

文章编号: 1007-2993(2023)06-0664-05

# 某尾矿堆积体沉积规律研究

刘来新

(北京爱地地质工程技术有限公司, 北京 100144)

**【摘要】** 采用勘探、取样、原位试验及室内试验相结合的方法研究了某尾矿堆积体的沉积规律。研究表明, 上游法尾矿坝堆积体自沉积滩顶向库内方向, 尾矿砂的粒径逐渐由粗变细, 自滩面向下, 尾矿砂沿深度方向的粒径总体上呈现由粗变细的规律; 尾矿砂的密实度总体上随深度的增大而增大, 并最终趋于稳定。

**【关键词】** 尾矿库; 尾矿堆积体; 沉积滩; 沉积规律

**【中图分类号】** P 624

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.06.006

## Study on the Deposition Rule of A Tailings Embankment

Liu Laixin

(Beijing Aidi Geological Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100144, China)

**【Abstract】** A combination of exploration, sampling, in-situ test, and indoor test was used to study the deposition law of tailings accumulation. The study shows that, from the top of the sedimentary beach to the direction of the reservoir, the particle size of the tailings sand gradually changes from coarse to fine, and from the beach to the downstream, the particle size of the tailings sand along the direction of the depth in general shows the law of changing from coarse to fine; the compactness of the tailings sand in general increases with the increase of the depth, and ultimately tends to be stabilized.

**【Key words】** tailings pond; tailings embankment; deposited beach; depositional regularity

### 0 引言

尾矿库是通过筑坝拦截谷口或围地构成的用以贮存尾矿的场所, 当其服务时间达到一定年限, 或库容量达到一定水平时, 将会是重大危险源和环境污染源, 既对尾矿库下游人民生命和财产安全构成威胁, 又易造成环境污染事故<sup>[1]</sup>。众多学者对尾矿库的充填工艺、失稳原因及稳定性分析方法做了大量研究。李保健等<sup>[2]</sup> 研究认为全尾砂非胶结充填工艺充填尾砂粒级分布较好、级配较均匀, 尾砂沉降速度较快。董贺伟等<sup>[3]</sup>、王琢<sup>[4]</sup>、路平平<sup>[5]</sup> 采用理论分析和数值模拟等研究方法综合计算尾矿库的抗滑稳定性和渗流稳定性。彭朝洪等<sup>[6]</sup>、曹荣国<sup>[7]</sup> 揭示了尾矿坝浸润线随库水位变化的规律及其与尾矿坝坝坡稳定性关系, 模拟尾矿库的应力应变分布规律。时悦琪<sup>[8]</sup> 通过室内渗透破坏试验总结了不同细粒含量的尾矿砂试样发生渗透破坏时的现象和规律。海龙等<sup>[9]</sup> 通过室内试验得出固结压力-孔隙比-渗透系数的定量变化规律。杨青峰<sup>[10]</sup> 总结了尾矿坝坝体内的渗流场

分布, 预测不同条件下的浸润线位置。

根据规范要求, 当上游式尾矿坝堆积至一定高度时, 应对坝体进行全面勘察并复核安全性, 而尾矿库库区的地貌特征、尾矿堆积体的组成、密实程度及其沉积规律、尾矿堆积材料的物理力学性质、尾矿库的渗流特征等对坝体稳定性评价起到至关重要的作用。肖霄等<sup>[11]</sup> 通过室内试验数据认为堆积体粒径随深度及沿水平方向有一定的沉积规律, 但仅仅通过颗粒分析试验只能得到粒径的大小分布。本文通过对某尾矿库的详细勘察, 采用勘探、取样、原位试验及室内试验相结合的方法研究了该尾矿堆积体的沉积规律, 为尾矿库的稳定性评价提供技术资料。

### 1 项目概况

某山谷型尾矿库用于堆存铁矿石尾矿, 由初期坝及尾矿堆积组成。堆积坝采用上游法筑坝工艺, 由尾矿砂堆积而成, 设计最终堆积坝标高为 230 m, 总坝高 114 m, 总库容  $8.89 \times 10^7 \text{m}^3$ , 为二等尾矿库。目前尾矿堆积坝顶标高已达 210 m, 沉积滩顶标高约

208 m。为满足尾矿库加高扩容需要,应进行全面勘察并进行稳定性专项评价,以验证坝体的稳定性和确定后期的处理措施,全面勘察应查明尾矿堆积体的组成、密实程度及其沉积规律。

## 2 研究方法

研究采用勘探、原位测试(标准贯入试验、静力触探试验、波速试验)与室内试验(常规土工试验、加压渗透试验)相结合的方法。勘察共布置3条勘探线,其中主勘探线下游端达到初期坝趾下游,上游端达到尾矿库水位线,勘探点间距30~60 m,勘探孔深度进入原天然地面下1~2 m,沉积滩内控制性勘探孔深度进入原天然地面下5~8 m,堆积坝上控制性勘探孔深度进入原天然地面下15~20 m。所有钻孔均测定地下水位,均取样,所有标准贯入试验点均采取扰动样。在主要勘探线上布置不少于1/2勘探点进行静力触探试验,在不少于1/2的钻孔中进行标准贯入试验。

在地下水位以上采用干钻,查明地下水位,并与尾矿库浸润线监测资料进行对比。

采用钻孔中内置环刀的原状取砂器及沉积滩探槽内环刀法采取原状尾矿砂试样,从标准贯入器中采取扰动尾矿砂试样,取样的竖向间距1~3 m。

在钻孔中进行波速测试、标准贯入试验,在钻孔旁进行双桥静力触探试验。

对尾矿砂进行有关项目的室内土工试验,评价其物理力学性质。

## 3 尾矿堆积沉积规律

### 3.1 尾矿堆积坝筑坝工艺

堆积坝采用上游法堆筑,用推土机筑子堤。在子坝顶均匀放矿,尾矿颗粒通过水力输送管道从选矿厂输送到坝顶,然后通过与输送管道相连接的放矿支管分散排放到尾矿池内,形成由坝顶向池内倾斜的尾矿沉积滩,沉积滩坡度自坝顶向池内逐渐变缓,这样形成了由初期坝坝顶向上游逐级堆积的呈阶梯状的尾矿堆积坝。

### 3.2 尾矿成分

选矿厂矿石为含铁石英岩,尾矿中所含矿物主要有:磁铁矿、黄铁矿、赤铁矿、褐铁矿、长石、石英、云母、辉石、角闪石等。

入库尾矿-200目粒度含量为69.2%,粒径范围0~0.85 mm之间,平均粒径0.075 mm,尾矿干密度为1.60 g/cm<sup>3</sup>。

根据勘探揭露结果,尾矿堆积材料主要由尾中

砂及尾粉细砂组成,局部夹互层状尾矿土薄层,具倾向库内的细微交错层理。

### 3.3 尾矿堆积体沉积规律

尾矿排放时,矿浆通过放矿支管由沉积滩顶向库内排放,形成由滩顶向库内倾斜的沉积滩面,放矿管的直径将直接影响到沉积滩的纵坡,放矿管细时,粗粒尾矿多集中在放矿口附近,沉积纵坡比较陡,增大放矿管可降低沉积滩坡度,增加干滩长度。此外,放矿管间距、开启的顺序与位置、持续时间、浆液的浓度等都影响着沉积滩的纵坡度及干滩的长度。浆液的粒度、尾矿库的排水系统直接影响着库内水位的高低,又反过来影响尾矿的沉积速率。

在矿浆的冲击下,沉积滩面形成树枝状冲沟,尾矿在沉积过程中,水流沿冲沟方向形成倾向库内的冲积扇,一般在放矿口附近及主流方向上,流速大,粗颗粒矿物先沉积,向两侧及下游方向,水流变慢,细颗粒矿物慢慢沉积,直到库水位内沉积尾矿泥。在同一级堆积坝上大体上形成了自坝顶向库内颗粒逐渐由粗变细,自坝顶向下颗粒逐渐由粗变细的沉积规律。同时,由于放矿管的交替打开,往往新开放矿管的尾矿又覆盖了先沉积尾矿,如此重复交叉的沉积在微观上形成了尾矿粒度粗细交错的层理。由于上述放矿规律,尾矿成层状向坝内延伸,颗粒分配大体上与坝面以及堆积坝外坡面平行。

从尾矿库干滩内按一定距离采取表层尾矿砂试样,通过颗粒分析试验研究尾矿砂沿沉积滩表层的沉积规律。从干滩内钻孔中采取不同深度的尾矿砂试样,通过颗分试验研究尾矿砂的竖向沉积规律。根据颗分试验得到尾矿砂平均粒径指标的变化特征曲线(见图1、图2)。

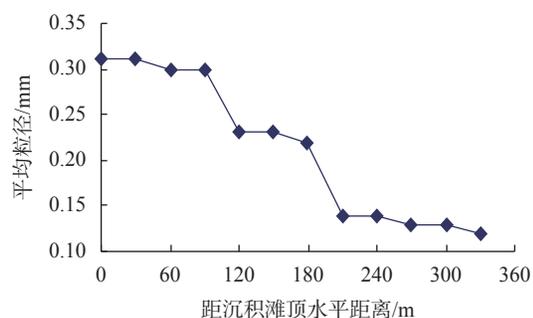
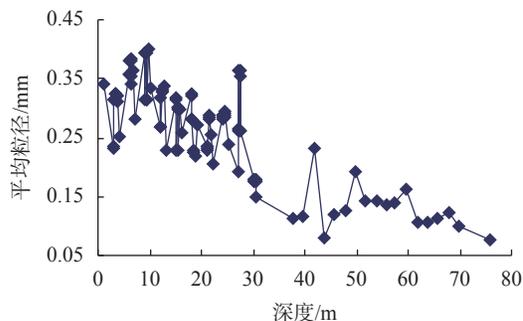


图1 沉积滩表层尾矿砂平均粒径  $d_{50}$  变化特征曲线

通过沉积滩表层尾矿砂平均粒径  $d_{50}$  变化特征曲线(见图1)可知:自沉积滩顶向库内方向,尾矿砂的粒径逐渐由粗变细。通过尾矿砂平均粒径  $d_{50}$  沿深度变化曲线(见图2)可知:自沉积滩面向下,尾矿砂沿深度方向的粒径总体上由粗变细。

图2 尾矿砂平均粒径  $d_{50}$  沿深度变化曲线

#### 4 尾矿堆积材料的物理力学性质

##### 4.1 尾矿堆积材料的原位测试结果分析

###### (1) 标准贯入试验

在钻孔中对尾矿堆积体自上而下进行标准贯入试验并划分尾矿砂密实度。图3为尾矿砂标准贯入试验击数随深度的变化曲线。

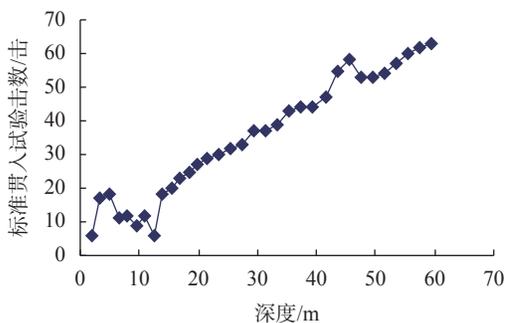


图3 尾矿砂标准贯入试验锤击数随深度变化曲线

根据统计,沉积滩内松散—稍密状态的尾矿砂深度一般不超过12 m,多数在7~8 m以内,20 m以下的尾矿砂均处于密实状态。除局部尾矿土夹层的影响钻孔外,尾矿砂的密实度总体上随深度的增大而增大。

###### (2) 双桥静力触探试验

在钻孔附近进行了双桥静力触探对比试验,锥头阻力及侧壁摩阻力数值开始随深度增加很快,反映出库区尾矿砂层由上部的松散—稍密层渐变为下部中密—密实层的过程,然后锥头阻力及侧壁摩阻力数值增加,曲线变陡,但依然呈现逐渐增加的趋势。总体来说,整个尾矿砂层的密实度是随深度逐渐增大的,同一尾矿砂层在不同触探孔位置上,水平方向存在一定差异性,局部尾矿砂层中夹有尾矿土薄层。随着深度的增大,当触探至尾黏性土与尾粉细砂交互层时锥头阻力及侧壁摩阻力及曲线波动性大,且锥头阻力及侧壁摩阻力数值明显减小,但土的密实趋势保持不变。尾矿砂典型静力触探曲线见图4。

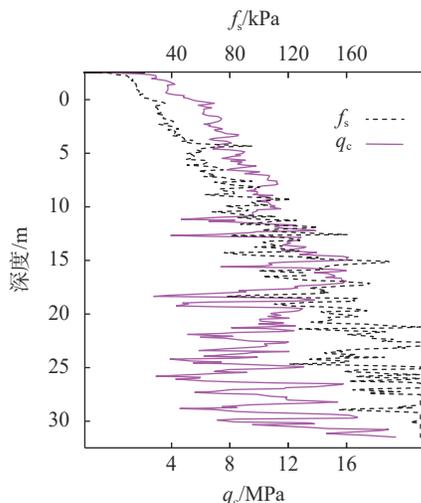


图4 尾矿砂典型静力触探曲线

###### (3) 钻孔波速测试

采用人工激震单孔检层法进行了钻孔波速测试,从测试结果和波速曲线(见图5)可见,排除局部尾矿土夹层的影响,尾矿堆积体的剪切波速值总体上随着深度的增加而增大,这与标准贯入试验锤击数和双桥静力触探试验曲线随深度的变化的趋势是一致的。

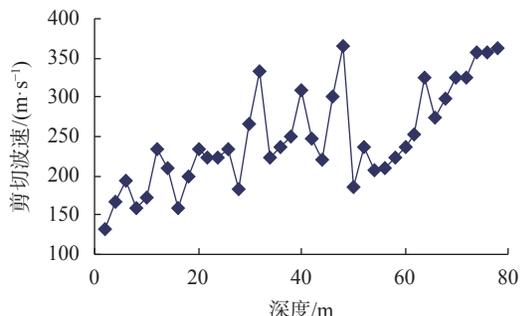


图5 剪切波速随深度变化曲线

##### 4.2 尾矿堆积材料的室内土工试验结果分析

###### (1) 一般物性试验

对钻孔及探槽内采取的原状尾矿砂试样进行了一般物性试验,其统计结果见表1。

根据表1,结合堆积体沉积规律,天然状态下尾粉细砂在含水量、饱和度、密度方面普遍比尾中砂高,而孔隙比低,反映出尾矿砂密实度自上而下逐渐增大的趋势。

###### (2) 相对密度试验

为了获取各层尾矿砂的相对密度  $D_r$ ,室内分别对尾中砂和尾粉细砂进行了相对密度试验,最小干密度( $\rho_{d,min}$ )试验采用量筒法,最大干密度( $\rho_{d,max}$ )试验采用振动锤击法,各层尾矿砂的相对密度  $D_r$  计算结果见表2。

根据表2,结合堆积体沉积规律,天然状态下尾

表 1 尾矿砂一般物性试验指标统计结果

岩土名称	统计项目	质量密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	天然含水量 $w/\%$	土粒比重 $G_s$	天然孔隙比 $e$	饱和度 $S_r/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$
尾中砂	范围值	1.50 ~ 2.16	2.10 ~ 15.4	2.8	0.477 ~ 0.978	8.1 ~ 84.8	1.42 ~ 1.9
	平均值	1.70	5.84		0.750	22.12	1.60
	变异系数	0.052	0.358		0.110	0.410	0.048
	样本数	299	299		299	299	299
尾粉细砂	范围值	1.51 ~ 2.16	3.8 ~ 27.1	2.8	0.479 ~ 0.982	13.6 ~ 95.9	1.41 ~ 1.89
	平均值	1.78	9.75		0.734	39.12	1.62
	变异系数	0.088	0.502		0.144	0.567	0.064
	样本数	148	148		148	148	148

表 2 尾矿砂相对密度  $D_r$  计算结果

岩土名称	最小干密度 $\rho_{d,min}/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_{d,max}/(g \cdot cm^{-3})$	天然干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 $D_r/\%$
尾中砂	1.34	1.79	1.42 ~ 1.90	35.20 ~ 82.40
尾粉细砂	1.33	1.77	1.41 ~ 1.89	48.00 ~ 83.80

粉细砂的相对密度普遍高于尾中砂, 反映出尾矿砂密实度自上而下逐渐增大的趋势。

(3) 颗粒分析试验

采用筛析法对尾矿砂试样进行了颗粒分析试验, 对尾矿砂进行定名并获得各项级配指标, 图 6—图 8 分别为现状沉积滩内尾矿砂的有效粒径  $d_{10}$ 、平均粒径  $d_{50}$  和不均匀系数  $C_u$  的分布特征散点图。

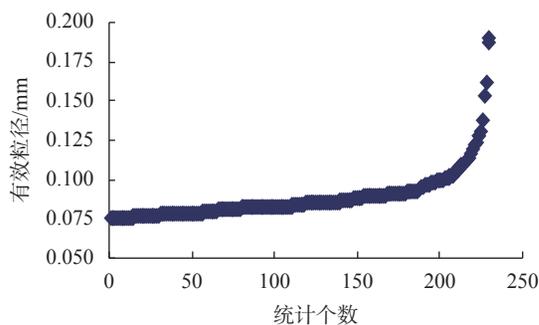


图 6 尾矿砂有效粒径  $d_{10}$  分布特征散点图

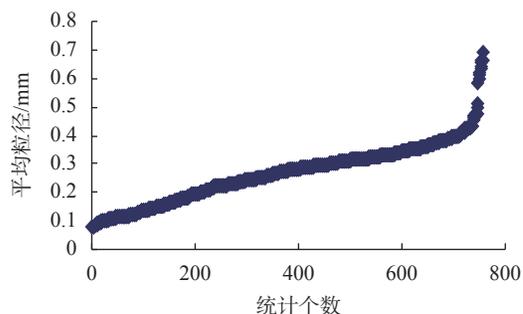


图 7 尾矿砂平均粒径  $d_{50}$  分布特征散点图

由图 6—图 8 可见, 沉积滩内尾矿砂的有效粒径  $d_{10}$  变化区间为 0.075 ~ 0.190 mm, 平均值为 0.089 mm, 大部分尾矿砂的有效粒径  $d_{10}$  集中于 0.075 ~

0.100 mm; 尾矿砂的平均粒径  $d_{50}$  变化区间为 0.077 ~ 0.691 mm, 平均值为 0.271 mm, 大部分尾矿砂的平均粒径  $d_{50}$  集中于 0.077 ~ 0.40 mm; 尾矿砂的不均匀系数  $C_u$  变化区间为 2.77 ~ 10.47, 平均值为 4.87, 大部分尾矿砂的不均匀系数  $C_u$  集中于 3.47 ~ 6.00。

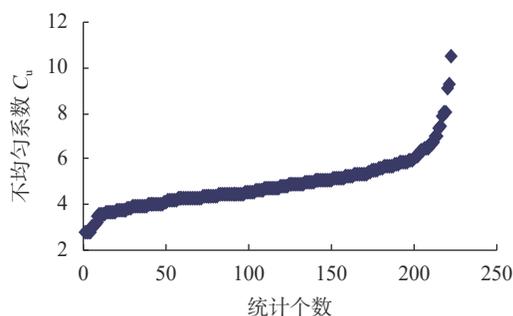


图 8 尾矿砂不均匀系数  $C_u$  变化特征散点图

(4) 室内加压渗透试验

采用室内加压渗透试验, 获得尾矿砂在不同上覆有效压力作用下的竖向渗透系数  $k_v$ , 绘制尾中砂和尾细砂的孔隙比  $e$  随压强  $P$  的变化关系曲线和竖向渗透系数  $k_v$  随压强  $P$  的变化关系曲线(见图 9、图 10)。

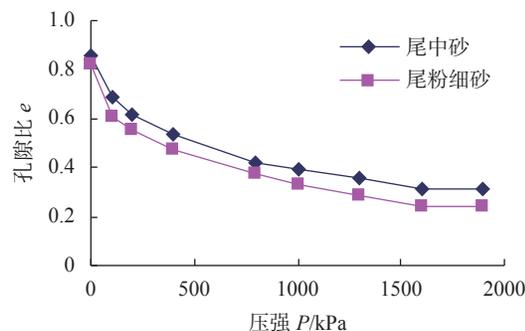


图 9 尾矿砂孔隙比  $e$  随压强  $P$  的变化关系曲线

由图 9、图 10 可以看出, 尾矿砂孔隙比  $e$  和竖向渗透系数  $k_v$  均随着压强  $P$  的增大而减小, 但减小的幅度逐渐降低。随着深度增加, 尾矿砂的密实度逐渐增加, 而竖向渗透系数  $k_v$  逐渐减小, 并最终趋于稳定。

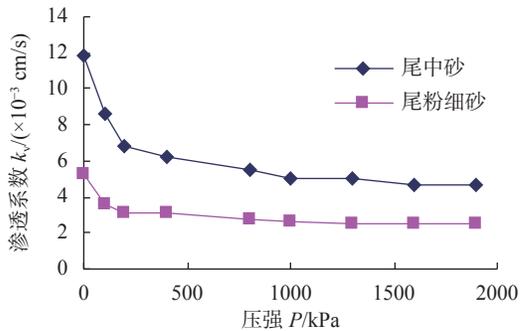


图 10 尾矿砂竖向渗透系数  $k_v$  随压强  $P$  的变化关系曲线

## 5 尾矿库的渗流特征

由于尾矿堆积过程中粒径具有纵向及垂向上从粗到细的宏观沉积规律,又具有尾矿无规律排放导致的粗细交错互层的微观沉积规律,导致了尾矿堆积体内水位的复杂性;受到多个沉积韵律中尾矿土的影响,钻孔中浅部经常可观测到多个初见水位,稳定水位远低于初见水位,在库区水位线以下也是如此,造成水位以下的部分尾矿砂并非处于饱和状态。由于交错层理的存在,含水层的竖向渗透性一般小于水平渗透性,水的下渗较慢,特别是在放矿期间,尾矿堆积体内观测到的初见水位往往较高,常以层流的形式流动。另外由于放矿量的大小、矿浆浓度高低、排回水系统的有效性、季节性雨水等因素的影响,导致尾矿堆积体内的水位变化较大,使得水的渗透途径极其复杂。

坝体浸润线的总体状态是:从沉积滩内到初期坝,浸润线的坡度随尾矿沉积层堆积地形变化而变化,从缓倾斜逐渐变为陡倾斜,一般在尾矿沉积滩内的浸润线平均水力坡度较缓,在滩顶附近坡度变陡。

## 6 结论

(1)受筑坝工艺影响,尾矿在沉积过程中,沿水流方向形成倾向库内的微细交错层理;自沉积滩顶向库内方向,自滩面向下,尾矿砂的粒径总体上呈由粗变细的规律。

(2)从原位测试数据反映,尾矿砂密实度在上部增长很快,中下部增长缓慢,总体上整个尾矿砂层的

密实度是随深度逐渐增大的;同一尾矿砂层在不同位置局部夹有尾矿土薄层,水平方向存在一定差异性。

(3)从室内一般物性试验及相对密度试验反映,尾中砂的密实度指标普遍低于尾粉细砂,反映出尾矿砂密实度自上而下逐渐增大的趋势。

(4)根据室内加压渗透试验,尾矿砂孔隙比  $e$  和竖向渗透系数  $k_v$  均随着压强  $P$  的增大而减小,并最终趋于稳定,即密实度不再增加。

(5)由于尾矿的特殊沉积规律,导致了尾矿沉积层中水位和渗流的复杂性,但总体浸润线坡度从沉积滩内到初期坝由缓倾斜逐渐变为陡倾斜。

## 参 考 文 献

- [1] 魏德宁. 治理某问题尾矿库坝体管涌的方法和措施[J]. 山西焦煤科技, 2014, 38(6): 54-56.
- [2] 李保健, 周涌, 刘允秋, 等. 会宝岭铁矿全尾砂非胶结充填新工艺[J]. 金属矿山, 2015, (S1): 33-35.
- [3] 董贺伟, 王洋, 吴永刚. 某尾矿库坝体稳定性综合判定方法[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(4): 58-62.
- [4] 王琢. 尾矿库岩土勘察技术及坝体稳定性评价研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [5] 路平平. 宁城县宏达矿业2#尾矿库稳定性分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [6] 彭朝洪, 孟祥瑞. 基于有限元数值模拟的尾矿库堆积坝应力应变分析[J]. 价值工程, 2015, 34(10): 120-122.
- [7] 曹荣国. 大黑山尾矿坝渗流与稳定性分析研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [8] 时悦琪. 细粒尾矿坝渗透破坏多尺度灾变机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [9] 海龙, 梁冰, 戴宏锋, 等. 铁尾矿的渗透特性试验研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 207-210.
- [10] 杨青峰. 承德某尾矿库坝体稳定性分析[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2019.
- [11] 肖霄, 徐世光, 黄建国, 等. 上游式尾矿库尾矿堆积体沉积规律[J]. 价值工程, 2014, 33(15): 65-67.

收稿日期: 2022-09-16