

中线式尾矿筑坝法关键技术

宋会彬¹, 郑学鑫¹, 刘金勇²

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 江西铜业股份有限公司 德兴铜矿, 江西 德兴 334200)

[摘要] 本文通过系统总结采用中线式尾矿筑坝法堆坝的德兴铜矿四号尾矿库、普朗铜矿玉郎佩尾矿库及德兴铜矿五号尾矿库多年的建设和运行经验, 得到中线式尾矿筑坝法的关键技术, 该技术包括中线式尾矿筑坝法建设期关键技术和运行期关键技术。中线式尾矿筑坝法在建设期的关键技术包括中线式尾矿筑坝法坝址选择、尾矿分级系统选择及砂量平衡计算; 运行期的关键技术包括筑坝尾砂实时控制技术, 机械分期修筑围堰、二段粗砂连续充填筑坝技术及多雨地区的中线式尾矿筑坝区立体截排洪系统技术。中线式尾矿筑坝法关键技术的完善和发展对该类尾矿库的建设和运行具有指导意义, 有利于中线式尾矿筑坝法在国内的推广和使用。

[关键词] 中线式; 尾矿坝; 建设; 运行; 尾矿库

[中图分类号] TD926.4

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2022)04-0021-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.04.005

0 引言

尾矿库是绝大多数矿山必备的生产设施, 也是矿山最重要的安全环保设施之一。尾矿库本身是一个具有高势能的人造泥石流危险源, 一旦失事, 很可能造成重、特大安全事故, 且对下游环境形成无法估量的影响^[1]。据统计, 截至 2015 年底, 我国共有尾矿库 8 869 座。上游式尾矿筑坝法由于设计、运行简单, 从业人员易于运用, 在我国得到广泛应用, 已建尾矿库绝大多数采用该方法。但上游式尾矿筑坝法的筑坝尾砂质量难以控制, 易出现安全事故, 目前国际矿业发达国家及地区已经限制使用该方法, 我国在高震区也已限制使用该方法。

尾矿坝自身安全性高低是决定尾矿库能否安全运行的前提条件, 中线式尾矿筑坝法由于筑坝尾砂质量可控、浸润线埋深低^[2], 是国际上公认的安全性较好的尾矿筑坝方法。我国中线式尾矿筑坝法建设起步较晚, 缺乏建设及运行管理经验, 且采用该筑坝法的尾矿坝建设及运行管理的复杂程度远超上游

式尾矿筑坝法的尾矿坝。因此, 该方法在国内一直未得到广泛推广和使用。

近年来国家高度重视尾矿库安全生产工作, 对尾矿库本质安全提出了更高要求, 中线式尾矿筑坝法因其安全度高、建设成本相对较低, 在国家大力重视尾矿库安全的背景下, 中线式尾矿筑坝法在国内将得到广泛应用。同时, 国家“一带一路”战略将加快中国矿业投资“走出去”, 这些都要求我国更多的矿业从业人员能够更快、更好地掌握安全性较高的中线式尾矿筑坝法^[3-4]。

德兴铜矿四号尾矿库于 1991 年 2 月投产, 设计总库容为 8.35 亿 m³^[5], 其尾矿坝为国内首例采用中线式尾矿筑坝法堆筑的尾矿坝, 该尾矿坝至 2022 年 2 月, 已经运行了 31 年。近年来, 国内大型尾矿库倾向于选用中线式尾矿筑坝法, 如 2017 年投入使用的云南省普朗铜矿玉郎佩尾矿库设计库容 2.3 亿 m³、2019 年投入使用的江西省德兴铜矿五号尾矿库设计库容 10.3 亿 m³, 其尾矿坝均采用中线式尾矿筑坝法筑坝。根据上述尾矿库的建设和运行管理经验, 总结和完善的中线式尾矿筑坝法的关键技术是十分迫切和必要的。本文根据上述尾矿库的建设和运行经验系统总结提炼, 包括建设期关键技术和运行期关键技术, 此项技术的完善和发展将有利于中线式尾矿筑坝法在国内的推广和使用。

[收稿日期] 2022-03-02

[作者简介] 宋会彬(1985—), 女, 辽宁铁岭人, 高级工程师, 博士, 主要从事矿山配套尾矿库工程设施的设计与研究

[引用格式] 宋会彬, 郑学鑫, 刘金勇. 中线式尾矿筑坝法关键技术[J]. 有色设备, 2022, 36(4): 21-25.

1 建设期关键技术

中线式尾矿筑坝一般采用水力旋流器对全尾矿进行分级后用沉砂筑坝,其建设期的主要工作内容为尾矿坝坝址的选择、尾矿分级系统的选择、后期坝及基建期相应工程设施建设。

基建期的主要工程设施包括初期坝、拦砂坝、库底排渗设施、尾矿分级及排放设施、渗水收集设施及筑坝区防洪设施。上述设施的建设与其它类型尾矿坝的建设并无不同。其建设期的关键是根据中线式尾矿堆坝法的特点选择合适的尾矿坝坝址、尾矿分级系统及砂量平衡计算。

1.1 中线式尾矿筑坝法坝址选择

中线式尾矿坝一般由初期坝和后期坝两部分组成,初期坝建设直接影响尾矿库基本建设投资,后期坝建设则与尾矿库的运行管理费用直接相关。中线式尾矿坝坝址选择既要考虑库容坝高比优、地质条件良好、初期坝建设投资少,又要考虑后期坝筑坝工程量,满足尾矿砂量平衡。因此,中线式尾矿坝坝址的选择应综合考虑初期坝与后期坝两者的关系并根据具体条件慎重确定。

1.2 尾矿分级系统选择

尾矿分级系统选择关键是分级设备的选择及作业率的确定。中线式尾矿筑坝法分级设备一般选用水力旋流器。其规格与型号的选择应在满足沉砂“质”的前提下,尽可能提高“量”。所谓“质”是指满足要求的沉砂,由沉砂中 -0.074 mm 和 -0.037 mm 的含量控制;所谓“量”是指沉砂的产量,小型旋流器可以获得较高的产量,大型旋流器管理简单,在旋流器选择时应在满足筑坝速度的前提下尽可能采用大型旋流器。此部分工作一般先由分级设备的生产者根据选矿厂所排出尾砂的工艺参数初选几种工艺配置,最后由设计单位综合考虑确定尾矿分级系统最终的工艺配置并给出相应的粗砂产率(k_1)。

由于矿山的选矿厂除了年检外,均连续生产,这要求尾矿排放是连续的。筑坝尾砂分级设备必须露天布置在坝顶,其所处的自然环境对年作业率影响很大,所以必须根据当地的自然环境综合考虑其作业率(k_2)。

尾矿分级系统作业率(k_2) = (选矿厂年生产天数 - 极端天气天数 - 分级系统年事故天数) / 选矿厂年生产天数

极端天气天数主要为年暴雨、暴雪及极寒天数,具体数值应根据当地的气象数据确定。分级系统年事故天数一般按 10 ~ 15 天考虑。

1.3 砂量平衡计算

尾矿库后期坝的建设贯穿尾矿库运行期的始终,其坝坡的确定、稳定计算、渗流计算、动力抗震计算与其它类型尾矿坝采用的方法相同,其关键是通过砂量平衡计算确定不同尾矿库堆存标高时的坝顶升高高度。

中线式尾矿筑坝法在用沉砂筑坝的过程中,旋流器的溢流不断地排入尾矿库内,堆积高度也在逐年上升。旋流器沉砂产量必须满足筑坝速度的需要,坝顶的升高速度必须在任何时候都能满足堆存尾砂的需要。为此,必须根据分级系统的粗砂产率、年作业率进行砂量的平衡计算以确定不同尾矿库堆存标高时的坝顶升高高度。

砂量平衡计算前应根据尾矿库的地形图分别计算出不同标高的库内有效容积(V_1)和筑坝容积(V_2),并分别建立标高 ~ 库内有效容积、标高 ~ 筑坝容积曲线。

库内不同堆存标高的坝顶升高高度的计算方法如下:根据计算坝高按标高 ~ 库内有效容积曲线查出对应的库内有效容积 V_1 ,按下式计算出相应的筑坝容积。

$$V_2 = V_1 \rho_{d1} k_1 k_2 k_3 / \rho_{d2} (1 - k_1 k_2 k_3)$$

式中 V_1 、 V_2 —库内有效容积、筑坝容积, m^3 ;

k_1 、 k_2 —粗砂产率、尾矿分级系统作业率;

k_3 —粗砂产量储备系数,一般取 0.9;

ρ_{d1} 、 ρ_{d2} —库内尾矿平均堆积干密度、筑坝尾矿平均堆积干密度, t/m^3 。

根据 V_2 通过标高 ~ 筑坝容积曲线查出此堆存标高对应的最大筑坝标高,最大筑坝标高减去库内堆存标高即为当期坝顶最大升高高度。

通过计算不同库内堆存标高的坝顶最大升高高度形成标高 ~ 坝顶最大升高高度曲线,确定尾矿坝不同运行期的坝顶升高方法及升高高度。根据不同运行期的坝顶升高方法及升高高度,平衡库内库外的砂量,进而调整粗砂产率、尾矿分级系统作业率,最终使库内、库外尾砂获得平衡。各期升高高度的选择除了不能超过坝顶最大升高高度外,还应考虑坝内坡的稳定性,一般不宜超过 20 m。

2 运行期关键技术

中线式尾矿筑坝法运行期关键技术主要包括筑坝尾砂实时控制技术,机械分期修筑围堰、二段粗砂连续充填筑坝技术,中线式尾矿坝筑坝区立体截排洪系统。

2.1 筑坝尾砂实时控制技术

中线式尾矿筑坝分级设施需在保证筑坝尾砂的质满足筑坝设计要求的基础上,尽量提高筑坝尾砂的量。本文基于几个中线式尾矿库多年的运行管理经验提出筑坝尾砂的控制原则为保“质”提“量”,在运行过程中需避免提“质”弃“量”。运行过程中需对筑坝尾砂进行定期检测,主要检测内容为筑坝尾砂粒度、浓度及分级粗砂产率。在尾矿库运行初期及旋流器移位时,应每天进行检测;当筑坝尾砂质量稳定后,可减小检测频率,但不宜小于每周一次;当遇筑坝尾砂质量波动时,应加大检测频率。通过检测结果,实时调整分级系统运行参数,影响旋流器分级效果的主要工艺参数为入料尾砂的浓度、旋流器的给料压力和沉砂嘴的尺寸。具体调节方法如下:

(1)选厂尾矿量、浓度和粒度波动旋流分级工艺参数控制方法

旋流器处理的选厂尾矿量、浓度和粒度经常波动,但波动范围一般不会太大,旋流器工艺参数的控制主要以压力控制为主,末段旋流器入矿浓度控制为辅。

①选厂尾矿量发生变动时,通过增减旋流器的开启台数控制。

②选厂尾矿浓度升高时,通过增开旋流器台数、减小给料泵压力等方法降低一段旋流器的给矿压力,稳定一段沉砂量;通过加大一段沉砂补加水量降低二段旋流器的给矿浓度,增开二段旋流器台数。选厂尾矿浓度降低时,通过减少旋流器台数、增大给料泵压力等方法提高一段旋流器的给矿压力,稳定一段沉砂量;通过减少一段沉砂补加水量提高二段旋流器的给矿浓度,减少二段旋流器台数。

③选厂尾矿粒度变细时,通过减少旋流器台数、增大给料泵压力等方法提高一段旋流器的给矿压力,保证一段沉砂的质;选厂尾矿粒度变粗时,通过增开旋流器台数、减小给料泵压力等方法降低一段旋流器的给矿压力,提高一段沉砂的量。

④若选厂尾矿粒度发生较大波动,则需调整沉

砂嘴尺寸,应事先准备几种型号的沉砂嘴,遇粒度变粗,需调大沉砂嘴尺寸,遇粒度变细,需调小沉砂嘴尺寸。

(2)末段旋流器位置变动旋流分级工艺参数控制方法

末段旋流器位置变动可通过调节旋流器开启台数、给料泵压力等方法,控制旋流器给矿压力,保证末段旋流器分级效果。

2.2 机械分期修筑围堰、二段粗砂连续充填筑坝技术

中线式尾矿筑坝法筑坝工艺的选择需综合考虑尾矿坝堆筑速度,旋流器及管道移动频率等因素,筑坝区域分为外坡粗砂堆筑区和坝顶子坝堆筑区两部分。筑坝顺序为先堆筑外坡粗砂堆筑区,后堆筑坝顶子坝堆筑区。外坡粗砂堆筑方法简单,筑坝工期主要受坝顶子坝堆筑速度控制。本文通过系统总结提出机械分期修筑围堰、二段粗砂连续充填筑坝技术堆筑坝顶子坝,解决了大型中线式尾矿坝一次筑坝高度、筑坝工程量大,筑坝时间要求短的难题。

此项技术具体实施方法为子坝堆筑由两头向中间推进子坝堆筑时,二段旋流器架设于尾矿坝坝轴线两端,以粗砂堆积成的坝体作为基础,采用机械分期修筑围堰,分别向中间分段进占。子坝堆筑一般安排在汛期过后,合拢一般在坝顶中间(单头筑坝除外)。每期子坝筑坝高度由设计确定。每次堆坝过程示意图如图1所示。

尾矿坝筑坝过程中需对筑坝工期、坝体形态、筑坝排水、筑坝机械配合等关键作业进行控制,确保堆筑任务能够保质保量完成。

(1)筑坝工期控制

中线式尾矿筑坝法筑坝工序多,旋流器安装移动费时,造成筑坝工期长,容易给尾矿库下一年防汛带来影响。其流程为架设管线、安装旋流器、机械修筑围堰、分级放矿、排水等。其中修筑围堰可有效加快粗砂沉积和固结速度,减少筑坝粗砂流失;增加围堰长度,可加快大坝堆筑速度,缩短筑坝工期。

(2)坝体形态控制

尾矿坝子坝堆筑前需对尾矿库运行现状进行测绘,根据测绘结果及放矿安排制定子坝堆筑方案,确定子坝坝轴线,内、外坡脚线位置,保证子坝中心线与上一期子坝位置保持不变。各级子坝堆筑全程测绘监控,保证大坝堆筑高度、宽度、平整度达到设计要求。

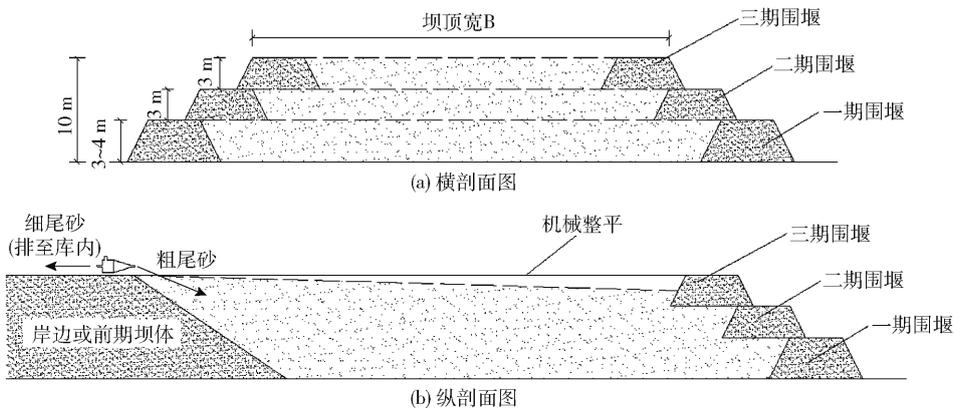


图1 一次筑坝过程示意图

(3) 筑坝排水控制

为减少外排水对外坡的冲刷,筑坝排水管宜埋设在库内侧,埋设数量根据需求确定,埋设深度需根据堆筑子坝长度调节;当堆筑子坝较短时,细砂不易沉积、易排出,排水管理设深度较浅;当堆筑子坝较长时,细砂易沉积,不易排出,排水管理设深度较深。排水管进水口宜为活动式。

(4) 筑坝机械配合控制

子坝堆筑采用机械联合作业,配合筑坝作业主要机械为湿地推土机。推土机主要用于修筑放矿围堰,为确保推土机作业安全,需提前将子坝围堰内积水排净,并进行干燥(自然凉干),推土机作业安排专人进行指挥,控制子坝堆筑坡度。

2.3 中线式尾矿坝筑坝区立体截排洪系统

中线式尾矿坝运行期筑坝区域持续充填尾砂,形态不停变动,在多雨地区坝体表面尾砂易流失。根据中线式尾矿坝特点,针对南方多雨地区,本文提出通过在筑坝区两侧设置截排洪沟、坝外坡在汛前利用堆坝尾砂修筑“多梯级截排水”设施、“人”字形挡水子坝及坝顶截水沟多设施形成立体截排洪系统。立体截排洪系统即适应中线式尾矿坝筑坝区不停变动的现实,又充分利用了坝体自身材料降低了工程投资,解决多雨地区中线式尾矿坝运行期筑坝区域汛期坝体表面易冲刷造成粗砂流失的难题。

(1) 筑坝区两侧截排洪设施

为了防止筑坝区外部雨水进入筑坝区,在两岸分期逐级修建截洪沟,使山体汇水与坝面汇水分流,山体汇水直接外排,减少了沉砂池入池洪水量,有较好的环保效益。

(2) 坝外坡“多梯级截排水”设施

由于中线式尾矿筑坝的自身特点,尾矿坝外坡不断变化,坝外坡的截排洪设施需每年修筑;另外,基于坝体安全性考虑,坝外坡截排洪设施不能改变坝体自身的物理性质,综合考虑以上两点,德兴铜矿首次提出采用筑坝尾砂修筑坝外坡“多梯级截排水”设施。

“多梯级截排水”设施是指通过在尾矿坝外坡修筑拦截子坝划块分区管理,分割汇流面积,拦截汇流雨水,及时导流,排出坝面汇水,防止坝面汇水的扩大和连续对砂质坝体的冲刷。具体措施是在坝外坡面每隔一定高度利用尾砂修筑一条挡水子坝,其作用是将汇水拦截,然后导流至两侧截洪沟内,利用截洪沟进行排水,防止雨水和筑坝粗砂形成越来越大的矿浆流,加剧坝体的冲刷。每条子坝之间的高差根据外坡面面积及当地暴雨量确定,两条子坝之间的高差为20~30m。对于坝外坡长度较长的区域,挡水子坝修筑为“人”字形,并在两侧山体结合部利用土工布及砂袋人工垒筑排水出口至两侧排污沟^[6]。

(3) 坝顶截排水设施

中线式尾矿坝坝顶宽较宽,坝顶溢流容易出现拉沟甚至导致边坡垮塌。为解决这一问题,首先在尾矿坝坝顶内、外侧各堆筑一条挡水坝,避免坝顶汇水溢流形成拉沟;其次在坝顶沿轴线方向人工开挖一条宽0.5m、深0.4m的沟槽,利用坝顶粗尾砂、水泥加速凝剂制作速凝水泥砂浆,涂抹在沟槽表面形成2~3cm的固化层用于导流,并每间隔150m设置一路排水管将汇水排入库内。由于固化层厚度只有2~3cm,固结面很容易被破坏,不会形成弱透水层影

响坝体的稳定性。

3 结论

(1) 本文通过对国内三个典型中线式尾矿坝建设和运行过程的经验进行系统的分析, 总结出了关键技术, 该技术包括建设期关键技术和运行期关键技术。

(2) 中线式尾矿筑坝法建设期的关键技术包括尾矿坝坝址选择、尾矿分级系统选择及砂量平衡计算。

(3) 运行期的关键技术包括筑坝尾砂实时控制技术, 机械分期修筑围堰、二段粗砂连续充填筑坝技术, 对于多雨地区还包括中线式尾矿坝筑坝区立体

截排洪系统。

[参考文献]

- [1] 孟宪彬等. 中国有色金属尾矿库概论[Z]. 北京: 中国有色金属工业总公司, 1991.
- [2] 杨春福. 中下游式尾矿坝设计概要[J]. 有色矿山, 1999(3): 33-36.
- [3] 郭天勇, 段蔚平. 中线法尾矿筑坝应用问题研究[J]. 现代矿业, 2014(12): 43-45.
- [4] 夏禄清, 万道春, 邓会镜. 中线式沟谷型尾矿库设计优化要点分析[J]. 现代矿业, 2020(8): 208-210.
- [5] 严德显. 德兴铜矿 4#尾矿库安全管理实践[J]. 工业安全与环保, 2005, 35(1): 63-64.
- [6] 李小生, 巫尚蔚. 中线法堆坝在南方多雨地区的防洪度汛实践[J]. 现代矿业, 2015, 31(8): 134-137.

Key Technologies for the Centerline Embankment Method

SONG Hui-bin, ZHENG Xue-xin, LIU Jin-yong

Abstract: The article provides a systematic summary of the key technologies used for the centerline embankment method, which has been applied in the construction and operation of three tailings facilities: Tailings Pond No. 4 and No. 5 of Dexing Copper Mine, and Yulangpei TSF of Pulang Copper Mine. These technologies include both those that have been used during construction and operation as well. The key technologies used during construction include: site selection, tailings classification system selection and tailings balance calculation. The key technologies during operation include: real-time control of the tailings used for centerline embankment, phase-wise use of machinery for embankment, continuous embankment with the coarse secondary tailings, and the multi-dimensional flood containment and discharge system used in rainy areas. The improvement and development of these key technologies have important guiding implications for the construction and operation of tailings facilities of the same kind, and can contribute to the promotion and application of the centerline embankment method in China.

Key words: centerline; tailings dam; construction; operation; tailings pond

