动机组。该电站以500kV线路接入河南电网,承担调峰、填谷、调频、调相及事故备用等功能,如图1所示。其上水库采用混凝土面板堆石坝,下水库则通过加高加固宝泉水库形成。电站设计巧妙,运行灵活,能有效平衡电网负荷,提高电网运行的稳定性和可靠性,对保障电力供应、促进

新能源消纳具有重要意义。



图1 宝泉抽水蓄能电站示意图

### 2 抽水蓄能电站上水库沥青混凝土防渗面板设计

#### 2.1 封闭层

在对抽水蓄能电站上水库防渗体系设计的封闭层混凝土防渗面板的封闭层设计时,本文以宝泉抽水蓄能电站为例,该抽水

蓄能电站封闭层设计厚度通常为2mm,由沥青基体与矿物填料按特定比例复合而成<sup>[1]</sup>。该材料体系在工程应用中发挥双重功能,其一,形成连续致密的表面防护层,显著提升沥青混凝土防渗层的密实度与结构稳定性。其二,作为环境隔离屏障,有效降低防渗层直接暴露于紫外辐射的几率,减少其与大气环境及水分的接触频率,从而延缓防渗层的氧化老化过程,提高其长期抗渗性能。在性能指标方面,封闭层需满足在设计边坡条件下,经受70℃高温环境持续48小时热稳定性测试而不发生流动性,同时在-30℃低温环境下保持结构完整性,避免脆性开裂现象。

## 2.2 防渗层

防渗层采用密级配沥青混凝土,作为防渗结构的关键功能层,其性能指标需同时满足高抗渗性、结构稳定性和变形适应性要求。为了有效适应基础变形,对于碾压后的防渗层技术要求如表1所示,而防渗层厚度则可根据如下公式进行计算。

$$W_{\min} = C + H / 25$$

在上述公式中, $W_{\min}$ 是指防渗层所需最小厚度,H是指防渗层承受的最大水头,C为常数,通常由骨料质量和级配决定,通常取值为7。

因此,在本项目工程中,防渗面板承受的最大水头为405.7m。经结构计算分析,防渗层最小设计厚度应不低于862mm,实际工程采用100mm厚度。实测数据表明,100mm厚度防渗层的库区总渗漏量为1288m<sup>3</sup>/d,低于设计允许的渗漏控制标准<sup>[2]</sup>。为提升防渗结构对基础不均匀沉降的适应能力,在主坝反弧段底部及主坝与库岸连接段等应力集中区域,于防渗层与整平胶结层之间增设高分子聚合物加强网格。同时,在关键部位额外设置50mm厚的沥青混凝土防渗加厚层,以增强结构整体的防渗性能与变形适应能力。

表1 防渗层技术指标

项目	技术指标	项目	技术指标
密度g/cm <sup>3</sup>	>2.35	水稳定性%	≥90
孔隙率%	≤3.0	冻断温度℃	≤-30
渗透系数cm/s	≤1*10 <sup>-8</sup>	拉伸应变%	≥0.8
斜坡流淌值mm	≤0.8	弯曲应变%	≥2.0

## 2.3 整平胶结层

整平胶结层作为防渗层的结构支撑层,位于防渗层与排水垫层之间,承担着过渡连接的关键功能。该层通过形成均匀平整的粘聚性界面,为防渗层提供稳定的结构基础<sup>[3]</sup>。在材料组成方面,整平胶结层采用孔隙率控制在10%~15%的级配沥青混凝土,其微观结构特征为粗骨料骨架与沥青砂浆的有机结合,有效确保了结构的整体稳定性和必要的渗透性能。而整平胶结层为级配沥青混凝土,碾压后的技术要求如表2所示。

表2 整平胶结层技术指标

项目	技术指标
	>2.20
孔隙率%	10-14
渗透系数cm/s	1*10 <sup>-2</sup> -1*10 <sup>-4</sup>
热稳定性	≤4.5
水稳定性%	≥85

## 3 抽水蓄能电站上水库粘土铺盖设计

针对本项目的抽水蓄能电站上水库粘土铺盖设计时,其上水库粘土铺盖厚度t可根据如下公式计算。

$$t \geq \frac{\Delta h}{i_n}$$

在该公式中, $\Delta h$ 是指铺盖任一点水头差值, $i_n$ 是指铺盖允许水力坡降。

在正常蓄水位789.60m工况下,黏土铺盖承受的水头差为39.9m。依据《碾压式土石坝设计规范》(SL274-2001)相关规定,结合上水库黏土铺盖实际工作条件,铺盖允许水力坡降取值为10。经渗流计算分析,黏土铺盖最小厚度应满足 $t \geq 3.99m$ ,工程设计采用4.50m厚度。设计技术指标要求:压实度不低于98%,渗透系数不大于 $10^{-6} cm/s$ ,全库盆黏土填筑总量约为65万m<sup>3</sup>。为延长黏土与沥青混凝土面板接触面的渗径,黏土铺盖沿库周20m范围设置贴坡,顶面高程由749.70m抬升至752.70m,坡比1:5.0,坡顶宽度3.0m。在黏土与沥青混凝土面板接触区域,设置0.5m厚高塑性黏土层,利用其高塑性特性适应基础变形,有效防止开裂渗漏<sup>[4]</sup>。黏土铺盖施工完成后至水库蓄水前需经历一个完整冬季,为避免冻融破坏及保障施工机械作业条件,铺盖上部设置0.3m厚碎石土保护层。基于料场特性及黏土原位渗透试验结果,将黏土铺盖划分为三个功能区,分别制定填筑控制标准,而各区黏土填筑控制指标如表3所示。

I区:黏土与沥青混凝土面板接触带,全断面填筑0.5m厚高塑性黏土。

II区:高程745.20~748.20m范围,厚度3.0m。

III区:高程748.20~749.70m范围,厚度1.5m。

表3 黏土填筑控制指标

分区	干密度t/m <sup>3</sup>	含水量%	压实度%	最大砾径mm	5-50mm砾径含量%	5-150mm砾径含量%
I区	-	+1~+3	90-95	50	<20	-
II区	1.65	-2~+3	98	50	<20	-
III区	浮动	-	<98	150	-	30

## 4 抽水蓄能电站上水库防渗体排水及反滤设计

### 4.1 库岸排水垫层设计

排水垫层设置于沥青混凝土防渗面板下方,发挥双重工程功能:其一,为面板施工提供平整且颗粒级配优化的基层界面;其二,有效排除面板及岸坡基岩渗流,消除反向水压力的潜在风险<sup>[5]</sup>。在本项目工程中,垫层采用弱风化至新鲜石灰岩骨料加工制成,压实后技术参数需满足,渗透系数不小于 $5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ,变形模量不低于40MPa,干密度不低于 $2.22 \text{t/m}^3$ 。颗粒级配控制指标为:最大粒径80mm,5mm以下颗粒含量25%~39%,0.075mm以下颗粒含量小于5%。基于渗流稳定性分析计算,垫层最小设计厚度为0.42m,库岸段实际采用0.60m厚度。主坝坝面排水垫层主要采用水平碾压工艺施工,其厚度受施工机械作业要求制约,水平覆盖宽度设定为2.0m。

### 4.2 排水垫层固坡设计

为预防排水垫层在沥青混凝土施工前遭受雨水侵蚀及其他环境因素影响导致结构破坏,施工完成后采用乳化沥青对坡面实施加固处理,乳化沥青通过喷涂工艺进行施工,设计喷涂量为 $2.0 \text{kg/m}^2$ 。

### 4.3 粘土铺盖反滤层设计

反滤层的设置旨在有效抑制粘土铺盖的渗透破坏风险,属于关键性反滤工程设计范畴。其技术要求需严格满足,(1)确保被保护土体不发生渗透变形,(2)保证反滤层渗透系数高于被保护土体,实现渗流的高效导排,(3)防止细颗粒淤积导致的失效风险,(4)在防渗体裂缝发生时,阻滞土颗粒流失并促进裂缝自愈。宝泉电站上水库库底工程采用双层反滤结构设计,具体包括厚度0.50m的4B级反滤层(颗粒粒径 $0.1 \sim 20 \text{mm}$ )与厚度0.50m的4C级反滤层(颗粒粒径 $5 \sim 60 \text{mm}$ )。

## 5 抽水蓄能电站上水库防渗体系设计问题及应对策略

### 5.1 设计阶段

抽水蓄能电站上水库防渗体系设计对保障电站长期安全稳定运行具有决定性作用。设计阶段需重点解决的关键问题包括地质资料精度不足与防渗材料选型失当。地质勘探深度不足或数据偏差较大将导致防渗结构设计失当,无法有效阻隔渗流通道,进而危及水库结构安全性<sup>[6]</sup>。同时,不同地质条件与水力环境对材料性能要求存在显著差异,材料选型失误将引发防渗层过早失效风险。针对上述问题,应实施以下技术对策,通过强化地质勘探工作,采用高精度勘探技术,提升勘探点密度与勘探深度,获取可靠地质参数,为防渗结构设计提供科学依据;开展防渗材料性能系统试验,模拟实际工程工况,对多种候选材料进行渗透性、耐久性、变形适应性测试与对比分析,综合权衡工程需求与经济性,优选适用的防渗材料,确保上水库防渗体系设计的科学性、合理性和可靠性。

### 5.2 施工阶段

抽水蓄能电站上水库防渗体系施工阶段面临多重技术挑战,直接制约工程质量和工期进度。施工质量管控难度显著,涉及多工艺复合系统,如沥青混凝土心墙浇筑、土工膜铺设,而任一工序的质量缺陷均将诱发渗漏风险。同时,施工进度易受气象条

件、设备运行稳定性及材料供应链等外部因素制约,工期延误将导致工程成本增加并影响整体效益。针对上述问题,应实施系统性技术对策,强化施工质量管理体系,建立三级质量检验制度,严格把控工序符合性。优化施工工艺,采用自动化摊铺设备提升沥青混凝土施工效率,应用BIM技术进行施工过程模拟以减少返工率,制定专项应急预案,提前储备关键工程材料,科学规划雨季施工方案,通过动态资源调配机制保障施工进度,从而实现防渗体系的高标准、高可靠性建设。

### 5.3 运行阶段

抽水蓄能电站上水库防渗体系在运行期易受长期水压力、热循环效应、材料老化及地质活动耦合作用影响,导致防渗功能劣化。典型失效模式包括,沥青混凝土面板在紫外辐照与热循环作用下产生结构性裂缝,土工膜因尖锐物穿刺或接缝失效引发渗漏<sup>[7]</sup>。粘土铺盖受干湿循环作用出现不均匀沉降。若未及时处理,上述缺陷将逐步演变为严重渗漏,危及水库结构安全。针对此,需构建系统化运维体系:建立周期性监测机制,采用无人机航拍监测与渗流监测系统实施季度外观检查及年度专项检测;对轻微缺陷实施精准修复,包括高压灌浆技术处理裂缝、热熔焊接修复土工膜接缝;对严重老化或失效区域制定分阶段更新改造方案,通过有序替换防渗材料确保体系长期有效性,实现防渗功能的可持续保障。

## 6 结束语

在抽水蓄能电站上水库防渗体系设计时,通过正确设计沥青混凝土、粘土铺盖本身结构外,还应着重解决各种防渗结构的接头问题,并对沥青混凝土面板基础不均匀沉降和粘土渗透破坏性问题进行处理,才能最大限度确保抽水蓄能电站上水库防渗满足电站运行需求,这对推动抽水蓄能电站建设事业的发展具有至关重要的作用。

### [参考文献]

- [1]李彬,丰伟,杨淇淇.贵港抽水蓄能电站下水库防渗设计[J].红水河,2025,44(01):85-88.
- [2]闵征辉,朱义刚,郭建华.新疆某抽水蓄能电站下水库渗控分析[J].水利规划与设计,2024,(12):85-90+108.
- [3]刘育乘,吴建东.某抽水蓄能电站枢纽布置比选与主体建筑物设计[J].水上安全,2024,(16):25-27.
- [4]杨月凤.桂林抽水蓄能电站上水库全库盆防渗施工导流设计[J].红水河,2023,42(04):16-19+24.
- [5]王素香.某抽水蓄能电站上水库库底土工膜防渗设计研究[J].黑龙江水利科技,2020,48(02):102-105.
- [6]张健,陈冬冬,淦浩华.浅谈周宁抽水蓄能电站上水库副坝坝址区防渗设计[J].大坝与安全,2021,(02):6-8+12.
- [7]王孟其.瓮安瞎猫冲水库防渗帷幕灌浆设计优化分析[J].河南水利与南水北调,2024,53(12):55-56+58.

### 作者简介:

张涛(1984—),男,汉族,河南平舆县人,大学本科,中级职称,研究方向:水电工程。