

尾矿库支沟发育地形的排洪系统设计

郭星辰

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830002

摘要：随着尾矿库建设规模不断扩大，支沟发育地形下的排洪系统设计愈发关键。本文深入剖析尾矿库支沟发育地形特征，涵盖沟谷形态、地质条件及汇水特性。在设计方法上，坚持安全、经济与环保并重原则，精准确定防洪标准，搭建科学洪水计算模型。针对主沟-支沟联合排洪系统，制定支沟初期与后期差异化排洪方案、合理规划主沟排洪，同时采取井筒重叠等结构优化措施，并布设监测系统，确保排洪系统稳定运行与尾矿库安全。

关键词：尾矿库；支沟发育地形；排洪系统设计

引言：尾矿库作为矿山生产的重要设施，其安全运行关乎周边生态环境与下游居民生命财产安全。在众多影响尾矿库安全的因素中，排洪系统设计至关重要。尤其在尾矿库处于支沟发育地形时，复杂的地形地质条件与独特的汇水特性，给排洪系统设计带来了巨大挑战。传统的排洪设计方法难以直接适用，需要深入研究该地形特征，结合先进设计理念与技术手段，构建科学合理、安全可靠的排洪系统。这不仅有助于保障尾矿库自身稳定，也对区域生态保护和可持续发展具有重要意义。

1 尾矿库支沟发育地形特征分析

1.1 地形地质条件

(1) 沟谷类型呈现典型树枝状“掌形”宽谷形态，该形态由多支次级支沟向主沟汇聚形成，类似手掌分支结构。沟谷切割深度差异显著，介于12~80m之间，浅切割区域主要分布于支沟上游平缓段，深切割区域集中在主沟与支沟交汇的陡降段；沟谷整体坡度维持在17~39°，此坡度范围既保障了沟谷内水流的自然排泄能力，又避免因坡度过陡引发水土流失加剧的问题。(2) 第四系堆积层中冲洪积层发育程度较低，表明该区域历史上受洪水冲刷搬运作用影响较小，沟谷两岸的物质组成相对稳定。同时，坡面植被覆盖率超过60%，较高的植被覆盖率能够有效固持坡面土壤，减少雨水对坡面的直接冲刷，降低沟谷内泥沙淤积的风险，对维持沟谷地形的稳定性起到重要作用。(3) 地形上以山脊作为天然分隔界限，将不同支沟区域清晰划分，形成相对独立的地理单元。地质构造方面，勘察范围内未发现断层构造及软弱夹层，断层的缺失避免了因构造活动导致的地形变形、裂缝等问题，而无软弱夹层则确保了沟谷岸坡及底部的岩土体具有较好的整体性和承载能力，为尾矿库的建设和运营提供了稳定的地质基础。

1.2 汇水特性

(1) 在汇水面积分配上，支沟汇水面积占尾矿库总汇水面积的35%，该占比表明支沟在整个库区汇水系统中占据重要地位。受季风气候影响，暴雨期支沟区域易形成集中降雨，导致洪峰流量骤增，实测数据显示暴雨期支沟洪峰流量可达 $120\text{m}^3/\text{s}$ ，如此大的洪峰流量若不能及时疏导，将对尾矿库的防洪安全构成严重威胁。(2) 主沟与支沟之间存在45m的高差，显著的高差使得支沟水流在汇入主沟时具有较大的势能，同时也促使支沟形成独立的汇水单元。独立汇水单元的形成意味着各支沟的汇水过程相对独立，不会出现不同支沟水流相互干扰、叠加的情况，这一特性为针对性制定各支沟的防洪措施提供了便利^[1]。(3) 尾矿库沉积滩坡度控制在0.8%~1.2%的范围内，沉积滩作为尾矿库储存尾矿和调节洪水的重要区域，其坡度大小直接影响调洪库容的计算结果。坡度偏小会导致沉积滩面过于平缓，洪水在滩面的停留时间延长，可能增加尾矿库漫顶风险；坡度偏大则会使沉积滩的有效储水空间减少，降低调洪库容，因此需精准控制沉积滩坡度，确保调洪库容满足设计防洪标准。

2 尾矿库支沟发育地形的排洪系统设计方法

2.1 设计原则

(1) 安全优先原则是排洪系统设计的核心准则，需严格满足尾矿库防洪标准与调洪需求。结合支沟“掌形”宽谷、独立汇水单元的地形特征，排洪系统需具备应对暴雨期 $120\text{m}^3/\text{s}$ 洪峰流量的能力，同时考虑主沟与支沟45m高差带来的水流势能影响，通过合理布局构筑物，确保洪水在任何工况下均能安全排出，避免漫坝、溃坝等风险，保障下游居民生命财产及生态环境安全。(2) 经济合理原则要求在满足安全的前提下，通过多方案技术经济比较确定构筑物型式。针对支沟切割深度12~80m、坡度17~39°的地形差异，分别对比明渠、涵洞、排水管等不同排洪构筑物的建设成本、施工难度及

运维费用。例如，在浅切割缓坡段可优先采用明渠，降低施工成本；在深切割陡坡段则选用抗冲击能力强的钢筋混凝土排水管，平衡安全与经济性，避免过度设计造成资源浪费。（3）环保要求需贯穿设计全过程，一方面要确保排洪水质达标，通过在排洪系统中设置沉淀池、过滤层，去除尾矿水中的悬浮物及有害物质，避免污染下游水体；另一方面需防止砂土流失，结合坡面 $>60\%$ 的植被覆盖率，在排洪构筑物进出口设置截砂设施，同时对排洪沟沿线边坡进行生态防护，减少雨水冲刷导致的砂土进入排洪系统，维护区域生态平衡。

2.2 防洪标准确定

（1）防洪标准确定严格依据《防洪标准》（GB 50201-94），并结合尾矿库库容、坝高及下游危害程度综合判定。首先根据尾矿库总库容及坝顶高程，明确库区防洪等级；再结合支沟汇水面积占比35%、暴雨期洪峰流量大的特点，以及下游村庄、农田的分布情况，评估洪水可能造成的危害程度，为防洪标准的细化提供依据，确保标准制定既符合规范要求，又贴合工程实际风险。

（2）设计洪水重现期采用分阶段设定方式，初期设定为200年一遇，中后期提升至500年一遇。初期尾矿库堆存高度较低、库容较小，且支沟排洪系统尚未完全配套，200年一遇标准可平衡安全与建设进度；随着尾矿堆存高度增加、库容扩大，支沟汇水对库区的威胁随之上升，同时排洪系统逐步完善，中后期提升至500年一遇，以应对更大规模洪水，保障尾矿库长期安全运营^[2]。（3）校核标准采用可能最大洪水（PMF），考虑到支沟区域受季风气候影响，极端暴雨事件可能引发超标准洪水，需以PMF作为校核依据。通过分析区域历史暴雨数据、地形对降雨的增幅作用，结合支沟独立汇水特性，计算PMF对应的洪峰流量与洪水总量，检验排洪系统在极端工况下的过流能力，确保即使遭遇罕见洪水，排洪系统仍能正常运行，避免重大安全事故。

2.3 洪水计算模型

（1）暴雨参数选取以区域气象站实测数据为基础，确定24小时设计暴雨量为320mm，雨型采用双峰型。双峰型雨型符合该区域暴雨多呈现“前峰小、后峰大”的特点，能够更真实地模拟暴雨过程中降雨量的时空分布，为后续洪水计算提供精准的降雨输入条件，避免因雨型选择不当导致洪水计算结果偏差，影响排洪系统设计准确性。（2）调洪演算采用水量平衡法，重点考虑沉积滩渗透损失。根据沉积滩0.8%~1.2%的坡度，计算沉积滩的有效调洪面积与容积；在演算过程中，不仅需计算入库洪水总量、排洪系统出流量，还需结合沉积滩

岩土体的渗透系数，量化沉积滩的渗透损失量，修正调洪过程中的水量平衡关系，确保计算得出的调洪库容、最高洪水位等关键参数准确可靠，为排洪构筑物尺寸设计提供依据^[3]。（3）水力计算采用自由出流与半压力流组合模式，最终确定排水管直径为1.2m。在洪水初期，库水位较低，排水管处于自由出流状态，按明渠流公式计算过流能力；随着洪水位上升，排水管逐渐转为半压力流，采用压力流公式修正过流能力。结合支沟洪峰流量120m³/s及调洪演算结果，通过试算不同管径对应的过流能力，最终确定1.2m管径既能满足各流态下的过流需求，又能避免管径过大导致成本增加或管径过小造成洪水壅高。

3 尾矿库主沟-支沟联合排洪系统设计

3.1 支沟排洪设计

（1）初期方案采用排水斜槽-排水管系统，该系统适配支沟“掌形”宽谷、独立汇水的地形特征，能快速疏导初期较小洪量。排水斜槽作为汇水入口，可收集支沟坡面及沉积滩区域的雨水，再通过排水管将洪水输送至主沟排洪系统，形成“汇-输”一体化的排洪路径，避免初期洪水在支沟内滞留引发淤积或漫溢。（2）排水斜槽设计为0.8m×1.0m（宽×高）的矩形断面，该断面尺寸结合支沟初期200年一遇洪水的过流需求确定，既能保证足够过流能力，又避免断面过大增加施工成本；斜槽坡度设定为1:500，此坡度可形成稳定水流速度，防止水流过缓导致泥沙淤积，同时避免流速过快对槽壁造成过度冲刷。（3）排水管选用钢筋混凝土管，其材质具有较好的抗压、抗渗性能，适配支沟17~39°的坡度环境，能承受沟谷地形变化带来的土壤压力；管壁厚度设计为20cm，通过结构力学计算，该厚度可抵御暴雨期洪水的冲击压力，同时满足管体自身重量与外部荷载的平衡，确保长期运行中不发生开裂、变形。（4）后期方案增设山脊临时排水沟，随着尾矿库运营进入中后期，支沟汇水面积内的尾矿堆存高度增加，洪量随之上升，临时排水沟可作为补充排洪通道，分流部分洪水，缓解排水斜槽-排水管系统的排洪压力，适配中后期500年一遇的防洪标准。（5）山脊临时排水沟采用梯形断面，底宽1.5m、深1.2m，该尺寸结合后期洪峰流量计算确定，能满足额外分流需求；边坡坡度设计为1:1.5，此坡度与山脊区域岩土体的稳定坡角相匹配，可防止沟壁坍塌，同时便于后期维护清理，减少杂草、泥沙对沟道过流能力的影响^[4]。

3.2 主沟排洪设计

（1）主沟作为尾矿库洪水排出的核心通道，采用排水井-隧洞系统，该系统具有过流能力强、受地形影响小

的优势，能承接各支沟排出的洪水并集中输送至库外。排水井布设在主沟沿线，通过窗口收集主沟及支沟洪水；隧洞则贯穿主沟底部，将洪水从库区输送至下游安全区域，形成“多井集水—一洞输水”的高效排洪模式。

(2) 排水井选用框架式结构，井径设计为3.5m，较大的井径可减少洪水进入井内的水头损失，同时便于后期设备检修；井身开设窗口尺寸为 $1.2\text{m} \times 0.8\text{m}$ （高×宽），窗口间距根据主沟水位变化规律设定，确保不同水位下洪水均能通过窗口进入井内。框架式结构采用钢筋混凝土浇筑，井壁厚度不小于30cm，保障井体在洪水冲击及尾矿压力下的稳定性。(3) 隧洞断面设计为城门洞型，净宽2.5m、净高3.0m，该断面形式兼具矩形断面过流能力强和拱形断面受力合理的优势，能承受隧洞顶部及两侧岩土体的压力；净宽与净高的组合经过水力计算，可满足暴雨期各支沟洪水汇入后的总过流需求（总洪峰流量超 $120\text{m}^3/\text{s}$ ），同时预留一定安全余量，应对极端洪水。隧洞施工采用新奥法，减少对主沟地形的扰动。(4) 为降低洪水出洞后的流速，避免冲刷下游河道，在隧洞出口设置消能设施，采用“消力池+明渠衔接”的组合形式，消力池长度设计为15m，通过池内水流的相互撞击、旋滚消耗能量，使出池水流流速降至安全范围；明渠则与下游天然河道平缓衔接，明渠断面尺寸根据消力池出流流量确定，确保水流顺畅排入河道，不对周边地形造成破坏。

3.3 结构优化措施

(1) 针对排水井随尾矿堆存高度逐步抬高的特点，采用井筒重叠设计，相邻排水井的重叠高度设定为2.0m。重叠部分通过法兰连接，确保井体衔接处的密封性与整体性，避免洪水从衔接处渗漏；2.0m的重叠高度可适应尾矿堆存过程中的微小沉降，同时便于后期井筒的加高施工，减少对排洪系统正常运行的影响。(2) 考虑到隧洞长期输送含泥沙的洪水，易受水流冲磨导致

内壁损坏，对隧洞内壁进行抗冲磨处理，采用环氧砂浆防护层。环氧砂浆具有高强度、高耐磨性及良好的粘结性，能有效抵御水流及泥沙的冲磨；施工时先对隧洞内壁进行凿毛处理，再均匀涂抹环氧砂浆，厚度控制在5-8mm，确保防护层与隧洞壁紧密结合，延长隧洞使用寿命。(3) 为实时掌握排洪系统运行状态，布设完善的监测系统，在各支沟排水管出口、主沟排水井及隧洞进口处布设水位计，实时监测各节点水位变化，及时预警水位异常；在排水井井壁、隧洞两侧及消力池底部布设渗压计，监测结构物周边渗压变化，预防渗漏风险。监测数据通过无线传输系统实时上传至控制中心，便于管理人员及时调整排洪策略，保障系统安全稳定运行。

结束语

尾矿库支沟发育地形的排洪系统设计是一项复杂且关键的工程任务。本文通过对地形特征、汇水特性的细致分析，结合安全、经济、环保原则确定了排洪设计方法，并完成了主沟-支沟联合排洪系统的设计优化。然而，实际工程中仍存在诸多不确定性因素。未来，需持续关注尾矿库运行状况，结合新技术、新材料完善排洪系统。同时，加强排洪系统的监测与维护，不断提升其应对极端洪水的能力，为尾矿库的长期安全稳定运行提供坚实保障，推动矿业可持续发展。

参考文献

- [1] 卢云香,胡宏.尾矿库排洪系统封堵方法研究[J].工程技术研究.2020,(02):25-26.
- [2] 金志斌,刘瀚和,王海超.平地型干式堆存尾矿库排洪系统的创新设置[J].有色冶金设计与研究,2024,45(05):58-61.
- [3] 倪智伟,叶青,李阳,等.某尾矿库老旧排洪系统封堵技术研究[J].现代矿业,2024,40(07):233-236.
- [4] 唐奎,陈建军.极端条件下尾矿库排洪系统失效溃坝影响规律研究[J].矿产勘查,2024,15(S1):178-189.