层状尾矿水分迁移机制及毛细屏障效应研究

边润泽[1,2],刘　迪[1,2],卢才武[1,2],江　松[1,2],马莲净[1,2],洪　勇[1,2]
(1. 西安建筑科技大学 资源工程学院,陕西 西安　710055;
2. 西安市智慧工业感知计算与决策重点实验室,陕西 西安　710055)

摘要: 细粒夹层结构是尾矿坝常见的沉积结构,其特有的水力学性质会影响土体中水分的运动,进而降低尾矿坝长期服役性能. 为探究尾矿坝在夹层结构影响下的毛细水迁移机制,采用自主研发的尾矿毛细水上升实时监测试验系统,基于细粒夹层的层位和厚度设置了3组模型对比试验,得到细粒夹层结构影响下尾矿毛细水运移高度和含水率随时间的变化规律,并依据试验结果分析含夹层尾矿中毛细水在不同阶段的运动状态,进而发现毛细屏障效应对毛细水迁移的阻滞机理,揭示了不同夹层层位和厚度下的水分运移机制及其对尾矿毛细屏障效应的影响机理. 结果表明:层状尾矿中毛细水上升高度随时间变化呈前期快速上升、中期缓慢上升和后期平稳的特点,含高位夹层的柱体毛细水上升高度大于中位和低位夹层;同一层位的夹层,厚度越大,水分穿越夹层的时间越长,夹层含水率越高,且夹层含水率比其上、下层尾矿高;夹层影响其上、下部尾矿毛细水的运移,当毛细水上升至夹层的下部界面时,因细粒夹层具有较强的基质吸力,水分会以较快速度进入到夹层;当毛细水抵达夹层的上界面时,受毛细屏障效应的影响,形成不连续毛细带,毛细水在夹层中不断累积最终穿透夹层进入上部尾矿. 研究工作可为层状尾矿毛细水迁移机制研究和细粒尾矿坝稳定性分析提供参考.

关键词: 细粒夹层;层位;厚度;水分迁移;毛细屏障效应
中图分类号: TD 926.4　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)01-0244-13

Water migration mechanisms and capillary barrier effects in layered tailings with fine-grained interlayers

BIAN Runze[1,2], LIU Di[1,2], LU Caiwu[1,2], JIANG Song[1,2], MA Lianjing[1,2], HONG Yong[1,2]
(1. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Perceptive Computing and Decision for Intelligent Industry, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

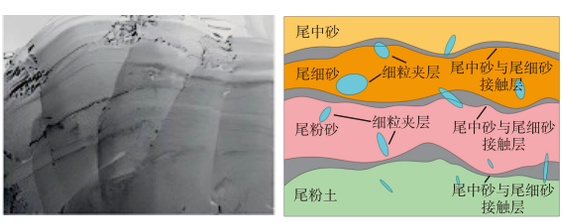
Abstract: Fine-grained interlayers are common sedimentary features in tailings dams and exhibit hydraulic properties that can substantially alter the water migration, thereby influencing long-term stability and service performance. To clarify capillary water migration mechanisms in layered tailings, this study examined the effects of fine-grained interlayer position and thickness on capillary rise behavior. A self-developed real-time monitoring system was used to conduct controlled laboratory model tests. Three comparative experimental groups were established by varying interlayer eleva-

收稿日期: 2025-08-06　　**修回日期:** 2025-09-18　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250313
基金项目: 国家自然科学基金项目(52404140);陕西省自然科学基金项目(S2023-JC-QN-0687);陕西省社会科学基金项目(2023R046)
第一作者: 边润泽(2001—),男,山东省邹城市人,硕士研究生.
通信作者: 刘　迪(1987—),女,陕西省咸阳市人,副教授,博士生导师. E-mail: safety_ld2010@126.com
引用格式: 边润泽,刘　迪,卢才武,等.层状尾矿水分迁移机制及毛细屏障效应研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):244-256.
BIAN Runze, LIU Di, LU Caiwu, et al. Water migration mechanisms and capillary barrier effects in layered tailings with fine-grained interlayers[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 244-256.

tion and thickness. Temporal changes in capillary rise height and moisture distribution were continuously monitored to analyze staged migration behavior. The results demonstrate that capillary rise in layered tailings progresses through three stages: rapid ascent, gradual rise, and stabilization. Columns with higher interlayers achieve significantly higher final capillary rise heights than those with middle or lower interlayers. Increasing interlayer thickness delayes capillary water transmission and promotes sustained moisture accumulation within the interlayer, where water content remaines higher than in adjacent tailings. Fine-grained interlayers markedly regulates water migration in both the underlying and overlying tailings. Capillary flow accelerates upon reaching the lower interlayer interface due to strong matrix suction, whereas a capillary barrier formes at the upper interface, producing a discontinuous capillary zone. Continued water accumulation ultimately overcame this barrier, enabling upward penetration into the overlying tailings. These findings clarify the coupled mechanisms of capillary water migration and capillary barrier formation in layered tailings. They provide a scientific basis for evaluating moisture redistribution and long-term stability risks in fine-grained tailings dams.

Key words: fine-grained interlayer; horizon; thickness; water migration; capillary barrier effect

尾矿坝是我国安全生产的9个重大危险源之一，其运行安全直接关系着周边环境和人员安全[1]. 坝体安全事故发生的直接原因通常与其内部水-土相互作用密切相关[2-3]，尾矿坝的层状土体结构影响着毛细水的运移效果，而持续干湿循环状态下的毛细作用会使土体强度和浸润线高度极不稳定，这密切影响着尾矿坝的长期安全服役[4-6]. 在工程实际中，尾矿的排放方式以间断式分段集中排尾为主，这难免导致尾矿不均匀沉积形成层状结构[7-8]. 尾矿颗粒粒径较细，易形成高含水率、强压缩性、低渗透率的不良沉积层，即形成透镜体，又称细粒夹层[9-11]. 细粒夹层的存在不但使尾矿沉积时间变长，且会弱化坝体的强度，容易产生不良地质现象，在毛细作用的持续影响下，威胁着坝体的稳定性[12]，坝体中的层状沉积结构见图1.



(a) 尾矿坝层状结构局部图　　(b) 层状沉积结构示意

图1　尾矿坝层状非均质结构图

Fig. 1　Layered heterogeneous structure of tailings dam

关于毛细水的研究可以追溯到二十世纪三十年代欧美国家土木工程师使用“毛细作用”对地下水向上流动的现象进行描述. 目前国内外学者围绕毛细水的研究主要集中在路基、黄土、砂土、黏土、盐渍土等介质，通过经验公式计算、室内试验和数值模拟等方法对毛细作用规律进行了大量研究. 文献[13]较早提出土层中毛细上升高度经验公式，并提出了海森经验公式，但其只适用于均质砂土中毛细水上升高度的计算，而对于堆积型尾矿坝这种非均质对象，计算结果偏差较大. 文献[14]结合室内试验与数值模拟方法，研究了压实红黏土中的毛细作用特性，结果表明毛细水上升高度与土体含水率之间呈现出类似于水-土特征曲线的关系特征，并借助数值模拟手段成功再现了水分随时间演化的瞬态分布过程. 文献[15]提出一种基于图像RGB信息测试含水率的方法获取湿度场，能够精确测得毛细水上升过程中含水率及湿润锋的变化规律. 文献[16]基于改进溶质吸力方程和毛细孔径分布分形理论，提出了可以预测盐分作用下毛细水最大上升高度的方法. 文献[17]提出了一种二重模型来连续模拟膨润土的土壤持水行为，能够合理地预测毛细起始和从吸附到毛细的转变. 上述研究阐明了各种介质中毛细水上升高度规律和迁移特性，并能对毛细行为进行合理预测. 文献[18]通过数值模拟方法对影响尾矿坝稳定性的关键因素进行了分析，结果显示毛细力在坝体稳定性中起着至关重要的作用，开创性地指出水的毛细作用可能显著削弱尾矿坝的安全裕度. 文献[19]对尾矿中孔隙水的迁移特性及其对细观结构的影响机制展开研究，提出将实际浸润线高度与毛细水上升高度叠加，作为浸润线有效高度的判定依据，并据此对尾矿坝的稳定性进行了分析与评价. 文献[20]基于不同颗粒级

配的尾矿砂进行了室内毛细水上升试验，得出毛细水上升的变化规律及其对尾矿稳定性的影响．文献[21]通过室内试验研究了温度和气压对某尾矿坝中毛细水上升规律的影响，发现温度对毛细水上升的影响比气压大，且在毛细水上升后期温度和气压的作用显著．上述研究将毛细水作用力应用到尾矿材料中，探究基于某一段时间内毛细水的上升规律以及影响其上升的因素，并说明尾矿坝的稳定性与毛细作用有必然的联系，虽然考虑了毛细水运移机理，但忽视了层状土体的非均质界面会影响毛细水的运移过程，这会对毛细水上升规律造成一定的偏差．

尾矿坝的这种层状结构会表现出一些特有的水力性质，如基质势[22]、进气值[23]、非饱和参数的突变[24]及毛细屏障作用[25-27]等，这些特性使得其内部水分运移行为显著区别于均质尾矿体，从而对水分迁移路径及尾矿的持水性能产生重要影响，其中毛细屏障作用是指在2种不同介质的交界处，因上下层介质的基质吸力存在差异从而导致水分穿越该界面时受到阻碍的现象．由于层状土体在水力特性上存在非连续性，在毛细水上升过程中，土体的分层结构会影响毛细水上升的整体进程．文献[28]针对不同情形系统探讨了砂质夹层对毛细水最大上升高度的影响规律，并提出了砂质夹层影响毛细水上升极限高度所需满足的条件．文献[29]基于主动加热光纤法开展了层状土毛细水上升试验，提出了适用于描述层状土中毛细水上升规律的ILW模型．文献[30]进行了不同粒径夹层与均质土体的对照试验，发现有夹层的土柱最终毛细水上升最大高度大于无夹层的土柱，且有、无夹层土柱之间的较细土体存在较小的基质吸力间隙．文献[31]设置不同层状结构土壤开展水分运移入渗试验，从土壤水分、水势和水通量3个方面探明了夹层对土壤水分运移的阻滞机理．层状尾矿中水分运移要比均质尾矿复杂得多，其水分运移特征和孔隙水赋存状态与均质尾矿完全不同，并且层状结构会阻碍或加速毛细水的上升进程[32-36]．尽管当前针对土体中夹层毛细作用的研究已存在很多，但与砂土、黄土等天然岩土材料相比，尾矿因颗粒更细且形态不规则，具有更复杂的孔隙结构，使其毛细水迁移行为在夹层结构影响下表现出更显著的非连续性和屏障效应．因此，现有成果难以直接适用于研究层状结构对尾矿坝毛细水上升过程及毛细屏障的作用机制，特别是在细粒夹层影响下尾矿的水分迁移特性与含水率变化规律方面，仍存在明显的研究空白．

基于此，本文采用自主研发的尾矿毛细水上升实时监测试验系统进行室内土柱模拟试验，综合考虑细粒夹层层位和厚度的影响，研究夹层影响下尾矿毛细水上升高度和含水率随时间的变化规律，揭示细粒夹层对尾矿坝毛细水运移特性及毛细屏障效应的影响机理，研究成果可为层状尾矿毛细水迁移机制研究和细粒尾矿坝稳定性分析提供重要参考．

1 层状结构尾矿毛细水上升试验

1.1 试验装置

试验设备包括激光粒度仪、X射线衍射仪、扫描电子显微镜和全自动压汞仪，用以测试分析尾矿材料的理化特征，具体见表1．

表1 测试分析方案一览表

Table 1 Overview of test and analysis scheme

测试和分析内容	仪器
粒度分布	HELOS-RODOS型激光粒度仪
矿物成分及含量	D/MAX2550VB＋型自动X射线衍射分析仪 S4 PIONEER型X射线荧光光谱仪
微观形貌	X-650型扫描式电子显微镜
孔隙特征	AutoPore IV 9510型全自动压汞仪

利用自主研发的尾矿毛细水上升实时监测试验系统进行毛细吸水试验，探究细粒夹层对毛细水上升过程的影响，毛细水上升在线监测试验系统的主体部分由毛细吸水试验柱组、含水量(变化)实时监测系统、数据及图像采集系统、细观行为观测系统、供水系统和排水系统6部分组成，整体试验装置及流程见图2．

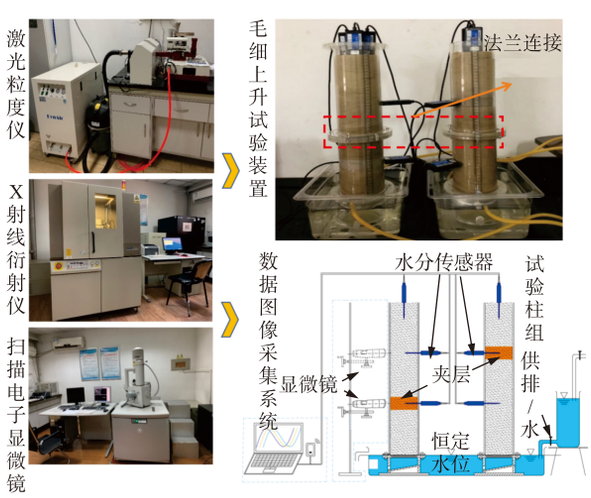


图2 试验装置

Fig. 2 The test device

柱组主体由2个透明有机玻璃柱构成，柱体总高度为50 cm，包括上、下2段玻璃柱，分别是上部装样结构和下部支撑结构，下段高20 cm，上段高30 cm，上、下段以法兰连接，该连接方式具有良好的密封性并便于拆卸，采用金属法兰和垫圈结构并通过多孔均布螺栓对称预紧，可避免在试验过程中发生水分渗漏，同时便于试验完成后从柱体内部取样；装样结构与底部支撑结构设计尺寸均为内径110 mm，壁厚5 mm，侧边50 mm高处设有一个进水孔；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高度提供参照，这里的湿润锋指毛细水上升过程中尾矿湿润区与未湿润区之间的界面，而饱和锋则是指尾矿柱中由未饱和转向饱和的界面，一般落后于湿润锋或与湿润锋重合，可以体现出从部分饱和向完全饱和的转变. 含水量(变化)实时监测系统由SM3001B温湿度传感器和SU9101B型RS485转换器构成，传感器测湿范围为0～24%，精度为满量程的2%，测温范围为－30～80 ℃，传感器响应时间小于1 s，系统具有较高的精度，温湿度传感器采集的数据可通过RS485转换器传输到计算机中进行数据的实时显示与存储，每个柱体上布设3个传感器，具体高度分别为9，29，39 cm. 数据和图像采集系统包括摄像机、电子显微镜和SV3010数据采集系统，采集数据图像信息并利用SV3010数据采集软件存储在计算机当中，可以显示实时曲线画面、历史数据信息和数据报表等内容.

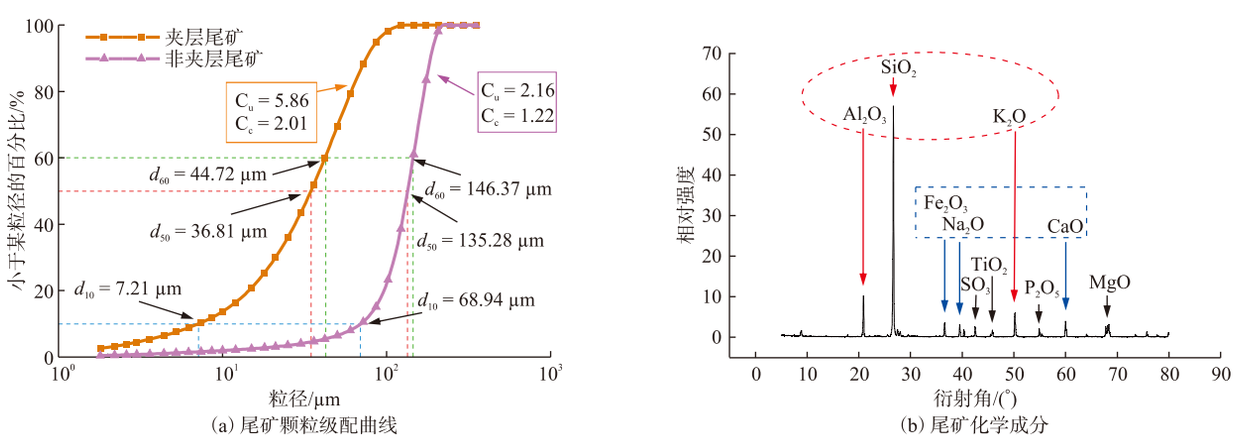
1.2　试验材料

尾矿样品采集以干滩面表层20 cm深度以内的尾矿为主，粒径范围为5～180 μm. 通过进行预试验，发现原位尾矿材料中含有残留的浮选药剂、碎屑等多种杂质，每次取样的颗粒组成以及润湿性差异较大，导致多轮试验的重复性差，难以揭示细粒夹层单独对水分上升速率及上升高度的影响.

在工程实际中，尾矿坝中的透镜体多为细粒夹层，尾粉土材料因等效孔隙半径小、毛细力强，故而可用于模拟尾矿坝中的低渗细粒夹层结构，而尾细砂孔隙连通性好且渗透系数高，可作为尾矿坝的主体基质. 因此本试验选择尾粉土作为细粒夹层材料，尾细砂作为非夹层尾矿材料.

首先对采回的尾矿样品进行清洗，以避免杂质含量以及浮选药剂的干扰；然后进行晾晒、研磨和烘干，确保颗粒互不黏连，以获取更加松散且均匀的颗粒状态，便于后续准确地按筛分孔径分级；最后将烘干后的尾矿经过振动筛分和分级，以获取对应粒径的尾矿材料供试验使用.

通过激光粒度仪得到夹层尾矿和非夹层尾矿的颗粒级配曲线见图3a，其中有效粒径d_{10}，中值粒径d_{50}和限制粒径d_{60}分别表示颗粒级配曲线上累计粒度分布百分数为10%，50%和60%时对应的粒径. 结果表明，夹层尾矿尾粉土的d_{10}，d_{50}，d_{60}分别为7.21，36.81，44.72 μm，而作为非夹层尾矿材料的尾细砂的d_{10}，d_{50}，d_{60}分别为68.94，135.28，146.37 μm. 不均匀系数C_u反映颗粒粒径的离散程度，曲率系数C_c衡量中间粒径与极端粒径的匹配程度，由图3可见尾矿夹层结构整体粒径较小，颗粒级配良好. 进行X射线衍射测试得到该尾矿材料主要由SiO_2，Al_2O_3，K_2O等化学成分组成，含量分别占79.82%，5.51%，1.83%，具体的化学成分见图3b.



(a) 尾矿颗粒级配曲线　　(b) 尾矿化学成分

图3　试验材料

Fig. 3　Test materials

1.3 试验方案

根据夹层层位和夹层厚度将试验分为3组对比试验，试验柱分别记为：A，B，C，D，E，F，G，H和I，装样高度均为45 cm. 将A，B，C柱设为第1试验组，夹层厚度为3.0 cm，探讨毛细水在夹层较薄的条件下，高层位、中层位与低层位夹层对毛细水迁移路径和上升高度的影响，评估细粒夹层在不同高度是否能有效阻滞或改变水分上升过程，为夹层结构对毛细作用影响机制提供初步参照；第2组D，E，F的夹层厚度设置为5.0 cm，模拟在夹层厚度适中的情况下，比较不同层位夹层对水分运移的影响，相较于第1组，分析夹层变厚是否增强了阻水或保水效果，分析厚度适中时夹层的“毛细屏障作用与水分滞留能力”在不同位置是否表现出差异；第3组G，H，I的夹层厚度设为7.0 cm，以此探讨较厚夹层对毛细水上升过程的阻滞能力，分析厚夹层在高位、中位和低位时，是否能显著阻断或延缓水分继续上升，并验证夹层厚度达到一定程度后，其影响是否趋于稳定，或是否存在“临界厚度”现象. 具体试验方案设置见表2.

表2 试验方案设置

Table 2 Test scheme design

组别	试验柱编号	夹层厚度/cm	夹层层位	夹层位置/cm
第1组	A	3.0	低层位	8.0～11.0
	B	3.0	中层位	17.0～20.0
	C	3.0	高层位	28.0～31.0
第2组	D	5.0	低层位	8.0～13.0
	E	5.0	中层位	16.0～21.0
	F	5.0	高层位	27.0～32.0
第3组	G	7.0	低层位	6.0～13.0
	H	7.0	中层位	15.0～22.0
	I	7.0	高层位	26.0～33.0

试验环境温度是影响毛细作用与水势分布的重要因素，为控制环境因素对毛细水上升过程的影响，所有室内试验均在实验室常温下进行，通过温度记录仪监测到的平均室温为20 ℃，温度波动范围小. 首先，对清洗、筛分后的尾矿试样按试验要求进行配制，获取试验所需的尾细砂和尾粉土，根据《土工试验方法》(GB/T 50123—2019)将其按每5 cm分层装样并压实至层高，确保尾矿试样与管壁充分接触，每一层装样完成后，把该层的表面拉毛，维持各层之间的连续性，从而保证试验中毛细水迁移的连续，静置48 h以备试验使用. 随后，进行传感器的布设并完成设备的安装与调试，确保数据采集系统和图像获取装置的准确性.

图4展示了细粒夹层的设置和毛细水迁移过程，以尾粉土和尾细砂2种材料将尾矿柱整体设置为“粗-细-粗”的分层结构，考虑夹层层位和厚度2种因素的影响，进行毛细吸释水试验. 利用试验装置的供/排水系统，通过虹吸原理供水，维持水槽液面与试样底部齐平，启动毛细吸水试验，并在前30 min内每隔1 min纪录一次湿润锋上升高度，之后每隔5 min纪录一次，直至数据稳定，每一轮试验结束后，通过供/排水系统将水槽中的水分排出，尾矿大孔隙中的水分通过重力作用释放，剩余的水分由于毛细作用仍保持在小孔隙和薄膜水层中. 后续按照试验柱编号以相同步骤依次进行第2，3组试验.

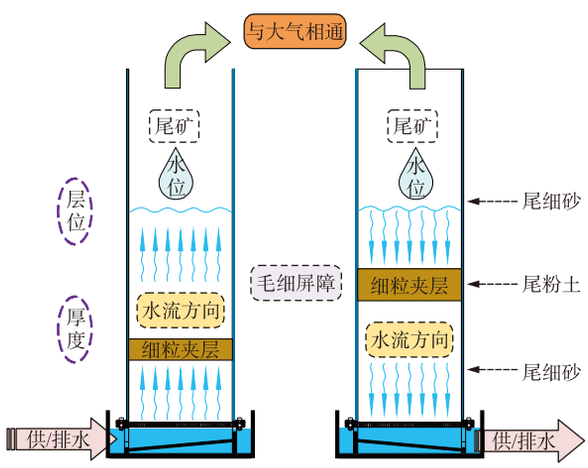


图4 层状结构尾矿毛细水迁移试验示意

Fig. 4 Schematic of capillary water rise experiment of layered tailings

2 结果与讨论

毛细水的运移特性主要包括毛细水上升高度、时间以及含水量的分布等. 试验中，干湿尾矿样的颜色对比较强烈，湿润锋可作为尾矿湿润与非湿润区的分界线，通过图像采集的方法记录并绘制毛细水上升后湿润锋面的运移过程. 试验过程中，由水分监测系统记录水分变化情况，分析并总结细粒夹层在不同层位和厚度下对毛细水迁移特性及毛细屏障效应的影响.

2.1 细粒夹层对尾矿毛细水迁移特性的影响

在尾矿毛细吸水过程中，以湿润锋的运移轨

迹为重点，着重观察干湿尾矿样之间的分界线．透过无色有机玻璃柱上的刻度记录湿润锋面的位置，由于毛细水前期上升速度较快，通过结合数码相机拍摄可以高效确定锋面的位置；将湿润锋的运移位置与每个时刻相对应，进而获得大量基于湿润锋高度的时序数据，便于后续分析夹层影响下毛细水的运移规律．

根据试验方案设置，从细粒夹层层位和厚度 2 个方面讨论其对尾矿毛细水运移规律的影响．图 5 展示了毛细水上升高度与时间的关系．

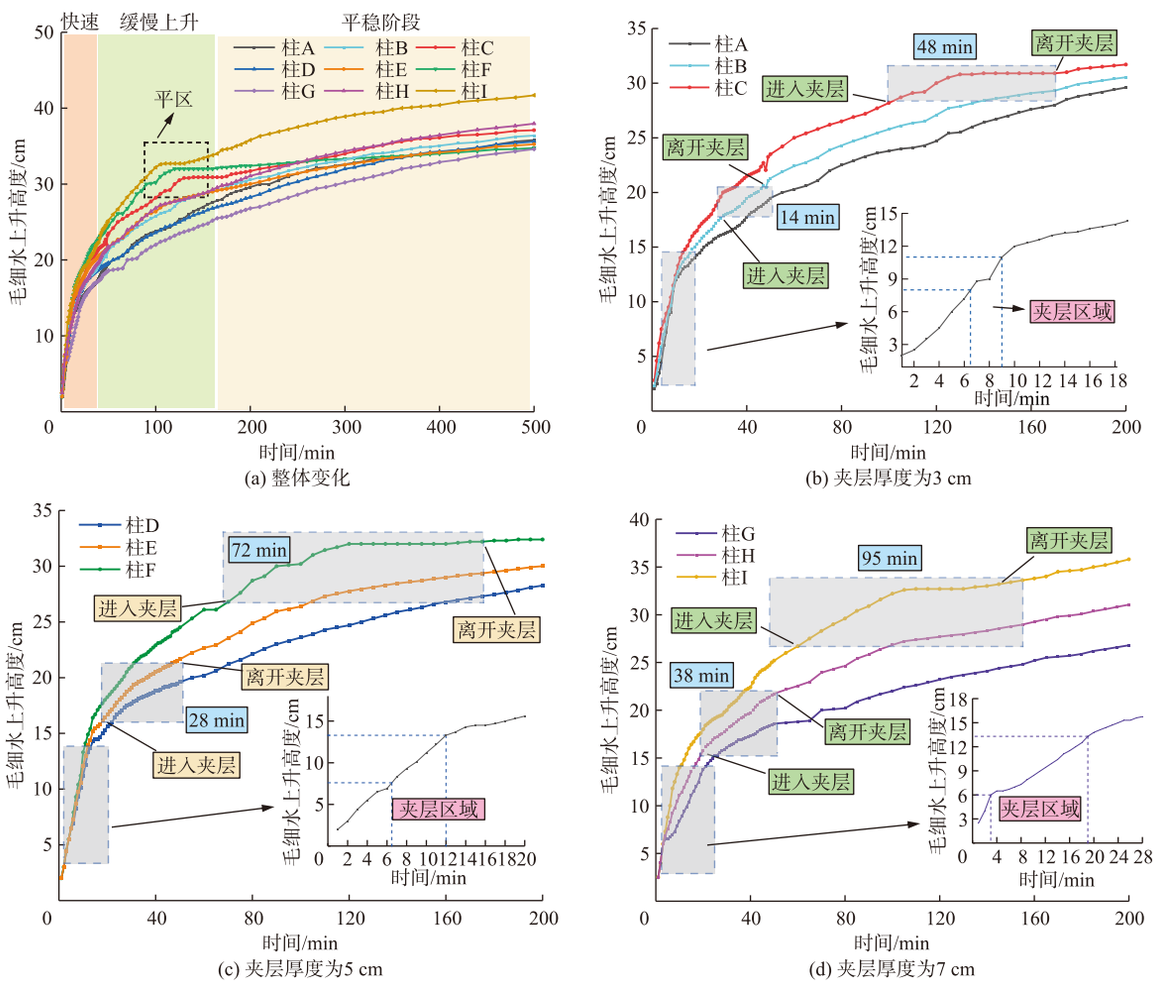


图 5　毛细水上升高度随时间的变化关系

Fig. 5　Relationship between capillary water rise height and time

从图 5a 毛细水上升全过程曲线中可以看出，前 15 min 内 9 个尾矿柱体中的毛细水均上升迅速，呈陡峭增长趋势，毛细水上升高度从 0 cm 跃升至约 15 cm，平均上升速度为 1 cm/min，水分迅速填充毛细通道，此过程毛细水尚未接触夹层或夹层尚未对毛细水运移发挥显著影响，因此 9 根试验柱曲线走势较接近，未出现明显分化．而在 20～150 min 的时间段中，曲线斜率减小，毛细水上升速度明显减缓，上升速度从 1 cm/min 逐渐下降至 0.2 cm/min，其中试验柱 C，F，I 出现“平台区”，即上升高度在一定时间内近乎停滞，分别耗费了 48，72，95 min．9 根柱体的水分上升高度也增加至 25～35 cm 范围内．在 150 min 以后，毛细水继续上升但速度缓慢，速度逐渐趋近于 0，最终上升高度趋于稳定，上升高度的最终值在 32～42 cm 之间．为避免主观定性，本研究依据上升速度对毛细水上升过程进行定量划分，参考毛细水上升的经典研究[20-21]，并结合本试验速度分布，以毛细水上升速度 1.0 和 0.2 cm/min 作为阶段分界，所有柱体中尾矿毛细水运移均呈现出前期快速上升、中期缓慢上升、后期趋于平稳的过程．

从细粒夹层层位考虑其对毛细水迁移特性的影响，保证每一组内 3 个试验柱的夹层厚度相同，对比分析高、中、低 3 个层位下的水分上升情况．首先对于第 1 组试验，以图 5b 中柱 A，B，C 为例研究毛

细水上升的具体过程，柱 A，B，C 在前 15 min 内上升高度较为相近，此后 3 个柱体的曲线逐渐出现偏离，柱 B，C 在整个水分上升过程中高度均大于柱 A，且柱 C 中水分上升最高，尤其在前 150 min 内三者高度差异显著. 柱 A 夹层位于 8～11 cm 高度处，属于低层位夹层，从局部放大图中看到毛细水在 6.5 min 时开始进入夹层，而在 9 min 时离开夹层继续向上运移，上升过程基本不受细粒夹层的影响. 柱 B 夹层在 17～20 cm 高度处，属于中层位夹层，毛细水通过该夹层时受到较小的影响，30 min 时进入夹层，而在 44 min 时便离开夹层继续向上运移. 柱 C 夹层在 28～31 cm 高度处，属于高层位夹层，图中可以看出毛细水经过该夹层花费较长时间，从 90 min 时进入夹层直到 138 min 时离开夹层，这个阶段毛细水上升高度较小，仅为夹层厚度部分.

然后以图 5c 中的柱 D，E，F 研究第 2 组试验结果，柱 D 夹层为高度为 8～13 cm 的低层位夹层，根据局部放大图，毛细水到达夹层下表面所用的时间为 6.5 min，抵达夹层上表面时所用时间为 12 min，即毛细水通过整个夹层共花费时间 5.5 min，且上升曲线较为平滑，说明低层位夹层对毛细水上升的阻碍作用极小，大部分水继续向上迁移；柱 E 中毛细水通过中层位夹层共花费了 28 min，毛细水上升受到了一定的阻碍作用；柱 F 中毛细水通过整个夹层用了 72 min，此时的水主要发生横向运动，在夹层上界面不断累积，产生了图中所示的“平区”.

最后以图 5d 分析第 3 组试验数据，可以发现在最初阶段柱 G，H，I 中的毛细水上升曲线便出现差别，柱 I 中水分上升整体高度大于柱 G，H. 在 3 min 时水分便进入柱 G 夹层下界面，18.5 min 时突破夹层离开，通过夹层共经历了 15.5 min；柱 H 中毛细水通过中层位夹层共用了 38 min，水分上升受到了夹层的阻滞效应，而柱 I 中毛细水通过高层位夹层共经历 95 min，阻滞效果明显，对比发现夹层层位越高，细粒夹层对毛细水的阻滞作用越强，出现的平区区域越大.

由此可见，夹层厚度相同的情况下，低层位夹层对尾矿毛细水迁移的影响很小，水分能够保持较快速度穿过夹层，其上升高度随时间变化的关系曲线无显著跳跃，与均质尾矿相近；对于中层位夹层的尾矿柱，细粒夹层对毛细水上升的阻滞作用开始显现，水分通过夹层的时间逐渐变长；对于夹层位置高的尾矿柱，从毛细水上升高度和时间关系曲线可以看出，当毛细水抵达细粒夹层之前，毛细水上升不受影响，其运动过程与均质尾矿相同，当穿越夹层时，曲线会出现一段“平区”，说明毛细水受到夹层的阻碍作用显著，上升速度减缓，而在通过夹层后，曲线明显趋于平稳，毛细水缓慢上升一定高度后便趋于稳定，且夹层层位越高，毛细水上升高度越大，穿过夹层后的速度越小.

从细粒夹层厚度考虑，本试验共设置了 3 种夹层厚度，分别为 3.0，5.0，7.0 cm，图 6 展示了低层位、中层位和高层位情况下 3 种不同厚度夹层对毛细水上升过程的影响.

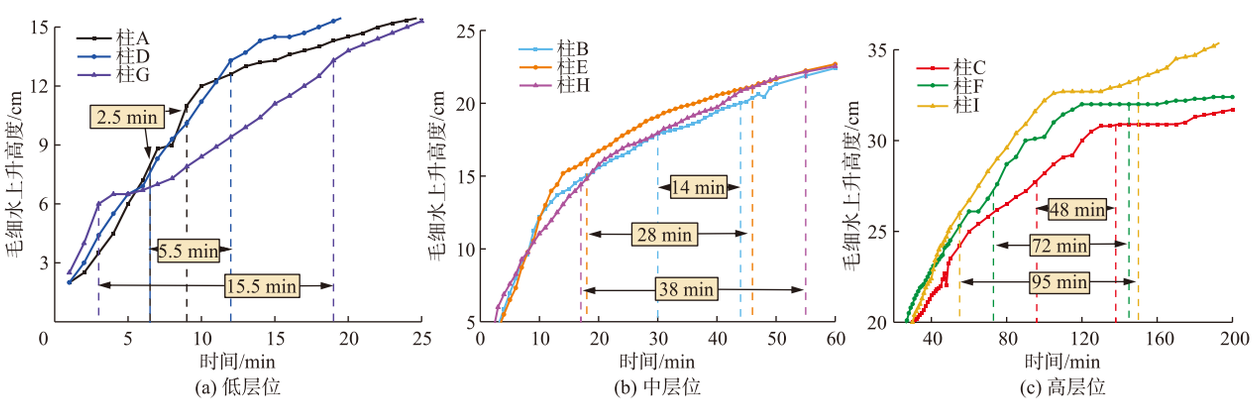


图 6 不同层位下夹层厚度对毛细水上升的影响

Fig. 6 The influence of interlayer thickness on capillary rise at different layer positions

从图 6a 可知，当夹层处于低层位时，毛细水通过柱 A，D，G 夹层所用时间分别为 2.5，5.5，15.5 min，可见低层位夹层中厚度对毛细水上升速度影响不大，即使厚度增加毛细水依旧能以较短的时间通过夹层. 图 6b 中夹层位于柱体中部位置的情况下，柱 B，E，H 中水分通过夹层的时间分别为 14，28，38 min，说明中层位夹层中厚度会影响毛细水的迁移效果，夹层厚度增加时水分通过夹层所花费的时间也随之增加. 图 6c 中展示了夹层处于高层位时，夹层厚度与毛细水上升过程的变

化关系，此时夹层厚度增加对毛细水上升有较大影响，柱C，F，I中水分通过夹层的时间分别为48，72，95 min，而在通过夹层后毛细水上升进入平稳阶段，上升高度变化不大．

综上，低层位夹层情况下夹层厚度对毛细水上升速度没有较大的影响，而在中、高层位情况下厚度会对毛细水上升造成显著影响，延缓水分通过夹层的时间．在同一层位下，夹层厚度越大毛细水通过夹层所用的时间越长，且水分通过夹层后的迁移速度随夹层厚度增大而减小．

2.2　细粒夹层对尾矿毛细带含水率的影响

上述结果表明细粒夹层对毛细水上升具有显著影响，下面将进一步比较不同层位与厚度下尾矿柱的含水率分布差异，以揭示其机理．为更定量地描述尾矿柱含水率随高度的变化规律，在每个土柱不同高度的剖面布设22个测试点，对其含水率进行统计分析，得到3个试验组中断面含水率与高度之间的关系，如图7所示．

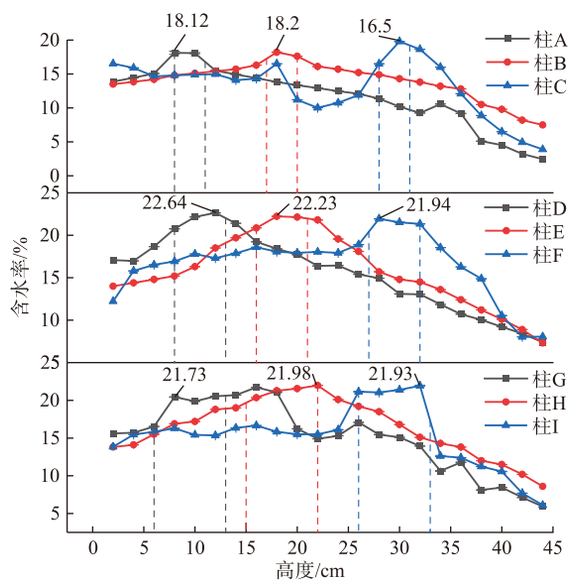


图7　含水率随高度的变化关系

Fig. 7　The relationship between moisture content and height

由图7可以看出，所有柱体中的含水率均随着高度的增加整体呈下降趋势，仅在细粒夹层位置处出现突变现象，含水率保持较高水平．当湿润锋到达柱A夹层下界面(8 cm)时，含水率显著上升，且高于柱B和柱C在相同高度处的含水率，这是由于细粒夹层处基质吸力骤增，增强了其持水能力；当柱A中湿润锋超过10 cm后，夹层中的含水率先升高后降低，其原因在于夹层上界面对毛细水的阻滞作用逐渐减弱，同时介质性质发生突变，使得毛细水垂向运动速度显著降低，而水平运动速度增大所致；而当湿润锋上升超过11 cm后，尾矿含水率随高度的升高开始逐渐降低．整个过程中柱A的峰值含水率为18.12%，位于细粒夹层高度处，同样其他8个柱体中的含水率最大值也存在于细粒夹层位置处．对比各柱体含水率曲线发现，对于夹层同在低层位的柱A，D，G，在8～12 cm高度范围内柱A的含水率较高，而柱D含水率较高时对应的高度范围是8～16 cm，柱G则是6～18 cm的高度范围，说明随着细粒夹层厚度的增加，试验柱中会有更大范围的尾矿保持着较高的含水率，而这个范围恰好是细粒夹层所在的位置附近．

在整个试验柱毛细水上升过程中，细粒夹层对毛细水上升速率及其补给速率都有显著影响，进而影响试验柱中尾矿土体各部分的水分分布情况，图8统计了试验柱中尾矿不同部位处的平均含水率情况．可以看出，9个试验柱中细粒夹层位置处的含水率均比其上、下部尾矿高，足以证明细粒夹层的持水性能明显强于同一柱体其他位置的尾矿．细粒夹层位于低层位时，柱A夹层中的平均含水率(w_A)为17.98%，柱D夹层中平均含水率(w_D)为19.99%，柱G夹层含水率(w_G)为20.93%，含水率关系为$w_A<w_D<w_G$；当夹层位于中层位时，柱B，E，H的平均含水率(w_B，w_E，w_H)分别为17.59%，19.74%，20.44%，即$w_B<w_E<w_H$；而当夹层位于高层位时，柱C，F，I的平均含水率(w_C，w_F，w_I)的关系则为$w_C<w_F<w_I$，证明在同一层位下，细粒夹层的厚度越大，其内部的含水率越高，随着夹层内部含水率的不断增加，当达到水分临界状态时，毛细水将穿越夹层继续向上迁移．

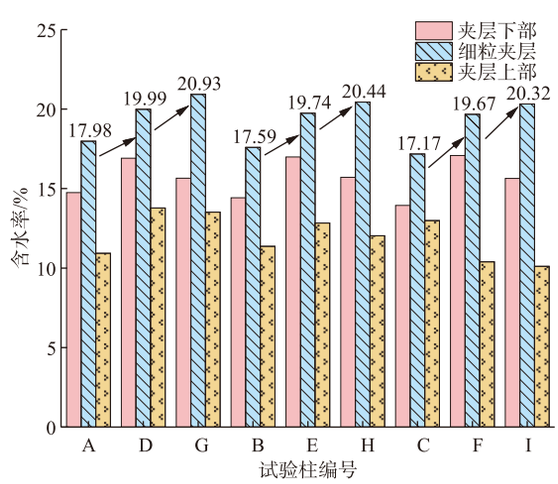


图8　柱体各部分含水率

Fig. 8　Water content of each part of the column

在尾矿层状结构中，假设各层水分迁移已保持平衡，即总水头（由位置水头与吸力水头构成）相等，且相邻两层界面附近的位置水头可忽略不计，可以认为其吸力水头相同．因此，在相同吸力条件下，细粒介质的含水率必然高于粗粒介质的含水率，也就是说，在处于水分平衡状态的层状尾矿结构中，细粒层的含水率较大，而粗粒层的含水率较小，这正是造成相邻层之间含水率差异较大的原因之一．

因此，尾矿柱体中细粒夹层具有良好的持水性能，含水率均高于其上、下部尾矿．低层位夹层的含水率略高于中、高层位夹层，且对于同一层位夹层，其厚度越大，含水率越高．

3 毛细屏障效应分析

3.1 毛细水进入夹层和穿透夹层的状态

试验结果表明，在含有细粒夹层的尾矿柱中，夹层会对毛细水迁移行为产生显著影响，阻滞毛细水上升，限制毛细水的最大上升高度并延长其运移时间，图 9 展示了夹层影响下毛细水上升过程中速度的整体变化．

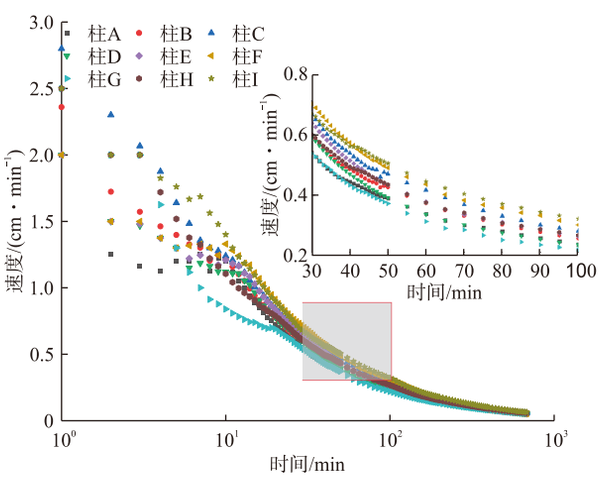


图 9 毛细水上升速度随时间的变化关系

Fig. 9 Variation of capillary water rising velocity with time

由图 9 可以看出，随着时间的推移毛细水的上升速度整体呈减小的趋势，在 10 min 以内各个柱体毛细水上升速度较快，最快速度达到 2.8 cm/min，速度变化差异明显，此时对于低层位夹层，毛细水已穿过夹层下界面并在夹层内部运移．根据土壤水动力学原理，水分沿水势梯度（包括基质势、重力势等）从高能区向低能区迁移，具体而言，当毛细水自下而上运移至尾矿与细粒夹层形成的砂-土界面时，由于细粒土的基质吸力较大，在基质吸力的作用下毛细水能够保持较快的速度通过砂-土界面，直至达到饱和状态．在 10～100 min 范围内水分上升速度开始逐渐降低，这个时间段内毛细水已穿过中、低层位的夹层，并且透过夹层下界面进入高位夹层，而在 100 min 之后各柱体中毛细水上升速度十分缓慢，水分迁移速度衰减显著，最大速度不超过 0.4 cm/min，水分运动趋于稳定状态．为探究细粒夹层对毛细水迁移的阻滞作用，将毛细水上升至细粒夹层上、下界面处的速度整理于表 3 中．

表 3 夹层界面处毛细水运移速度

Table 3 Capillary water rise velocity at the interlayer interface

位置		进入下界速度/(cm·min^{-1})	穿过上界速度/(cm·min^{-1})	速度衰减/(cm·min^{-1})
低层位	柱 A	1.25	1.20	0.05
	柱 D	1.18	1.12	0.06
	柱 G	2.00	0.71	1.29
中层位	柱 B	0.59	0.45	0.14
	柱 E	0.80	0.44	0.36
	柱 H	0.85	0.40	0.45
高层位	柱 C	0.28	0.22	0.06
	柱 F	0.37	0.22	0.15
	柱 I	0.47	0.20	0.27

从表 3 可以看出，所有尾矿柱体中毛细水抵达夹层下界面的速度均大于到达上界面时的速度，并且在同一夹层层位下，如柱 B 毛细水通过整个夹层速度下降了 0.14 cm/min，柱 E 速度减小了 0.36 cm/min，柱 H 速度降低了 0.45 cm/min，速度的变化幅度为 B＜E＜H，说明夹层的厚度越大，水分迁移速度的衰减幅度越大，表明细粒夹层对毛细水迁移的阻碍作用显著，很大程度上降低了水分上升速度．值得注意的是，表 3 中柱 G 的进入下界速度为 2.00 cm/min，显著高于其他样品，这是由于此时毛细水上升驱动力大，其在试验初始阶段快速响应，且该试验设计中的细粒夹层层位较低，其对毛细水的阻滞效应微弱，导致毛细水进入夹层下界面的速度值较大．

在水势梯度的持续驱动下，毛细水进一步向上迁移，直至到达夹层上边界（即土-砂界面），由图 9 可知，此时毛细水上升速度逐渐降低，曲线趋于平缓．由于夹层上方为基质吸力较小的粗颗粒尾矿，毛细水难以立即穿越该界面，导致供水中断，形成“毛细不连续带”．该现象指在毛细水上升过程中，由于颗粒级配或分层结构差异导致毛细水

迁移到层界面处形成局部的水分聚集现象，与整体毛细水连续分布不同，具体表现为湿润锋的停滞或分裂，因此称为毛细不连续带．随着夹层内部含水量不断增加，重力势能逐步增强，其基质吸力相应减小．当夹层基质吸力下降至低于上层尾矿的基质吸力时，毛细水才能突破夹层上界面，继续向上迁移．水分穿越夹层上界面的前提是夹层含水量达到一定的临界值，而该临界含水量通常高于在相同条件下均质尾矿的含水量．因此，细粒夹层能使毛细水上升速度减慢，使上升到夹层里的水分大部分滞留在夹层内部，这便延长了毛细水上升到尾矿柱顶端的时间，从而达到了抑制毛细水上升速度的效果，这种阻碍方式便是细粒夹层对水分上升的“毛细屏障效应”．毛细屏障效应是因上、下层尾矿的基质吸力不同引起的，也导致夹层内部水分滞留聚积而接近饱和．

3.2　毛细屏障的时间效应

基于上述结果，本小节将进一步从毛细水上升的各个阶段讨论夹层所产生的毛细屏障效应及其时间特性．与均质尾矿不同，层状尾矿中水分穿越细粒夹层到达土柱表层的时间计算相对复杂，最大区别在于水分在土-砂界面处的滞留时间，毛细屏障的时间效应主要体现在水分在这一界面的停滞时间，即水分在细粒夹层上界面的停滞时间．毛细水上升时间具体包括 4 部分，分别是毛细水在夹层下部尾矿中运移的时间、在夹层中运移的时间、在土-砂界面处的滞留时间以及穿越夹层上升到土柱表层的时间．

通过记录湿润锋位置的实时变化来计算细粒夹层对毛细水上升的时间阻滞效应，图 10 展示了各试验柱中毛细水上升 3 个阶段的时间分布情况．图中夹层下部的时间为试验最初阶段至湿润锋迁移到夹层下界面所用的时间，夹层中的时间为湿润锋从夹层下界面上升到上界面所用的时间，而滞留夹层的时间即为湿润锋从抵达夹层上界面直到穿过上界面共花费的时间．可见夹层造成的穿越阻力很大，导致平台滞留时间在不同设计下差异明显．毛细水在高位夹层中停滞时间较长，而低层位夹层对毛细水上升的阻滞作用很小，反映了夹层对毛细水迁移行为的控制作用．

1）当夹层层位相同而厚度不同时，即使夹层厚度增大，处在低层位夹层中的毛细水上升过程也不会存在滞留现象，从图 10 中的柱 A，D，G 可知，低层位夹层对毛细水上升的阻碍作用极小，滞留夹层的时间分别为 0.5，1.0，2.5 min，对于整个毛细水迁移过程来说微乎其微，水分上升速度极快，迅速的穿过夹层继续向上运移，因此低层位夹层水分上升到土柱表层的时间主要由 3 部分构成：水分在夹层以下尾矿、夹层中、夹层以上尾矿中的时间．对于中层位夹层，柱 B，E，H 中水分停滞在夹层上界面的时间分别为 4.0，9.0，12.0 min；而夹层在高层位的柱 C，F，I 中，水分停滞在夹层上界面的时间则为 18.0，26.0，34.0 min，毛细屏障作用效果逐渐显著，夹层越厚，水分停滞时间越长，水分上升到夹层上界面时夹层的含水量越大，夹层的导水率也越大，导致水分在夹层中运移的时间变长．尽管夹层厚度的增加会使毛细水在夹层上部尾矿中运移的距离缩短，但会导致其穿过夹层后夹层的导水率降低，从而使毛细水在较短距离尾矿中运移的时间明显大于夹层厚度较小时在较长距离尾矿中运移的时间．因此，与厚度较小的夹层相比，厚度较大的夹层土柱中水分在夹层上界面的滞留时间更长，到达尾矿柱表层的时间也更长．

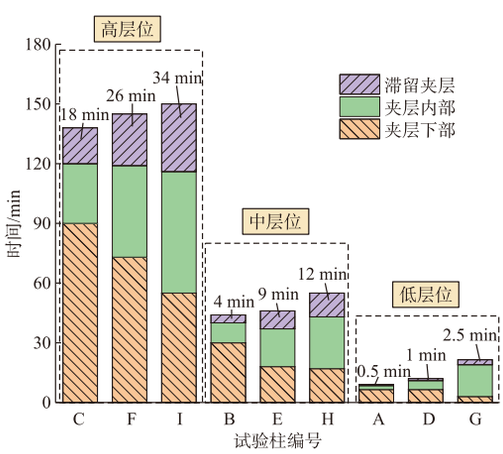


图 10　毛细水上升阶段的时间分布

Fig. 10　Time distribution of the capillary water rise phase

2）当厚度相同而层位不同时，与低层位夹层相比，中、高层位夹层中水分在下层尾矿中运移的时间、穿越夹层的时间、夹层上界面滞留的时间都会增加，对比图 10 中各柱体水分上升时间，低层位夹层中水分在各个阶段的运移时间均小于中、高层位夹层，低层位夹层对水分的滞留时间小于 5 min，中层位夹层最多可以使水分滞留在土-砂界面处超过 10 min，而高层位夹层则能使水分滞留时间超 30 min．对于后续水分在夹层以上尾矿中运移的时间，随着夹层厚度的增大，该时间段变

长.说明水分穿越高层位夹层尾矿后上升速度衰减更快,究其原因是水分穿越夹层上升到上部较粗粒径的尾矿中,夹层导水率变低,所以,毛细水穿越夹层直至上升到土柱表层的过程,也是细粒夹层对毛细水上升影响较为显著的部分.

4 结 论

1)层状尾矿中毛细水上升高度随时间变化呈前期快速上升、中期缓慢上升和后期平稳的特点.不同层位夹层对毛细水运移影响显著,其中高位夹层柱体中毛细水的上升高度最大,中位夹层次之,低位夹层最小.

2)在相同层位条件下,毛细水穿越夹层所需时间随夹层厚度的增加而延长.对于中、高层位夹层的尾矿毛细水上升高度曲线中普遍表现出明显的"平区"特征,且夹层相对位置越高,厚度越大,"平区"越长,穿越夹层所需时间越长,后续上升速度越小.

3)毛细水上升过程中水分会优先存储在夹层内部,夹层的含水率高于其上、下层尾矿的含水率.同一层位的夹层,厚度越大,含水率越高,低位夹层尾矿含水率范围为17.98%~20.93%,中位夹层尾矿含水率范围为17.59%~20.44%,高位夹层尾矿含水率范围为17.17%~20.32%.

4)夹层对其上、下部尾矿毛细水运移过程具有显著调控作用.当毛细水上升至夹层的下部界面时,因细粒夹层具有较强的基质吸力,水分会保持较快的速度进入夹层中;当毛细水抵达夹层的上界面时,因毛细屏障作用阻碍水分继续向上迁移,具有明显的时间阻滞效应,随着毛细水在夹层中的不断累积,最终穿透夹层进入上部尾矿.

5)本文所述工作聚焦于单轮的毛细吸-释水试验过程,揭示了非均质尾矿结构对毛细水迁移的调控机制.后续研究拟在此基础上开展多轮干湿循环作用下的毛细吸-释水试验,以探究循环累积效应对水分迁移路径、平衡高度及介质含水率的影响.

参考文献:

[1] 段 伟,赵泽宁,蔡国军,等.尾矿生态脆弱区场地测试技术与土工参数评价方法研究进展[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(4):1001-1016.
DUAN Wei, ZHAO Zening, CAI Guojun, et al. A review of site testing technology and geotechnical parameter evaluation method in tailings ecological fragile area [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(4): 1001-1016.

[2] 张 村,高敬宜,吴润泽,等.含水饱和度影响下砂岩单轴压缩破碎特征及其弱化机理[J].中国矿业大学学报,2024,53(6):1117-1131.
ZHANG Cun, GAO Jingyi, WU Runze, et al. Weakening mechanism and fragmentation characteristics under uniaxial compression of sandstone with different saturations[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1117-1131.

[3] 席雅允,刘娟红,程立年.铁尾矿粉混凝土在荷载与硫酸盐干湿循环耦合作用下的性能劣化机理[J].工程科学学报,2024,46(8):1358-1369.
XI Yayun, LIU Juanhong, CHENG Linian. Mechanism of performance deterioration of iron tailing powder concrete under the coupling effect of load and sulfate dry-wet cycle[J]. Journal of Engineering Science, 2024, 46(8): 1358-1369.

[4] LONG D Y, LI C H, HU Y Y, et al. Investigation on the prevention and treatment measures of seepage failure of the fine-grained tailings dam: A case of iron tailings reservoir in China[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41(2): 875-887.

[5] 张鹏宇,马 砺,石新慧,等.基于时序优化长短期记忆网络的采空区环境多参数预测[J].中国矿业大学学报,2025,54(3):653-666.
ZHANG Pengyu, MA Li, SHI Xinhui, et al. Multi-parameter prediction of goaf environment based on time-series optimized long short-term memory network [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 653-666.

[6] HUANG X Q, SUN Z H, ZHAO Y H, et al. Zero-carbon inertization processes of hazardous mine tailings: Mineral physicochemical properties, transformation mechanism, and long-term stability[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 469, 133882.

[7] LIU D, LIAN M J, LU C W, et al. Effect of the lenticles on moisture migration in capillary zone of tailings dam[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(8): 1036-1045.

[8] WANG F, LI W, YU P J, et al. Research on the static liquefaction failure of upstream tailings dams under continuous discharge conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 176, 106785.

[9] 王中翰,柴金义,张 宏.层状构造土体中毛细水上升的试验研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2021,52(2):192-197.
WANG Zhonghan, CHAI Jinyi, ZHANG Hong. Experimental study on the rise of capillary water in lay-

ered soil[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2021, 52(2): 192-197.

[10] CHEN Q L, ZHANG C, YANG C H, et al. Strength and deformation of tailings with fine-grained interlayers[J]. Engineering Geology, 2019, 256, 110-120.

[11] ZHANG H, LI Q M, WANG J C, et al. The impact of lenses on the seepage failure of tailings dam[J]. Plos One, 2024, 19(8): e0305425.

[12] 刘　迪,卢才武,连民杰,等.基于粒径效应影响的尾矿毛细特性试验[J].中国有色金属学报,2020,30(11):2746-2757.
LIU Di, LU Caiwu, LIAN Minjie, et al. Experiment on capillary characteristics of tailings based on particle size effect[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(11): 2746-2757.

[13] 董　斌,张喜发,李　欣,等.毛细水上升高度综合试验研究[J].岩土工程学报,2008(10):1569-1574.
DONG Bin, ZHANG Xifa, LI Xin, et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(10): 1569-1574.

[14] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等.压实红黏土水分传输的毛细效应与数值模拟[J].岩土力学,2010,31(7):2289-2294.
TAN Yunzhi, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Capillary effect of moisture transfer and its numerical simulation of compacted laterite soil[J]. Rock and Soil Mechanies, 2010, 31(7): 2289-2294.

[15] 田升奎,刘观仕,赵青松,等.基于图像RGB信息测试湿度场技术的风积沙毛细水上升试验研究[J].岩土力学,2023,44(9):2525-2536.
TIAN Shengkui, LIU Guanshi, ZHAO Qingsong, et al. Experimental study of capillary water rising in aeolian sand using a moisture field testing technique based on image RGB information[J]. Rock and Soil Mechanies, 2023, 44(9): 2525-2536.

[16] 沈宇鹏,曹　权,李　丹,等.基于改进溶质吸力方程的含盐土毛细水迁移规律研究[J].铁道学报,2024,46(7):135-142.
SHEN Yupeng, CAO Quan, LI Dan, et al. Study on capillary water rise in saline soils based on improved solute suction equation[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(7): 135-142.

[17] PENG F, SUN D A, CHEN B, et al. Effective approach to predict soil-water retention curve of bentonites considering adsorption and capillarity[J]. Journal of Hydrology, 2024, 641, 131799.

[18] ZANDARIN M T, OLDECOP L A, RODRIGUEZ R, et al. The role of capillary water in the stability of tailing dams[J]. Engineering Geology, 2009, 105(1): 108-118.

[19] 尹光志,张千贵,魏作安,等.孔隙水运移特性及对尾矿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 Guangzhi, ZHANG Qiangui, WEI Zuoan, et al. Experimental study of migration characteristics of porewater and its effect on meso-structure of tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 71-79.

[20] 张志军,李亚俊,刘玄钊,等.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 Zhijun, LI Yajun, LIU Xuanzhao, et al. Rising law of capillary water in tailings dam of metal mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1345-1351.

[21] 章求才,田亚坤,张志军,等.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):1016-1022.
ZHANG Qiucai, TIAN Yakun, ZHANG Zhijun, et al. Effects of temperature and air pressure on the capillary water rise in a metal mine tailings dam[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(5): 1016-1022.

[22] JIN S L, CHEN C , SU Z H, et al. Dynamic response and stability analysis of tailings storage facilities under seismic waves[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2025, 25(4): 3839-3855.

[23] 颜荣涛,徐玉博,颜梦秋.含水合物土体的土水特征曲线及渗透系数[J].岩土工程学报,2023,45(5):921-930.
YAN Rongtao, XU Yubo, YAN Mengqiu. Soil-water characteristic curve and permeability of hydrate-bearing soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 921-930.

[24] 张　昭,程靖轩,刘奉银,等.基于颗粒级配参数描述砂土持水及非饱和强度特性的土壤转换函数[J].水利学报,2020,51(4):479-491.
ZHANG Zhao, CHENG Jingxuan, LIU Fengyin, et al. Pedotransfer functions to describe water retention and unsaturated strength behaviors of sandy soils based on particle size parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 479-491.

[25] CHEN W W, JIA B B, SHAN X K, et al. Preventing the secondary salt deterioration in the repaired

area of basal erosion of earthen sites based on capillary barrier effect[J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130168.

[26] GAO C, YE W M, LU P H, et al. An infiltration model for inclined covers with consideration of capillary barrier effect[J]. Engineering Geology, 2023, 326, 107318.

[27] YAN C G, WAN Q, XU Y, et al. Experimental study of barrier effect on moisture movement and mechanical behaviors of loess soil[J]. Engineering Geology, 2018, 240, 1-9.

[28] 史文娟,沈 冰,汪志荣,等.层状土壤毛管水最大上升高度分析[J].干旱地区农业研究,2007(1):94-97.
SHI Wenjuan, SHEN Bing, WANG Zhirong, et al. Maximum height of upward capillary water movement in layered soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007(1): 94-97.

[29] 郝 瑞,施 斌,曹鼎峰,等.层状土毛细水上升过程中Lucas-Washburn模型评价及修正[J].水文地质工程地质,2018,45(6):84-92.
HAO Rui, SHI Bin, CAO Dingfeng, et al. Evaluation and modification of the Lucas-Washburn model during capillary water rising in the layered soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 84-92.

[30] ZHAO Z H, LUO Z J, SUN H J, et al. Capillary rise in layered soils [J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3374-3374.

[31] 王强民,赵 明,彭鸿杰,等.旱区不同层状结构土壤的水分运移过程与模拟[J].水文地质工程地质,2023,50(4):84-94.
WANG Qiangmin, ZHAO Ming, PENG Hongjie, et al. Water transport process and simulation of layered soils with different configurations in an arid region [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 84-94.

[32] 汪顺生,翟士旭,傅渝亮,等.含砂层层位及厚度变化条件下层状土上升毛管水运动特性研究[J].灌溉排水学报,2019,38(11):49-57.
WANG Shunsheng, ZHAI Shixu, FU Yuliang, et al. Study on the variation characteristics of rising capillary water of layered soil under variation of sand layer and thickness [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 49-57.

[33] LIU D, LI Z Y, LU C W, et al. Experimental study on multi-scale migration characteristics of capillary water in tailings [J]. Thermal Science, 2024, 28(3B): 2657-2668.

[34] ZHANG Q Y, CHEN W W, WU G C, et al. Effect of PVA-treated soil on water-salt capillary rise in loess soil: Soil column experiment[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127806.

[35] 汪林志,高明中,蔡 武,等.废弃矿井抽水蓄能巷道衬砌混凝土孔渗特性研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(6):1185-1197.
WANG Linzhi, GAO Mingzhong, CAI Wu, et al. Pore penetration characteristics of lining concrete for pumped storage roadways in abandoned mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1185-1197.

[36] 刘 迪,刘曜华,卢才武,等.基于GCN-LSTM的尾矿坝多点位沉降变形预测方法[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(6):236-250.
LIU Di, LIU Yaohua, LU Caiwu, et al. Multi-point settlement deformation prediction method for tailings dams based on GCN-LSTM model[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(6): 236-250.

(责任编辑 沈春妮 仝 腾)