

尾矿库复杂排洪系统水力设计方法及实例

朱建华

(中冶长天国际工程有限责任公司,湖南 长沙 410205)

摘要:为分析、研究尾矿库排洪系统水力设计内容和方法,文章利用水力学原理并结合水利水电行业类似水工建筑物的规范、文献、科研成果,针对尾矿库复杂排洪系统各种不同排洪构筑物如排水井、溢流堰、竖井、消力井、隧洞进口连接段、隧洞、出口消能防冲设施等的水力设计进行总结。分析总结出:1)不同排洪构筑物的水力设计方法及设计原则;2)水流通过隧洞进口连接段时发生堰流或孔流的判定方法;3)排洪隧洞内可能发生的几种水流流态和水面线类型;4)对尾矿库排洪系统设计一些特殊问题提出了针对性措施。本文结果可为相关工程设计提供参考。

关键词:尾矿库;排洪系统;水力设计;防洪标准

中图分类号:TD926.4

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)11-0075-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.11.141

Hydraulic design methods and examples of complex flood drainage system of tailings pond

ZHU Jianhua

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In order to analyze and study the hydraulic design content and method of the tailings pond flood drainage system, based on the principle of hydraulics and combined with the specifications and scientific research results of similar hydraulic buildings in the water conservancy and hydropower industry, the hydraulic design of various different flood drainage structures in the complex drainage system of tailings ponds, such as drainage shafts, overflow weirs, vertical shafts, dissipation wells, tunnel inlet connection sections, tunnels, and outlet energy dissipation and anti-scouring facilities, is summarized. Through systematic summarization and analysis, this study establishes hydraulic design methodologies and principles for various flood discharge structures. It provides determination methods for identifying flow regimes (riffal or orifice flow) occurring at tunnel inlet connection sections. The research identifies multiple potential flow patterns and water surface profiles within flood discharge tunnels. Furthermore, it proposes targeted solutions to address specific challenges in tailings pond flood discharge system design. The results of this article can provide reference for related engineering designs.

Key words: tailings pond; drainage system; hydraulic design; the standard of flood control

尾矿库是用以贮存金属、非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所,尾矿库一旦失事后破坏力大、影响范围大、修复难度大,近些年,国内外尾矿库建设标准越来越高。为确保尾矿库的防洪安全,尾矿库必须设置排洪设施^[1],尾矿库排洪系统

往往具有平面布置复杂、泄流量大、泄流量变化大、上下游落差大、流速大、工程投资大等特点。而当尾矿库汇水面积较大,库内调洪难以满足要求时,还需要在尾矿库上游或两岸设置截洪设施,库内排洪设施与库外截洪设施联合排洪。

收稿日期:2025-02-14

作者简介:朱建华(1983—),男,高级工程师,从事水工专业(尾矿库)方面的设计工作。

沈楼燕^[2]提出尾矿库排洪系统布置宜采用库外库内分流方案,排洪系统型式宜采用排水井加排洪隧洞;时炜^[3]针对尾矿库排洪隧洞结构型式及流态的确定提出了一些看法,认为尾矿库排洪隧洞宜按无压流控制,无压隧洞断面一般设计为城门洞型,无压长洞中的水面曲线均属bⅡ型降水曲线。

前人对尾矿库排洪系统布置、某种类型排洪构筑物结构型式和流态的确定等方面进行了大量研究和总结,然而未全面地对不同型式尾矿库排洪系统水力设计进行分析和总结。本文针对尾矿库复杂排洪系统各种类型排洪构筑物的水力设计和一些特殊措施进行系统地、全面的分析与总结,以期可为相关工程设计提供借鉴与参考。

1 尾矿库排洪设施型式及主要排洪构筑物

1.1 排洪设施型式选定

根据《国家矿山安全监察局关于进一步加强非煤矿山安全生产行政许可工作的通知》(矿安〔2024〕70号)中规定“尾矿库应当限制使用排洪斜槽、排洪涵管等排洪方式。”尾矿库排洪设施型式主要有溢洪道、截洪沟和进水构筑物+隧洞等型式。其中,溢洪道一般适用于一次建坝的尾矿库;截洪沟适用于汇水面积较小的四、五等尾矿库或库尾排矿的干式尾矿库;进水构筑物+隧洞型式适用范围较广,适用于大多数尾矿库。

进水构筑物+隧洞型式较多,根据泄流量大小、上下游水位差和运行要求等因素常用进水构筑物

物+隧洞型式有排水井+竖井+隧洞[图1(a)]、排水井+隧洞[图1(b)]、环形溢流堰+竖井+隧洞[图1(c)]或明口隧洞[图1(d)]4种型式。不同型式进水构筑物的共同目的是将水流平顺地导入隧洞内。

由于溢洪道和截洪沟结构型式和水力计算较简单,本文重点对较复杂的进水构筑物+隧洞型式的水力设计和工程安全作简单的小结和分析。

1.2 主要排洪构筑物

4种进水构筑物+隧洞型式的主要构筑物如表1所示。

表 1 主要排洪构筑物

型式	构筑物
排水井+竖井+隧洞	排水井、竖井、消力井、隧洞进口连接段、隧洞、出口消能防冲设施
排水井+隧洞	排水井、隧洞进口连接段、隧洞、出口消能防冲设施
溢流堰+竖井+隧洞	溢流堰、竖井、消力井、隧洞进口连接段、隧洞、出口消能防冲设施
明口隧洞	隧洞进口连接段、隧洞、出口消能防冲设施

2 排洪构筑物水力设计

尾矿库排洪系统过流能力受排水井、竖井、隧洞进口连接段、隧洞等排洪构筑物泄流(过流)能力限制,排洪系统过流能力取决于泄流(过流)能力最小的排洪构筑物,各排洪构筑物泄流(过

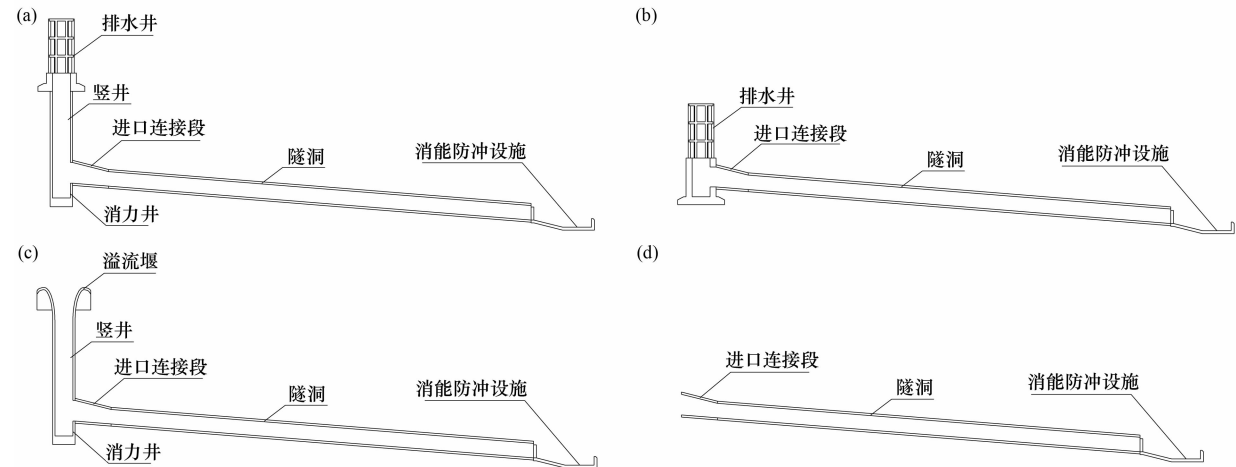


图 1 排洪构筑物示意

流)能力应匹配,避免出现“卡脖子”现象。

2.1 排水井

排水井是尾矿库重要泄水构筑物,其结构型式有窗口式、框架式和叠圈式 3 种,排水井泄流能力根据井口形状、尺寸和井口淹没情况按堰流或孔口流结果计算公式计算,其泄流能力受水头、过水断面面积、流量系数、收缩系数、淹没系数等因素影响,计算公式可参考《尾矿设施设计参考资料》^[4]第四章第二节表 4-1 中公式计算,本文不再赘述。

2.2 环形溢流堰

若尾矿库库内排洪、上游截洪进水标高(即正常水位)为固定值时可采用环形溢流堰泄水,具有泄流量大、结构简单、安全可靠等优点。环形溢流堰堰型宜采用实用堰,其泄流能力按式(1)^[5]计算,其中流量系数 m 受堰形曲线、堰高、堰上水头、进口防涡设施等因素影响。

$$Q = m2\pi R_L \sqrt{2g}H^{1.5} \quad (1)$$

式中: Q 为进水流量, m^3/s ; m 为流量系数; R_L 为堰口半径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为堰顶水头, m 。

2.3 竖井

竖井进口宜控制为自由堰流,竖井直径大小应至少满足避免进口不发生呛水或淹没流的条件,竖井直径可按式(2)^[5]计算:若竖井上部为环形溢流堰,竖井直径宜与环形溢流堰末端内径相同。

$$D \geq \left(\frac{Q_m^2}{g} \right)^{1/5} \quad (2)$$

式中: D 为竖井直径, m ; Q_m 为最大设计流量, m^3/s 。

2.4 消力井

消力井内径宜与竖井内径一致,井深一般为 1~2 倍竖井内径 D 。

消力井消能率按式(3)^[5]计算:

$$\eta = 1 - (h + V^2/2g) / (\Delta H + h) \quad (3)$$

式中: ΔH 为上游水位与隧洞水流平顺段或出口处的水位落差, m ; h 为隧洞水流平顺段或出口处水深, m ; V 为隧洞水流平顺段或出口处的流速, m/s 。

2.5 隧洞进口连接段

隧洞进口连接段的作用是将上游水流平顺地导入隧洞内,并控制隧洞进口水流流态、流量、

流速、水深等。当水流进入连接段内时由于流线在较短范围内急剧变化,是急变流,水流通过连接段时分堰流和孔流两种类型,当水流落差较小时发生堰流,当水流落差较大时发生孔流。隧洞进口连接段形堰流和闸孔的界限大致是^[6]: $H/a < 1.2$ 为堰流; $H/a \geq 1.2$ 为孔流(其中 a 为进口洞高, m ; H 为上游水深, m)。

当发生孔流时应在隧洞进口连接段顶部设压坡段,压坡段长度一般小于一倍洞高,顶部坡度宜取 1:1.6~1:1.8,控制压坡段末端高度 H 略小于隧洞临界水深 h_k ,临界水深计算公式见式(6)^[7]。

当发生堰流时可对隧洞进口连接段顶部局部抬高,不设压坡段。

2.6 隧洞

2.6.1 隧洞尺寸、线路确定

由于尾矿库所排泄洪水是非恒定流,流量变化大,流量变化频繁,若隧洞设计为有压洞,需要设置工作闸门,工作闸门调度操作复杂、难度大,因此隧洞宜设计为无压隧洞。

无压隧洞断面宜采用圆拱直墙式;隧洞轴线宜采用直线,当流速小于 15 m/s 时可采用曲线布置,曲线半径不小于倍洞径或洞宽,转角不大于 60°;隧洞纵坡宜为固定值,若隧洞纵坡变化应避免出现急变流并设置消能防冲措施;隧洞出口应避免发生淹没出流,水力设计时应隧洞出口下游水深 h_s 低于隧洞出口正常水深 h_0 。

2.6.2 无压隧洞过流能力计算

无压隧洞过流能力按明渠均匀流公式计算,计算公式见式(4)^[7],在通过设计洪水时隧洞水面线以上应留一定面积净空和一定高度净高。

$$Q = CA \sqrt{Ri} \quad (4)$$

式中: Q 为泄流量, m^3/s ; C 为谢才系数; A 为过水断面面积, m^2 ; i 为隧洞纵坡。

2.6.3 无压隧洞内水流流态和水面线类型判定

无压隧洞内水流流态和水面线类型与隧洞长度、隧洞纵坡、进口水深、流速等因素有关。

无压隧洞洞长如果不影响泄流能力称为短洞,洞长如果影响泄流能力称为长洞。当底坡为缓坡而趋于平坡,长短洞的界限长度 l_k 按式(5)^[6]计算;当底坡为缓坡而接近于临界坡时,长短洞的界限

应按式(5)^[6]算出的上限增加约 30%;当底坡为陡坡,泄流能力不受洞长影响,按短洞工作状态考虑。

$$l_k = (5 \sim 12)H \quad (5)$$

式中: H 为上游水深, m 。

水流通过进口连接段进入隧洞进口时水深接近临界水深 h_k , 隧洞内水面线受隧洞纵坡影响, 隧洞内水流流态根据隧洞纵坡可分为 3 种情况: 当 $i < i_k$ 时, 缓流; 当 $i > i_k$ 时, 急流; 当 $i = i_k$ 时, 临界流。临界底坡 i_k 按式(8)^[7]计算。

临界水深 h_k 按照明槽均匀流计算, 其计算公式如下。

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{aq^2}{g}} \quad (6)$$

$$q = Q/B \quad (7)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; m 为流量系数; B 为隧洞净宽, m ; α 为动能修正系数, 取 1.05。

临界底坡 i_k 按下式^[7]计算:

$$i_k = \frac{Q^2}{A_k^2 C_k^2 R_k} = \frac{g \chi_k}{a c_k^2 B_k} \quad (8)$$

式中: 在临界水深条件下的 A_k 为过水断面面积, m^2 ; R_k 为水力半径, m ; χ_k 为湿周, m ; B_k 为水面宽, m ; C_k 为谢才系数。

当设计洪水通过进口连接段进入隧洞后水流流态和水面线类型可按表 2 判别。

2.7 出口消能防冲设施

隧洞出口消能防冲设施的水力计算可按《溢洪道设计规范》(SL 253—2018)^[8]中附录 A.4 ~ A.6 中公式计算。当隧洞出口采用底流消能时, 若单宽流量大, 为减少单宽流量, 有利于消能, 减轻下游冲刷, 宜在出口设置扩散段, 扩散角按式(9)^[6]计算:

$$\tan \theta \leq 1/(3F_r) \quad (9)$$

式中: θ 为扩散角, ($^\circ$); F_r 为弗劳德数; h_1 为断面水深, m ; v_1 为断面流速, m/s 。

3 复杂排洪系统水力设计的其它针对性措施

3.1 防空蚀掺气措施

在排洪构筑物水流边界突变处、高速水流处、隧洞进口连接段反压板末端等部位易产生空蚀破坏, 为防止排洪构筑物发生空蚀破坏除选取合理的体型、控制水流边界壁面和局部不平整度和采用满足抗蚀性能指标的材料外还需要设置通气管掺气减蚀。

通气孔通气量按以下经验公式^[6]计算:

$$\beta = K(F_r - 1)^{[a \ln(F_r - 1) + b]} - 1 \quad (10)$$

$$F_r = V/(gh)^{0.5} \quad (11)$$

$$Q_a = \beta Q_m \quad (12)$$

$$A \geq Q_a/[V] \quad (13)$$

式中: β 为气水比, $\beta = Q_a/Q_m$; F_r 为弗劳德数; K 、 a 、 b 为各区间系数; V 为最大流量下收缩断面的平均流速, m/s ; h 为最大流量下收缩断面的水深, m ; Q_a 为最大流量通气孔通气量, m^3/s ; Q_m 为最大流量, m^3/s ; $[V]$ 为控制风速, $[V] \leq 60.0 \text{ m/s}$; A 为通气孔面积, m^2 。

3.2 环形溢流堰防涡措施

当环形溢流堰 $P/R < 1$ 时 (P 为堰高, R 为环形溢流堰堰顶半径), 或周围来流流速 $> 0.3 \text{ m/s}$, 宜在环形溢流堰进口设置保证和提高泄流能力的导流防涡措施。

3.3 隧洞渐变段的体型

当隧洞洞身断面变化时, 应设置渐变段使水流能平顺过渡。在低流速时可以减少能量损失;

表 2 水流流态和水面线类型

项目	隧洞纵坡	水流流态	水面线类型
短洞	$i < i_k$	非均匀缓流	M3 型曲线
	$i > i_k$	非均匀急流	S2 型曲线
	$i = i_k$	非均匀急流	C3 型曲线
长洞	$i < i_k$	非均匀缓流 - 均匀缓流	M3 型曲线 - 直线(水深 h_0)
	$i > i_k$	非均匀急流 - 均匀急流	S2 型曲线 - 直线(水深 h_0)
	$i = i_k$	非均匀急流 - 临界流	C3 型曲线 - 直线(水深 h_0)

在高流速时主要避免产生空蚀和过大的冲击波。

隧洞扩散渐变段的扩散角(边线与中线的夹角)一般取 $4^{\circ} \sim 8^{\circ}$, 收缩渐变段的收缩角一般取 $7^{\circ} \sim 11^{\circ}$, 其长度一般为均匀段洞径的 1.5 ~ 2.5 倍。

3.4 岔洞的布置

尾矿库排洪系统往往设置多条支隧洞与一条主隧洞相连, 隧洞交叉段水流流态较复杂, 尤其当支隧洞过水而主隧洞不过水时易引起旋涡, 水流脉动强烈。根据我国类似工程经验, 交叉处设置成弧形比折线好; 从流态看两洞轴线的夹角越小越有利, 目前多采取 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。

4 某尾矿库排洪系统设计实例

4.1 某尾矿库排洪系统设计概况

我国南方地区某尾矿库为二等库, 总汇水面积 11.5 km^2 , 根据《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013), 设计防洪标准为 1 000 a 一遇, 由于尾矿库汇水面积大且设计防洪标准高, 排洪系统设计采用上游截洪 + 库内排洪联合排洪型式。尾矿库上游截洪面积 7 km^2 , 1 000 a 一遇洪峰流量 $188 \text{ m}^3/\text{s}$; 尾矿库库内排洪汇水面积 4.5 km^2 , 1 000 a 一遇洪峰流量 $101 \text{ m}^3/\text{s}$, 库内洪水经过调洪后最大下泄流量 $36.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

由于上游截洪流量大, 水流落差大, 为了减少隧洞内水流流速、降低出口消能工难度、减少洞身产生空蚀的可能性、避免出现明满流交替状态, 上游截洪设施采用拦洪坝 + 环形溢流堰 + 竖井 + 消力井 + 隧洞进口连接段 + 主隧洞 + 消力池。在尾矿库库尾上游设拦洪坝, 拦洪坝坝顶高程为 690 m; 环形溢流堰采用实用堰型, 堰顶半径为 6.5 m, 进口堰顶高程为 684.2 m, 出口高程为 682.95 m; 在环形溢流堰进口沿堰顶直径方向均匀布设 6 个导流墩, 导流墩宽度为 0.6 m, 长度为 2.5 m, 两端用采用 $1/4$ 椭圆曲线, 长半轴长度为 0.6 m, 短半轴长度为 0.3 m; 竖井内径为 5.5 m, 深度为 83.16 m; 消力井深度取 $1.0D$, 为 5.5 m; 隧洞进口连接段采用矩形断面, 进口底板高程为 599.79 m, 底宽为 4.0 m, 纵坡为 3%, 长度为 3.0 m, 顶压板板斜率为 1:6, 出口断面尺寸为 $4.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$, 在顶压板末端设置 2 根 $\varnothing 350 \text{ mm}$ 通气管; 主隧洞断面采用圆

拱直墙式, 纵坡坡度为 3%, 长度为 2.9 km, 上游段(与 7#支隧洞交点以上)尺寸为 $4.0 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$, 下游段(与 7#支隧洞交点以下)尺寸为 $4.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$; 隧洞出口设 30 m 长渐变明渠, 尺寸由 $4.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ 渐变为 $10 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$; 在明渠下游设消力池, 尺寸为 $40 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 深)。

为节约工程投资, 库内排洪设施和上游截洪设施共用一条主隧洞, 库内排洪设施采用排水井 + 竖井 + 消力井 + 隧洞进口连接段 + 支隧洞 + 主隧洞 + 消力池, 共设置 7 座排水井, 其中 4#排水井通过最大下泄流量 $36.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 库内排洪和上游截洪共用一条主隧洞和消力池。4#排水井井架高度为 21 m, 内径为 3.5 m, 进水标高为 615 m; 4#竖井内径 3 m, 深 68.61 m; 消力井深度取 $1.5D$, 为 4.5 m; 4#支隧洞进口连接段采用矩形断面, 进口底板高程为 546.39 m, 底宽为 2.5 m, 纵坡为 3%, 长度为 3.0 m, 顶压板板斜率为 1:6, 出口断面尺寸为 $4.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 在顶压板末端设置 2 根 $\varnothing 250 \text{ mm}$ 通气管; 3#支隧洞断面采用圆拱直墙式, 纵坡为 3%, 长度为 0.12 km, 尺寸为 $2.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$, 出口接入主隧洞。

4.2 排洪系统水力设计成果分析

(1) 库内 1 000 a 一遇洪水经过调洪后最大下泄流量 $36.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 按本文 3.1 节中计算方法计算: 通过 3#排水井时水深 2.6 m, 为堰流;

(2) 库外环形溢流堰通过 1 000 a 一遇洪水时, 按本文式 (1) 计算: 堰上水头为 2.47 m。

(3) 1 000 a 一遇洪水情况下, 按本文式 (2) 确定竖井直径, 库内 3#竖井和库外竖井内径满足避免进口不发生呛水或淹没流的条件。

(4) 1 000 a 一遇洪水情况下, 库内 3#竖井、库外竖井底部消力井消能率分别为 91%、84.3%, 消力井消能效果较好, 消力井消能率计算如表 3 所示。

(5) 1 000 a 一遇洪水情况下, 支隧洞、主隧洞水面线以上空间占断面总面积的比例为 15.7% ~ 40% > 15%, 且不小于 0.4 m 的无压隧洞净空要求, 流速不大于 16 m/s , 满足规范、标准要求。

(6) 1 000 a 一遇洪水情况下, 主隧洞、3#支隧洞进口连接段处水流为孔流; 连接段末端通气孔面积分别为 0.192 m^2 、 0.098 m^2 , 满足防空蚀掺气措施要求, 通气孔通气量计算如表 4 所示。

表 3 消能率计算

项目	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	$\Delta H/m$	h/m	$V/(m^3 \cdot s^{-1})$	$\eta/\%$
3 [#] 竖井	36.4	69.11	1.8	9.41	91.0
库外竖井	188.0	83.67	3.3	14.24	84.3

表 4 通气孔通气量计算

项目	$Q_m/(m^3 \cdot s^{-1})$	F_r	$V/(m \cdot s^{-1})$	h/m	β	$Q_a/(m^3 \cdot s^{-1})$	$[V]/(m \cdot s^{-1})$
主隧洞进口	188.0	2.80	15.67	3.20	0.056	10.51	60
3 [#] 支隧洞进口	36.4	1.84	8.09	1.98	0.025	5.57	60

(7) 1 000 a 一遇洪水情况下,主隧洞出口经 30 m 长渐变明渠渐变后,采用消力池消能,满足消能防冲要求。

因此、尾矿库排洪系统所拟定的排洪构筑物型式、结构尺寸、纵坡等合适。

5 结 语

随着尾矿库建设标准越来越高,尾矿库排洪系统越来越复杂,本文对尾矿库复杂排洪系统各排洪构筑物水力设计方法及设计原则进行了总结,并就尾矿库排洪系统设计一些特殊问题提出针对性措施,可为较复杂的进水构筑物+隧洞排洪型式水力设计提供依据或指导,并通过某尾矿库复杂排洪系统实例分析验证其水力设计可行性、可靠性。

当设计中遇到特别复杂的排洪系统,应通过水工模型试验验证排洪构筑物过流能力、体型、结构尺寸等;和通过掺气减蚀模型试验验证掺气

设施的体型尺寸。

参考文献:

[1] 尾矿设施设计规范:GB 50863—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.

[2] 沈楼燕. 关于尾矿库排洪系统设计中的问题探讨[J]. 有色金属(矿山部分),2003(3):38-40.

[3] 时炜. 浅议尾矿库排洪系统设计[J]. 有色矿山,2002(5):43-46.

[4] 《尾矿设施设计参考资料》编写组. 尾矿设施设计参考资料[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.

[5] 抽水蓄能电站竖井式泄洪洞设计导则:T/CEC 5052—2021[S]. 北京:中国电力出版社,2021.

[6] 李炜,齐鄂荣.《水力计算手册》(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[7] 李家星,赵振兴.《水力学》(第二版)(上册)[M]. 南京:河海大学出版社,2001.

[8] 溢洪道设计规范:SL 253—2018[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018.