

我国上游法尾矿坝理论研究与工程实践综述

蒋卫东 张春生

(江西铜业公司 贵溪 335424) (中南大学资源与安全工程学院 长沙 410083)

李夕兵

摘 要 上游法尾矿坝是我国尾矿坝的主要坝型, 其安全问题非常重要。本文综述了我国上游法尾矿坝在筑坝、渗流、排渗、地震反应、管理、监测以及环境影响方面的理论研究及工程实践, 并着重介绍了大石河尾矿坝的研究成果, 给出了基于渗流的上游法尾矿坝研究的几个建议。这些内容对指导上游法尾矿坝设计以及中后期管理, 有较大的参考价值。

关键词 上游法尾矿坝理论研究 工程实践 渗流 综述

中图分类号 X751 **文献标识码** B **文章编号** 1004 - 4051 (2003) 08 - 0054 - 04

REVIEW OF THEORETICAL STUDY AND ENGINEERING PRACTICE OF TAILINGS DAM CONSTRUCTED WITH UPSTREAM METHOD IN CHINA

Jiang Weidong Zhang Chunsheng

(Jiangxi Copper Company ·Guixi 335424)

Li Xibing

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University ·Changsha 410083)

Abstract: The safety of tailings dam constructed with upstream method (TDM), which is main style of tailings dam in China, is very important. In this paper, theoretical study and engineering practice of TDM, including dam construction, seepage, drainage, seismic response, management, monitoring, and environmental impact, is reviewed. As an emphases, the study result of Dashihe Tailings Dam is introduced. Finally, the future study based on seepage is discussed as the remarks. These contents may have reference to design and management of TDM during the middle and latter periods.

Keywords: Tailings dam constructed with upstream method, Theoretical study, Engineering practice, Seepage, Review

1 引 言

堆筑尾矿坝的方法分为上游法、中线法及下游法。上游法尾矿坝由于浸润线较高, 特别容易发生震害, 如 1965 年智利 Laliagua 地震和 1978 年日本 Izur-Oshima 地震, 造成了周围许多上游法尾矿坝溃坝。国外较少采用上游法筑坝, 我国由于历史原因以及上游法具有的堆筑工艺简单、管理方便及成本低的优点, 广泛采用了这种坝型, 现有的上一定规模的 1500 余座尾矿坝, 大部分采用上游法堆筑。许多科研及工程技术人员对上游法尾矿坝进行了大

量理论研究及工程实践, 形成了丰富的理论模式及实践经验。本文对这些成果作一综述, 以期对上游法尾矿坝设计, 特别是中后期管理有较大的参考价值。

2 尾矿坝堆筑

2.1 基础坝堆筑

上游法尾矿坝包括基础坝和堆积坝。从降低浸润线的角度看, 基础坝高一些好; 从减少工程投资的角度看, 基础坝低一些好。太钢峨口铁矿采用定向抛掷爆破施工滤水堆石基础坝, 不仅节约基建投

资 50%，并且加快了施工进度；经过 20 年的运行，坝体状态正常。工程实践表明，上游法尾矿坝宜选用透水基础坝，特别是对采用细粒尾矿堆积的尾矿坝。通过分析，认为初期坝高取总坝高的 1/3 ~ 1/6 较合适。

2.2 堆积坝堆筑

堆积坝一般采用池填法和坝前分散管排放，人工配合推土机堆筑。太钢峨口铁矿采用水力旋流器分级沉砂移动筑坝，筑坝高度 100m，在坝外坡面形成了一层粗粒级尾矿。一些采用水力旋流器的尾矿坝工程实践表明，这层粗粒级尾矿对防止坝体振动液化、减少坝坡渗流破坏起到了显著效果。

对大冶铁矿白雉山尾矿坝及西石门铁矿后井尾矿坝，采用了旋流器与分散管交替排放联合堆筑子坝新工艺；经工程地质勘察和试验研究表明，采用旋流器与分散管交替排放联合堆筑子坝工艺的尾矿坝，其沉积规律与上游法常规工艺堆筑的尾矿坝一致，只是增加了 1 个粒度粗、级配好、密度高的尾细砂保护体。

2.3 细粒尾矿堆坝

细粒尾矿堆坝一直是上游法尾矿坝工程领域的重要研究课题，分析了细粒尾矿堆坝的不利因素，认为细粒尾矿堆成的坝体，静、动力稳定性都较差。还对细粒泥层内超静孔隙水压力的积累和消散过程进行了分析：基于一维固结、小应变及土性参数不随有效应力水平变化等假定，提出了坝坡段、干滩段和人工湖段的超静孔隙水压力 u_z 。计算公式，其中人工湖段为

$$u_z = \frac{16aH_2}{3c_v^{1.3.5}} \frac{1}{n^3} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-n^2 \cdot c_v(t_2 - t_1)}{4H^2} \right] \right\} \sin \frac{n \cdot z}{2H} \exp \left[\frac{-n^2 \cdot c_v(t - t_2)}{4H^2} \right] \quad (1)$$

式中符号含义见原文（下同）。

对于我国高寒地区细颗粒尾矿筑坝，尾矿坝必须具备一套完整的排渗设施，最大限度地降低浸润线的高度，控制冻结体的产生，同时对子坝进行土工布加固。

3 尾矿坝渗流及排渗

3.1 尾矿坝渗流

渗流是影响尾矿坝稳定性的最主要因素，获取渗流场的方法一般有现场测量法、数值模拟计算法、物理模型试验法。用一维元胞自动机模型，模拟和预测燕昌尾矿坝地下水位的动态演化过程，预

我国上游法尾矿坝理论研究及工程实践综述

测结果和现场实测值比较接近。将正置模型用于尾矿坝渗流场的电模拟试验。

研究了尾矿坝渗流的计算，提出了以盲沟抽水代替排井抽水的浸润线计算方程

$$y = \begin{cases} \sqrt{h_0^2 + \frac{q_1}{K}(X - L_0)} & X < L_0 \\ \sqrt{b_0^2 + 2b_0X} & X > L_0 \end{cases} \quad (2)$$

通过分析得出：放矿水对浸润线有重要影响，分散放矿比均匀放矿的浸润线低；分散放矿时放矿水对浸润线影响的修正系数为 0.5 ~ 0.8 h ， h 为考虑放矿水影响与不考虑放矿水影响之差，通过有限元计算分析，认为以下几种主要因素对尾矿坝渗流场影响的次序是，尾矿堆坝坝高 > 坝内各层渗透系数之比 > 尾矿堆坝下游坡比 > 尾矿堆坝干滩长度 > 初期坝坝高 > 尾矿堆坝上游坡比；当坝高一定时，以渗透系数的影响最大，干滩长度对浸润线的影响在坝体分层确定之后，显得特别重要，在洪水期应严加控制，以免发生因干滩长度过短而造成浸润线上升过大的现象。这些结论对指导尾矿坝设计与管理有着重要意义。

3.2 尾矿坝排渗

降低尾矿坝体浸润线的方法有水平排渗，轻型井点排渗、辐射井式排渗等。各种方法的优劣不尽相同，具体选用要结合尾矿坝的渗流状况、所处地理位置等来确定。本钢歪头山铁矿小西沟尾矿坝采用了水平孔 - 竖直袋状砂井联合自流排渗技术，钟山铁矿尾矿坝采用水平排渗技术，狮子山铜矿杨山冲尾矿坝，歪头山铁矿小西沟尾矿坝采用水平孔 - 竖直渗井联合自流排渗技术，均取得了很好的效果

土工织物广泛用于尾矿坝排渗设施，但是经常会遇到淤堵问题。通过对武山铜矿尾矿坝排渗系统的实验研究，得出氢氧化铁凝胶在织物纤维上的附着是化学淤堵的主要机理，尾矿中含有充分多的细粒黄铁矿且滤层处于非饱和渗流带或饱和 - 非饱和交替变化渗流带，是土工织物发生严重化学淤堵的必要条件。研究了土工布在尾矿坝应用时机械淤堵及化学淤堵的问题，建议选用 50g/m² 土工布作为反滤材料，400g/m² 土工布作为排水体保护材料；在选用土工布规格时，应考虑在不同荷载下作厚度校正；对于碱性较大的渣，应注意滤饼板结现象。通过研究得出土工织物渗透性准则：当被保护土为尾砂或粉煤灰时（渗透系数为 K_s ），无压

条件下测定的土工织物渗透系数 K_g 应满足

$$K_g \geq 100 K_s \quad (3)$$

当被保护土为粘土时, 无压条件下测定的土工织物渗透系数 K_g 应满足

$$K_g \geq K_s \quad (4)$$

对于尾矿回水系统, 根据大量的试验研究, 给出了高尾矿坝具有圆形框架式进水塔的竖井排洪道, 以环形堰流、孔流, 孔堰多层流及有压管流等各种流态运行时的泄流能力计算公式, 如环形孔堰多层流的流量 Q 计算公式为

$$Q = M_w L \sqrt{2g} H_w^{\frac{3}{2}} + \mu_{0i} L e_i \sqrt{2g} H_{0i} \quad (5)$$

4 尾矿坝地震反应研究

4.1 大石河尾矿坝地震反应研究

我国东北、华北地区的十几座大型尾矿坝经受住了 1975 年海城 M7.3 地震和 1976 年唐山 M7.3、M7.1 地震的强烈袭击, 这种现象引起了很多学者的关注。以冶金部建筑研究总院和加拿大阿伯塔大学、不列颠哥伦比亚大学为主组成的中加合作研究组, 历时 5 年, 在深入研究唐山地震特征、坝体震害表现的基础上, 选择有代表性的大石河尾矿坝, 进行了全面系统的勘察、试验和计算分析, 取得了一整套具有国际先进水平的新成果。作为国家重点攻关课题, 研究成果对上游法尾矿坝研究有普遍的指导意义。

(1) 阐明了有研究人工输入地震动的必要性, 并提出了三种基岩输入地震动时程曲线;

(2) 现场勘察除了采用常规方法外, 首次在尾矿坝上采用了薄壁取样器—现场干冰冻结存运技术和同位素勘察技术; 在标贯试验中采用了能量标定技术等。现场原位测试技术包括标准贯入试验 (SPT)、静力触探试验 (CPT)、波速试验 (SWV) 及同位素测原位密度试验等。通过对 SPT、CPT 和 SWV 三种测试方法进行对比分析, 表明对 $D_{50} = 0.096 \sim 0.295$ 的尾矿砂, 可利用分析所得的成果进行相互换算。

(3) 进行了包括静三轴试验、稳态强度试验、动三轴试验、动单剪试验及共振柱试验在内的室内试验, 得出许多有价值的结论。通过对尾矿粘性土的动力变形和强度特征分析, 得出尾矿粘性土动剪切模量的衰减速率, 随着粘粒含量的增加和塑性指数的增大而减小; 粘滞阻尼比受塑性指数的影响不明显。尾矿粘性土的动强度随着土样塑性指

数的增大而增大, 强度衰减速率随着塑性指数的增加而逐渐变缓。

(4) 提出了一个适用于尾矿坝沉积滩液化分析的简化法, 即平均动剪应力 σ_{av} 计算式

$$\sigma_{av} = 0.65 \cdot \frac{h}{g} \cdot a_{\max} \cdot r_d \cdot r_s \cdot K \quad (6)$$

(5) 提出了用稳态理论分析尾矿坝地震液化与稳定的方法, 其流程见图 1 所示。

图 1 流滑与动力稳定分析框图

通过对大石河尾矿坝二维真非线性有效应力动力反应分析, 得出尾矿坝在沉积滩、水池较大范围内会发生液化, 液化最大深度为浸润线下 14m;

在坝顶区振动产生的最大超孔压为其上覆有效应力的 40%; 在下游坡和沉积滩上, 会出现水平拉应力, 进而导致地震裂缝的产生。

4.2 其它尾矿坝地震反应研究

通过对大冶铁矿白雉山尾矿坝的地震反应分析, 得出考虑尾矿坝—地基相互作用时, 坝体动位移增大 15%~20%, 坝体的动应力增加 10%左右的结论。通过对银山铅锌矿尾矿坝尾砂的动力特性研究, 认为中值粒径 d_{50} 和不均匀系数较小的尾矿砂相对更容易液化, 并证实了初始应力状态和相对密度都较低的砂容易发生液化。

5 尾矿坝管理及监测研究

5.1 尾矿坝管理研究

我国有不少小尾矿坝发生溃坝事故, 主要原因之一是管理不规范, 由此可见, 管理对尾矿坝安全至关重要。提出在执行尾矿库管理规范的同时, 应不断引进当代先进的技术, 不断吸纳尾矿库工程研

研究的最终成果；并认为尾矿坝管理不应是矿山行为，而应是社会行为，只有这样，才能保证尾矿坝从设计、建设到闭库一系列过程的安全，以及与环境的协调。

采用模糊灰色综合评价方法，将不同尾矿坝放进同一个大系统中去考虑，能够比较客观地评定尾矿坝的安全状况。采用事故树方法，详细分析了导致汛期尾矿坝溃坝的原因，认为采取有效的排洪措施，包括修复或增设排洪设施、汛前降低库水位等，是确保尾矿坝安全渡汛的关键。

5.2 尾矿坝监测研究

尾矿坝常见的监测项目有坝体水平位移、坝体沉降，坝体固结、坝体孔隙水压力，坝体浸润线、绕坝渗流及渗流水水质。由于浸润线状况对上游法尾矿坝稳定性最为重要，因此一般尾矿坝均设有浸润线监测。目前，国内矿山主要还是通过测压管测试浸润线，自动化监测的例子很少。研究了德兴铜矿2号尾矿坝安全自动化监测问题，通过埋设在坝体内的孔隙水压力探头，对尾矿坝浸润线和孔隙水压力进行自动监测。

6 尾矿坝环境影响研究

尾矿坝对环境有很大的影响，在某金矿溃坝3、4年后，对溃坝区域进行了研究，发现被污染土壤中氰化物的自然降解速度非常缓慢，被氰化物污染的土壤成为环境中的二次污染源，对地表环境、地面水及地下水有长期潜在危害；提出尾矿浆在生产的同时就应对其氰化物进行处理，以保护环境。

研究了铁笼尾矿坝废水净化课题，提出了一种经济有效的方法。通过在坝的迎水面内侧敷设过滤和净化材料，使废水中悬浮物、重金属离子和其他有机物等与过滤材料进行物理化学作用，废水通过坝体后，变成无毒的清水，从而达到净化废水的目的。

7 结 语

本文综述了上世纪80年代末到本世纪初我国上游法尾矿坝的基本情况，反映了我国乃至世界范围内上游法尾矿坝理论与工程实践的总体水平。从文献综述看，大部分理论研究及工程实践都是围绕渗流以及由渗流引发的坝体设计、排渗、地震液化、汛期管理、环境污染等展开的，这是因

为渗流是影响上游法尾矿坝稳定的最主要原因。目前，我国大多数上游法尾矿坝都已进入中后期，为确保坝体安全，建议在以下几个方面加强对渗流的研究：

(1) 采用固定间隔时间观测浸润线

采用固定间隔时间观测浸润线，可以得到等时序列的浸润线，这种数据适合于作理论分析。

(2) 对浸润线进行非线性分析

根据浸润线观测数据，有时可以直观地判断浸润线状态，但大多数情况下，这种判断很难揭示问题的实质。浸润线由多种因素决定，其演化必然是一个复杂的非线性系统，特别是在浸润线状态异常时，蕴含着丰富的混沌现象，应进行非线性分析，对此作者已有另文研究。

(3) 将降低浸润线工程措施与理论研究相结合

采取一种工程措施降低浸润线，其效果往往不能在施工前得出，而是在工程结束后，通过测压管观测来证实。如果能建立浸润线演变的理论模式，并将其与工程治理相结合，必将起到事半功倍的效果。这种理论模式的建立，是今后尾矿坝研究的一个方向。

(4) 自动化监测研究

我国水工大坝安全自动化研究取得了很大成果，但在尾矿坝上进展很小，其中一个很大的原因是因为监测费用较大，矿山难以承受。因此，开发适应尾矿坝特点、性能稳定、价格低廉的自动化系统，是今后我国尾矿坝工程的一个研究重点。

(收稿日期：2003年1月19日)

【作者简介】 蒋卫东（1968—） 博士研究生 高级工程师 主要研究方向为尾矿坝系统工程安全

李夕兵（1962—） 博士 博导 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授 中南大学资源与安全工程学院院长 湖南省政协常委 曾获中国图书奖 中国青年科技奖等 承担了国家自然科学基金 国家863、973重大科研课题多项 发表论文100余篇

张春生 高级工程师 江西铜业公司安环处处长