

# 榆木沟尾矿库自流式辐射井排渗系统施工关键技术

汪拾金

(浙江省岩土基础公司, 浙江 宁波 315040)

**摘要:** 浸润线过高导致的渗流状况不良已经成为许多尾矿库的主要安全隐患, 是引起尾矿库溃坝事故的最直接原因之一。自流式辐射井排渗系统具有自流排水安全可靠、辐射式集渗管水平伸入坝体范围广、排水量大、水位下降快、成本低、使用寿命周期长、后期管理运行方便等优势。在榆木沟尾矿库2号大口辐射井工程中应用了自流式辐射井排渗系统, 取得了良好的技术和经济效果。结合该工程实践, 对自流式辐射井排渗系统在尾矿库排渗工程中的施工关键技术问题进行了研究和探讨, 为今后类似工程提供了有益的经验。

**关键词:** 自流式辐射井; 集水竖井; 水平集渗管; 水平排渗管; 榆木沟尾矿库

**中图分类号:** TV649 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)04-0056-05

**Key Technologies of Natural Flow Radiation Well for Seepage Drainage in Yumugou Tailings Pond/WANG Shi-jin**  
(Zhejiang Geotechnical & Foundation Company, Ningbo Zhejiang 315040, China)

**Abstract:** Bad seepage behavior caused by high saturation line has become the main potential safety hazard of tailings pond, which is one of the most direct reasons of tailings dam-break accidents. The natural flow radiation well for seepage draining system has advantages of safe and reliable drainage, seepage collecting pipe horizontally reaching into wide range of the dam, large displacement, fast decreasing of water level, low cost, long service life and convenient final-period management. Natural flow radiation well has been applied to 2# radiation well in Yumugou tailings pond with remarkable technical and economic benefits. Combined with the construction practice, the research and discussion are made on the key construction technologies of natural flow radiation well for seepage draining system, which can provide the beneficial experience for the similar projects in future.

**Key words:** natural flow radiation well; catchment shaft well; horizontal seepage collecting pipe; horizontal seepage drainage pipe; Yumugou tailings pond

## 0 引言

尾矿库是矿山工业重要的基础设施, 同时也是一种具有高势能、高危害性的危险源与环境风险源。我国尾矿库具有数量大、小库多、安全基础薄弱、危险、病库尚未得到有效治理等特点。据国家安全生产监督管理局统计数据, 截至2014年底, 全国共有11359座尾矿库, 其中危库、险库和病库为772座。普遍存在浸润线过高、调洪库容不够、坝体裂缝现象严重、坝体安全观测设施不健全等重大安全与环保隐患。尾矿及尾矿水中常含有重金属、化学药剂等有毒有害物质, 一旦发生事故, 会对下游村庄、河流、水库、农田等造成严重环境污染, 对人民生命健康、财产安全造成严重危害<sup>[1-2]</sup>。2006年4月30日, 陕西省商洛市镇安县黄金有限公司尾矿库“4.30”溃坝事故, 造成17人遇难。事故主要原因是该尾矿库无正

规扩容设计, 违规施工, 擅自加高坝体, 严重超储。2006年8月15日, 山西省太原市娄烦县马家庄乡银岩选矿厂尾矿库发生垮坝, 同时将相邻的新阳光选矿厂尾矿库摧垮, 导致蔡家庄村部分村民和房屋受到冲击, 造成6人死亡, 20人受伤。2008年9月8日, 由于违法违规建设、生产和排放, 山西省临汾市襄汾县新塔矿业有限公司发生尾矿库溃坝事故, 281人死亡, 34人受伤, 这也是安监总局统计以来发生的死亡人数最多的特别重大尾矿库溃坝事故。

我国早期95%以上的尾矿库是采用上游法堆积尾矿筑坝<sup>[3]</sup>, 多为不透水粘土坝, 由于坝体内渗流不易控制, 且随着后期坝的加高, 造成坝内积水, 坝体浸润线逐渐抬升, 多级子坝坡面出现沼泽化并伴随塌陷和流砂等现象, 坝体稳定性急剧下降<sup>[1,4-7]</sup>。相关研究资料表明, 尾矿库的坝体

收稿日期: 2017-01-18; 修回日期: 2017-03-27

作者简介: 汪拾金, 男, 汉族, 1972年生, 高级工程师, 从事岩土工程施工及技术研究工作, 浙江省宁波市江东区宁穿路448弄16号, 834846727@qq.com。

浸润线的位置相差 1.0 m,尾矿坝的稳定系数相差 1.2%~2.5%<sup>[8]</sup>。浸润线过高即渗流状况不良已经成为许多尾矿库的主要安全隐患,是引起尾矿库溃坝事故的最直接原因之一<sup>[9]</sup>。近 20 年的实践表明,为降低浸润线采用了各种排渗方法,如排渗盲沟、管井、虹吸井、轻型井点、袋装砂井等<sup>[4]</sup>。但这些措施在使用时大多效果不尽人意,多数会失效,使排渗达不到预期的目标。例如,排渗盲沟对地形条件要求较高,且只能在尾矿堆积期间由人工铺设,难以降低已有坝体的浸润线;虹吸井经常发生断流,需人工频繁处理;轻型井点须用水泵间断强制抽水,浸润线波动频繁,而且设备维护管理繁琐。因此,在尾矿库设计时,采取合理的降水排渗技术,降低尾矿库坝体的浸润线,是确保尾矿库安全运行的关键所在。

自流式辐射井排渗系统具有自流排水安全可靠、辐射式集渗管水平伸入坝体范围广、排水量大、水位下降快、投资小、使用寿命周期长、后期管理运行方便等优点,所以近些年来在尾矿库排渗工程中得到了广泛的应用,取得了显著的经济和社会效益<sup>[9-10]</sup>。本文结合位于河南省栾川县榆木沟尾矿库的 2 号大口辐射井的工程应用,总结归纳出一套适用于自流式辐射井排渗系统施工过程中的关键性技术及相关设备工艺。

### 1 自流式辐射井排渗系统结构及原理

自流式辐射井是由大口径集水竖井、若干水平辐射式集渗管和水平排水管 3 大部分联合构成的一种排渗系统<sup>[11]</sup>,其结构示意图如图 1 所示。大口径集水竖井通过沉井的方式从坝坡地表下沉到设计深度,水平集渗管在竖井的下部穿过井壁伸入坝体内,呈辐射状向四周延伸。由于水平集渗管设置在浸润线的下部,坝体内的水在地下水头的渗透作用下通过集渗管汇集到竖井内,再通过水平排水管将井内的集水排到坝的下游,达到降低浸润线提高坝体

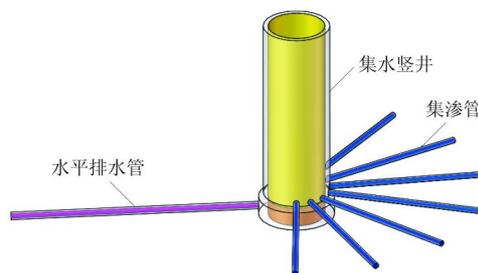


图1 辐射井排渗系统结构示意图

稳定性的目的。

自流式辐射井排渗系统同时具有集水和排水的功能,其施工工艺较为复杂,技术要求较高,质量控制要求严。竖井的沉井施工过程中,随着井深增大往往会发生井位倾斜,井周围地面塌陷等现象而影响施工安全。沉入浸润线以下后,尾砂、水往往涌入井中,继续下沉十分困难。水平集渗孔和排水孔由于在竖井下施工,受空间的限制,人员操作不便,增加了施工的难度。另外水平集渗管的安装工艺流程也决定了排渗系统的实际效果。因此针对现场工程应用,选择合理的施工设备及技术工艺至关重要。

### 2 榆木沟尾矿库 2 号辐射井排渗工程设计

榆木沟尾矿库属于山谷型尾矿库,位于河南省洛阳市栾川县境内。初期坝为碾压堆石坝,后期采用尾砂上游法筑坝,总坝高 260 m,总库容  $4272 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,处理能力  $10000 \text{ t/d}$ <sup>[12]</sup>。目前榆木沟尾矿库采用了库底排渗、滩面水平排渗和辐射井等多种排渗技术,有效地控制了坝体浸润线的升高。然而,这种典型的尾砂冲积排放的上游式尾矿库,由于库面面积小,纵深较短的特点,在运行过程中坝体高度上升较快。因此,根据榆木沟尾矿库坝体整体浸润线上升的高度、坝内积水的具体情况以及水在坝内渗透性的各项参数,结合以往类似工程的成功经验,在原有的辐射井上游坝顶标高 1350 m 的位置重新设计了 2 号大口辐射井,其横剖面示意图如图 2 所示。

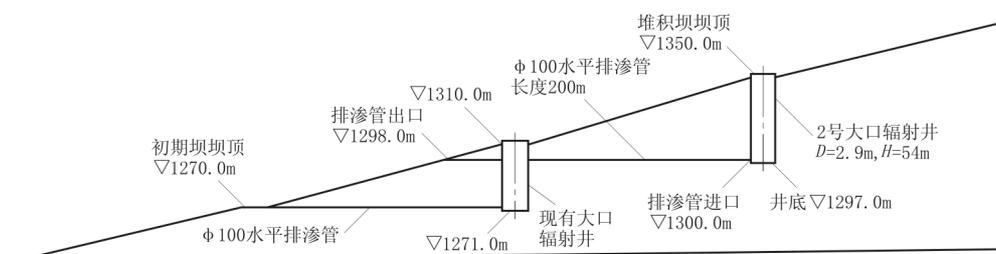


图2 辐射井横剖面示意图

2号辐射井排渗系统纵剖面结构示意图如图3所示,主要由集水竖井、混凝土底板、 $\phi 250$  mm库底集渗管、 $\phi 75$  mm水平集渗管和 $\phi 100$  mm水平排渗管组成。集水竖井为钢筋混凝土井壁,外径3.5 m,内径2.9 m,井深54 m,井顶高出尾砂1.0 m。从标高1300 m开始每上升1.0 m,在平行于坝轴线方向布置5排,每排4根的 $\phi 75$  mm水平集渗管与集水竖井相连。根据原始地形南侧每排的两根集渗管长约44 m,北侧每排的2根集渗管长约68 m,坡度 $< 1.0\%$ 。在标高1312.0、1315.0 m平行于坝轴线方向共设置2排、每排4根 $\phi 75$  mm水平集渗管与集水竖井相连,南侧每排的2根集渗管长约160 m,北侧每排的2根集渗管长约86 m,坡度 $< 1.0\%$ 。为了降低底板水压力,防止出现涌砂现象,在井底设置 $\phi 250$  mm集渗管,其中水平向3根,竖直向1根,每根长750 mm,四通连接,水平向夹角为 $120^\circ$ 。布置在底板以下400 mm的砾石层中。底板、砾石和尾砂之间均采用 $400\text{ g/m}^2$ 的土工布一层隔开。集渗管中的渗水进入竖井后通过 $\phi 100$  mm水平排渗管引至坝坡的排水沟,水平排渗管长200 m,为了防止空气进入对排渗效果造成不利影响且保证出口为淹没出流,设计要求水平排渗管出口采用弯管连接。

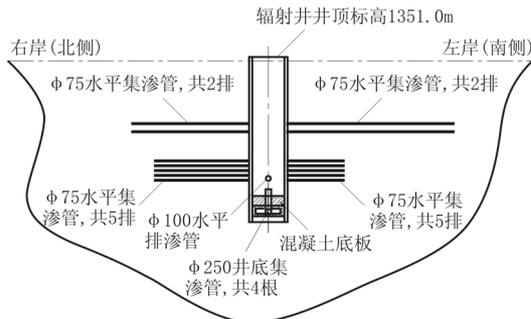


图3 辐射井纵剖面结构示意图

### 3 辐射井排渗系统施工技术

自流式辐射井排渗系统同时具有集水和排水的功能,其施工工艺较为复杂,技术要求较高。榆木沟尾矿库工程勘察报告显示,库内尾砂含水量大,流动性强,集水竖井开挖沉井时防止出现倾斜、偏移、扭转等不均匀下沉现象是本工程的施工难点之一。本次辐射井排渗系统设计的单根集渗管最长160 m,单根排渗管最长200 m,是目前全国尾砂坝排渗管施工方面最长的排渗管和集渗管,如何选取合适的施工设备,采用合理的施工工艺,满足设计要求,达

到预期的排渗效果是本工程的另一难点。根据本工程的技术特点,为了做好总体部署和施工协调,确保安全施工,制定项目施工的总流程图如图4所示。以下从各主要部分的施工进度,阐述其技术要点。

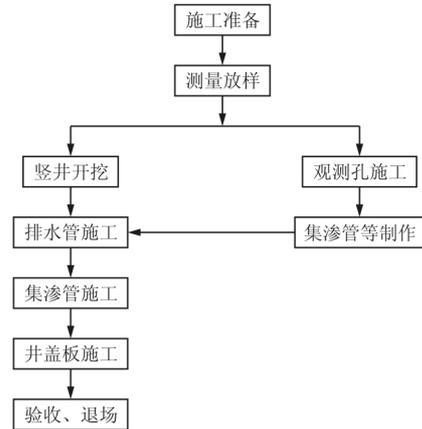


图4 项目施工总流程图

#### 3.1 集水竖井施工

集水竖井是排出水汇集和井底水平孔的施工场所,其完成质量的好坏直接决定了后续工作的进行。本工程新建竖井深度为54 m,施工技术难度较大,而且在下沉时容易发生倾斜、缓沉等情况。根据其他同类工程施工经验,本工程的沉井施工采用多节制作、分节下沉(制作与下沉交替进行)的方法,沉井施工流程如图5所示。

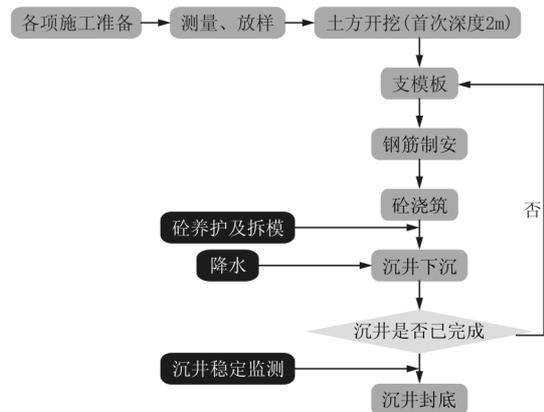


图5 沉井施工流程图

##### 3.1.1 集水竖井混凝土施工

混凝土强度等级为C25,在现场用砼搅拌机拌制。沉井施工按36次浇筑,36次下沉施工,每节沉井浇混凝土必须连续进行,一次完成。施工缝采用凹槽式接法,结合面应尽量粗糙,施工缝结合处采用沥青砂浆处理。沉井井壁模板应在混凝土达到设计

强度的25%以上方可进行拆除,首节井壁的强度应达到设计强度的50%以上。为了防止模板变形或地基不均匀下沉,沉井的混凝土浇筑应对称、均衡下料。将沉井分成若干段同时对称均匀分层浇筑,砼面应保持同步均匀上升,每层厚30 cm,以避免造成地基不均匀下沉或产生倾斜。密切观察沉降,若发生不均匀沉降,应及时采取措施,严防井壁产生裂缝。

### 3.1.2 尾砂开挖施工

依据尾矿库的地层地质条件,本工程采用了人工+水力机械取砂法施工,依靠沉井自重下沉到达设计标高。沉井初次开挖深度约2 m,开挖并平整底部后立模。第一节沉井下沉前,应将井内的所有杂物清除干净,先对称、同步的敲碎刃脚下的垫木。当沉井下沉到地下水位线1 m以深后,改用水力机械取砂法继续抽取尾砂,保持沉井以适宜的速度下沉。现场的施工图片如图6所示。



图6 尾砂开挖现场施工图

尾砂开挖应注意均匀对称,由中心向刃脚四周开挖,每层挖砂厚度0.3~0.4 m,在刃角处留0.4~0.5 m的台阶,然后沿井壁每1~2 m一段,向刃脚方向逐层、全面、对称、均匀地开挖尾砂,每次挖0.15~0.2 m,当尾砂经不住刃脚的挤压而破裂,沉井便在自重作用下均匀下沉。当沉井下沉很慢或不下沉时,可再从中间向下挖0.4~0.5 m,并继续向四周均匀掏挖,使沉井平稳下沉。如上所述,当挖至刃脚,沉井仍不下沉或下沉不稳定,则须按布置分段

的次序,逐段对称地将刃脚下掏空,并掏出刃脚外壁约0.1 m。严禁深锅挖土,防止突沉造成沉井四周地面沉陷和沉井倾斜的危险。沉井下沉初阶段纠偏应根据“多沉则少挖,少沉则多挖”的原则,刃脚下挖土要逐步扩大,不能一次过量掏空。当沉井下沉至接近设计标高1 m时,应减速下沉。最后0.2~0.3 m处停止开挖,观测沉井在不开挖的情况下的下沉速度,确保沉井下沉标高严格控制在范围内。

### 3.1.3 竖井封底施工

井筒开挖至设计深度之后,方进行封底工作。封底时,先回填刃脚部位的尾砂,回填厚度为130 cm。沉井封底时,为了使降水达到理想状态,避免井底水压力过大,出现涌砂现象,因此在井底设置水平竖直集渗管,布置在底板以下400 mm的砾石层中。底板、砾石和尾砂直接均采用400 g/m<sup>2</sup>的土工布一层隔开。

## 3.2 集渗管、排渗管施工

集渗管和排渗管均属于水平孔,本次辐射井排渗系统设计的单根集渗管最长160 m,单根排渗管最长200 m,是目前全国尾砂坝排渗管施工方面最长的排渗管和集渗管。因此,现场采用ZJS-100水平钻机施工44、68、86 m的集渗管,160 m的集渗管和200 m的排渗管采用ZJS-300水平钻机施工。集渗管均使用U-PVC管材,规格为 $\varnothing 75 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ ,每节长度4 m。管周围开直径10 mm的孔,每周4个,间距分别为10和12.5 cm,梅花形布置,外用400 g/m<sup>2</sup>的土工布包两层,然后用铁丝扎紧。排渗管直接采用 $\varnothing 100 \text{ mm}$ 的U-PVC管,接头采用套管连接。

### 3.2.1 井下钻进平台搭建

本工程施工平台的支撑杆件均用 $\varnothing 4.8 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 钢管,采用落地式钢管搭设,单扣件连接。支撑钢管沿井壁四周均匀布置,避开预留孔洞,立杆间距均为1000 mm,平台上铺设50 mm厚木板。

### 3.2.2 水平集渗管成孔及安装

集渗管成孔方式主要采用水平钻机同步跟管静压法,并以钻孔法作为辅助。静压法施工时首先钢管套管顶进,按照各水平孔设计的孔口标高和方位,以不大于1%的坡度向坝体内辅助钻进。待达到规定深度后,拔出钻具,封堵套管端部管口,并冲洗干净套管内的尾砂,然后采用人工小心逐段送入已按设计要求钻孔并包扎土工布的集渗管,下放时应缓慢

进行,防止铁丝被磨断,土工布擦破。接着用顶杆固定集渗管,逐段拔出套管。最后填塞集渗管与竖井井壁之间的环状间隙即可完成一根集渗管的敷设。

### 3.2.3 水平排渗管成孔及安装

水平排渗孔采用 ZJS-300 型水平钻机施工,其存在的主要问题是控制钻孔的偏斜,往上偏斜则由于重力作用不能够正常排水,往下偏斜则不能到达预定设计标高的坝坡排水沟内而造成排水失败。因此,施工中应实时观察监测钻孔的偏斜程度,及时使用纠偏钻头进行纠偏处理。成孔后根据现场施工难易情况,在不影响工程质量的情况下。排渗管的安装可由坝外向井内或者由井内向坝外进行,安装完毕后拔出套管即可。

所有施工以坝体的稳定为前提,施工过程中,每天进行一次浸润线监测(遇降水天气加大监测频率),建立相应坐标,并绘制浸润线曲线,根据曲线分析排渗情况,实时指导施工。

## 4 沉降监测及降水效果

施工结束后,布置在坝体南侧和北侧的浸润线观测孔的监测数据如表 1 所示。对比分析排渗系统施工前后的坝体浸润线位置可知,水位值较初始值有大幅度的下降,坝体北侧累计下降 3.87 m,坝体南侧累计下降 4.08 m,辐射排渗系统效果良好,达到了设计目的。

表 1 监测数据对比结果

监测点位置	水位初始值/m	竣工时水位值/m	累计下降值/m
坝体北侧	32.31	36.18	3.87
坝体南侧	32.48	36.56	4.08

## 5 结论

根据自流式辐射排渗系统的特点和优势,以榆木沟尾矿库降水排渗工程为例,对自流式辐射井排渗系统的施工关键技术问题进行了研究和探讨,工程实践得出以下结论。

(1) 自流式辐射井排渗系统具有自流排水、安全可靠、辐射式集渗管水平伸入坝体范围广、排水量

大、水位下降快、成本低、使用寿命周期长、后期管理运行方便等优势,已经成为尾矿库降水排渗工程中的首选技术。

(2) 榆木沟尾矿库 2 号大口辐射井工程的集水竖井施工采用多节制作、分节下沉的沉井方式,在这种尾砂含水量大、流动性强的工况下,有效地控制了沉井的偏移、倾斜、扭转等不均匀下沉现象。沉井施工质量可靠,深度满足设计要求。

(3) 借助 ZJS-100 和 ZJS-300 型水平钻机,采用同步跟管静压法,并以钻孔法作为辅助顺利实施了单根 200 m 的目前全国最长的尾矿坝排渗管。

(4) 现场监测数据表明自流式辐射井排渗系统降水排渗效果良好,能够有效降低坝体浸润线位置。

## 参考文献:

- [1] 韩静,周金钢,曹长龙. 水力静压式顶管施工在尾矿坝辐射井排渗加固工程中的应用[J]. 矿产与地质,2003,17(97):487-489.
- [2] 汪良峰,朱君星,项宏海,等. 尾矿库排渗辐射井的设计探讨[J]. 金属矿山,2010,39(2):55-56.
- [3] 刘晓非,周汉民. 辐射式排渗井在云南某尾矿库的应用[J]. 有色金属,2012,64(4):60-62.
- [4] 何同庆. 尾矿库的垂直水平联合排渗[J]. 采矿技术,2002,(1):37-39.
- [5] 阮茂盛,奚兴富,周晨晨. 辐射井技术在尾矿库降排水工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):72-75.
- [6] 杜艳强,杨春和,张超,等. 尾矿坝辐射井降水模型[J]. 金属矿山,2015,44(5):20-23.
- [7] 王东,沈振中,陶小虎. 尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):307-312.
- [8] 杨燕,唐泽勋,魏作安. 上向弯曲双向槽孔排渗管技术在新厂沟尾矿库的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2013,24(1):66-69.
- [9] 曹小宇,席鹏. 辐射井在尾矿库排渗工程中的应用[J]. 金属矿山,2010,39(S1):66-69.
- [10] 刘太政,赵竞,崔良忠,等. 辐射井自流排渗技术在尾矿坝除险加固上的应用[J]. 现代矿业,2011,27(6):95-98.
- [11] 薛宏智. 辐射井渗流数学模型及计算方法研究[D]. 陕西西安:长安大学,2014.
- [12] 邓金迪. 榆木沟尾矿库排渗技术探讨[J]. 现代矿业,2014,30(1):179-180.