



基于粒径效应影响的尾矿毛细特性试验

刘 迪^{1,3}, 卢才武^{2,3}, 连民杰^{2,3,4}, 顾清华^{2,3}

- (1. 西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 西安 710005;
2. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 西安 710005;
3. 西安建筑科技大学 矿山系统工程研究所, 西安 710005;
4. 中钢集团矿业开发有限公司, 北京 100080)

摘 要: 为探究尾矿粒径对尾矿坝毛细水上升的影响机制, 利用自主研发的在线监测毛细水上升试验系统(简称 OM-CRT 系统), 针对尾矿砂、尾粉砂和尾粉土尾矿, 分别开展不同粒径尾矿的毛细水上升全过程试验, 得到了尾矿毛细水上升高度、上升速度与时间的关系曲线及拟合方程, 并分析毛细带不同断面含水率随时间的变化规律和影响因素。结果表明: 尾矿毛细水上升湿润锋与时间呈对数函数关系, 试验初期毛细水上升速度较快, 随着试验时间的延长, 毛细水上升速度逐渐减小并最终降为 0, 且毛细水上升高度及速度与尾矿粒径呈负相关; 不同断面的瞬时含水率变化与时间的关系类似于水土特征曲线呈“S”形, 3 个柱体中含水率变化均随高度增长而减小; 尾粉土试样底端毛细带的含水率为 23.77%, 形成了 300 mm 的稳定饱和和毛细带。通过建立毛细管径与尾矿粒径的关系, 进一步推导出粒径与毛细水上升高度的关系。毛细水上升试验很好地验证了尾矿中吸力以及毛细作用的存在, 进一步验证了界面作用的原理。研究结果可为建立考虑毛细作用影响下的坝体稳定性分析方法和理论奠定基础, 同时可为边坡等工程的稳定性研究工作提供一种新思路。

关键词: 尾矿; 粒径效应; 毛细特性; 毛细水上升高度; 瞬时含水量; 饱和和毛细带

文章编号: 1004-0609(2020)-11-2746-12

中图分类号: X936

文献标志码: A

多孔介质中均存在毛细现象, 当然, 尾矿也不例外。毛细作用从微观上源于分子间力的作用, 从宏观上表现为肉眼可见的现象。长期以来, 人们从微观上忽略了毛细的作用, 从宏观上又忽视了它的存在, 这被 Wolfgang Ostwald 称为“被忽视的尺寸世界”^[1]。然而, 由于毛细作用本身涉及气、液、固三种“相”和“态”, 同时, 又以表面、界面作用为主, 因此, 其作用对颗粒尺度而言是很强的。

1921 年, WASHBURN^[2]基于毛细作用力在泊肃叶定律中的运用提出了毛细管流方程, 这是关于毛细作用研究最早的记录。之后的毛细上升研究多是 Washburn 经典模型的拓展, 更多是简化为单管模型来考虑^[3]。LOCKINGTON 等^[4]将动态湿度梯度与 Washburn 模型结合, 提出了描述均匀玻璃管中毛细上升后期现象的方程, 但其对真实土壤的适用性还有待验证, 也无法整体描述毛细上升的全过程。HOGENTGLER 等^[5]试图综合评述毛细水的性质, 认

为毛细水的流动方程同细管中的毛细水上升公式相一致, 并在研究石灰和水泥浆的 Bartell 仪的基础上改制了毛细管仪, 可用于测定土的进气值。TERZAGHI^[6]在其著作《理论土力学》中总结了 HOGENTGLER 等^[5]的工作, 提出了水-气分界面对土的性状有重要影响, 并在假定孔隙度 n 和渗透系数 k 不变的情况下, 推导出毛细水上升一定高度所需时间的计算公式。VALLE-RODAS 等^[7]用均匀砂做了开口管试验和毛细管试验, 表明在毛细作用区内砂的含水量不同, 而且浸润过程和干旱过程的含水量也不同。此次试验仅改变了每组试验的粒径, 与工程实际具有一定的差距。

尾矿属于人造土, 是矿石经过机械破碎及选矿后排至尾矿库的沉积物, 其结构特征与材料性质与坝体的稳定性密切相关^[8-9]。大量研究表明, 水是影响尾矿坝稳定性最重要的外部因素^[10-11], 2001 年, ICOLD(国际大坝委员会)在一份公告文献中提出, 毛细现象对尾矿坝的稳定性可能存在影响^[12]。2009 年, ZANDARÍN

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774228)

收稿日期: 2019-06-26; **修订日期:** 2020-10-04

通信作者: 卢才武, 教授, 博士; 电话: 029-82203440; E-mail: lucaiwu@126.com

等^[13]开创性的提出了毛细作用可能显著地降低坝体整体的安全系数,并建议尾砂储存设施的标准监测计划中应包含非饱和区毛细水量的测定。2012年,尹光志等^[14]对孔隙水运移特性及对尾砂细观结构作用机制进行了研究,并基于毛细作用的角度提出浸润线高度的计算方法。2013年,刘玄钊等^[15]研究了尾矿坝毛细水最大上升高度公式,得出 C 值为 0.66 cm^2 。2014年,张志军等^[16-17]系统的研究了颗粒级配的差异对毛细水上升过程的影响及毛细水带内的坝体材料物理力学特性,结果表明毛细水带尾砂的含水率、密度、黏聚力、内摩擦角等物理力学指标随毛细水高度的变化而有所改变。2017年,章求才等^[18]通过室内模拟试验研究了温度和气压对尾矿毛细水上升规律的影响。我国90%尾矿库均采用上游法堆坝,矿浆从坝前向库内流动的过程中,根据粒径由粗到细依次沉积形成堆积坝,即尾矿坝是由不同粒径的尾矿堆积形成,但尾矿粒径效应对毛细作用的影响规律和内在机理还缺乏研究。

以上研究大都是基于某一段时间内对毛细上升高度通过几何量测得到。实际上毛细上升是一个连续的过程,为了更好地研究毛细水上升过程中不同断面、不同瞬时的含水率随时间、高度的变化规律,本文开发了一套基于在线监测和数据存储功能的毛细水上升试验装置,选择不同粒径尾矿作为研究对象,在TERZAGHI^[6]的毛细上升高度公式的基础上,建立毛细管上升模型,并开展相应的室内毛细上升试验,旨在探索粒径效应对尾矿毛细作用的影响机制。

1 实验

1.1 尾矿毛细水上升原理

尾矿毛细现象是固-液-气三相界面上产生的现

象。非饱和尾矿是由空气、矿浆水及尾矿颗粒组成的三相体系,矿浆水和空气共同占据着非饱和尾矿内部孔隙空间,由于矿浆水与尾矿颗粒表面间的分子引力作用,使得毛细管水面呈凹液面状,即孔隙内气-液接触面为内凹形的弯液面^[19-20]。当水柱上升改变了弯液面的形状时,管壁与水之间的湿润作用又会使水柱面恢复为内凹液面状。如此循环直到水柱重力可平衡管壁与水分子间的引力所产生的上举力为止^[21]。颗粒级配不同的非饱和尾矿在逐级筑坝压实的过程中,在微观上产生了类似毛细管的通道,又因基质吸力的存在,为坝体毛细现象的形成提供了外界条件。

尾矿对水分的吸持作用产生基质势,基质势与重力势相平衡的高度即为毛细水上升高度。非饱和尾矿的基质势永远为负值,饱和尾矿的基质势为0,尾矿坝毛细水上升模型见图1。

$$q = ki = n \frac{dz}{dt} \quad (1)$$

式中: q 为流速; k 为非饱和尾矿的渗透系数; i 为水力梯度; n 为孔隙率; z 为 t 时刻毛细上升高度; β 的意义如图1所示, k 与饱和尾矿渗透系数 k_s 的关系为

$$h = 1/\beta \quad (2)$$

$$k = k_s \exp(-\beta z) \quad (3)$$

代入式(3)积分整理得

$$\frac{dz}{dt} = \frac{k_s}{n} \exp(-\beta z) \frac{h_c - z}{z} \quad (4)$$

$$h_c = \frac{4T_s \cos \theta_{ls}}{\rho_w g d} \quad (5)$$

式中: T_s 为水的表面张力; θ_{ls} 为水与固体的接触角; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; d 为毛细管直径。

通常毛细水上升高度主要采用室内试验^[22]和现场试验^[23]来确定,关于毛细水上升高度,国内外学者做过许多相关的研究,并提出了诸多估算公式和测定

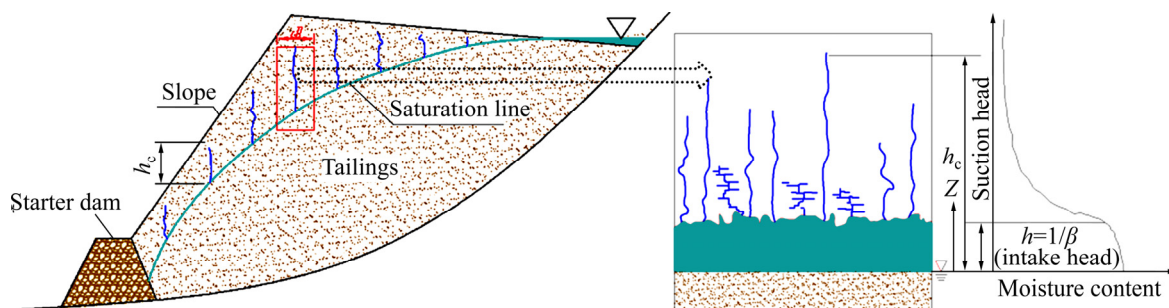


图1 尾矿坝毛细水上升模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of capillary rise of tailings dam

方法,如含水量试验法^[24]、水分特征曲线法^[25]等。但现行比较通用的估算公式为海森公式^[26]:

$$h_c = \frac{C}{d_{10}e}$$

(6)

式中: h_c 为毛细水上升高度; d_{10} 为有效粒径; e 为土的孔隙比; C 是与颗粒形状和表面清洁程度有关的系数,取值范围为 $1\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-5}\text{ m}^2$ 。由于 C 取值范围较大,计算特殊土体的毛细水上升高度将会产生较大误差^[15-17],同时不能反应毛细水上升的过程,实际工程中应根据试验测定。

1.2 试验材料

试验所用尾矿取自陕西某铜矿尾矿库,粒径范围为 $0.5\sim 250\text{ }\mu\text{m}$,主要集中在 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 。为避免杂质含量的影响,首先充分洗涤样品。然后进行晾晒、

研磨和烘干。最后将烘干后的尾矿经过筛分和分级,得到尾细砂、尾粉砂和尾粉土尾矿,以备试验使用。图2所示为尾细砂、尾粉砂和尾粉土尾矿的颗粒分布累计曲线,表1所列颗粒级配指标与主要物理性质指标。

1.3 试验设备

试验装置为自主研发的在线监测毛细水上升试验系统(简称OM-CRT系统),主体部分由毛细吸水试验柱组、含水量(变化)在线监测系统、数据采集系统、供水系统和排水系统五部分组成(见图3)。

试验系统主体部分由2个透明有机玻璃柱组成,玻璃柱包括上部装样结构和下部支撑结构,装样结构设计尺寸为内径 110 mm (这样以避免有机玻璃柱弧度对观测效果的影响,并达到试样尺寸的要求),高 1200 mm ,壁厚 5 mm ;下部支撑结构高 100 mm ,壁厚、

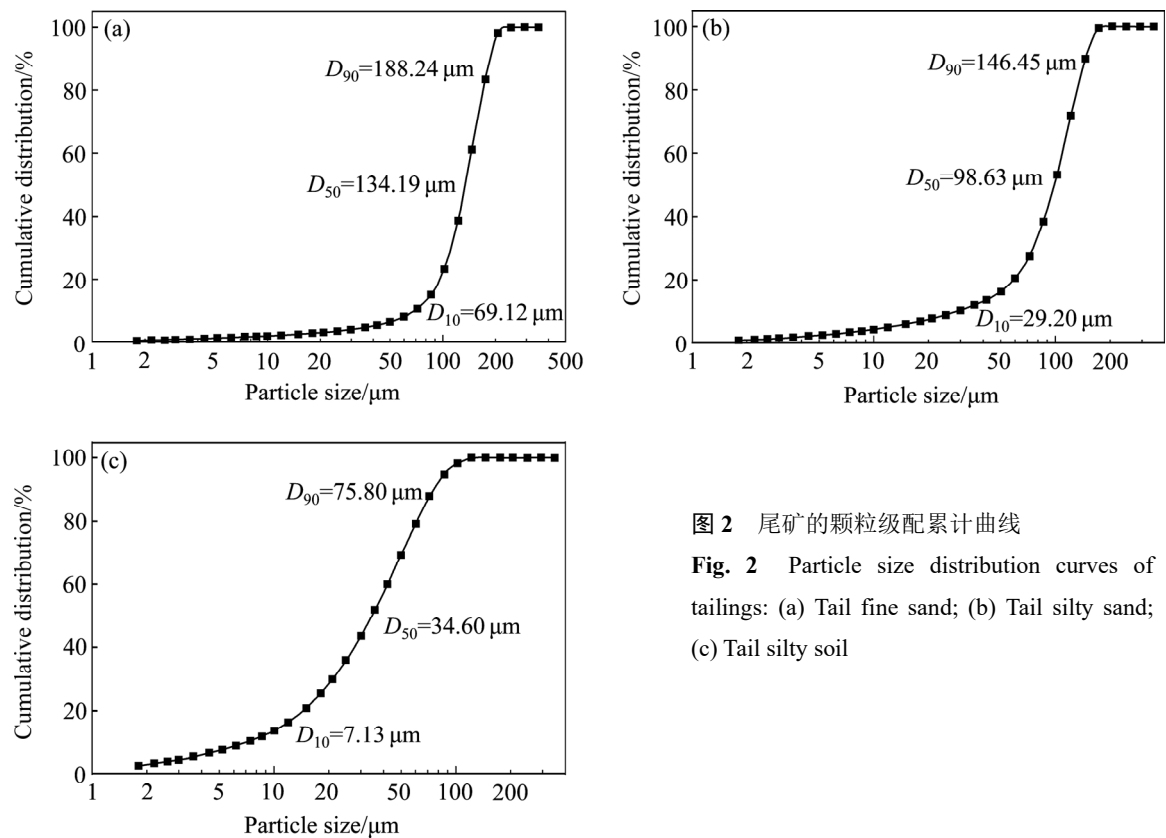


图2 尾矿的颗粒级配累计曲线
Fig. 2 Particle size distribution curves of tailings: (a) Tail fine sand; (b) Tail silty sand; (c) Tail silty soil

表1 颗粒级配指标和主要物理性质指标

Table 1 Particle composition parameters tailings and main physical property indexes of tailings

Particle group	Particle size range/ μm	Effective grain size, $d_{10}/\mu\text{m}$	Median grain size, $d_{50}/\mu\text{m}$	Constrained grain size, $d_{60}/\mu\text{m}$	Uniformity coefficient, C_u	Initial moisture content, $w/\%$
Tail fine sand	125–180	69.12	134.19	155.12	2.24	2.51
Tail silty sand	75–125	29.20	98.63	114.26	3.91	2.92
Tail silty soil	5–75	7.13	34.6	42.56	5.96	3.31

内径与上部装样结构一致，侧边 50 mm 高设有一个毛细水进孔；二者之间由多孔圆盘隔开，中间隔有橡胶垫圈以达到密封效果。圆盘上布满直径为 3 mm 的小孔，厚度为 10 mm，以保证水能够与尾矿接触。其上覆盖直径 110 mm 大小的土工布，以防尾矿颗粒渗漏；有机玻璃柱上刻制以多孔圆盘顶面高度为 0 点的标尺，最小刻度为 1 mm，对称两侧各一条，为记录湿润锋及饱和锋提供参照。

含水量在线监测系统主要由 10 支 SM3001B 型温湿度传感器、SU9101B 型 RS485 转换器和 SV3010 数据采集系统构成。SM3001B 型温湿度传感器主要技术指标见表 2。

1.4 试验方案

根据尾矿粒径组成，本次试验分尾细砂、尾粉砂和尾粉土三组，具体步骤如下：

1) 将有机玻璃柱编号为 1[#]柱体、2[#]柱体，根据试验方案将配制好的尾细砂和尾粉砂分别装入柱 1[#]、2[#] (1[#]柱体上安置的传感器为 M4、M5、M6，2[#]柱体上安置的传感器为 M1、M2、M3，安装高度均为 200 mm、400 mm、600 mm)。采用每 5 cm 分层装样和震实的方法保证试样装填均匀，并通过刻度及装填质量计算维持一定的干密度。然后将装有尾矿的有机玻璃柱移入水槽内。打开注水装置的控制阀使溶液进入水槽，并控制水流速度，保证水恰好与尾矿样底部接触，利用

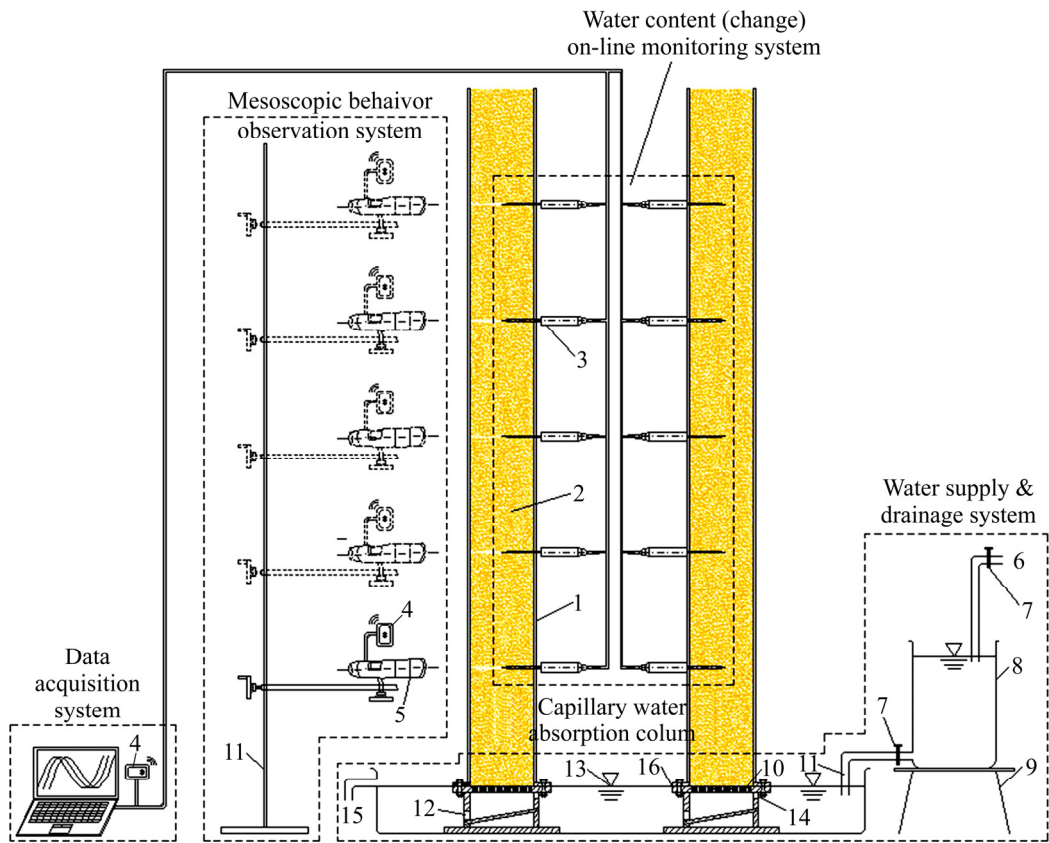


图 3 毛细水上升试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of capillary water rising apparatus: 1—Tube wall; 2—Tailings; 3—Water sensor; 4—Cloud module; 5—Distortionless microscope; 6—Water source; 7—Valve; 8—Water storage tank; 9—Trestle; 10—Porous disk; 11—Constant speed water supply pipe; 12—Scupper & outlet pipe; 13—Constant water level; 14—Water-in; 15—Water-out; 16—Geotextile

表 2 SM3001B 传感器主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of SM3001B

Probe length/mm	Probe diameter/mm	Moisture measuring range/%	Temperature range/℃	Response time/s	Moisture accuracy/%	Temperature measurement accuracy/℃	Voltage/V
75	3	0—100	−30—60	<1	3%	0.5	0—10

虹吸原理保证水槽水位(相当于尾矿坝中的浸润面高度)不变。

2) 开始进行毛细上升试验,定期记录湿润锋上升高度,并进行数码成像,直至水柱停止上升,且试验过程中保持环境温度不变。

3) 待1[#]、2[#]毛细水上升结束后,将尾矿样取出,在1[#]柱体中再次装入尾粉土,重新编号为3[#](3[#]柱体上安置的传感器为M7、M8、M9、M10,安装高度为200 mm、400 mm、600 mm、800 mm)。重复步骤(1)、(2),直至试验结束。

2 结果与讨论

2.1 粒径对尾矿毛细水上升高度的影响分析

尾矿被水润湿后产生的力使水具有一种能量,通过做功转化为等量重力势能,表现出一定数值的毛细水上升高度。通过定期测量1[#]、2[#]和3[#]柱体中毛细水湿润锋的上升高度,得到尾矿毛细水上升高度随时间的变化规律。

由图4(a)、(b)和(c)可知,尾细砂、尾粉砂和尾粉

土柱体中的毛细水上升高度随时间的变化趋势基本一致,可以分为三个阶段:前期快速上升阶段、中期缓慢上升阶段和后期稳定阶段。毛细水上升高度随着时间的增加而增大,直至毛细水上升高度达到稳定值后停止上升。由图4还可知,毛细水上升高度明显受到尾矿粒径大小的影响,粒径越小,毛细水上升高度越大,分别对不同粒径尾矿毛细水上升的前11000 min的数据进行拟合,结果见表3。

可知不同粒径尾矿的毛细水上升高度随时间的变化关系均满足对数函数: $y = a - b \ln(x + c)$, 且回归显著。由此可得尾矿毛细水上升高度随时间变化的拟合方程为:

$$H = a - b \ln(t + c) \quad (7)$$

式中: H 为毛细水上升高度; t 为对应的时间; a 、 b 和 c 为系数。

2.2 粒径对尾矿毛细水上升速度的影响分析

毛细水上升速度是其上升高度对上升时间的导数,图5所示为不同粒径尾矿毛细水上升速度随时间的变化关系。表3所列不同粒径尾矿毛细水上升相同高度所用时间的对比。

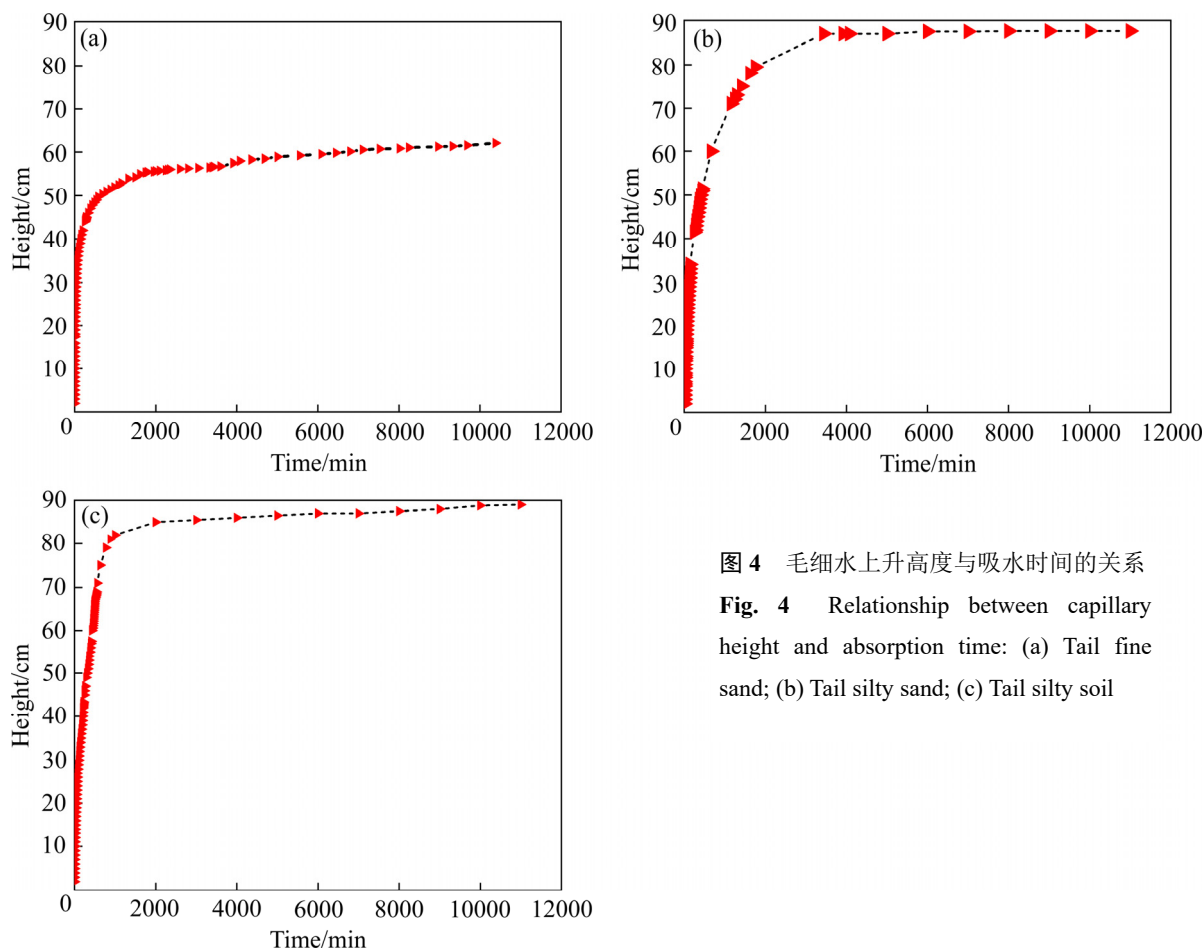


图4 毛细水上升高度与吸水时间的关系
Fig. 4 Relationship between capillary height and absorption time: (a) Tail fine sand; (b) Tail silty sand; (c) Tail silty soil

表 3 不同粒径尾矿毛细水上升高度拟合方程

Grain group	Average particle size/ μm	coefficient			Fitting equation	Regression coefficient
		a	b	c		
Tail fine sand	152.5	6.59	-6.35	0.18	$y=6.59+6.35 \ln(x+0.18)$	0.9924
Tail silty sand	100	-21.05	-12.1	0.5	$y=-21.05+12.10 \ln(x+0.5)$	0.9352
Tail silty soil	40	-138.98	-31.85	96.93	$y=-138.98+31.85 \ln(x+96.93)$	0.9924

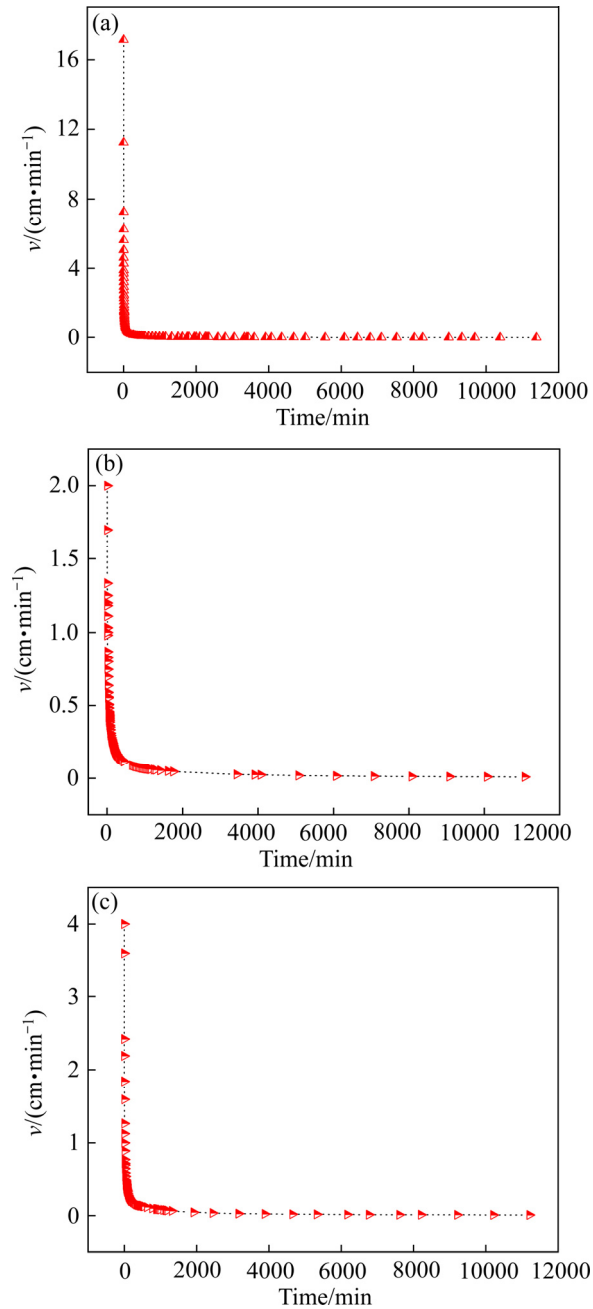


图 5 湿润锋上升速度与吸水时间的关系
Fig. 5 Relationship between rising velocity of wetting front and water absorption time: (a) Tail fine sand; (b) Tail silty sand; (c) Tail silty soil

由图 5 可见，尾细砂尾矿、尾粉砂尾矿和尾粉土尾矿的毛细水上升速度随时间的变化规律基本一致，即在试验初期毛细水上升速度较快，随着试验的进行上升速度逐渐降低直至为零。这是因为尾矿毛细水上升是湿润锋上气-液交界面处的水势能梯度引起的，在上升初期毛细水高度较低，其基质势远大于重力势，因此毛细水上升较快。随着试验的进行，毛细水高度逐渐增大引起水重力势增大，则气-液交界面处水势能梯度降低，导致毛细水上升速度相应减小，直至重力势与基质势达到平衡，毛细水停止上升^[27]。由图 5 还可看出，毛细水上升速度明显受到尾矿粒径大小的影响，且毛细水上升速度与尾矿粒径呈负相关，尾矿粒径越小，毛细水上升速度变化越快。对 1[#]、2[#]和 3[#]柱体中毛细水上升高度相关试验数据进行汇总见表 6。

表 6 毛细水上升高度对比
Table 6 Comparison of capillary water height

Height/cm	Time/min		
	Tail fine sand	Tail silty sand	Tail silty soil
10	2.3	11.5	10
20	9.5	46	41
30	32.5	112	101
40	144	250	200
50	686	399	307
60	6800	666	433

由表 6 可知，尾细砂柱体中毛细水上升至 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 高度所用时间均小于尾粉砂和尾粉土。但上升至 50 cm 之后，毛细水上升速度衰减明显，与此同时，尾粉砂和尾粉土柱体中毛细水上升速度反超尾细砂。尾粉砂柱体中毛细水上升至 60 cm 所用时间比尾细砂所用时间少 6134 min，比尾粉土所用时间多 233 min。尾细砂柱体中毛细水高度上升至

10 cm 所用时间仅需 2.3 min, 尾粉砂次之为 11.5 min, 尾粉土需 10 min。可知, 暴雨初期, 尾矿的毛细作用在短时间内即可呈现出来, 尾矿坝的浸润面将伴随着毛细作用迅速上升到达一定的高度, 这在工程实际中需重点考虑。

2.3 粒径对尾矿毛细带含水量的影响分析

图 6(a)、(b)和(c)所示分别为尾细砂、尾粉砂和尾粉土柱体不同断面含水率随时间的变化关系。

由图 6(c)可知, 尾粉土试样的毛细水含水率变化最显著。究其原因其粒径较小, 基质势较大。由 Kelvin 模型方程(式(8))可知, 开始毛细吸水时, 由于基质势作用, 毛细水自下而上迁移, 直至孔隙气压力和孔隙水压力相等时, 尾矿样中的毛细水分不再迁移。

$$(u_a - u_w) = 2T_s / R_s \quad (8)$$

式中: u_a 、 u_w 为尾矿的孔隙气压力和孔隙水压力; T_s 为曲面两侧表面张力; R_s 为曲率半径。

三个柱体中不同断面的瞬时含水率变化与时间的关系均类似于水-土特征曲线呈“S”形, 三个柱体中含水率变化均随高度增长而减小。尾细砂尾矿的含水率变化范围为 2.51%~20.6%, 平均值为 11.55%, 变化值为 18.09%; 尾粉砂尾矿的含水率变化范围为 2.92%~21.05%, 平均值为 11.985%, 变化值为 18.13%; 尾粉土尾矿的含水率变化范围为 3.31%~23.77%, 平均值为 13.54%, 变化值为 20.46%。可以看出, 粒径越小, 含水率的变化越明显, 说明粒径小的尾矿毛细吸水能力越强。M1、M4、M7 传感器距柱体底端最近, 含水率变化最显著。尾粉土试样底端的含水率最大为 23.77%, 已达到饱和状态。

2.4 饱和和毛细带的产生

图 7 所示为饱和和锋上升过程的变化图像。尾矿的毛细上升是一个动态变化过程, 湿润锋和饱和锋的上升高度随时间不断变化, 因此, 完整描述毛细水的上升过程需要考虑时间的因素^[28-29]。毛细水迁移的过程中受多种因素共同作用, 在毛细吸水的初始阶段, 由于水量很小, 与液相相关的黏性阻力和重力作用相对较弱, 此时, 毛细压力和惯性力起支撑作用, 且能平衡较多毛细水的重力, 使距试样底端较近处尾矿的含水率能够达到接近饱和的状态, 称为饱和毛细水带。图 7 所示为尾粉土柱体中湿润锋和饱和锋随时间变化的图像, 按照干-湿分界面的位置及尾矿含水率的变

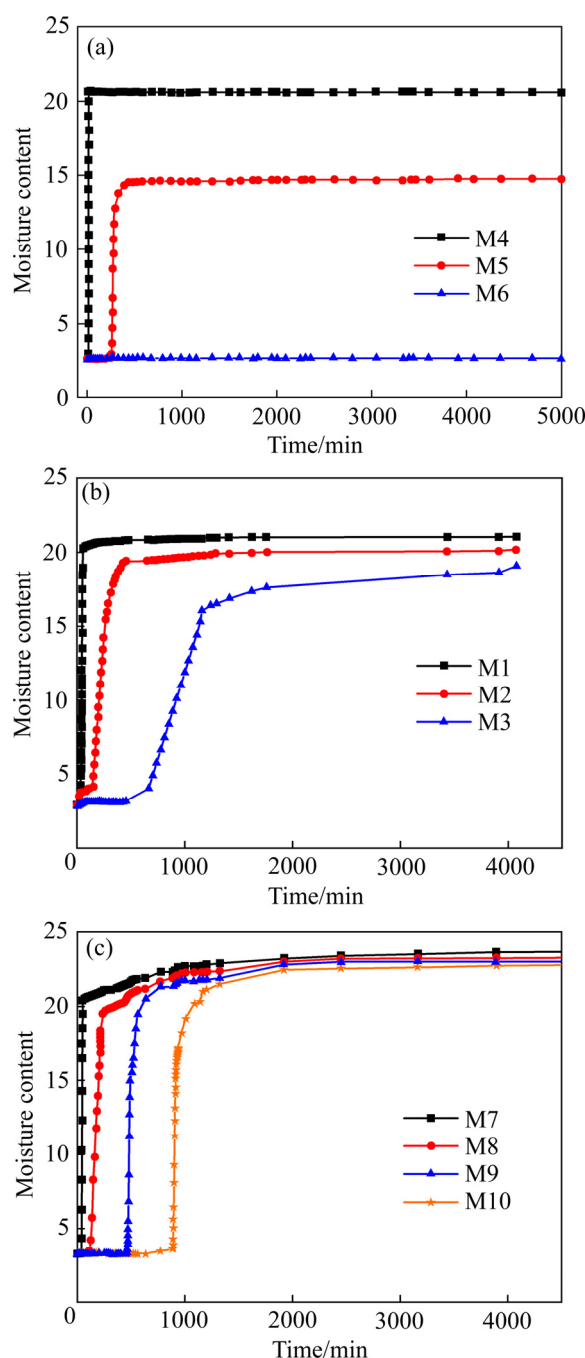


图 6 不同断面含水率随时间变化的关系

Fig. 6 Relationship between moisture content and time at different sections: (a) Tail fine sand; (b) Tail silty sand; (c) Tail silty soil

化, 将毛细带分为饱和毛细带和非饱和毛细带。毛细上升 100 min, 开始出现饱和和毛细带(见图 7(b)), 再经过 66 h 的毛细上升, 最终形成了 300 mm 的稳定饱和和毛细带(见图 7(c)), 其含水率达 23.77%, 饱和带和非饱和带的分界面是含水率变化最明显的位置, 非饱和和毛细带的含水率随着高度的升高逐渐减小。

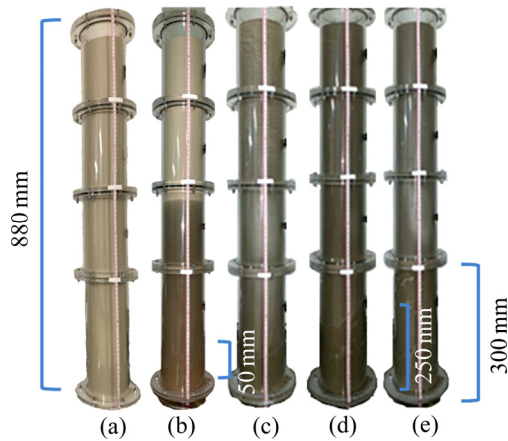


图7 饱和锋上升过程的时间效应

Fig. 7 Time effect during saturated front rising: (a) Initial state; (b) Capillary water begins to rise; (c) Saturated capillary zone increased to 5 cm; (d) Saturated capillary zone increased to 25 cm; (e) Saturated capillary zone increased to 30 cm and final stable state

3 尾矿粒径对尾矿坝中毛细水上升的影响机制

3.1 毛细管径与尾矿粒径的关系

尾矿作为一种特殊多孔材料,其孔隙分布及形成原因与外界环境等因素密切相关,且由多相(固相、水相和气相)构成。按照颗粒的排列方式,球形颗粒模型和毛细管排列模型是土孔隙结构的两种典型排列模型^[30]。在分析尾矿孔隙结构时,分析对象一般指尾矿颗粒表面之间的空隙或间隙,不包括颗粒表面的超细孔隙和裂隙。由上述尾矿毛细上升试验结果可知,尾矿粒径对颗粒间孔隙中的毛细上升有重要影响,主要原因在于尾矿粒径对坝内孔隙尺寸的控制作用。为便于分析,假设尾矿柱体是由均质且粒径相同的球状尾矿颗粒组成,则尾矿颗粒的排列存在简单立方体与紧凑四面体两种极限形式,如图8所示。

假设尾矿是由粒径为 D 的均质颗粒组成,相同颗粒粒径的排布形式可分为简单立方体堆积(SC)和紧凑四面体堆积(TH)。图8中 d_{SC} 为简单立方体堆积时的毛细管半径, d_{TH} 为紧凑四面体堆积时的毛细管半径。以尾矿颗粒间孔隙直径表示毛细管直径,分析尾矿粒径 D 与毛细管直径 d 之间的关系。

由图8可知,紧凑四面体堆积时毛细管直径最小,简单立方体堆积时毛细管直径最大。在实际情况下,球状尾矿颗粒的几何排列形状是介于上述两种极限堆

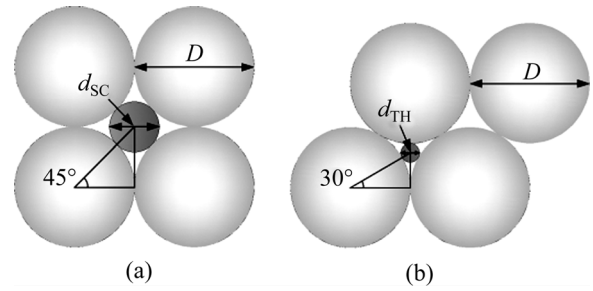


图8 尾矿颗粒堆积平面图

Fig. 8 Plane figure of heaps of uniform spherical soil particles: (a) Simple cube stacking; (b) Simple cube stacking

积形式之间。可得, D 与 d 的关系如下:

对尾矿中的简单立方体堆积(SC),有

$$\cos 45^\circ = \frac{D/2}{(D/2) + (d_{SC}/2)} \quad (9)$$

$$d_{SC} = (\sqrt{2} - 1)D \quad (10)$$

对尾矿中的四面体堆积(TH),有

$$\cos 30^\circ = \frac{D/2}{(D/2) + (d_{TH}/2)} \quad (11)$$

$$d_{TH} = \frac{2\sqrt{3}-3}{3}D \quad (12)$$

即

$$\frac{2\sqrt{3}-3}{3}D \leq d \leq (\sqrt{2}-1)D \quad (13)$$

进一步化简为

$$d = \alpha D \quad (14)$$

式中: d 为毛细管直径; D 为尾矿颗粒直径; α 为系数, $\frac{2\sqrt{3}-3}{3} \leq \alpha \leq \sqrt{2}-1$ 。

将式(10)和(12)分别代入式(5)中,得

$$\frac{9.76T_s \cos \theta_{ls}}{D\rho_w g} \leq h_c \leq \frac{26.67T_s \cos \theta_{ls}}{D\rho_w g} \quad (15)$$

假设 $\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $T_s = 0.072 \text{ N/m}$ (温度 25°C 水的表面张力),接触角为 0 (当液体能完全浸润毛细管时),代入式(15)得

$$\frac{0.73}{D} \leq h_c \leq \frac{2.0}{D} \quad (16)$$

即已知尾矿颗粒的最大和最小直径,便可求出坝体中毛细水上升高度的范围。

3.2 毛细水上升过程的力学平衡分析

尾矿颗粒间毛细管内气-液交界面处的力学平衡如图9所示。

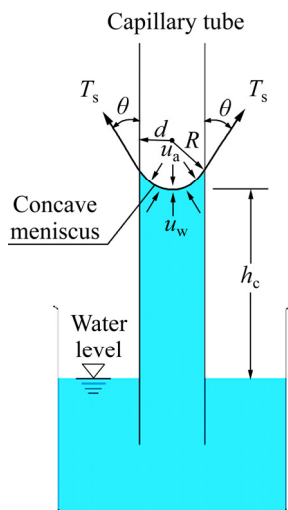


图9 气-液交界面力学平衡示意图

Fig. 9 Schematic diagram of mechanical equilibrium at gas-liquid interface

根据 Young-Laplace 方程, 当毛细管为圆管时, 有

$$p_c = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \theta}{\alpha D} \quad (17)$$

$$R = \frac{d}{\cos \theta} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17), 得

$$p_c = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \theta}{\alpha D} \quad (19)$$

式中: p_c 为基质吸力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙液压力; T_s 为液相的表面张力; R 为气-液交界面的曲率半径; d 为毛细管半径; θ 为尾矿与溶液的接触角。

液相的表面张力来源于水分子之间的不平衡作用力, 相同温度下水的表面张力相等。接触角 θ 为水浸润尾矿的能力, 因水与尾矿性质不变, 即 θ 为定值。所以, 由式(19)可知, 毛细水所受到的基质吸力与尾矿粒径成反比, 即尾矿粒径越小, 基质吸力越大。当尾矿试样底端开始吸水后, 由于基质势的影响, 水分自下而上不断迁移, 直至当水土势达到另一个动态平衡时, 此时 u_a 几乎等于 u_w , 曲率半径将会无穷大, 当毛细管力等于毛细水所受重力时, 毛细水不再迁移, 随着时间的延长逐渐趋于稳定。

因此, 尾矿粒径越小, 毛细水可达到的高度越大。这是由于尾矿粒径越小, 颗粒间毛细管径越小, 毛细水所受到的基质吸力越大, 且毛细水所受的重力与毛细管直径成正相关, 故而, 尾矿粒径越小, 坝体内毛细水上升高度越大。毛细水上升试验很好地证明了尾矿中吸力以及毛细作用的存在, 进一步验证了界面作用的原理。

4 结论

1) 尾矿毛细水上升高度与时间呈对数函数关系: $H = a - b \ln(t + c)$, 毛细水上升过程可分为三个阶段: 前期快速上升阶段、中期缓慢上升阶段和后期稳定阶段。毛细水上升高度与尾矿粒径呈负相关, 即尾矿粒径越小, 毛细水上升高度越高。即可根据尾矿粒径预测坝体不同位置的毛细水上升高度, 准确的判断真实的浸润线高度。

2) 毛细水上升速度与尾矿粒径呈负相关, 其变化趋势与毛细水上升高度变化趋势一致, 在试验初期, 尾矿毛细水上升速度较快, 随着试验时间延长, 速度减小并最终降为零。

3) 不同断面瞬时含水率变化与时间的关系类似于水土特征曲线呈“S”形, 含水率变化均随高度增长而减小。尾矿粒径越小, 基质吸力越大, 含水率变化越大。

4) 尾矿的湿润锋和饱和锋上升是一个动态变化过程, 上升过程中形成饱和毛细带和非饱和毛细带, 其分界面是含水率变化最明显的位置。尾粉土柱体最终形成 300 mm 的稳定饱和毛细带, 含水率达 23.77%。

5) OM-CRT 系统可定量研究颗粒的毛细作用问题, 可用于不同种类、不同粒度、不同密度和不同初始含水量下的尾矿及其他粉体材料的毛细吸水试验, 可实现数个断面瞬时含水量实时在线监测和数据自动采集, 具有持续监测不间断的优势。

6) 构建了一个由颗粒间孔隙近似确定毛细管径的物理模型, 从紧凑四面体堆积和简单立方体堆积的极限角度出发, 推导出毛细管径和颗粒粒径的关系, 确定出尾矿颗粒粒径和毛细水上升高度的关系。

REFERENCES

- [1] 高世侨, 刘海鹏. 毛细力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

- GAO Shi-qiao, LIU Hai-peng. Capillary mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] WASHBURN E W. The dynamics of capillary flow[J]. Physics Review, 1921, 17(3): 273–283.
- [3] MARCELO L, MARIELA A. Capillary rise in porous media[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2001, 234(1): 35–43.
- [4] LOCKINGTON D A, PARLANGE J Y. A new equation for macroscopic de-scription of capillary rise in porous media[J]. Journal of colloid and Interface Science, 2004, 278(2): 404–409.
- [5] MYERS B, HOGENTOGLER C A, BARBER E S, PORTER H C. Discussion on soil water phenomena[C]// Proceedings of the Twenty-First Annual Meetings of the Highway Research Board. Baltimore Maryland: Highway Research Board, 1942: 452–465.
- [6] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [7] VALLE-ROADS R, HOGENTOGLER C A. Capillarity in sands[C]// Proceedings of the Twenty-First Annual Meetings of the Highway Research Board. Baltimore Maryland: Highway Research Board, 1945: 389–396.
- [8] CANDEIAS C, ÁVILA P F, SILVA E F D, FERREIRA A, DURÃES N, TEIXEIRA J P. Water-rock interaction and geochemical processes in surface waters influenced by tailings impoundments: Impact and threats to the ecosystems and human health in rural communities (Panasqueira Mine, Central Portugal)[J]. Water Air & Soil Pollution, 2015, 226(2): 23–33.
- [9] EZEKWE I C, EZEKWE A S, CHIMA G N. Metal loadings and alkaline mine drainage from active and abandoned mines in the ivo river basin area of southeastern Nigeria[J]. Mine Water & the Environment, 2013, 32(2): 97–107.
- [10] RICO M, BENITO G, DÍEZ-HERRERO A. Floods from tailings dam failures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/3): 79–87.
- [11] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, DÍEZ-HERREROET A, PEREIRA H G. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846–852.
- [12] ICOLD. Tailing Dams: Risk of dangerous occurrences, Lessons learnt from practical experiences[R]. Paris: Commission International des Grangs Borrage, 2001: 78–93.
- [13] ZANDARÍN M T, OLDECOP L A, RODRÍGUEZ R, ZABALA F. The role of capillary water in the stability of tailing dams[J]. Engineering Geology, 2009, 105(1): 108–118.
- [14] 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细观结构作用机制试验研[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.
- [15] 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(自然科学版)2013, 27(2): 24–31.
- 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(Science and Technology), 2013, 27(2): 24–31.
- [16] 张志军, 李亚俊, 刘玄钊, 章求才, 贺桂成. 基于颗粒级配均匀设计的尾矿坝中的毛细水上升规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(6): 45–50.
- ZHANG Zhi-jun, LI Ya-jun, LIU Xuan-zhao, ZHANG Qiu-cai, HE Gui-cheng. Study on the rising regularity of capillary water in a tailings dam based on uniform design of grain composition[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(6): 45–50.
- [17] 张志军, 李亚俊, 刘玄钊, 潘文鑫, 刘永. 某金属矿山尾矿坝中毛细水的上升规律[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1345–1351.
- ZHANG Zhi-jun, LI Ya-jun, LIU Xuan-zhao, PAN Wen-xin, LIU Yong. Rising law of capillary water in tailings dam of metal mine [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1345–1351.
- [18] 章求才, 田亚坤, 张志军, 李亚俊, 刘玄钊, 贺桂成, 刘永. 温度和气压对某金属矿山尾矿坝中毛细水上升规律的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(5): 1016–2020.
- ZHANG Qiu-cai, TIAN Ya-kun, ZHANG Zhi-jun, LI Ya-jun, LIU Xuan-zhao, HE Gui-cheng, LIU Yong. Influence of temperature and air pressure on rising law of capillary water in tailings dam of metal mine[J]. The Chinese Journal of

- Nonferrous Metals, 2017, 27(5): 1016–2020.
- [19] PANDA S, AKCIL A, PRADHAN N, DEVECI H. Current scenario of chalcopryrite bioleaching: A review on the recent advances to its heap-leach technology[J]. Bioresource Technology, 2015, 196: 694–706.
- [20] ARAKI K. Differential-geometrical approach to the dynamics of dissipationless incompressible Hall magneto hydrodynamics: II. Helicity conservation under Noether's first theorem, double Beltrami flow expansion and its magneto hydrodynamic limit[J]. Physical Review E, 2015, 92: 063106.
- [21] LU N, LIKOS W J. Closure of "rate of capillary rise in soil"[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6): 646–650.
- [22] 苗强强, 陈正汉, 田卿燕, 钱尼贵, 姚志华. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. 岩土力学, 2011(S1): 327–333.
- MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, TIAN Qing-yan, QIAN Ni-gui, YAO Zhi-hua. Experimental study of capillary rise of unsaturated clayey sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(S1): 327–333.
- [23] 姜彬, 韩洪德. 测定毛细管水强烈上升高度方法应用实例[J]. 煤炭工程, 2007(10): 59–60.
- JIANG Bin, HAN Hong-de. Application examples of determining height of capillary water[J]. Coal Engineering, 2007(10): 59–60.
- [24] 刘亚磊, 梁杏, 朱常坤, 李静. 采用土壤孔隙表面分形维数预测土壤水分特征曲线[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 125–130.
- LIU Ya-lei, LIANG Xing, ZHU Chang-kun, LI Jing. Prediction of soil water retention curve by surface fractal dimensions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 125–130.
- [25] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 38–39.
- GAO Da-zhao, YUAN Ju-yun. Soil properties and soil mechanics[M]. Beijing: China Communication Press, 2001: 38–39.
- [26] 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.
- [27] YIN S H, WANG L M, CHEN X, WU A X. Effect of ore size and heap porosity on capillary process inside leaching heap[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26: 835–841.
- [28] 郝瑞, 施斌, 曹鼎峰, 魏光庆, 张岩, 梅世嘉. 基于AHFO技术的毛细水运移模型验证试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 41(2): 376–382.
- HAO Rui, SHI Bin, CAO Ding-feng, WEI Guang-qing, ZHANG Yan, MEI Shi-jia. Experimental study on capillary water transport model based on AHFO technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 41(2): 376–382.
- [29] AKSU I, BAZILEVSKAYA E, KARPYN Z T. Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability[J]. GeoResJ, 2015, 7: 1–13.
- [30] 刘杰, 姚海林, 卢正, 卢梦玲, 董启朋. 非饱和土路基毛细作用的数值与解析方法研究[J]. 岩土力学, 2013(S2): 421–427.
- LIU Jie, YAO Hai-lin, LU Zheng, LU Meng-ling, DONG Qi-peng. Study of analytic and numerical methods for capillary action of unsaturated soil subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(S2): 421–427.

Experiment on tailings capillary characteristics based on particle size effect

LIU Di^{1,3}, LU Cai-wu^{2,3}, LIAN Min-jie^{2,3,4}, GU Qing-hua^{2,3}

(1. College of Materials Science and Engineering,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. Institute of Mining System Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

4. Sinosteel Mining Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: Using a self-developed system for online monitoring capillary rise test (OM-CRT) to explore the effect characteristics of tailings particle size on capillary water rise of tailings dam, the whole process of capillary water rise was tested according to the tail fine sand, the tail silty sand and the tail silty soil of different particle sizes, the relation curves and fitting equations of the rise height, rise speed and time of capillary water in tailings are obtained, and the variation rule and influencing factors of water content in capillary zone in different profiles with time were analyzed. The results show that the wetting front and time is logarithmic relationship when the tailings capillary water rises. The capillary water rises quickly in early trial, but with the test time increasing, the capillary water rises slowly and stops rising eventually. Therefore, the height and velocity of capillary water rise are negatively correlated with the tailings particle size. The relation between the instantaneous water content change and time in different profiles is similar to the characteristic curve of water and soil, showing the shape of 'S'. The moisture content in three cylinders decreases with the height increasing. The moisture content in the capillary zone of the bottom of the tail silty soil sample is 23.77%, which forms a stable saturated capillary band of 300 mm. Through the relation between capillary diameter and tailings particle size is established, and the relation between particle size and capillary water rising height is further deduced. The capillary water rising test proves the existence of suction and capillary action in tailings and further verifies the principle of interface action. The research results can lay a foundation for the dam stability analysis method and theory under the influence of capillarity, and provide a new approach for the stability study of slope engineering.

Key words: tailings; particle size effect; capillary characteristics; capillary water rising height; instantaneous water content; saturation capillary zone

Foundation item: Project(51774228) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2019-06-26; **Accepted date:** 2020-10-04

Corresponding author: LU Cai-wu; Tel: +86-29-82203440; E-mail: lucaiwu@126.com

(编辑 李艳红)