

## 某金属矿山尾矿坝中毛细水的上升规律

张志军, 李亚俊, 刘玄钊, 潘文鑫, 刘 永

(南华大学 核资源工程学院, 衡阳 421001)

**摘 要:** 尾矿坝坝体材料的物理力学特性因毛细作用会发生较大变化, 这种变化势必影响尾矿坝的安全稳定状态。为此, 开展了尾矿坝现场取样、室内毛细水上升测试等研究工作。结果表明, 尾矿砂中毛细水的上升规律呈初期迅速而后缓慢的变化趋势, 这是其受多种作用力的共同作用所致。毛细水在短时间内就能上升到较大高度, 前 3 天的毛细水上升高度约为最终上升高度的 50% 以上, 之后毛细水持续缓慢上升直至稳定。这表明尾矿坝内毛细水将随浸润线的升高而迅速升高, 从而影响尾矿砂的物理力学性质, 进而可能在短期内影响尾矿坝的稳定性。采用幂函数对该金属矿山尾矿坝尾矿砂中毛细水随时间的变化关系进行了拟合, 获得了毛细水上升规律计算式。

**关键词:** 尾矿坝; 毛细水; 上升高度

中图分类号: TU 457

文献标志码: A

## Rising law of capillary water in tailings dam of metal mine

ZHANG Zhi-jun, LI Ya-jun, LIU Xuan-zhao, PAN Wen-xin, LIU Yong

(School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** The influence of capillary water on the physical and mechanical properties of dam materials of tailings dam is great, which will affect on the stability of tailings dam. Therefore, in-situ sampling and laboratory rising tests were carried out to study the rising law of capillary water in a tailings dam of a metal mine. The results show that the tendency of rising velocity of capillary water is fast increasing then decreasing, which is caused by combined action of several forces. The rising height of the capillary water in early 3 days is above 50% of the final rising height and keeps on increasing until stable. This indicate that capillary water will rise rapidly with the increase of phreatic level of tailings dam, which can impact the physical and mechanical properties of tailings sand and influence the stability of the tailings dam in a short time. The relation between rising height of capillary water and time can be better fitted by the power function, and the calculation equations are obtained.

**Key words:** tailings dam; capillary water; rising height

我国作为矿业生产大国, 建有数以万计的尾矿库来存放尾矿或工业废渣, 而保持其安全运营的则是尾矿坝。这些尾矿坝一般采用碾压或直接堆积的方式构筑而成, 存在较大的安全隐患, 一旦发生溃坝事故, 将给下游居民的生命财产和生态环境造成巨大损失。分析影响尾矿坝稳定性的众多因素, 发现其受水的影

响最大, 绝大多数的溃坝事故是由水所引起的<sup>[1]</sup>。因此, 众多国内外学者在水对尾矿坝稳定性的影响方面开展了多方面的研究工作, 如研究了渗透静力对尾矿坝稳定性的影响<sup>[2-3]</sup>、构建了尾矿坝的渗流模型<sup>[4-5]</sup>、探讨了洪水漫滩导致溃坝的原因、机制和模式<sup>[6-8]</sup>、研究了降雨对尾矿坝渗流及稳定性的影响<sup>[9]</sup>。2009 年,

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51004067, 51374129); 教育部重点科研基金资助项目(20111126); 环保部科研基金资助项目(监管 1209&1309, 调查 1204); 2010 年度高校博士点项目(20104324120001); 湖南省教育厅科研基金资助项目(10B091); 南华大学校级创新团队计划项目

收稿日期: 2013-09-02; 修订日期: 2014-04-15

通信作者: 张志军, 副教授, 博士; 电话: 13575105056; E-mail: zzz181@163.com

学者 MARÍA 等<sup>[10]</sup>采用数值模拟方法分析探讨了影响尾矿坝安全稳定性的重要因素,并开创性地提出毛细作用可能会降低尾矿坝的安全储备这一论断。继而,重庆大学尹光志等<sup>[11]</sup>对孔隙水运移特性及其对尾矿坝细观结构作用机制进行了研究,提出浸润线的计算高度可由其上部毛细水的高度来确定,并用其进行尾矿坝稳定性分析。

这些研究虽然指出毛细水可能影响尾矿坝的安全稳定,但是仅限于数值模拟和理论推断阶段,并未开展验证工作。目前,在毛细水上升方面的研究工作主要是针对路基病害防范问题而开展的,学者们研究了毛细水上升高度的综合试验方法<sup>[12]</sup>,以及多种不同粗细土料<sup>[13]</sup>、长江口细砂<sup>[14]</sup>、盐渍土<sup>[15]</sup>、污染土<sup>[16]</sup>等介质中的毛细水的上升规律。其研究重点主要在于砂、土介质的级配情况对毛细水上升高度的影响,其计算过程一般采用海森经验公式,并定性表达了毛细水上升情况大体呈现为初期迅速而后期缓慢这一规律,却未开展深入探讨和分析。此外,尾矿砂与普通砂土的特性差异较大,亦需深入分析其特性对毛细水上升情况的影响。因此,为深入探究毛细水作用对尾矿坝稳定性的影响程度,首先需对尾矿坝中毛细水运动特性开展深入的研究工作。

## 1 毛细水上升高度计算的基本理论

砂土中的毛细现象是指水在表面张力作用下,沿着细的砂土孔隙向上及向其他方向移动的现象<sup>[17]</sup>,如图1所示。理论上毛细水上升最大高度的计算公式为

$$h_c = \frac{4T \cos \alpha}{d\gamma_w} \quad (1)$$

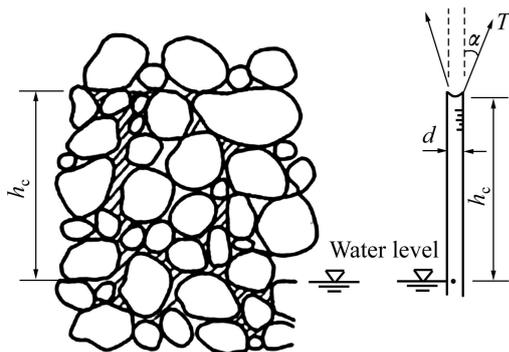


图1 毛细现象示意图

Fig. 1 Schematic diagram of capillarity phenomenon

式中:  $h_c$  为毛细水上升高度(m);  $T$  为水与空气间的表面张力(N/m);  $\alpha$  为接触角( $^\circ$ );  $d$  为毛细管的直径(m);  $\gamma_w$  为水的重度(kN/m<sup>3</sup>)。

由于砂土中毛细管截面千变万化,其毛细上升情况比玻璃管中的情况要复杂的多,因此在工程实践中估算毛细水上升最大高度时常采用海森(Hazen)经验公式:

$$h_c = \frac{C}{ed_{10}} \quad (2)$$

式中:  $e$  为土的孔隙比;  $d_{10}$  为土的有效粒径(m);  $C$  为系数,与土粒形状及表面洁净情况有关,其范围一般为  $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ,砂土中一般取  $C$  为  $4.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。

由海森经验公式可知,毛细水上升高度受介质本身的系数  $C$  的影响最大,而  $C$  值的取值在实际中很难选择,虽然有文献指出在实际应用中可根据室内试验结果进行反算得出<sup>[12,18]</sup>,但其仅能大致反映砂土中毛细水的上升最大高度,却反映不出毛细水上升过程随时间的变化情况。

## 2 某金属矿山尾矿坝中毛细水上升情况

### 2.1 尾矿砂取样及级配情况

为了开展实验工作,研究人员在湖南某金属矿山尾矿坝中进行了钻孔取样,获得了试验所用的尾矿砂,取样位置如图2所示。

对所取尾矿砂进行基本的颗粒分析试验,由于尾矿砂颗粒粒径均小于 2 mm,因此按规范取尾矿砂试样 100~300 g 分别过孔径 1、0.5、0.25、0.1 和 0.075 mm 的标准筛,进行多组试验,筛分试验结果见表1。由表1可见,颗粒粒径小于 0.075 mm 的尾矿砂质量小于总质量的 10%,因此不需要测试小于 0.075 mm 的颗粒组成。

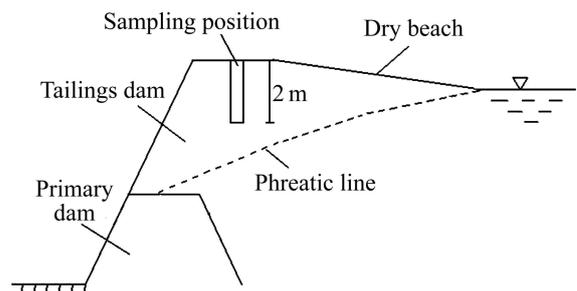


图2 尾矿坝中取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling from tailings dam

表 1 各粒组的含量

Table 1 Contents of different particle groups

Particle group/mm	Mass fraction/%
>2	—
1-2	0.620
0.5-1	7.147
0.25-0.5	23.594
0.1-0.25	48.702
0.075-0.1	10.625
<0.075	9.312

由表 1 可绘制该尾矿坝尾矿砂的颗粒级配累计曲线, 如图 3 所示。

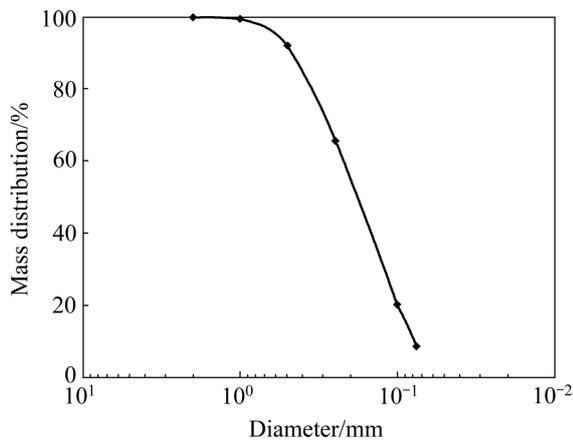


图 3 尾矿砂的颗粒级配累计曲线

Fig. 3 Curve of particle size distribution of tailings sand

由图 3 可得该尾矿砂的有效粒径  $d_{10}$ 、中值粒径  $d_{30}$  和限制粒径  $d_{60}$ , 其中  $d_{10}$  为 0.076 mm,  $d_{30}$  为 0.125 mm,  $d_{60}$  为 0.211 mm。

进行土工试验测得该尾矿砂的部分原位三相比例指标, 结果见表 2。

表 2 尾矿砂的主要物理性质指标

Table 2 Major indexes of physical properties of tailings

Gravity density, $r/(kN \cdot m^{-3})$	Water content, $w/\%$	Void ratio, $e$
15.45	0.564	0.752

## 2.2 毛细水上升试验及结果

采用正水头直接观测法对尾矿砂中的毛细水上升情况进行测试, 以分析毛细水的上升高度、上升速度规律。

试验装置是在标准毛细水试验仪器基础上改进而成的, 装置示意图如图 4 所示。

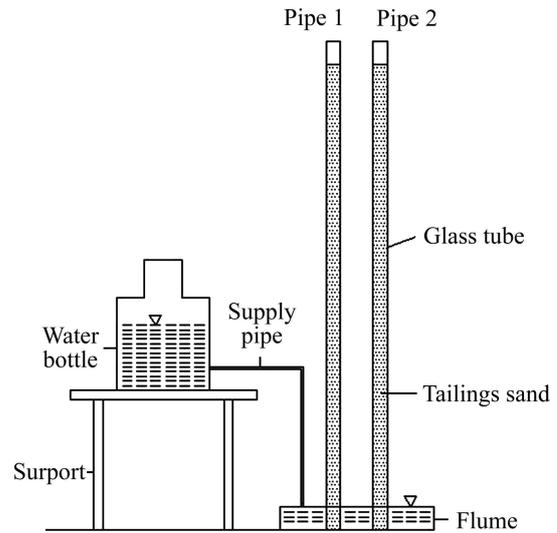


图 4 毛细水上升试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of device for capillary rising test

将尾矿砂均匀地装入 2 个内径为 1.6 cm、高 2 m 的有机玻璃管中, 并压实以保持与原位砂样密度一致, 分别标记为 1 号管和 2 号管, 做毛细水上升平行试验, 管底用土工布封底以防止尾矿砂颗粒流失。当装有砂样的有机玻璃管底部浸入托盘内水中时, 开始计时, 并以托盘水面为参考面, 测记毛细水上升高度, 前半个小时每隔 5 min 测记一次, 之后随着时间增加, 测记间隔时间逐渐延长。

通过试验, 观测得到 1 号管和 2 号管试样中的毛细水在 95 d 后达到最大上升高度, 其中 1 号管的最大上升高度为 142.5 cm, 2 号管的为 142.6 cm, 1、2 号管的最终毛细水上升高度与时间的关系曲线见图 5,

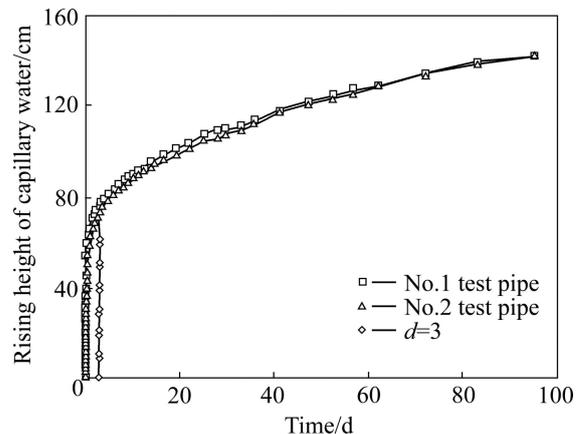


图 5 毛细水上升高度与时间的关系

Fig. 5 Relationship between rising height of capillary water and time

图中横坐标为时间，纵坐标为毛细水上升高度。

### 3 毛细水上升情况分析

通过试验观测和数据分析得出，毛细水在开始阶段的上升速度很快，随着时间推移，上升速度越来越慢，即毛细水上升相同高度所需的时间越来越多，其上升高度和上升速度分别与时间的关系如下所述。

#### 3.1 毛细水上升高度与时间的关系

经计算分析，该矿山尾矿坝中毛细水上升高度与时间的关系可以采用幂函数进行回归分析。因此，对1号和2号管的毛细水上升高度  $H$  与时间  $t$  的测记平均值采用幂函数进行回归，得到回归方程：

$$H = 53.674t^{0.216} \quad (3)$$

式中： $H$  为毛细水上升高度(cm)； $t$  为时间(d)， $t_{\max} = 95$  d；回归方差为 0.9900。

回归方程曲线与1、2号管测记值的吻合情况见图6。

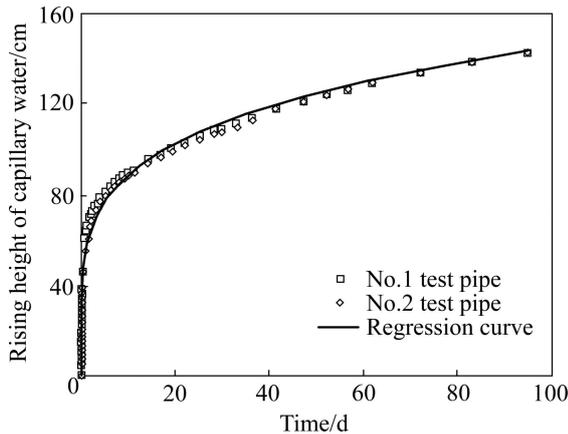


图6 回归方程曲线与测记值的吻合情况

Fig. 6 Fitting result by regression equation curve and data

由6图可知，回归方程曲线与1、2号管的测记值均能较好的拟合，因此可以用来估计该矿山尾矿坝中毛细水随时间的上升高度。

从每次记录的毛细水上升高度值中选取一部分制成表3和表4。

综合分析图5、表3和表4可知，毛细水在前3d上升很快，并能达到较大高度，这对尾矿砂的物理力学性质将有较大影响，进而可能在短期内影响尾矿坝的稳定性。因此，有必要对毛细水上升速度与时间的关系作进一步研究。

表3 1号管前  $n$  天毛细水上升高度

Table 3 Rising height of capillary water in No.1 test pipe in early  $n$  days

Time/d	Rising height in early $n$ days/cm	Rate of rising height in early $n$ days/%	Rising height in present period/cm	Rate of rising height in present period/%
0.04	20.0	14.0	20.0	14.0
0.28	45.4	31.9	25.4	17.8
1.1	63.6	44.6	18.2	12.8
2.9	74.9	52.6	11.3	7.9
10.1	89.8	63.0	14.9	10.5
25.3	105.9	74.3	16.1	11.3
47.2	121.1	85.0	15.2	10.7
95	142.5	100.0	21.4	15.0

表4 2号管前  $n$  天毛细水上升高度

Table 4 Rising height of capillary water in No.2 test pipe in early  $n$  days

Time/d	Rising height in early $n$ days/cm	Rate of rising height in early $n$ days/%	Rising height in present period/cm	Rate of rising height in present period/%
0.04	22	15.4	22	15.4
0.28	42.5	29.8	20.5	14.4
1.1	59.2	41.5	16.7	11.7
2.9	72.1	50.6	12.9	9.0
10.1	88.4	62	16.3	11.4
25.3	104.5	73.3	16.1	11.3
47.2	121.1	84.9	16.6	11.6
95	142.6	100	21.5	15.1

#### 3.2 毛细水上升速度与时间的关系

##### 3.2.1 毛细水上升速度与时间关系的拟合情况

由于速度是路程对时间的导数，同样地，毛细水上升速度  $v$ (cm/d)亦是其上升高度  $H$  与上升时间  $t$  的导数，将式(3)对时间  $t$  求导，可得：

$$v = 11.594t^{-0.784} \quad (4)$$

毛细水上升速度与时间的关系曲线如图7所示。

由表3和表4可计算1、2号管的毛细水上升速度，见表5。

##### 3.2.2 结果分析

分析图7和表5，毛细水的平均上升速度约为1.5 cm/d，上升过程中速度衰减趋势非常显著。速度曲线

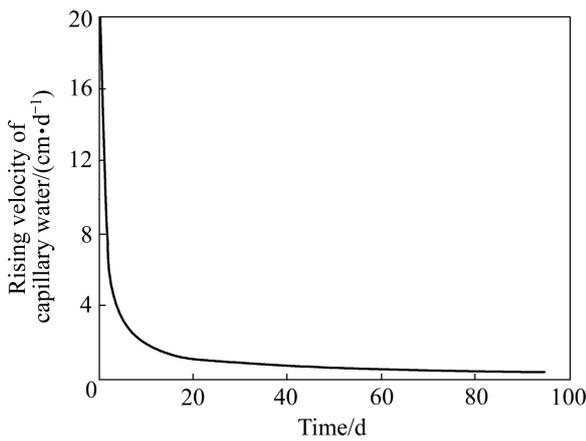


图 7 毛细水上升速度与时间的关系

Fig. 7 Relationship between rising velocity and time of capillary water

表 5 毛细水上升速度表

Table 5 Rising velocity of capillary water

Time/ d	No.1 test pipe		No.2 test pipe	
	Average rising velocity in early <i>n</i> days/ (cm·d <sup>-1</sup> )	Average rising velocity in present period/ (cm·d <sup>-1</sup> )	Average rising velocity in early <i>n</i> days/ (cm·d <sup>-1</sup> )	Average rising velocity in present period/ (cm·d <sup>-1</sup> )
0.04	500.000	500.000	550.000	550.000
0.28	162.143	105.833	151.786	85.417
1.1	57.818	22.195	53.818	20.366
2.9	25.828	6.278	24.862	7.167
10.1	8.891	2.069	8.752	2.264
25.3	4.186	1.059	4.130	1.059
47.2	2.566	0.694	2.566	0.758
95	1.500	0.448	1.501	0.450

在最初时的值很大, 随后急剧下降, 之后渐渐趋向于零, 这表明毛细水初期上升非常迅速, 其速度可达 500~550 cm/d, 但随着时间的增长, 急剧衰减变缓, 最后 48 d 的平均上升速度仅为 0.448~0.450 cm/d。

根据试验过程以及毛细水上升相关理论, 直观分析其上升前快后缓的原因为: 在毛细水上升初期, 由于表面张力要远大于上升水柱的重力, 因此上升速度较快; 但随着毛细水柱的增高, 其重力值逐渐增加并接近表面张力, 导致上升速度逐渐变缓<sup>[17]</sup>。深入分析可知, 在毛细水上升的初始阶段, 由于毛细水总量相对较少, 与液体量相关的黏性阻力及自身重力作用相

对较小, 毛细压力和毛细上升初期惯性力占主导作用, 这种力能够平衡较多毛细水产生的重力, 因此上升速度非常大; 此时距浸润线较近处的尾矿砂接近饱和和状态, 而较大的含水率所产生的毛细上升阻力较大, 其对毛细上升力的消减作用比较明显, 因此上升速度衰减显著; 随着毛细水上升高度增加, 黏性阻力和重力已平衡掉很大部分毛细上升力, 尾矿砂中毛细水含量变得很少, 消减作用也变得很弱, 因此上升后期速度缓慢且持久。综合分析整个毛细上升过程, 其毛细上升动力呈明显的衰减趋势, 该趋势的外在表现即为尾矿砂中毛细水上升前快后缓这一变化规律。

### 3.3 毛细水上升规律分阶段回归分析

从表 3、表 4 和表 5 可以得出, 毛细水在前 0.28 d(400 min) 的上升高度占总上升高度的 30% 左右, 平均上升速度约为 150 cm/d, 前 3 d 的上升高度占总高度的 50% 以上, 平均上升速度约为 25 cm/d, 上升速度衰减显著, 而后毛细水上升更加缓慢, 持续 90 多天直至稳定。可以认为, 毛细作用在短期内即可呈现出来, 进而影响尾矿砂的物理力学性质。

因此, 为了提高回归的精确性, 可将其上升高度随时间的变化情况分两段分别进行回归, 即前 3 d 为一段, 称为显著段, 第 3 d 之后为另一段, 称为持续段, 回归曲线分别见图 8 和 9, 回归结果见表 6。

表 6 中相关系数越接近 1, 说明回归方程越显著, 即相关系数越接近 1, 回归效果越好; 实际应用中, 在分析短期内毛细水上升对尾矿坝稳定性的影响时, 即可采用表 6 中显著段的方程式对毛细水上升情况进行计算分析。

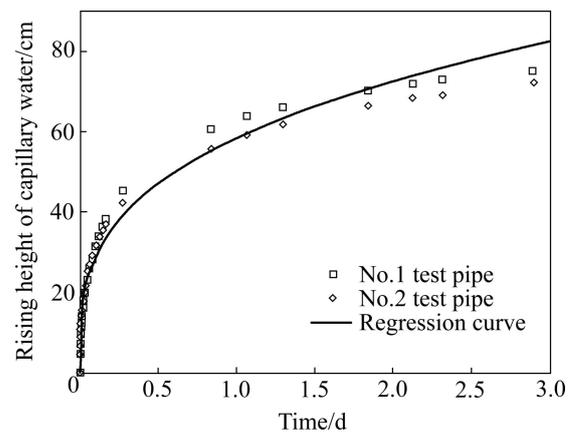


图 8 前 3 天毛细水上升高度与时间的回归方程曲线

Fig. 8 Curve of regression equation of rising height and time of capillary water in early 3 days

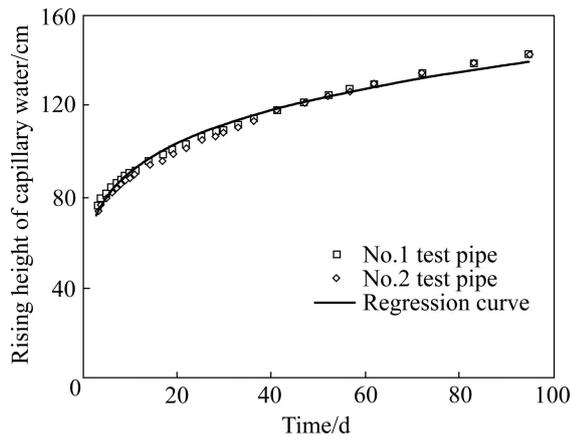


图9 3天之后毛细水上升高度与时间的回归方程曲线

Fig. 9 Curve of regression equation of rising height and time of capillary water after 3 days

表6 毛细水上升高度与时间的回归方程

Table 6 Regression equations of rising height and time of capillary water

Period of time	Regression equation	Correlation coefficient	Equation of velocity
In early 3 days	$H=58.325t^{0.312}$	0.9868	$v=18.197t^{-0.688}$
After 3 days	$H=57.572t^{0.194}$	0.9951	$v=11.169t^{-0.806}$

## 4 结论

1) 毛细水在上升初期的短时间内能达到较大高度, 在前 0.28 d(400 min)的上升高度占总上升高度的 30%左右, 前 3 天的上升高度占总高度的 50%以上, 上升速度衰减显著, 之后毛细水上升更加缓慢, 持续 90 多天直至稳定。

2) 幂函数能较好地拟合该尾矿砂中毛细水上升高度随时间的变化关系, 分别获得了该金属矿山尾矿坝中毛细水随时间的上升高度和上升速度的计算式。

3) 由于毛细水连接浸润线, 当尾矿坝受外界因素影响导致其浸润线上升时, 其上部毛细水将在多种作用力的共同作用下随之迅速升高, 将在短期内对尾矿砂的物理力学性质产生较大影响, 进而可能在短期内影响尾矿坝的稳定性, 后续研究工作应重点分析毛细水带内尾矿砂的物理力学性质变化规律, 为尾矿坝的稳定性分析工作提供参考和指导。

## REFERENCES

- [1] 中国有色金属尾矿库概论编委会. 中国有色金属尾矿库概论[M]. 北京: 中国有色金属工业出版社, 1992.  
Editorial Committee of Introduction of Nonferrous Metals Tailings Dam of China. Introduction of nonferrous metals tailings dam of China[M]. Beijing: China National Nonferrous Metals Industry Press, 1992.
- [2] CHANDLER R J, TOSATTI G. The Stava tailings dams failure[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1995, 113(2): 67-79.
- [3] BLIGHT G E. Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1997, 125: 9-18.
- [4] ABADJIEV C B. Seepage through mill tailings dams[C]// Trans of the 12th ICOLD. Mexico City, 1976: 381-393.
- [5] van ZYL D, ROBERTSON A, MAC G. Subsurface drainage of tailings impoundments: some design, construction and management considerations[C]// Symposium on Uranium Mill Tailings Management. Fort Collins, Colorado, 1980: 153-177.
- [6] RICO M, BENITO G, DIEZ-HERRERO A. Floods from tailings dam failures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/3): 79-87.
- [7] 敬小非, 尹光志, 魏作安, 李小双, 王孟来. 尾矿坝垮塌机制与溃决模式试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1377-1384.  
JING Xiao-fei, YIN Guang-zhi, WEI Zuo-an, LI Xiao-shuang, WANG Meng-lai. Model experimental study of collapse mechanism and broken mode of tailings dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1377-1384.
- [8] 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, 41(4): 131-135.  
WEI Yong, XU Kai-li. Research on mechanism and process of tailing dam break due to overtopping[J]. Metal Mine, 2012, 41(4): 131-135.
- [9] 孙恩吉, 张兴凯, 李仲学, 裴玉斌. 降雨条件下尾矿坝饱和-半饱和和渗流模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(3): 5-8.  
SUN En-ji, ZHANG Xing-kai, LI Zhong-xue, PEI Yu-bin. Simulation analysis on tailings dam saturated and semi-saturation infiltration of under rainfall conditions[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(3): 5-8.
- [10] ZANDARÍN M T, OLDECOP L A, RODRÍGUEZ R, et al. The role of capillary water in the stability of tailing dams[J]. Engineering Geology, 2009, 105(2): 108-118.
- [11] 尹光志, 张千贵, 魏作安, 王文松, 耿伟乐. 孔隙水运移特性及对尾矿坝细观结构作用机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 71-79.  
YIN Guang-zhi, ZHANG Qian-gui, WEI Zuo-an, WANG

- Wen-song, GENG Wei-le. Experimental study of migration characteristics of pore water and its effect on meso-structure of tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 71-79.
- [12] 董 斌, 张喜发, 李 欣, 张冬青. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1569-1574.  
DONG Bin, ZHANG Xi-fa, LI Xin, ZHANG Dong-qing. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1569-1574.
- [13] 姚 华, 张喜发, 张冬青. 影响粗粒土毛细水上升高度的因素研究[J]. 勘察科学技术, 2007, 25(1): 10-12.  
YAO Hua, ZHANG Xi-fa, ZHANG Dong-qing. Research on affecting factors of rising height of capillary water on coarse grained soil[J]. Site Investigation Science and Technology, 2007, 25(1): 10-12.
- [14] 夏 宁, 黄琴龙. 长江口细砂毛细水上升高度试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2009, 23(6): 3-5.  
XIA Ning, HUANG Qin-long. The experimental research of the capillarity water rising height of Changjiang Delta fine sand[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2009, 23(6): 3-5.
- [15] 李培源. 黄泛区盐渍土地基、路基聚盐规律及处治措施研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.  
LI Pei-yuan. The salt accumulation law of yellow river flooded area saline soil ground, subgrade and treatment measures research[D]. Jinan: China. Shandong University, 2011.
- [16] 童 玲, 陈伟胜, 郑西来, 李 梅. 柴油污染土壤中毛细水上升规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 131-134.  
TONG Ling, CHEN Wei-sheng, ZHENG Xi-lai, LI Mei. Capillary rise of water in diesel oil contaminated soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(6): 131-134.
- [17] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [18] 刘玄钊, 张志军, 李亚俊, 潘文鑫. 某尾矿坝尾矿砂中毛细系数  $C$  的确定方法研究[J]. 南华大学学报, 2013, 27(2): 23-27.  
LIU Xuan-zhao, ZHANG Zhi-jun, LI Ya-jun, PAN Wen-xin. Study on a method of determining the coefficient  $C$  of capillary in tailings sand of a certain tailings dam[J]. Journal of University of South China, 2013, 27(2): 23-27.

(编辑 何学锋)