

# 某铜矿酸性水库垂直防渗治理技术

## Engineering Practice of Vertical Anti-seepage Treatment of Acid Reservoir in a Copper Mine

张林水 刘定斌 郑王佳琦

Linshui Zhang Dingbin Liu Wangjiaqi Zheng

江西铜业股份有限公司(德兴)项目经理部 中国·江西 上饶 334200

Project Management Department of Jiangxi Copper (Dexing), Shangrao, Jiangxi, 334200, China

**摘要:** 论文以中国南方典型有色金属酸性水库防渗治理工程为例,分析该项目的环保特征,并对治理技术路线进行了比选,提出工程实施技术参数和要点,坝体采用化学灌浆+粘土灌浆进行垂直防渗处理,项目实施后针对工程防渗效果进行检测验证,证明防渗效果达到设计要求,本项目实施可为酸性水库防渗治理提供参考。

**Abstract:** Taking the seepage control project of typical nonferrous metal acid reservoirs in southern China as an example, the paper analyzes the environmental protection characteristics of the project, compares and selects the technology roadmap for control, puts forward technical parameters and key points for project implementation, adopts chemical grouting+clay grouting for vertical seepage control treatment of the dam body, and after the implementation of the project, tests and verifies the seepage control effect of the project, proving that the seepage control effect meets the design requirements. The implementation of this project can provide reference for the anti-seepage treatment of acidic reservoirs.

**关键词:** 酸性水库; 垂直防渗; 工程实践

**Keywords:** acid reservoir; vertical seepage control; engineering practice

**DOI:** 10.12346/etr.v5i6.8198

## 1 引言

酸性水库主要收集露天采场和废石场产生的酸性水,除酸性水库还配套建设集水池(截渗池)、清污分流系统和地下水监测井等设施<sup>[1,2]</sup>。酸性水库大坝为不透水土石混合坝,采用水泥和粘土灌浆形成隔水帷幕<sup>[3,4]</sup>。酸性水库建成时间超过14年,经现场踏勘发现坝脚存在酸性水渗漏情况,因此需要对坝体进行防渗治理。中国现有坝体垂直防渗技术包括灌浆处理、截渗墙、HDPE膜垂直防渗墙等<sup>[5]</sup>,经综合比选采用灌浆处理,主要在坝体及坝基防渗采用灌浆处理,灌浆共布置4排,排距0.6m。上游排和下游排灌浆采用水泥粘土灌浆,中间两排灌浆采用化学灌浆。大坝防渗轴线沿上游马道布置,坝顶两岸山体设置灌浆平洞。水泥粘土灌浆底线按深入强风化岩体以下1m控制,化学灌浆底线按深入岩体渗透系数 $1 \times 10^{-7}$ cm/s线(相应的透水率 $\leq 0.01$ Lu)以下2m控制。灌浆工程实施后显著减少了酸性水渗漏量,酸性

水库对周边环境风险逐步可控。

## 2 项目概况

### 2.1 基本概况

废石场贮存的废石属于第Ⅱ类一般工业固体废物,其中废石场的酸性废水主要汇流进入酸性水库存贮,经提铜和废水处理达标后部分回用,部分外排。酸性水库是的重要环保设施,总库容约307万 $m^3$ ,有效库容约247万 $m^3$ 。酸性水库建成运行已久,因地质条件影响,坝脚存在少量的酸性废水渗漏。现酸性水库渗漏水由渗水收集池进行收集,通过渗水回收泵站返回库内,以避免酸性废水外排,但水库渗漏存在潜在环保风险,需进行防渗处理。

### 2.2 酸性水库防渗现状

酸性水库为碾压式斜墙堆石坝,上游斜墙为细粒土料层,主要由风化岩及砾石、粘性土组成,本次地勘成果表明该层

【作者简介】张林水(1966-),男,中国江西乐平人,房建一级建造师,工程师,从事建工系工民建专业研究。

属于中强透水层，防渗性能较差。上游斜墙表面铺设 2mm 厚双毛面 HDPE 土工膜，设计渗透系数  $K \leq 1 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ 。

酸性水库位于矿区排土场下游，地形平坦，水库设计库容 307 万  $\text{m}^3$ ，汇水面积约 4.56 $\text{km}^2$ 。目前该水库酸性水出现渗漏，渗漏位置为混凝土垫与灌浆顶相交面。下游有排洪隧道、坝下两处渗漏点。水库渗漏影响水库的正常运行，并且会给下游环境造成污染风险。本次调查酸性水库坝前断面、酸性水库坝脚渗流水样渗滤液断面，共 3 个监测断面。分析检测了 pH、硫化物、铜、锰、铅、锌、铁、砷、铬、镉、汞、钼、钴共计 13 项。库区酸性水的铜、铁、锰、锌、铅含量较高。对地下水环境存在一定环境风险。酸性水库渗漏将影响下游区域水体、土壤等生态环境，同时酸性水体中含有的 Cu 等金属随着水体渗漏也将造成金属资源的浪费。因此，做好酸性水库防渗处理，改善周边水资源、土壤环境，保护下游居民生活环境，具有重大意义。

### 2.3 水文工程地质情况

根据《酸性水库防渗处理工程初步设计工程地质勘察报告》和《水库酸性废水渗漏环境风险综合调查评估报告（平水期）》，酸性水库库区封闭性较好，库区渗漏的可能性较小，库区上游周边地下水监测井及下游民井水质未受酸性水质明显影响，坝址区存在坝体、坝基、绕坝渗漏以及排水洞渗漏，为巩固水库防渗能力，提升渗漏风险控制水平，需加强大坝的防渗能力。本次防渗治理针对大坝及其建筑物存在的渗漏问题采用垂直防渗的方案，主要措施包括大坝坝体及坝基防渗治理、排水洞防渗治理以及下游渗水回收系统的完善，防渗措施按满足环保防渗透率不大于  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$  进行控制。

## 3 治理技术选择

### 3.1 垂直防渗的标准选择

根据 GB/T29999—2013《铜矿山铜矿酸性废水综合处理规范》和 GB18599—2020《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》，酸性水库的防渗层为：至少厚度 1m 的黏土，渗透系数  $\leq 10^{-7} \text{cm/s}$ ，相应的透水性  $\leq 0.01 \text{Lu}$ ；或 2mm 厚高密度聚乙烯或至少 2mm 厚的其他人工材料，渗透系数  $\leq 10^{-10} \text{cm/s}$ 。

垂直防渗帷幕应嵌入渗透系数  $\leq 10^{-7} \text{cm/s}$  的地层深度不小于 2m，防渗帷幕的厚度可以根据“防渗透等效”原则进行换算。

### 3.2 治理技术比选

方案 1 为坝体防渗墙、基岩灌浆，方案 2 灌浆包括坝体灌浆和基岩灌浆，方案 3 主要为基岩灌浆。3 个方案在坝顶高程延伸至两岸山体的防渗线路重合，基岩均采用帷幕灌浆，至深入岩体渗透系数  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$  线以下 2m。

根据前期地质勘察和本次补充地质勘察资料，3 条防渗线路所处的基岩地质条件基本相同。对于坝体灌浆，方案 1

采用坝体混凝土防渗墙，需穿过原坝体堆石体和排水洞，方案 2 需在马道高程大坝细粒土内灌浆。垂直防渗方案选 3 条防渗轴线进行实施。

方案 1 坝体防渗轴线位于大坝坝顶，与坝轴线平行，分别延伸至最高洪水位与相对不透水层相交处。混凝土防渗墙是一种地下连续墙，具有较好的整体性与防渗性能，广泛应用于大坝防渗加固。在大坝坝顶布置防渗轴线，坝体采用混凝土防渗墙，坝基为防渗墙下灌浆，作为比选方案 1。

方案 2 轴线位于上游 110m 马道，并与两岸相交处沿山体折向坝顶，然后沿坝轴线向两岸山体延伸至最高洪水位与相对不透水层相交处；酸性水库大坝为碾压式防渗斜墙堆石坝，若坝体垂直防渗布置在坝顶处，将穿越坝体堆石区，施工难度较大，因此考虑将垂直防渗轴线向上游移至高程 110m 马道部位。若坝体采用防渗墙，两岸坝肩采用帷幕灌浆，衔接部位较多，因此在马道处布置垂直防渗体系，采用帷幕灌浆防渗形式，作为比选方案 2。

方案 3 轴线为原大坝帷幕灌浆沿上游坝脚周边布置，并与两岸相交处沿山体折向坝顶，然后沿坝轴线向两岸山体延伸至最高洪水位与相对不透水层相交处。酸性水库原大坝帷幕灌浆沿上游坝脚周边布置，因此考虑利用原帷幕灌浆压浆板，对原防渗线进行补强，同时在排水井上游设置围堰，使坝脚压浆板和排水涵管衔接处具备干地施工条件，将大坝与排水洞接触部位进行彻底加固处理，因此，将坝基帷幕沿原防渗线路布置，迎水面坝坡防渗土工膜拆除重新铺设，作为垂直防渗比选方案 3。

防渗方案对比表如表 1 所示。

综上所述，综合比较，方案 1 防渗可靠性较高，但施工难度较大，投资较大，施工中存在影响排水洞结构安全的不利因素；方案 2 可满足防渗要求，施工难度小，且投资节省；方案 3 可满足防渗要求，但围堰施工难度大，有害弃渣处理难度大，投资较大。经综合比选，大坝布置推荐采用方案 2：沿上游马道布置方案。

## 4 垂直防渗技术方案

### 4.1 坝体防渗措施选择

防渗轴线处坝体为细粒土料层，主要由风化岩及砾石、粘性土组成，该地层条件下，常见的防渗措施包括混凝土防渗墙<sup>[6]</sup>、高压喷射灌浆、水泥粘土灌浆<sup>[7]</sup>、化学灌浆<sup>[8]</sup>、HDPE 防渗土工膜<sup>[9]</sup>等。

酸性水库灌浆轴线处的坝体为细粒土料层，其渗透系数较大，且为水下酸性环境，根据以上防渗措施的特点及对本工程条件的适应性，选择坝体防渗措施如下：

①高程 110m 马道以下坝体不具备干地铺设 HDPE 土工膜的条件，采用灌浆处理。根据水泥粘土浆具有良好的化学惰性、与酸性液体含有的金属离子不易发生反应的特点，在马道靠上游侧设置一排水泥粘土灌浆，在土体内初步形成

表1 防渗方案对比表

防渗方案	优点	缺点	本项目适宜性分析
坝体防渗墙	①适用性较广，适用于各种地质；②实用性强，可用于防渗加固，墙体最大深度可达200m左右；③安全可靠，墙体的渗透性能和力学性能可根据地层和结构要求进行设计和控制，混凝土防渗墙渗透系数可达 $1 \times 10^{-7}$ cm/s。直接投资为6185.93万元	防渗墙需穿过原坝体堆石体和排水洞，施工难度大	水库进场交通条件，无法满足防渗墙施工所需的大型设备到达现场
坝体+基岩灌浆	①可利用现有酸性水处理系统将水位降低至死水位便可施工，不需设置围堰，施工机械采用较常规的钻孔灌浆设备；②灌浆施工对坝体结构及排水洞结构安全影响很小。直接投资为6150.22万元	需要控制酸性水库水位	从施工条件和投资比较方案2优
基岩灌浆	需将水位降低至死水位并在大坝上游设置导流围堰，围堰回填工程量约4500m <sup>3</sup> ，直接投资为6203.18万元	在酸性水条件下，围堰闭气施工难度较大	方案3围堰回填工程量较大，且清挖淤泥及围堰拆除后的渣土均为有害废物，处理难度较大，处理风险高，施工条件比较较差

结石体帷幕，为下游排化学灌浆施工提供无酸或少酸环境，提高化学灌浆帷幕质量。水泥粘土灌浆下游布置两排化学灌浆，作为主要防渗体。坝体灌浆共布置4排，从上游至下游，第1排为水泥粘土浆，第2排及第3排为化学灌浆，第4排为水泥粘土浆。为便于施工和防渗体系的衔接，帷幕灌浆前在马道上浇筑混凝土压浆板。

水玻璃和丙烯酸盐在土体中的固结体强度较大，耐久性较差，土体灌浆应用较少；硅溶胶较这两种材料固结体强度大大提高，且耐久性较好。因此，坝体化学灌浆采用硅溶胶灌浆材料。

②高程110m马道至防浪墙之间大坝上游面具备干地施工的条件，因此将原HDPE土工膜拆除后重新铺设HDPE土工膜。

③土工膜与防渗灌浆帷幕搭接处理。

为形成完整的防渗体系，坝体防渗土工膜与帷幕灌浆压降板之间要求连接严密、牢靠。土工膜与混凝土压浆板连接时，首先在混凝土面上间隔20cm打孔，安装膨胀螺栓，沿连接长度安装一条厚5mm宽10cm橡皮，再将土工膜折叠3层打眼穿入螺栓，然后再用一层橡皮、钢压条通过膨胀螺栓将土工膜固定。

#### 4.2 坝基及坝肩防渗治理

坝基及坝肩帷幕灌浆在灌浆平洞内进行施工，帷幕灌浆布置4排，排距0.6m，从上游至下游，第1排为水泥粘土浆及水泥灌浆，基岩面以下5m范围内采用水泥粘土灌浆，下部采用水泥灌浆，按深入强风化岩体以下1m控制；第2排及第3排为化学灌浆，每排灌浆孔的间距均为1.2m，按深入透水率 $1 \times 10^{-7}$ cm/s以下2m控制；第4排为水泥粘土浆及水泥灌浆，基岩面以下5m范围内采用水泥粘土灌浆，下部采用水泥灌浆，按深入强风化岩体以下1m控制。其余段基岩帷幕灌浆布置2排，排距0.6m，均采用化学灌浆，每排灌浆孔的间距为1.2m，按深入透水率 $1 \times 10^{-7}$ cm/s以下2m控制。

#### 5 工程防渗效果验证

为了保证酸性水库防渗治理工程的施工质量，中国水利水电科学研究院开展了酸性水库帷幕灌浆质量检测及室内试验分析。防渗治理工程治理检测主要包括基岩部分的灌浆帷幕检测、覆盖层部分的灌浆帷幕检测。现场注水试验表明，地层经灌浆处理之后，覆盖层与岩体的渗透系数均在 $10^{-7}$ cm/s量级以内，基本满足设计要求。孔内电视检测表明：基岩内孔壁光滑，完整性好，可见其中裂隙有明显浆液结石体充填。覆盖层内孔壁表面密实，无明显较大裂隙出现。无明显渗漏发生。根据检测方案，针对酸性水库防渗治理工程的重点部位进行抽检。现场检测和室内抗渗试验等结果表明，帷幕灌浆施工防渗效果整体较好，基本满足设计要求。本项目的成功实施，为中国现有酸性水库防渗治理改造提供借鉴。

#### 参考文献

- [1] 陈永贵,张可能,邹银生.酸性污水库坝渗流稳定性分析及防渗加固处理[J].中南大学学报(自然科学版),2006,37(6):1171-1176.
- [2] 颜荣华,郭玉君,朱明,等.矿山污水库防渗帷幕腐蚀机理分析及防腐对策研究[J].中国铝业,2022,46(5):61-64.
- [3] 王绍平,黄磊,刘兵.膏浆灌浆技术在矿山酸水水库大坝防渗工程中的应用[J].水利建设与管理,2022,42(10):52-56.
- [4] 李道明,余国平,汪金卫,等.铜矿山污水库防渗工艺探讨[J].现代矿业,2021,37(11):243-246.
- [5] 孟磊,龚雪刚,吴亮亮,等.矿区酸性水库防渗治理工程方案比选研究[J].有色金属(矿山部分),2022,74(6):28-32.
- [6] 赵江倩,黎剑华,颜荣华.金属矿山蓄污水库渗漏分析及防渗技术研究[J].金属矿山,2008(12):39-41.
- [7] 陈永贵,邹银生,张可能.粘土固化注浆在污水库防渗中的应用研究[J].矿业研究与开发,2007,27(2):79-81.
- [8] 王林林.化学灌浆在宜兴电站酸性水治理中的应用[J].大坝与安全,2011(3):56-61.
- [9] 汪武,黄和文.HDPE土工膜柔性垂直防渗墙在污染治理项目中的应用[J].中国建筑防水,2022(10):38-43.