

关于泰安二期抽水蓄能电站下水库库底渗漏示踪试验的研究

顾坚

中国安能集团第二工程局有限公司常州分公司, 江苏常州 213000

摘要: 为验证泰安二期抽水蓄能电站下水库帷幕灌浆防渗的有效性, 查找下水库是否存在其他渗漏通道对大坝结构安全及电站运行效率的潜在影响, 本研究采用示踪试验方法, 选取钼酸铵作为示踪剂, 系统开展了方案设计、实施准备、投放、监测检测等一系列工作。通过分析区域地质水文条件, 确定示踪剂投放点与接收点, 完成了钼离子背景值测定、示踪剂投放量计算, 并制定取样监测和样品检测技术要求, 通过检测数据说明是否存在渗透情况。研究结果可为水库工程库底防渗方案设计与决策提供精准的技术依据, 也为同类抽水蓄能电站水库渗漏探测提供了参考范例。

关键词: 水库渗漏; 示踪试验; 钼酸铵

1 引言

抽水蓄能电站作为重要的能源调节设施, 其水库工程的结构安全与防渗性能直接关系到电站的稳定运行。泰安二期抽水蓄能电站下水库因库周地下水位低于正常蓄水位, 蓄水后库内外将形成显著水头差, 存在库内蓄水通过库底岩层、裂隙组合向下渗漏的风险。

水库大坝渗漏探测^[1]方法多样, 包括直接观察法、高密度电阻率法、探地雷达法等, 但都存在局限性: 直接观察法仅适用于集中渗漏、下游出水集中的情形; 高密度电阻率法、探地雷达对探测条件要求较高, 时间和经济成本较大。示踪试验凭借其能突破复杂地质条件限制、精准锁定隐蔽渗漏通道、定量计算渗漏参数, 且具有非破坏性、操作便捷、成本较低、对水库正常运行干扰小等优势, 成为水库渗漏检测的优选方法。

2 研究背景概况

2.1 工程简介

泰安二期抽水蓄能电站位于山东省泰安市徂徕镇境内, 安装 6 台单机容量 300MW 的可逆式水轮发电机组, 总装机容量 1800MW, 建成后承担山东电网的调峰、填谷、调频、调相及紧急事故备用等任务。

2.2 下水库地质条件

下水库区以中细粒二长花岗岩为主, 该岩体抗风化能力强, 多呈中风化状; 洪冲积层则主要分布于库盆及坝址区, 下部为漂(碎)砾石层, 上部为粉质粘土, 是库区重要的松散堆积层。

下水库区域共发育 3 条断层。1 号断层宽度 2 ~ 3m, 张扭性断层, 带内岩体破碎, 石英脉呈 5 ~ 40cm 不等的宽度或分支侵入, 平行节理发育; 2 号断层宽 0.4 ~ 0.7m, 压性断层, 带内岩体呈强风化破碎, 见碎块岩、擦痕; 3 号断层宽 0.3 ~ 0.5m, 张性断层, 带内岩体破碎, 石英脉充填。断层与裂隙的发育为库

水渗漏提供了潜在的通道, 是库区渗漏风险的重要地质因素。

2.3 下水库水文条件

下水库地下水分为基岩裂隙性潜水和第四系覆盖层中的孔隙性潜水。下水库下坝线左岸地下水位埋深 5~20m, 右岸及副坝埋深 1~30m; 库岸垭口地下水位埋深 10~13m, 左坝头一带地下水位变幅较大, 达 8~16m, 其余部位变幅为 1~5m。

下水库基岩主要为块状和次块状结构, 近地表受风化、节理切割的影响, 局部存在中等透水岩体, 全风化层主要分布于下水库缓坡、山脊地带, 强风化岩层厚度总体不大, 中风化岩体完整性差~较完整, 微风化、新鲜岩体较完整~完整。下水库库内往坝基下游区域岩体总体随风化程度降低, 透水性减弱, 以弱~微透水性为主。

3. 试验设计

3.1 试验目的

本次示踪试验的核心目的是在资料搜集分析与实地调查基础上, 通过示踪试验手段查明下水库现有水体是否存在库底渗漏, 通过分析试验数据, 确定下水库库内水源与大坝下游量水堰处是否存在水力联系。

3.2 示踪剂的选择

3.2.1 理想示踪剂筛选条件

地下水连通示踪试验^[2]中, 理想示踪剂需满足以下条件: ①性质稳定, 在地下水环境中不发生化学反应、不分解变质; ②易溶于水, 能与地下水同步运动, 低浓度下不改变水体密度; ③无毒无害, 对生态环境和人体健康无不良影响; ④检测方法简便, 检出限低、灵敏度高; ⑤岩土介质对其吸附能力小; ⑥地下水中背景值低、波动小; ⑦成本低、易获取。

3.2.2 钼酸铵的选定及特性

结合同类示踪试验经验, 地下水中钼离子背

景值低、变差小，因此本次试验选取钼酸铵作为示踪剂，钼离子为示踪离子。钼酸铵分子式 $(\text{NH})_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ，分子量 1235.85g/mol，为无色或浅绿色棱形或柱状晶体，常温下 100g 水中溶解度为 43.5g，能溶于强酸和强碱，不溶于乙醇，在无还原剂的水中性质稳定，天然水中钼主要以钼酸根 $(\text{MoO}_4)_2^{+}$ 形式存在。

钼在自然环境中含量低微，岩石中钼含量多在 0.2~2 $\mu\text{g/L}$ ，地下水钼浓度多在 0~1024 $\mu\text{g/L}$ ，我国饮用水标准中钼的限度为 0.07mg/L，在合理投放量下不会对环境造成污染，但过量钼会对食草动物产生危害，因此需严格控制钼离子投放量。

3.4 投放点与接收点布设

通过实地调查，下水库原河道从库内穿过大坝直至坝后量水堰区域，是库底渗漏可能性最大的区域，试验时间处于冬季，枯水期上游径流量 0.1m³/s，对库内水体、水量影响较小，因此选定原河的水体为示踪剂投源点。

下水库主坝量水堰作为大坝唯一出水通道，将量水堰布设为检测接受点，通过检测数据可以直接判断量水堰流水是库内渗水还是坝体内部汇水。在量水堰处能否检测到示踪剂能够直接判断库内与下游是否存在水力联系。



表 1 钼酸铵投放量计算表

参数	符号	单位	取值	说明
投源点到接收点距离	r	m	700	上游河道至量水堰距离
含水层厚度	h	m	30	地面至风化边界下限
含水饱和度	S_w	/	0.5	参照地质报告全风化土体
地层孔隙度	φ	/	0.1	
渗流场扫及体积	V_d	m ³	2568270	包含一个月內上游来水量的修正值
分析仪器最小检测极限	MDL	$\mu\text{g/l}$	0.5	
示踪剂用量	A	kg	12.84	

考虑到 A 远大于理论计算值，选择投放量 25kg 作为本次示踪试验的投放量。

4 示踪剂投放与取样检测

图 1 投放点与接收点区位图

3.3 钼离子背景值的确认

在试验开始前要对下游的量水堰测定其钼离子含量，计算区域内信号接收井钼离子的背景值范围。一般来说，地下水中的常规离子分布服从正态分析，微量离子分布服从对数正态分析。判断区域内钼离子的分布特点，采用 X² 检验法进行判断。

首先，假设钼离子服从一般正态分布： $N(\mu, \sigma^2)$ ， μ 为均值， σ^2 为方差，用极大似然估计地下水的钼离子分布特点，具体公式如下：

$$\mu=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nX_i, \sigma^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(X_i-\mu)^2$$

X_i 表示量水堰多次采样的数值， μ 为采样点钼离子浓度的平均值。

在计算出结果后，判断在水平下 $\alpha=0.01$ ，假设是否成立，若服从正态分布则按照测试数据的 5%、95% 作为采样点钼离子背景值的上下限，若不符合正态分布，则按照测试数据的均值加减三倍标准差作为采样点钼离子的标准差。

3.4 试剂投放量的确认

钼酸铵投放量需满足仪器检测要求，同时避免投放量过大造成浪费和环境污染。选取示踪剂 $(\text{NH})_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ；分子式中 7 个 Mo 原子占整个分子量的 54.34%、按照钼酸铵纯度 99.0% 进行简单计算，公式如下：

$$A\gg 10\times MDL\times Vd$$

$$Vd=\pi r^2hSw\varphi$$

式中：A----- 示踪剂用量（kg）；
MDL----- 分析仪器最小检测极限（ $\mu\text{g/l}$ ）；
Vd----- 渗流场扫及体积（m³）；
r----- 投源点到接收点距离（m）；
h----- 含水层厚度（m）；
Sw----- 含水饱和度；
 φ ----- 地层孔隙度。

4.1 试验准备

4.1.1 投放点与接受点原始取样

为确保基础水样具有代表性，保证数据真实反映

水体本底与处理效果,投放点处分别在整个河道上、中、下游各取样 1 次,接受点处取样 3 次。取样时采用取样水润洗 2 ~ 3 次再取样。取样后及时固定样品,在瓶体贴标签上注明批次、时间、取样人。

4.1.2 示踪剂处理

考虑到购入的钼酸铵不易溶解,试验时间气温低、现场水文情况等问题,事先将钼酸铵在容器内溶解。首先将 25kg 粉粒状钼酸铵均匀倒入 10 个 50L 的试剂桶内,加水搅拌,稀释成 500L 的钼酸铵水溶液,密封放置 12 小时,让其充分溶解。

4.1.3 试验材料准备

准备好取样标签、取样瓶等器材;实验室准备好 Mo 标准溶液、高纯硝酸、注射器、石墨管等检测试剂与器材,确保室内检顺利开展。为保证样品精度,试验取样安排专人负责,明确各取样地点、时间,对取样人员进行专业培训,确保取样操作标准化。

4.2 示踪剂投放

本次试验将钼酸铵水溶液直接投放入库区河道内,投放前将 10 个试剂桶中的溶液充分搅拌,在投放区域的上、中、下游部位分别投放 5、3、2 桶钼酸铵溶液,利用河道水流和地下水径流下泄实现自然稀释。投源水体量约 2 万 m³,试验中严格控制来水条件,除上

游少量来水外无其他外来水汇入,避免示踪剂不必要的损失。

4.3 取样检测

根据试验安排,至投放示踪剂开始至最后一次取样完成,试验周期共 1 个月,示踪剂投放后 6~12 小时进行首次取样,后续每 24 小时取样一次,即每天监测 1 次;若接收点出现钼离子异常后,每 12 小时取样一次,即每天监测 2 次,直至试验周期最后一天。

在量水堰处进行取样,每个批次取样 1 瓶,取样后立标注取样地点、时间、人员和编号,取样瓶妥善保存后送至实验室检测。

4.4 数据测定

本次试验以钼离子为检测指标,采用质谱法^[3]进化验分析。本次试验采用原子吸收分光光度计,该仪器由光源、试样原子化器、单色仪和数据处理系统组成,原子化效率高,试样利用率达 100%,石墨炉测定钼的检出限可达 0.05 μg/L,检测灵敏度高,数据精准。同时准备 ICP-MS 仪,与原子吸收分光光度计配合使用,提高检测结果的可靠性。

5 数据分析

根据送样检测,具体数据见下表。

表 2 检测数据表

采样性质	钼 (μ g/l)	取样日期	备注
投放点初始值	19.20	2025.12.25	
接受点初始值	19.25		
接受点采样检测值	19.30, 19.30, 19.25, 19.20, 19.20, 19.25, 19.25, 19.30, 19.25, 19.15, 19.20, 19.20, 19.25, 19.20, 19.20, 19.15, 19.15, 19.15, 19.20, 19.20, 19.25, 19.20, 19.20, 19.20, 19.15, 19.20, 19.20, 19.20, 19.20, 19.20	2025.12.25 ~ 2026.01.23	采样数据 31 组

结果显示取样点钼离子浓度处于 19.15~19.30 μg/L,最大值与最小值差值为 0.15 μg/L。该结果与投放点、接收点的钼离子初始本底浓度相比,未发生显著性异常变化,且浓度波动差值符合水利工程现场地质水文指标检测的合理误差范围,证实本次试验未检测到示踪剂的有效响应信号。

6 结论与展望

整本次钼酸铵示踪试验未在下流监测点检测到示踪剂异常信号,表明泰安二期抽水蓄能电站下水库内与下游量水堰之间不存在可识别的水力联系^[4],无明显渗漏通道或连续渗流路径发育,库内渗漏的风险处于可控范围,库盆整体防渗性能良好,大坝帷幕灌浆质量可靠,防渗帷幕完整性与渗流控制能力满足工程设计要求,有效阻断了库内水向外渗流的通道,为电站长期安全运行提供了可靠保障。

本研究的试验方案和技术方法可为抽水蓄能电站

及水利工程的水库渗漏探测提供参考,后续可进一步开展不同示踪剂的对比试验,优化示踪剂选择和投放技术,提高渗漏探测的精度和效率,为水利工程的防渗安全保障提供更完善的技术支撑。

参考文献

[1] 李延河. “同位素示踪技术在地质研究中的某些应用.” #i{ 地学前缘 }5.2(1998):7.
[2] 车友明. #i{ 基于现场示踪试验的水库渗流研究 }.Diss. 河海大学 ,2006.
[3] 陆昌伟,奚同庚. 热分析质谱法 [M]. 上海科学技术文献出版社 ,2002.
[4] 刘继山. 岩体力学特性及其影响因素 [C]// 全国工程地质大会 .1988.