

抽水蓄能电站输水发电系统的渗流分析

陶永杰

(中国水利水电第三工程局有限公司, 甘肃 兰州 710038)

摘要 抽水蓄能电站作为电力系统重要的调节电源, 其输水发电系统的渗流安全直接关系到电站的长期稳定运行。本文针对绩溪抽水蓄能电站高水头、长隧洞及复杂地质条件的特性, 建立了包含输水隧洞、地下厂房及主要断层构造的三维有限元渗流分析模型, 设定了正常运行、检修放空及极端暴雨三种典型计算工况。结果表明, 正常运行期, 高压引水隧洞内水外渗形成局部高压区, 但在衬砌与围岩联合作用下, 渗透坡降处于安全范围; 检修放空期, 隧洞衬砌结构承受较大的外水压力, 需重点防范外压破坏; 地下厂房区的排水孔幕与排水廊道形成了有效的降水漏斗, 显著降低了厂房边墙的外水压力。

关键词 抽水蓄能电站; 输水发电系统; 渗流分析; 外水压力

中图分类号: TV743

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.039

0 引言

随着国家“双碳”战略的深入实施, 新能源装机规模持续扩大, 电力系统对调峰填谷的需求日益迫切。抽水蓄能电站凭借其启动灵活、储能效率高等优势, 成为构建新型电力系统的关键组成部分。输水发电系统作为连接上、下水库的核心枢纽, 承受着频繁变动的内水压力, 其渗流特性直接影响围岩稳定性、衬砌结构安全及地下厂房的运行环境。特别是在高水头、地质构造复杂的电站中, 渗流控制不当可能引发管涌、结构开裂甚至渗透破坏等工程事故。因此, 深入剖析输水发电系统的渗流场分布特征, 评价防渗排水系统的有效性, 具有重要的工程实践意义。

1 工程概况与水文地质条件

1.1 绩溪抽水蓄能电站工程概况

绩溪抽水蓄能电站位于安徽省绩溪县, 是一座日调节纯抽水蓄能电站, 总装机容量 1 800 MW。枢纽建筑物主要由上水库、下水库、输水发电系统及地下厂房组成。输水发电系统布置于上、下水库之间的山体内部, 采用二洞四机布置形式。引水系统由上水库进/出水口、引水主洞、引水岔管及高压支管组成, 主洞直径 6.5 m, 采用钢筋混凝土衬砌与钢板衬砌相结合的支护形式; 尾水系统则连接机组尾水管与下水库。地下厂房位于输水系统中部, 采用中部开发方式, 洞室群规模巨大, 包括主厂房、主变洞、尾闸洞等, 主厂房埋深约 400 m。由于电站额定水头高达 600 m 级, 输水系统长期处于

高压运行状态, 对围岩及衬砌结构的抗渗能力提出了极高要求。

1.2 输水发电系统区域地质条件

输水发电系统穿越的地层主要为震旦系休宁组砂岩、砂砾岩及南沱组泥质砂岩, 岩体完整性总体较好, 以 II、III 类围岩为主。然而, 输水线路穿越 F1、F2、F3 等多条区域断层, 断层带内充填构造角砾岩、碎裂岩及断层泥, 透水性强, 构成了主要的渗流通道。地下厂房区位于背斜核部, 节理裂隙较发育, 岩体具有各向异性渗透特征。根据钻孔压水试验成果, 断层破碎带岩体的透水率 q 值普遍大于 10 Lu, 属中等透水层, 而完整性较好的微新岩体透水率多小于 1 Lu, 视为相对隔水层。初始地下水位调查显示, 厂房区地下水位较高, 且受降雨入渗影响明显, 具备形成高外水压力的地质背景。

1.3 水文地质参数选取

渗流分析的准确性高度依赖于水文地质参数的取值。基于详勘阶段的钻孔注水试验及室内渗透试验, 结合工程经验类比, 对计算模型中的渗透系数进行了分区赋值。对于微风化至新鲜砂岩岩体, 渗透系数取 5.0×10^{-6} cm/s; 断层破碎带及影响带, 考虑其导水作用, 渗透系数取 5.0×10^{-4} cm/s; 钢筋混凝土衬砌结构, 考虑混凝土浇筑质量及微裂缝影响, 渗透系数取 1.0×10^{-7} cm/s; 高压固结灌浆后的围岩圈, 渗透系数取 1.0×10^{-6} cm/s。

作者简介: 陶永杰 (1986-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 工程技术。

2 渗流分析模型构建

2.1 数学模型与计算原理

岩体渗流主要沿裂隙网络进行,但对于工程尺度的区域渗流分析,等效连续介质模型仍具有较好的适用性。本文基于达西定律,建立非均质各向异性三维稳定渗流控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

K_x, K_y, K_z

式(1)中, H 为水头函数, K_x 、 K_y 、 K_z 分别为三个主方向的渗透系数。考虑到绩溪电站输水系统沿线岩体陡倾角裂隙发育,计算中设定垂直层面的渗透系数为水平方向的1/5,以反映渗透各向异性。数值求解采用有限单元法,利用专业渗流分析软件进行迭代计算,收敛准则设定为前后两次迭代水头差小于0.01 m。

2.2 几何模型建立与网格剖分

为消除边界效应,模型计算范围涵盖了输水发电系统及周边主要地质单元。水平方向以地下厂房为中心,向上、下游各延伸500 m,左右侧边界取至沟谷分水岭;垂直方向自地表向下延伸至相对隔水层底板以下100 m,高程覆盖范围约为-200 m至800 m。模型精细刻画了引水洞、尾水洞、地下厂房洞室群、断层F1-F3、防渗帷幕及排水孔幕等关键构造。其中,断层采用实体单元模拟,根据其产状进行空间定位;排水孔幕采用以管代孔的“排水子结构法”模拟,以准确反映排水孔的降压效果。网格剖分选用空间八节点六面体单元,并在隧洞衬砌、断层带及排水孔附近进行了加密处理,总节点数约28万个,单元数约26万个^[1]。

2.3 边界条件与计算工况

根据电站运行调度特点,设定三种典型计算工况:

工况一:正常运行期。上水库水位为正常蓄水位,下水库水位为正常蓄水位,引水洞内承受全水头内水压力,尾水洞水位按机组发电流量对应的水位计算。

工况二:检修放空期。模拟单条引水洞放空检修,洞内无水,其余洞室正常运行。此工况下需校核衬砌结构在渗透压力作用下的抗浮稳定性。

工况三:极端暴雨工况。在正常运行基础上,考虑遭遇50年一遇持续暴雨,山体地下水位大幅抬升,评估防渗排水系统的安全裕度。

模型边界条件设定为:模型底部为隔水边界;两侧分水岭边界给定初始地下水位水头;上、下水库库岸坡面按定水头边界处理;地表边界设定为降雨入渗边界,工况三中入渗量按设计暴雨强度折算。

3 输水发电系统渗流场分布特征分析

3.1 正常运行期渗流场分析

在正常运行工况下,引水系统内部充水,由于内水压力远高于周边山体地下水位,水流呈现出由洞室向围岩渗透的趋势,即“内水外渗”。计算结果显示,高压引水洞周围形成了明显的压力梯度带,靠近洞壁的孔隙水压力急剧升高。钢筋混凝土衬砌段,由于衬砌渗透系数较小,承担了约40%的水头差,有效降低了作用在围岩上的渗透压力。然而,在穿越F2断层段的引水洞区域,受断层高透水性的影响,水头损失较小,导致断层带内水力梯度局部集中,最大渗透坡降达到4.5,虽未超过断层填充物的临界破坏坡降,但需关注长期运行下的渗透变形风险。地下厂房区受排水孔幕保护,其周边地下水位显著低于引水洞区域,形成了以厂房为中心的低位汇水区,保证了厂房干燥的运行环境^[2]。

3.2 地下厂房区渗流场特征

地下厂房是电站运行的核心场所,其渗流控制至关重要。模拟结果揭示,设计方案中的排水廊道与排水孔幕构成了立体排水网络,极大地改变了渗流场的形态。在主厂房边墙外侧,地下水位普遍低于厂房顶拱高程,自由面呈漏斗状下凹。孔隙水压力等值线在排水孔附近密集分布,表明排水孔幕有效截断了来自上游引水洞及山体深部的渗流。厂房顶拱处的最大渗透压力约为0.12 MPa,远小于围岩压力,说明厂房区的防渗排水系统设计合理,能够有效控制外水压力。但在主变洞与尾闸洞之间的岩柱区域,由于排水孔布置相对稀疏,存在局部地下水位滞留现象,建议在施工期加强该部位的随机排水孔布设^[3]。

3.3 检修放空期渗流场变化

检修放空期是渗流控制的关键时刻,此时隧洞内部无水,周边岩体中的地下水向洞内渗透,衬砌结构承受全水头外水压力。计算表明,当引水洞放空后,围岩中的地下水迅速向洞室汇集,衬砌外侧水压力迅速升高。特别是在高压支管段,由于上游阀门关闭,外水压力最大值接近1.0 MPa。对于采用透水性较差的混凝土衬砌结构,外水压力直接作用于衬砌外壁,可能导致衬砌被压碎或崩裂^[4]。

4 渗流控制措施效果评价与优化建议

4.1 现有防渗排水系统效果评价

第一,针对高压引水隧洞的防渗效果,计算结果显示,在正常运行工况下,高压引水隧洞周围形成了

明显的内水外渗压力梯度场。设计采用的“高压固结灌浆+钢筋混凝土衬砌”组合结构发挥了显著的阻水作用。然而,在穿越 F2 断层带附近,由于岩体破碎且渗透性具有明显的各向异性,尽管整体坡降可控,但局部监测点的流速矢量仍显示存在集中渗流通道的趋势。

第二,针对地下厂房区的排水系统效能,模拟结果表明,设计布置的三层排水廊道及边墙排水孔幕构成了高效的立体降压网络。在未启用排水系统的工况模拟中,主厂房边墙最大外水压力水头高达 180 m,这将给衬砌结构带来巨大的荷载负担;而在排水系统正常运行状态下,厂房周边地下水位被有效控制在厂房顶拱以下,形成了以厂房为中心的低位降落漏斗。主厂房边墙的外水压力普遍降至 20 m~35 m 水头范围内,排水系统的减压效率超过 80%^[5]。

第三,现有防渗排水系统整体上能够满足电站安全运行要求,但仍存在局部薄弱环节。一是在极端暴雨工况下,山体地下水位大幅抬升,导致尾水隧洞区域涌水量激增,排水廊道负荷增大,部分排水孔出水口流速超过设计预期,存在淤堵风险;二是在检修放空工况下,引水隧洞衬砌外侧外水压力迅速回升,部分管段衬砌外压安全系数偏小,仅为 1.05,安全储备略显不足。

4.2 渗流控制措施的优化建议

第一,强化断层破碎带的针对性防渗处理。针对 F2 断层及影响带区域,建议在原设计高压固结灌浆的基础上,实施“加密加深”处理措施。具体而言,将断层带两侧各 5 m 范围内的灌浆孔间距由原设计的 2.0 m 优化为 1.5 m,并增加深孔帷幕灌浆,深度穿过断层下盘完整岩体不少于 10 m,以形成封闭的“筒状”防渗结构。同时,在断层穿越隧洞段,建议在混凝土衬砌内侧增设高密度聚乙烯防水板或采用高性能抗渗混凝土,阻断内水沿断层带溶蚀扩展的路径,防止长期运行中因断层充填物渗透破坏导致隧洞结构失稳。

第二,优化检修放空工况下的外水压力控制策略。鉴于数值模拟显示部分管段检修期外压安全系数偏低,建议在引水隧洞衬砌设计中引入“减压排水”理念。对于外水压力较高的管段,可在衬砌背后设置系统减压排水孔或环向排水盲管,通过引导外水压力释放来改善衬砌受力状态。此外,应制定严格的放空检修操作规程,控制隧洞内水位下降速度不超过 0.5 m/h,避免因围岩内孔隙水压力消解滞后产生巨大的渗透力冲击衬砌结构。在检修过程中,应加强对衬砌裂缝及渗漏点的监测,及时进行化学灌浆封堵。

第三,完善地下厂房排水系统的长效维护机制。考虑到电站长期运行中,地下水携带的矿物质及岩粉可能造成排水孔淤堵,导致排水效能衰减,建议在排水廊道内预留足够的清洗与疏通通道。在设计上,可将部分排水孔改为可更换滤芯式结构,或在排水孔末端安装反滤装置,防止细颗粒流失引起围岩空洞化。同时,建立排水量与地下水位的相关性预警模型,当监测发现排水量异常减少或地下水位异常升高时,立即启动应急疏通预案。

5 结论

本文以绩溪抽水蓄能电站为工程依托,综合运用水文地质分析与三维有限元数值模拟方法,对高水头输水发电系统的渗流场分布规律及渗控措施效果进行了系统研究,主要得出以下结论:

1. 绩溪抽水蓄能电站输水发电系统渗流场受地形地质条件及建筑物布置影响显著。正常运行期,高压引水隧洞存在明显的内水外渗现象,渗透坡降在断层破碎带较为集中;地下厂房区受排水系统控制,形成了稳定的低水位区。模拟结果揭示了渗流场在空间上的非均匀分布特征,为防渗设计提供了理论依据。

2. 现有防渗排水系统整体设计合理,效果显著。高压固结灌浆有效降低了断层带的渗透坡降,保障了渗透稳定;地下厂房排水孔幕将边墙外水压力削减了 80% 以上,极大地改善了结构受力条件。但在检修放空工况下,部分衬砌结构抗外压安全储备不足,且断层带仍存在集中渗流风险,需引起高度重视。

参考文献:

- [1] 阳志诚,劳俊源.抽水蓄能电站输水发电系统的渗流分析[J].红水河,2024,43(02):91-96.
- [2] 林文,徐力群.某抽水蓄能电站输水发电系统渗流场与渗控措施研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(03):20-26.
- [3] 杨海滔,刘丹,卢斌,等.汪清抽水蓄能电站输水发电系统渗控效果数值模拟研究[J].水电能源科学,2024,42(06):129-133.
- [4] 李锋,杨雨,温立峰,等.抽水蓄能电站输水系统渗控效应及排水措施敏感性分析[J].长江科学院院报,2024,41(12):109-116,132.
- [5] 付鹏,陈孝兵,涂小丽,等.某抽水蓄能电站地下厂房渗流特性及渗控效果研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(04):10-15.