

细粒尾矿坝漫顶溃坝机制及灾变过程*

杜艳强¹ 讲师 王新武¹ 张 坤¹ 王晓强¹ 杨春和²

(1 洛阳理工学院 土木工程学院,河南 洛阳 471023 2 中国科学院武汉岩土力学研究所
岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071)

学科分类与代码: 6203099(安全工程技术科学其他学科) 中图分类号: X928.9 文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51234004)。

【摘 要】 为阐明细粒尾矿坝漫顶溃坝事故的致灾机制,在力学分析的基础上,借鉴前人成果,研究漫顶溃坝事故的发生机制和灾变过程。分析结果表明,尾矿坝的漫顶溃坝破坏是由水流牵引应力对坝顶溃口形成的促进作用、下泄水流对溃口的冲切加深作用和边坡失稳对溃口的横向扩展作用 3 方面共同影响造成的。分析尾矿坝漫顶溃坝的灾变过程可以发现,在坝体横向方向,从下游向上游,尾矿坝被漫顶水流层层剥蚀;在坝体纵向方向,水流的冲蚀作用导致溃口边坡产生间歇性失稳坍塌现象,2 个方向的作用导致尾矿坝最终溃决。

【关键词】 细粒; 尾矿坝; 漫顶; 破坏机制; 灾变过程

Process and mechanism of fine grained tailings dam's failure due to overtopping

DU Yanqiang¹ WANG Xinwu¹ ZHANG Kun¹ WANG Xiaoqiang¹ YANG Chunhe²

(1 School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan 471023, China

2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China)

Abstract: The study was aimed at learning about the mechanism and process of dam failure induced by overtopping in fine grained tailings ponds. The failure mechanism of overtopping was analyzed theoretically and the results show that dam-break results from three processes, namely, the breach forming process facilitated by traction force of the water flow, the process in which the released flow is deepening the breach, and the broadening process of the breach by landslide. Referring to research findings of analogous earth-filled dam, tailings dam's failure process due to overtopping was analyzed. It was discovered that for fine grained tailings dams, collapse is a process in which the dam is disintegrated layer-by-layer from downstream to upstream in lateral direction, and that washing the slope causes landslide intermittently in longitudinal direction, and both the effects lead to dam failure.

Keywords: fine grained; tailings dam; overtopping; failure mechanism; catastrophe process

0 引 言

随着选矿技术的发展,尾矿的颗粒越来越细,导致尾矿库的排水固结能力降低,尾矿坝的本质安全

性不断减弱。洪水漫顶是尾矿库溃坝的重要原因之一。如 2010 年的广东信宜尾矿库漫顶溃坝事故^[1]就是由超蓄引发的,事故造成 22 人死亡,交通、水利等设施严重受损。因此,有必要研究尾矿坝的漫顶

* 文章编号: 1003-3033(2017)02-0104-05; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.02.019
收稿日期: 2016-12-02; 修稿日期: 2017-01-18

溃坝机制及灾变过程。

关于尾矿库漫顶溃坝的研究主要包括水流漫顶破坏以及溃坝洪水演进 2 个方面。张兴凯等^[2]用物理模型试验方法分析了尾矿库洪水漫顶溃坝的演化规律;魏勇等^[3-4]总结了尾矿库漫顶溃坝事故的主要影响因素;倪旭等^[5]认为,坝体外坡比的大小对均质尾矿坝溃口出流浑水冲刷下游坝体有明显影响;张强等^[6]分析了坝坡地形起伏和坡面抗冲性能 2 个因素对冲沟网形成的影响;陶东良^[7]认为坡比对溃坝形态和洪水状态有很大影响;尹光志等^[8-9]采用自制设备探讨了不同高度尾矿坝瞬间全溃条件下的泥浆流态演进规律及动力特性;张红武等^[10-11]提出了设计尾矿库溃坝模型时应遵循的条件,并建立了尾矿库漫顶溃坝洪水预测数学模型。

综上所述,学者们多采用模型试验、经验公式以及数值模拟的手段研究尾矿库漫顶溃坝,但这些研究缺乏溃坝现场实测资料,研究成果能否应用于工程有待检验。鉴于模型试验、数值计算等方法本身的局限性,目前对尾矿坝漫顶溃坝的破坏机制和灾变过程的认识并不全面。因此,笔者将从力学分析入手,研究尾矿坝漫顶溃坝事故的发生机制,并借鉴土石坝的相关研究成果,预测细粒尾矿坝的漫顶溃坝灾变过程,以为尾矿坝工程的防灾减灾工作提供依据。

1 尾矿库漫顶溃坝的影响因素

根据颗粒大小可以将尾矿分为细粒、中粒以及粗粒尾矿。细粒尾矿黏粒及粉粒含量较高,常具有一定黏性,而中粒、粗粒尾矿则表现出砂性土的特征。由于黏性颗粒与砂性颗粒性质差别较大,故细粒尾矿库洪水漫顶溃坝事故的发生机制及破坏过程与中粒、粗粒尾矿坝也存在显著差异^[12-13]。目前金属矿山选矿后排出的尾矿基本为细粒尾矿,因此,文中主要研究细粒尾矿库的洪水漫顶溃坝问题。

导致尾矿坝漫顶溃坝的原因有很多,既包括设计因素、施工因素、管理因素,又包括气候因素、技术因素,且各因素之间又相互制约相互影响。从漫顶溃坝的角度来讲,尾矿坝与土石挡水坝在物质组成和溃坝效果等方面均有相似之处,尾矿坝与土石挡水坝均采用散体颗粒筑坝,库内均存在自由水面并储存相当的水量。因此,一定程度上可以将尾矿库看作是一个小型水库。尾矿库发生洪水漫坝时,由于筑坝材料为松散的尾矿颗粒,坝顶位置处易因水流和泥流的冲刷作用形成一定规模的溃口。尾矿坝

漫顶溃坝事故的直接原因是库内水位过高,水流漫过坝顶而溢出坝外,引起库内水位超高的影响因素主要包括 4 个方面:①因库区滑坡或泥石流,库外物质侵占库内有效库容;②排洪设施发生故障,库内洪水不能及时排出;③排洪设施的设计排洪能力过小,库内水量不能及时排出,导致水位超过允许值;④非正常降雨条件下,实际降雨量超过尾矿库的设计排洪能力,排洪设施不能及时排出多余洪水。图 1 所示为尾矿库漫顶溃坝的现场情况。



(a) 漫顶事故处理



(b) 漫顶溃坝后果

图 1 尾矿库漫顶溃坝现场

Fig.1 Scene pictures of tailings dam's overtopping failure

2 细粒尾矿库漫顶溃坝的产生机制

尾矿库洪水漫顶溃坝事故的诱因主要包括 3 个方面:①漫顶水流的牵引应力使坝顶尾矿颗粒流失形成溃口;②下泄水流冲刷作用引起溃口不断加深;③溃口两侧边坡失稳导致溃口产生横向扩展。

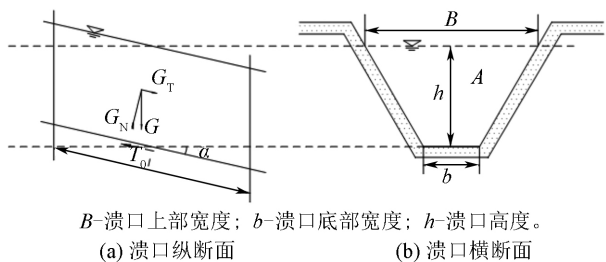
2.1 水的牵引应力形成溃口

尾矿库洪水漫过堆积坝时,坝顶位置在水流冲刷作用下形成溃口,水流经过溃口的过程可看作是明渠流。在明渠流中,水流受到渠底和边壁对水流的摩擦力,由水流产生的剪应力和对土颗粒的拉拽力作用在坝体下游表面。当剪应力超过某薄弱处的抗蚀临界值时启动侵蚀过程,当重力和阻力达到平衡时,形成等速均匀流动。如图 2 所示,在明渠定常均匀流中,取长度为 l 的一段液体,溃口湿周面积上的平均切应力为 τ_0 ,溃口横断面为等腰梯形,将液

体重力 G 分解为垂直于渠底的分力 G_N 和平行于渠底的分力 G_T 则

$$G_T = G \sin \alpha = \gamma_w A l \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

式中: A 为过水断面面积 m^2 ; γ_w 为水的重度 N/m^3 ; l 为一段液体长度 m ; α 为渠底与水平面的夹角 $(^\circ)$ 。



B -溃口上部宽度; b -溃口底部宽度; h -溃口高度。
(a) 溃口纵断面 (b) 溃口横断面

图2 溃口水力分析

Fig.2 Hydraulic analysis of breach

由于明渠流中 α 一般较小,常以 $\sin \alpha$ 表示渠底坡度,即 $\sin \alpha = i$; $\cos \alpha \approx 1$,因此

$$G_T = \gamma_w A l i \quad (2)$$

根据明渠定常均匀流的力学条件,力 G_T 与渠底和边壁对液流的摩擦力相平衡,因而溃口湿周面积上所发生的平均切应力为

$$\tau_0 = \frac{G_T}{Xl} = \frac{\gamma_w A l i}{Xl} = \gamma_w R i \quad (3)$$

式中: X 为湿周长 m ; R 为水力半径 m 。

2.2 下泄水流的冲刷引起溃口的纵向下切

陡坎的形状类似于瀑布,是指地面在高程上的突降,对于黏土堤坝的漫顶溃坝过程可以用陡坎冲刷模型来描述^[14]。如图3所示,在坝顶水流流过下游坡面初期,微小的陡坎开始在坝趾附近裂隙处形成,坡面水流流过陡坎时,水流向下冲击坝面并产生反向漩涡;冲击水流冲刷地面并掏蚀基础,使陡坎纵向下切;反向漩涡冲击跌水面,在跌水面上产生剪应力,使跌水面失稳而坍塌,陡坎不断向上游发展。如此往复循环,溃口不断扩大加深,直到堤坝溃决,有时还会在堤坝的下游坡面上形成一系列阶梯状陡坎。

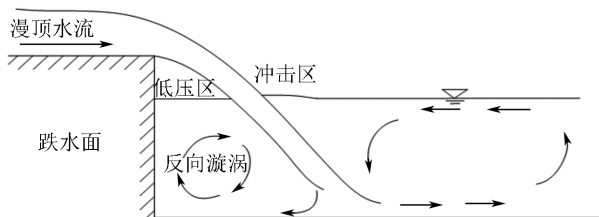


图3 溃口水流陡坎冲刷示意

Fig.3 Schematic diagram of breach's headcut erosion

2.3 边坡失稳引起溃口的横向扩展

假定尾矿坝洪水漫顶条件下的初始溃口形状为矩形,溃口由于受到水流的冲蚀作用而发生垂向下切和横向扩展,溃口边坡由于水流的冲蚀作用而变得越来越陡,当坡度达到临界坡度时,溃口边坡便发生失稳坍塌,溃口形状变为梯形(图4)。当垂向下切深度 H 达到临界深度 H_s 时,溃口边坡发生间歇性失稳和坍塌,如此循环,溃口不断扩大,最终导致尾矿坝发生溃坝事故。临界深度 H_s 可由以下方法导出,如图4所示,滑面为直线 AC ,假定截面厚度为1,当滑块 ABC 处于极限平衡状态时有

$$W \sin \theta_{k+1} = cL + W \cos \theta_{k+1} \tan \varphi \quad (4)$$

式中: W 为滑动楔体重力 N ; c 为土体黏聚力 Pa ; φ 为土体内摩擦角 $(^\circ)$; L 为楔体底边长 m ; θ_k 为边坡坡角 $(^\circ)$ 。

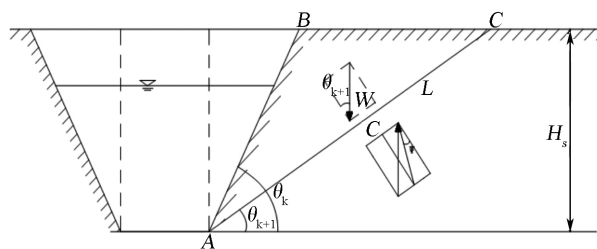


图4 溃口失稳坍塌示意

Fig.4 Schematic diagram of breach's collapse

滑动楔体重力 W 由下式计算

$$W = \frac{1}{2} \gamma \frac{H_s}{\sin \theta_k} L \sin(\theta_k - \theta_{k+1}) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得

$$c = \frac{1}{2} \gamma H_s \frac{\sin(\theta_k - \theta_{k+1}) \sin(\theta_{k+1} - \varphi)}{\sin \theta_k - \cos \varphi} \quad (6)$$

式中 γ 为土体重度 N/m^3 。由于 $\theta_k - \theta_{k+1} = \theta_{k+1} - \varphi$,于是有

$$\theta_{k+1} = \frac{1}{2}(\theta_k + \varphi) \quad (7)$$

$$c = \gamma H_s \frac{1 - \cos(\theta_k - \varphi)}{4 \sin \theta_k \cos \varphi} \quad (8)$$

因此,溃口临界深度由下式计算

$$H_s = \frac{4c \sin \theta_k \cos \varphi}{\gamma [1 - \cos(\theta_k - \varphi)]} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

需要指出的是,在不同的溃坝阶段,水流冲刷引起的纵向连续下切和溃口边坡失稳坍塌引起的横向间歇扩展,对溃口发展过程的影响存在大小差异。在漫顶溃坝初期,水流的横向冲蚀是溃口扩展的主导因素;而在溃坝的中后期,水流的纵向陡坎冲刷作用和横向的溃口边坡失稳坍塌成为溃口扩展的主导因素。

3 细粒尾矿库漫顶溃坝的灾变过程

尾矿库漫顶溃坝的灾变过程主要研究坝体溃口的扩展方式和库内洪水、尾矿的外泄情况,溃坝的规模和速度决定了事故灾害的大小。学术界对细粒尾矿库洪水漫顶问题研究较少,工程上又缺乏准确、完整的尾矿坝漫顶溃坝实测数据,因而目前尚无法准确描述尾矿库漫顶溃坝事故的灾变过程。通过对细粒尾矿物理性质的研究可知^[15-16],细粒尾矿粉粒、黏粒含量较高,常具有一定黏性。因此,可以参考黏土坝漫顶溃坝的研究成果^[17]预测细粒尾矿坝的漫顶溃坝灾变过程。

HANSON 等^[17]采用模型试验的方法,研究了洪水漫顶条件下,黏性土石坝溃口的形成及发展情况,细粒尾矿坝的漫顶溃决过程可参考该成果加以预测。在 HANSON 的漫顶溃坝模型试验中,黏土坝高 2.3 m,宽 7.3 m,上下游坝坡坡比都为 1:3,溃口

形成阶段,从漫顶水流对下游面坝趾位置处的侵蚀开始,随后逐渐过渡到上游坝顶位置,溃坝过程历时 31 min。图 5 为坝体破坏各阶段的典型图片,根据试验结果可将洪水漫顶溃坝过程分为 5 个阶段,各阶段的特点如下:① 水流漫顶,在坝顶形成小的溃口,同时水流冲刷坝坡,在坡面形成小的冲沟,冲沟包括一条或几条主沟,冲沟由多级阶梯状小的陡坎组成,如图 5a 所示;② 冲沟中的小的陡坎在水力冲刷作用下,向上游逐渐发展,同时不断下切和扩宽,逐步发展成为大的陡坎,如图 5b、图 5c 所示;③ 水力作用下,坝顶下游范围内的筑坝材料大量流失,陡坎不断地向上游方向延伸,一直延伸到坝顶位置处,如图 5d 所示;④ 坝顶材料被水流冲向下游,坝顶高程迅速降低,库内流体大量外泄,溃口流量达到最大值,同时库内水位开始降低,如图 5e 所示;⑤ 溃口向两侧扩展,深度则基本保持不变,直到库容完全丧失,坝体完全溃决,如图 5f 所示。

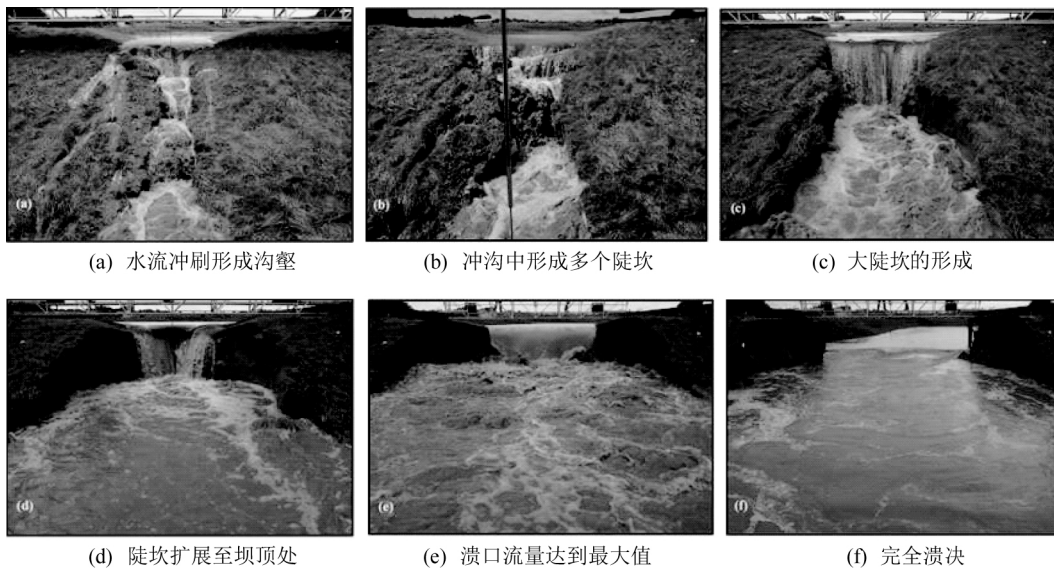


图 5 洪水漫顶模型试验的溃坝过程

Fig.5 Process of dam failure due to overtopping

根据以上黏土坝模型试验的结果,可以预测细粒尾矿库漫顶溃坝的灾变过程,图 6 为细粒尾矿库的洪水漫顶破坏过程示意,其中图 6a 为坝体横断面情况,图 6b 为坝体纵断面情况。在坝体横向产生的是垂向的层层剥蚀作用,具体表现为:从下游向上游,尾矿被漫顶水流层层剥蚀;在坝体纵向产生的是溃口边坡的间歇性失稳坍塌作用,表现为溃口的宽度和深度不断增加。溃口的横向剥蚀作用和纵向扩展作用同时发生,相互促进,直到尾矿坝完全溃决。

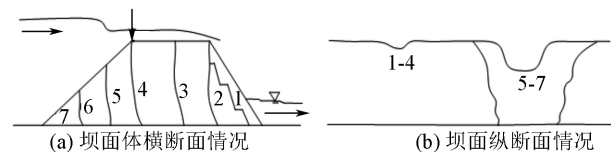


图 6 细粒尾矿库洪水漫顶破坏过程

Fig.6 Schematic diagram of dam failure induced by overtopping

4 结 论

通过分析细粒尾矿坝漫顶溃坝事故的发生机制及破坏过程,得到以下主要结论:

1) 细粒尾矿坝的主要成分为粉土和黏土等细粒材料,细粒尾矿具有一定黏性,对于细粒尾矿坝漫顶溃坝问题的研究可借鉴黏土坝的相关研究成果。

2) 尾矿库漫顶溃坝首先是因漫顶水流的牵引应力作用于坝顶形成溃口,随后因水流冲刷作用导致溃口纵向下切,当下切深度达到临界值时,边坡失

稳导致溃口发生横向扩展。

3) 洪水漫顶时,在坝体横向方向,尾矿被漫顶水流层层剥蚀;在坝体纵向方向,溃口边坡发生间歇性的失稳破坏,溃口宽度和深度不断增加。2种作用同时发生,相互促进,直到尾矿坝完全溃决。

参 考 文 献

[1] 广东信宜紫金矿业尾矿库溃坝特大事故系列刑事案一审判决 [EB/OL]. [2012-11-08]. http://www.gd.xinhuanet.com/newscenter/2011-08/06/content_23403143.htm.
First-instance judgment of major accident of Guangdong Xinyi Mining mudslide serial criminal cases [EB/OL]. [2012-11-08]. http://www.gd.xinhuanet.com/newscenter/2011-08/06/content_23403143.htm.

[2] 张兴凯,孙恩吉,李仲学. 尾矿库洪水漫顶溃坝演化规律试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 118-124.
ZHANG Xingkai, SUN Enji, LI Zhongxue. Experimental study on evolution law of tailings dam flood overtopping [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 118-124.

[3] 魏勇,许开立. 尾矿坝漫顶溃坝机理及过程研究[J]. 金属矿山, 2012(4): 131-135.
WEI Yong, XU Kaili. Research on mechanism and process of tailing dam break due to overtopping [J]. Metal Mine, 2012(4): 131-135.

[4] 魏勇,许开立,郑欣. 尾矿坝漫顶溃坝事故树分析[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2010, 31(6): 890-893.
WEI Yong, XU Kaili, ZHENG Xin. Fault tree analysis of tailing dam break due to overtopping [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2010, 31(6): 890-893.

[5] 倪旭,吕力行,彭媛. 尾矿坝外坡比对漫顶逐渐溃坝的影响研究[J]. 甘肃科学学报, 2014, 26(5): 59-62.
NI Xu, LYU Lixing, PENG Yuan. Impact of tailings dam outer slope ratio on overtopping dam breach [J]. Journal of Gansu Sciences, 2014, 26(5): 59-62.

[6] 张强,周扬. 土坝漫顶后冲沟网形成模拟[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(2): 33-37.
ZHANG Qiang, ZHOU Yang. Simulation on the formation of gully network due to overtopping [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(2): 33-37.

[7] 陶东良. 某钼矿尾矿库洪水溃坝模型试验研究[J]. 工程设计与研究, 2011(1): 18-24.
TAO Dongliang. Modal experimental study of a molybdenum mines tailings pond on dam-break induced by floods [J]. Engineering Design and Research, 2011(1): 18-24.

[8] 尹光志,敬小非,魏作安,等. 尾矿坝溃坝相似模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3 830-3 838.
YIN Guangzhi, JING Xiaofei, WEI Zuoan, et al. Experimental study of similar simulation of tailings dam-break [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3 830-3 838.

[9] 敬小非,尹光志,魏作安,等. 基于不同溃口形态的尾矿坝溃决泥浆流动特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 745-752.
JING Xiaofei, YIN Guangzhi, WEI Zuoan, et al. Study of tailings dam-break surges with floating slurry in model experiment in different collapse gates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 745-752.

[10] 张红武,刘磊,卜海磊,等. 尾矿库溃坝模型设计及试验方法[J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 1-5.
ZHANG Hongwu, LIU Lei, BU Hailei, et al. Test and design of tailings dam model [J]. Yellow River, 2011, 33(12): 1-5.

[11] 刘磊,张红武,钟德钰,等. 尾矿库漫顶溃坝模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 675-681.
LIU Lei, ZHANG Hongwu, ZHONG Deyu, et al. Research on tailings dam break due to overtopping [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 675-681.

[12] GERD Pickert, VOLKER Weitbrecht, ANDREAS Bieberstein. Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion [J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(2): 143-156.

[13] ZHANG Jianyun, LI Yun, XUAN Guoxiang, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength [J]. Science in China, 2009, 52(10): 3 024-3 029.

[14] ROBINSON K, HANSON G. Headcut erosion research [C]. Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference 2001: 15-22.

[15] 魏作安. 细粒尾矿及其堆坝稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
WEI Zuoan. Research on the characteristics and dam stability of fine grained tailings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

[16] 蔡清,程江涛,于沉香. 细粒尾矿的定义及分类方法探讨[J]. 土工基础, 2014, 28(1): 91-93.
CAI Qing, CHENG Jiangtao, YU Chenxiang. Definition and classification of fine grain materials from mine tailings [J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(1): 91-93.

[17] HANSON G J, COOK K R, HUNT S L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments [J]. Transactions of the Asae, 2005, 48(5): 1 783-1 794.



作者简介: 杜艳强 (1988—) 男,河南浉池人,博士,讲师,主要从事尾矿坝的安全稳定性研究。E-mail: cqduyq@163.com。