

细粒尾矿砂渗透破坏细观结构特征研究

时悦琪, 李长洪, 龙大愚

(北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 100083, 北京)

摘要: 采用自制的小型渗透变形仪,对细粒质量分数为30%的尾矿砂进行渗透破坏特性试验,研究细粒尾矿砂在渗透破坏进程中内部的细观结构孔隙和颗粒分布的演化特征。在渗透破坏进程中,采用水头级差的方法,对试样逐级加载4级水头直至试样发生破坏,结合CT技术,对4种水头下的尾矿砂试样进行扫描,运用vg studio max 3.0和avizo9.0.1三维可视化软件对扫描后的试样数据进行三维重构,建立数字图像信息,从微观上研究尾矿砂渗透破坏后颗粒的分布及孔隙结构的细观特征变化,分析其渗透破坏微观进程,总结尾矿砂渗透破坏细观结构特征。试验结果表明:随着水头加载值增大,细粒尾矿试样表面会有细小颗粒被带出,且出水口出水浑浊,发生管涌破坏;细粒尾矿内部的细观结构试样总孔隙率逐渐增大,连通孔隙不断发育,0.075 mm以下粒径颗粒会不断地向渗流方向迁移,在试样内部形成连通的渗透破坏通道。

关键词: CT扫描;细粒尾矿砂;渗透破坏;细观结构

中图分类号: TU411.92 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004019 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0155-10



OSID 码

Meso-Structure Features of Fine Tailings Sand in Osmotic Destruction

SHI Yueqi, LI Changhong, LONG Dayu

(Key Laboratory of Ministry of Education for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The osmotic destruction characteristics of tailings sand with a fine particle content of 30% are tested on a self-made small-scale permeation deformer. The evolution features of meso-structure pores and particle distribution in the process of osmotic destruction of the fine-grained tailings are discussed. In the process of osmotic destruction, the sample is loaded with 4 stages of water heads step by step by the method of water head difference until the sample is destroyed. Adopting CT (computerized tomography) technology, the tailing sand samples under four head pressures are scanned, the vg studio max 3.0 and 3D avizo 9.0.1 visualization softwares are used to reconstruct the scanned sample data in three dimensions, and the distribution of particles and the mesoscopic changes of pore structure are investigated microscopically with the newly established digital image information after tailings sand osmotic failure. The microscopic process of osmotic destruction and the meso-structural features of tailings sand infiltration failure are analyzed and concluded. It is shown that fine particles are taken out of the sample surface with the increasing water head pressure, the water at the outlet gets turbid and the soil is destroyed. The total porosity of the meso-structure sample of the fine tailings gradually increases, the connected pores continue to develop, and the particles with diameters smaller than 0.075 mm

收稿日期: 2019-11-22。 作者简介: 时悦琪(1989—),男,博士生;李长洪(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFC0804609)。

网络出版时间: 2019-12-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191212.1652.008.html>

continuously migrate along the seepage direction, forming a connected percolation damage channel inside the sample.

Keywords: CT scanning; fine-grained tailings sand; osmotic destruction; meso-structure

尾矿砂是将矿石粉碎选别后所残余的有用成分含量低、当前经济技术条件下不宜进一步分选的固体废弃材料,可作为修筑尾矿坝的原材料,是一种人造三相散体介质,具有特殊的结构特征及物理力学性质^[1-2]。目前,尾矿砂颗粒粒径呈现越来越细的趋势^[3]。细粒尾矿的颗粒粒度很小,比表面积大,反应活性也高^[4],因而相比一般尾矿来说,细粒尾矿富集,极易导致尾矿坝出现透镜体或软弱夹层。同时,尾矿砂作为砂土,本身强度不高,发生渗透破坏时,尾矿砂会在坝基、坝肩等薄弱处集中渗漏,在坝体内部形成空洞甚至引起坝体局部塌陷,极易引起尾矿坝的溃坝。由于细粒尾矿在力学特性上的不利特点,尾矿库的建造设计几乎没有直接利用细粒尾矿来充填的,而是粗细相结合来填充,或采取工程措施确保尾矿坝坝体的稳定性^[5-7]。

国内外学者对于天然土体渗透破坏方面已经开展了大量的试验研究,对尾矿砂力学特性研究方面也已取得一定成果。尹光志等研究了细尾矿砂的渗流规律^[8-9];乔兰等分析了细颗粒含量对尾矿工程性质的影响^[10];张超等研究了粒径对尾矿抗剪强度及坝体稳定性影响^[11];林雪松等^[12]研究了细尾矿砂破坏准则;张志军等分析了尾矿颗粒沉积和粒径组成等对物理力学性质和坝体稳定性的影响^[13]。但是,上述研究多数是对尾矿砂宏观力学特性进行探讨,对细微观结构的变形演化特征与力学行为的研究较少^[14-18]。高分辨率 X 射线计算机断层扫描(micro-CT)已被广泛用作无损技术,可以进行三维成像并分析物体的内部特征^[19]。该技术已经广泛应用于岩石和土体等方面的研究,但对尾矿砂这种特殊土体的应用几乎空白。

本文以福建马坑细粒尾矿为研究对象,采用自制的小型渗透变形仪器,利用 CT 扫描技术,实现细粒尾矿的细观结构三维重构。采用水头级差方法模拟细粒尾矿渗透破坏进程,分析细粒尾矿在渗透破坏过程中内部细观结构空隙及颗粒的变化特征,总结细粒尾矿的细观渗透破坏规律。

1 试验尾矿砂材料

试验用尾矿砂材料均为福建马坑铁尾矿库现场取样。使用激光粒度仪进行筛析,得到该尾矿砂材

料的颗粒组成,其中砂粒质量分数为 69.7%,粉粒和黏粒质量分数分别为 20.71%和 10.59%,其级配曲线见图 1。由图 1 可知,小于 0.075 mm 的细粒的质量分数在 15%~50%之间,按照《土工试验规程》(SL237—1999)中砂类土的分类,定名为粉土质砂(SM)。同时,该尾矿砂材料不均匀系数 C_u 为 25.5,远大于 5,说明尾矿砂中粗细颗粒大小相差悬殊,细颗粒容易填充在粗颗粒所形成的孔隙中,形成较好的骨架结构。

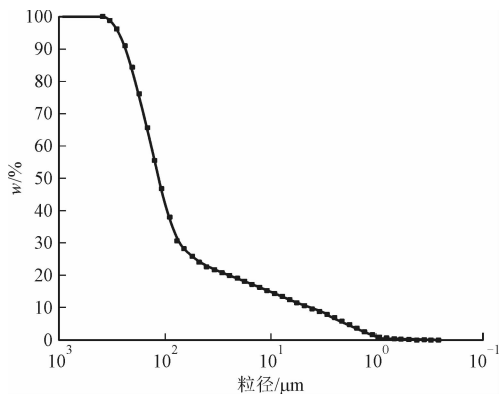


图 1 试验尾矿砂的级配曲线

2 试验装置及方案

2.1 小型渗透变形仪

采用的试验装置为一套经普通渗透仪改良的自制小型渗透变形仪,见图 2。该仪器由试验容器、加压装置、供水装置等部分组成。试验容器是高 50 mm、内径 10 mm、外径 14 mm 的透明亚克力圆管,为尾矿砂试验装填装置,方便观测试验现象。由于

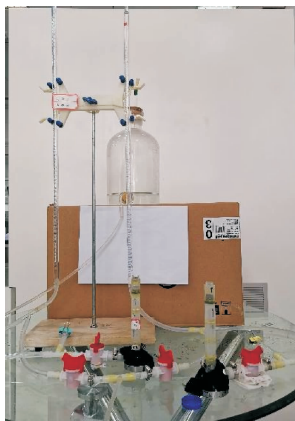


图 2 小型渗透变形仪

此次试验所用尾矿砂的粒径偏小,渗透系数较小,所以加压装置为带有毫米刻度的变水头管,供水装置为一个透明的供水瓶。

2.2 测试仪器

此次尾矿砂试样测试所用仪器为 nanoVoxel-3000 型显微 CT,见图 3。该仪器具备二级光学放大的技术特色,最高分辨率可达 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,且具备先进的无损三维成像能力和图像分析能力,能够无损地对材料内部微观结构进行三维可视化表征。

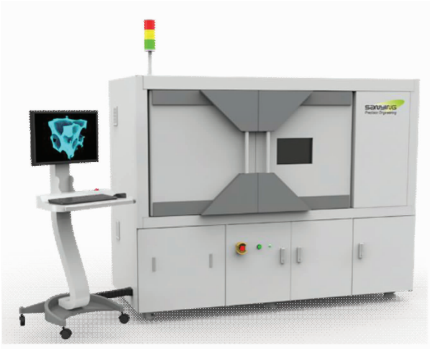


图 3 nanoVoxel-3000 型显微 CT

本次试验中 CT 的测试电压为 140 kV ,测试电流为 $70\text{ }\mu\text{A}$,曝光时间为 0.42 s ,射线源到样品的距离为 13.6 mm ,射线源到平板探测器的距离为 279.6 mm ,分辨率为 $6.16\text{ }\mu\text{m}$,即可以分辨孔径大于 $6.16\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙和尾矿砂颗粒的特征。本次试验采用锥形束连续扫描的方式,扫描速率为 $0.25(^{\circ})/\text{幅}$,共计 $1\,440$ 幅投影。将样品纵向切割 $1\,536$ 层,每层厚度为 $6.16\text{ }\mu\text{m}$,最后可以获得 $1\,536$ 张 $1\,800\times 1\,800$ 像素的二维切片图。本文尾矿砂试样 CT 扫描的参数见表 1。

表 1 尾矿砂试样 CT 扫描参数

测试电压 /kV	测试电流 / μA	曝光时间 /s	分辨率 / μm
140	70	0.42	6.16
像素数		射线源到样品 的距离/mm	射线源到平板探 测器的距离/mm
$1\,800\times 1\,800\times 1\,536$		13.6	279.6

2.3 试验方法及过程

为了得到尾矿砂渗透破坏的过程情况,试验采用逐级增加水头加载的方法来模拟。

根据已经测得细粒质量分数为 30% 的尾矿砂试样的临界渗透破坏水头值,将试验加载的水头分为 4 个等级。为方便对比试样渗透破坏前后的细观

特征,将前 3 级设为渗流未发生破坏的水头值,第 3 级为试样临界渗透破坏水头值,第 4 级为渗流破坏后的水头值。每级加载稳定后,对试样卸压进行 CT 扫描,见图 4,得到试样内部细观渗流表征,扫描后继续增加渗流水头到下一级水头值。根据记录的试验现象,试样每级加载水头值分配如表 2 所示。

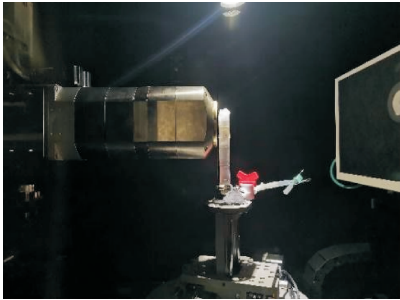


图 4 尾矿砂试样 CT 扫描

表 2 试样各级水头加载值

水头级别	水头加载值/cm
1 级	29.0
2 级	37.0
3 级	39.0
4 级	42.0

在试验过程中,注意观察试样表面是否发生水浑浊情况、冒气泡、细颗粒的跳动、试样表面是否有隆起或升高、试样内部是否出现断层等试验现象^[20]。当渗流平均速度突然增大且不稳定,或管壁发生集中渗流时,停止试验。

根据前期预试验数据评估,设计本次 CT 扫描试验的预加载每级水头值,并在试验过程中,需要注意观察试样表面是否发生水浑浊、冒气泡、细颗粒的跳动,试样表面是否有隆起或升高,试样内部是否出现断层等试验现象,且随时记录试验现象,如表 3 所示。

表 3 细粒质量分数 30% 尾矿砂的渗透破坏现象

水头 级别	水头加载 值/cm	试验现象
1 级	0~29	水流速度均匀,随水头增加渗流速度逐渐增加,无细颗粒跳动
2 级	29~37	水流速度增加,尾矿砂试样表面有轻微顶托现象,出现细颗粒跳动
3 级	37~39	流速急剧增加,尾矿砂试样表面明显浑浊,可见明显细颗粒跳动
4 级	39~42	流速急剧增加,渗流非常浑浊,试样完全破坏

根据试验现象,判断出试样发生管涌型渗透破坏。

3 试验结果及分析

3.1 细粒尾矿砂 CT 扫描三维重构

由 CT 扫描生成的数据上下部分切片产生锥影,影响后期的三维重构及孔隙结构的定量表征,因此需要在 vg studio max 3.0 可视化软件中对 CT 层数裁剪,得到 1 000 层 1 800×1 800 像素的二维切片图,再导入 avizo 软件中三维重构进一步分析。采用锥形束扫描得到的尾矿砂试样二维切片图像会受到各种类型系统噪声和伪影的影响,需要通过局部均值滤波器对获得的灰度图像进行滤波去噪^[21]。再通过 avizo 软件有效去除伪影,且通过该软件的迭代重建算法将扫描的数据执行重建,得到 1~4 级水头下尾矿砂试样三维图,见图 5。然后,按照常用的 Otsu 算法进行图像分割处理^[22],再对灰度图像二值化。最后,通过 avizo 软件提取数据体中的三维孔隙结构和尾矿砂颗粒结构,从微 CT 图像生成孔隙及尾矿砂颗粒空间排列的三维孔隙及尾矿砂颗粒网络模型。

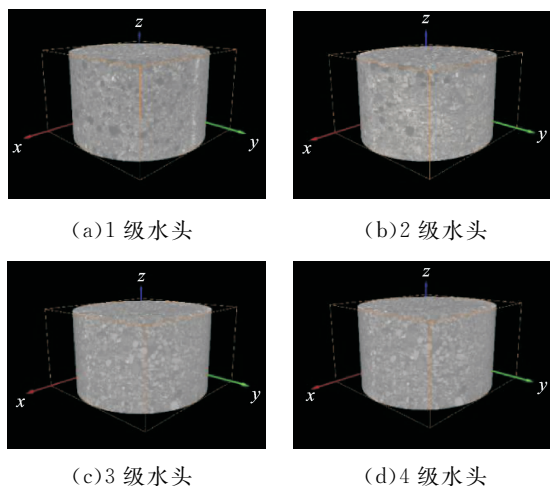


图 5 1~4 级水头下尾矿砂试样三维图

3.2 孔隙结构变化定量表征

在由微米 CT 扫描得到的三维断层图像的二维切片图中,水和空气对应于低灰度值,尾矿砂颗粒对应于高灰度值,因此能够区分各级水头下尾矿砂试样中孔隙和尾矿砂颗粒的分布情况。通过 avizo 软件对裁剪后的数据体阈值分割后二值化,得到 4 种不同的尾矿砂试样孔隙结构,如图 6 和图 7 所示。从图 7 可获得孔隙在水头逐级增加过程中的三维展布特征,可对特殊层数的切片进行单独提取和分析。

3.2.1 逐层孔隙率变化特征 通过 avizo 软件对各级水头下尾矿砂试样的 1 000 层二维切片图逐层

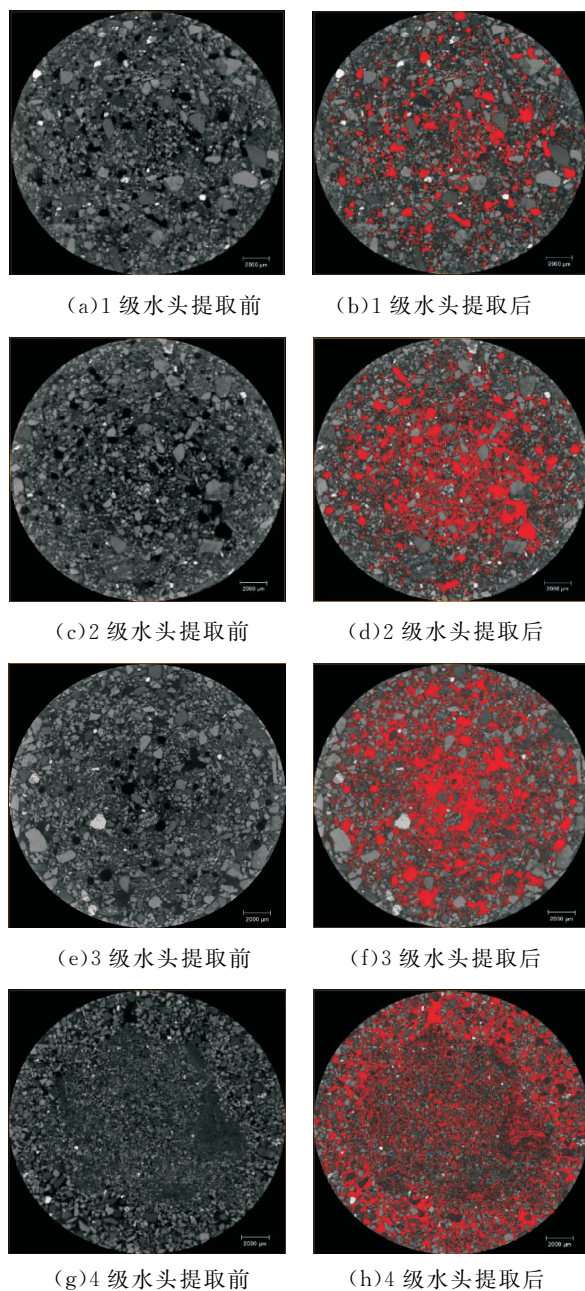


图 6 尾矿砂试样孔隙阈值分割情况

面孔隙率进行统计分析,结果见图 8 和图 9。由图 9 统计结果可知,尾矿砂试样在 1 级水头下的逐层孔隙率变化区间为 7.01%~12.03%,平均值为 9.74%;2 级水头下的逐层孔隙率变化区间为 10.17%~18.82%,平均值为 14.18%;3 级水头下的逐层孔隙率变化区间为 12.11%~21.07%平均值为 17.00%;4 级水头下的逐层孔隙率变化区间为 15.33%~23.41%,平均值为 19.78%。

从图 9 中分析可得如下结论。

(1)随着水头加载值增大,在同一区域尾矿砂试样逐层面孔隙率呈现递增的趋势,可以看出,渗流作用力的增加对尾矿砂试样逐层面孔隙率的影响明显。

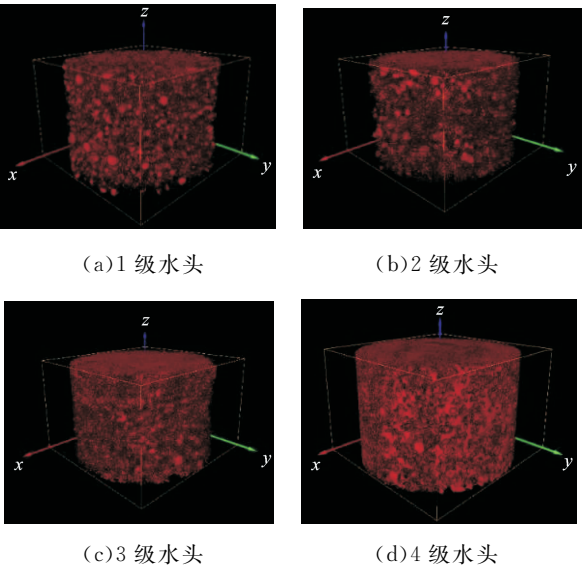


图 7 尾矿砂试样三维孔隙结构

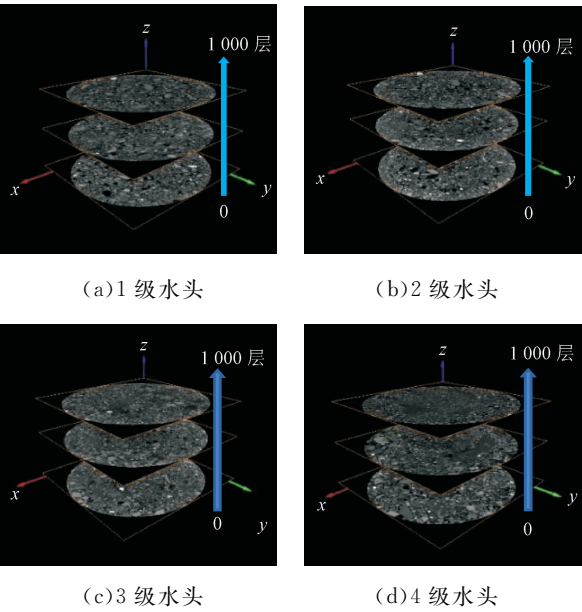


图 8 尾矿砂试样横向二维切片图

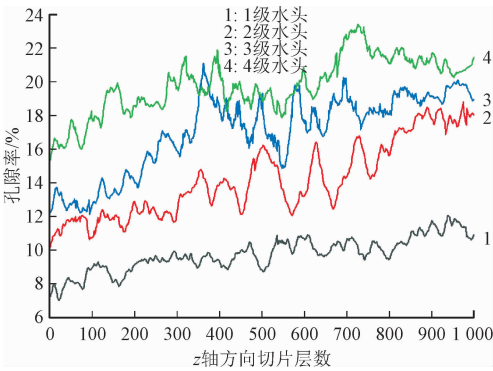


图 9 各级水头下尾矿砂逐层面孔隙率统计

(2)随着 z 轴方向切片层数的递增,各级水头下的尾矿砂试样逐层面孔隙率整体呈现出递增的趋

势,且在 1 级水头下逐层面孔隙率的变化幅度最小,2~4 级水头下逐层面孔隙率变化幅度显著增加,但 2~4 级水头之间的逐层面孔隙率变化幅度相差不大。分析其原因:随着水头加载值增大,渗流作用力越大,尾矿砂试样在 2 级水头下开始发生管涌型渗透破坏,且在 4 级水头下完全渗透破坏,发生破坏的整个过程中,尾矿砂细颗粒在粗颗粒形成的骨架中从下向上运移,将细颗粒积累在试样的上半部。

(3)在 CT 扫描细粒尾矿砂试样过程中卸载水压力,使堆积在尾矿砂试样上半部的细颗粒均匀沉降,导致细粒尾矿砂试样的下部分孔隙率普遍减小,且随着水头级差的增大,连通孔隙不断增加、孔径也不断变大,细粒含量无论从数量上还是颗粒粒径上沉降也越来越明显,造成尾矿砂试样下部分逐层面孔隙率下降也越来越明显。

3.2.2 孔隙分布表征 基于 avizo 得到的尾矿砂三维模型,可以任意方向提取二维切片,将各级水头下尾矿砂试样的三维孔隙数据还原为二维剖面,见图 10。三维尾矿砂试样结构的横、竖剖面可任意选取,具有无损、动态、定量检测等优点^[23]。

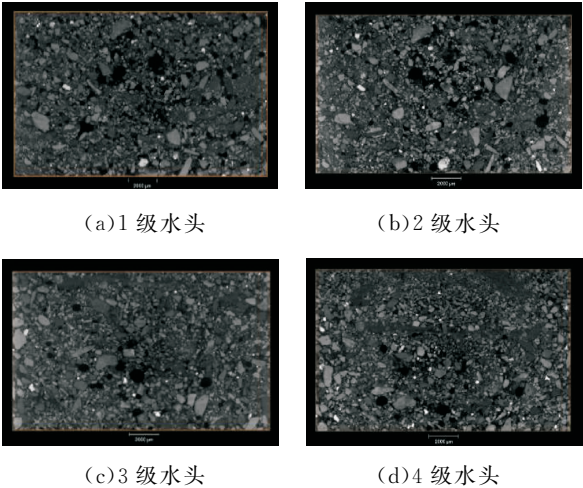


图 10 尾矿砂试样竖向二维切片图

在水头加载值逐级递增的情况下,饱和尾矿砂试样二维孔隙形态变化显著。为便于统计,将尾矿砂试样孔隙尺寸 D 分为 5 类,统计结果如表 4 所示。图 11 为逐级水头下孔隙尺寸与数量的变化。

从表 4 和图 11 中可以得出如下结论。

(1)在 1 级水头下,40~80 μm 的孔隙和大于 80 μm 的孔隙数量都比较少,分布在 0~10 μm 的孔隙数量占有比例最大。

(2)随着水头加载值的增加,孔隙尺寸和数量发生显著变化,其中尺寸在 0~10 μm 的孔隙数量快速下降,10~20 μm 的孔隙数量先缓慢增长后又减少,

表 4 细粒尾矿砂孔隙尺寸统计表

水头级别	$D/\mu\text{m}$					总孔隙数量	总连通孔隙体积/ μm^3
	[0,10)	[10,20)	[20,40)	[40,80)	≥ 80		
第 1 级	210 450	129 578	35 057	9 092	4 557	388 734	3.90×10^{10}
第 2 级	166 833	138 197	40 293	9 347	3 983	358 653	6.05×10^{10}
第 3 级	133 557	156 602	41 543	10 553	4 702	346 957	6.50×10^{10}
第 4 级	81 410	140 923	44 661	24 151	6 170	297 315	8.34×10^{10}

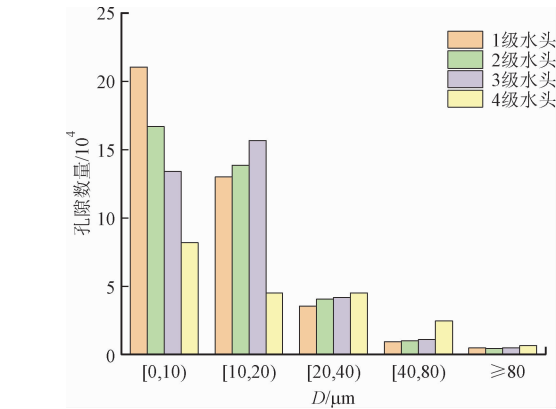


图 11 不同级别水头下孔隙数量统计情况

20~40 μm 的孔隙数量呈现增长的趋势,40~80 μm 的孔隙数量在第 4 级水头下增长明显,大于 80 μm 的孔隙数量增幅不大。这说明,在渗透力作用下,随着细粒颗粒的不断迁移,连通孔隙不断扩大,小孔隙逐渐被连通成大孔隙,尤以尺寸小于 10 μm 的小孔隙最为明显。从中可以看出,0~10 μm 的孔隙容易在渗流作用力增大时易被贯通成大于 10 μm 的孔隙,且 10~20 μm 孔隙数量始终保持在较高的比例。

3.2.3 连通孔隙体积变化 在获得尾矿砂试样三维孔隙结构的基础上,通过 avizo 软件,提取了沿渗流方向各级水头下的尾矿砂试样连通孔隙结构,并且统计了各连通孔隙的体积。图 12 为各级水头下尾矿砂试样连通孔隙结构三维展布,图 13 为各级水头下尾矿砂试样连通孔隙的体积。

由图 13 中可得以下结论。

(1)随着水头加载值逐级递增,连通孔隙从试样中心快速向四周贯通发育并逐渐充满整个试样,说明尾矿砂试样中细小颗粒随着渗流作用力的增大不断地在粗颗粒骨架中运移,扩大孔隙的连通性,且后期粗颗粒骨架产生破坏,连通孔隙的发育最为明显。

(2)随着水头加载值递增,孔隙体积从 39 nm^3 逐渐增大为 83.4 nm^3 ,且在 1 级水头到 2 级水头、3 级水头到 4 级水头下,连通孔隙体积增大明显;在 2

级水头到 4 级水头压力下,孔隙体积增大不明显。从中可以看出,连通孔隙在渗透破坏初期和完全渗透破坏时对水头压力最为敏感,其他小孔隙容易被贯通形成连通孔隙。

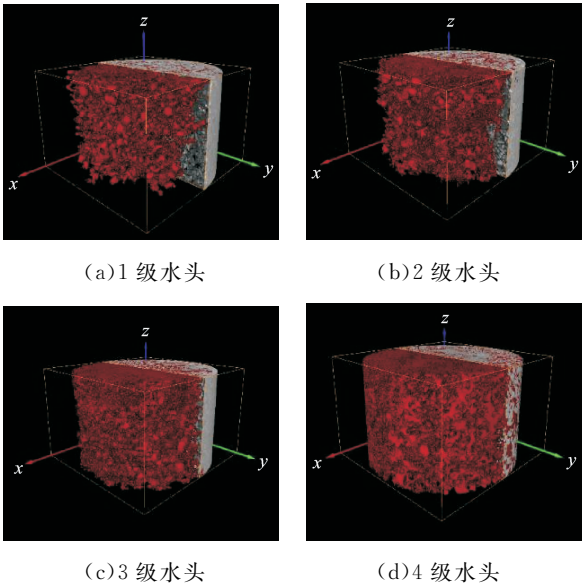


图 12 各级水头下尾矿砂连通孔隙三维结构

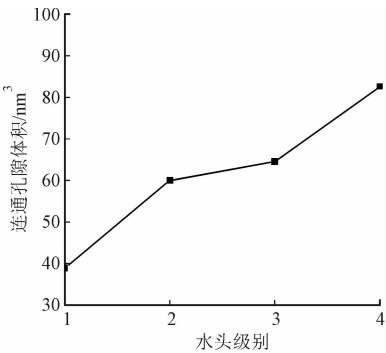


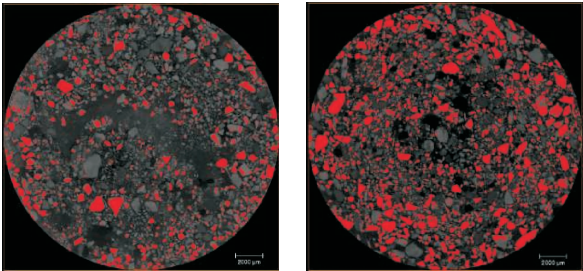
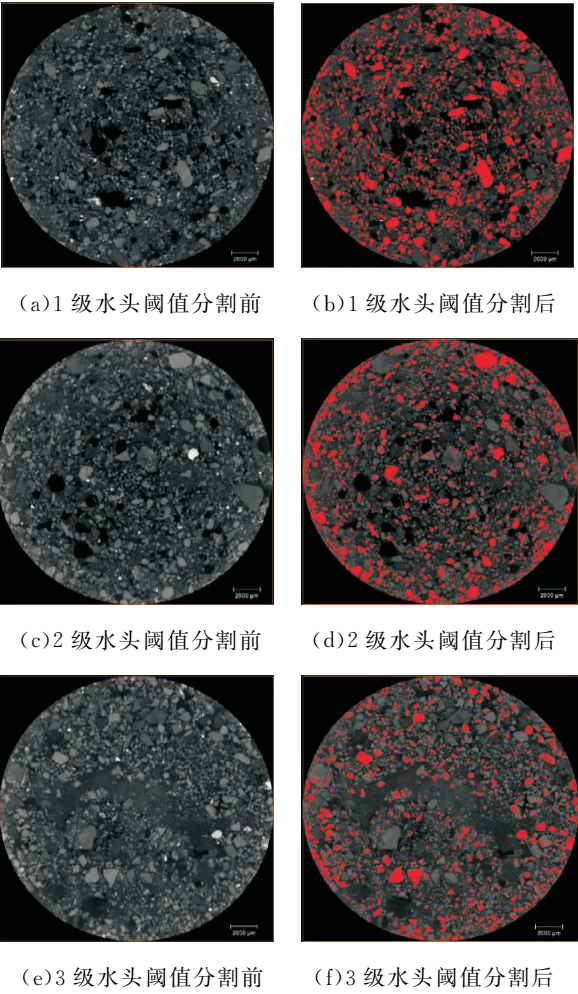
图 13 各级水头下连通孔隙体积

3.3 尾矿砂颗粒分布特征

基于 avizo 三维可视化软件,对各级水头下裁剪后的试样进行阈值分割后二值化,提取灰度值最高的尾矿颗粒,见图 14。以 200 层二维切片为一个区域,分 5 个区域共 1 000 层,对各级水头下[0,10)、[10,20)、[20,40)、[40,75) μm 粒径尾矿颗粒分布

进行统计,见表 5~8,图 15 为颗粒统计折线图。

由表 5~表 8 和图 15 可以看出,随着水头加载值增大,同一区域 0~75 μm 粒径尾矿颗粒总体呈现出沿渗流方向逐渐减少的趋势,0~75 μm 粒径尾矿颗粒在渗流作用力下不断地沿渗流方向运移。在



(g)4 级水头阈值分割前 (h)4 级水头阈值分割后
图 14 尾矿砂颗粒阈值分割情况

前 3 级水头级差中,随着水头加载值的增大,颗粒迁移越明显,且细粒尾矿的迁移的颗粒粒径不断增大,两者呈现正比关系,具体结论如下。

(1)在 1 级水头到 2 级水头下,随着渗透破坏开始发生,同一区域 0~20 μm 粒径尾矿颗粒下降明显,且在试样底层的 0~400 层之间,颗粒迁移现象显著,400 层以上颗粒下降趋势明显减弱。分析认为,试样底部有部分细颗粒迁移填充至 400 层以上孔隙空间内,且由于水头加载值较小,颗粒停留于空间内,导致试样 400 层以上空间 0~20 μm 细颗粒含量增多,较 200~400 层呈上升趋势;0~800 层试样中 20~75 μm 颗粒下降都很缓慢,说明越小粒径的尾矿在渗透破坏初期对渗流作用力越敏感,渗透破坏初期形成的渗流通道比较小,0~20 μm 颗粒粒径小,能在渗流通道中能形成良好的流动运移,而 20~75 μm 颗粒粒径较大,在孔隙通道中流动受阻;在 800~1 000 层试样上部可以看到,20~75 μm 颗粒粒径的细尾矿砂含量明显下降,说明在试样顶部由于矿砂的自重应力减小,20~75 μm 的较大颗粒在迁移过程中受阻减小,迁移作用明显。

表 5 细粒粒径为[0,10) μm 的颗粒数统计

水头级别	颗粒数				
	[0,200)层	[200,400)层	[400,600)层	[600,800)层	[800,1 000]层
1 级	26 653	20 791	17 301	17 441	18 944
2 级	19 751	14 573	14 862	15 978	19 242
3 级	16 894	14 363	13 917	13 750	16 062
4 级	18 444	15 048	14 558	14 469	12 000

表 6 细粒粒径为[10,20) μm 的颗粒数统计

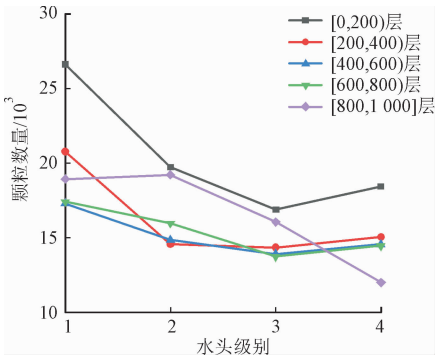
水头级别	颗粒数				
	[0,200)层	[200,400)层	[400,600)层	[600,800)层	[800,1 000]层
1 级	19 241	16 522	14 149	13 905	14 608
2 级	15 282	12 091	12 460	13 044	16 546
3 级	12 337	10 511	11 703	10 406	14 108
4 级	14 183	10 871	9 400	107 53	11 156

表 7 细粒粒径为[20~40) μm 的颗粒数统计

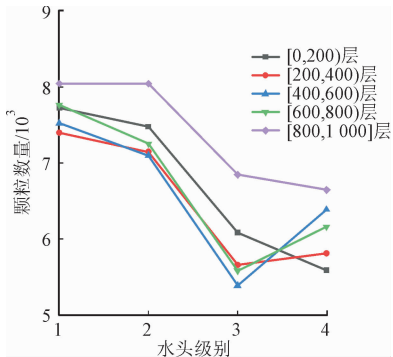
水头级别	颗粒数				
	[0,200)层	[200,400)层	[400,600)层	[600,800)层	[800,1 000]层
1 级	10 450	10 572	10 384	10 157	10 312
2 级	10 248	9 187	9 322	9 704	10 299
3 级	7 881	7 220	7 186	7 160	9 973
4 级	7 423	7 080	7 315	7 237	8 605

表 8 细粒粒径为[40,75) μm 的颗粒数统计

水头级别	颗粒数				
	[0,200)层	[200,400)层	[400,600)层	[600,800)层	[800,1 000]层
1 级	7 721	7 394	7 518	7 758	8 038
2 级	7 472	7 144	7 095	7 247	8 036
3 级	6 086	5 661	5 388	5 582	6 844
4 级	5 591	5 814	6 387	6 161	6 644

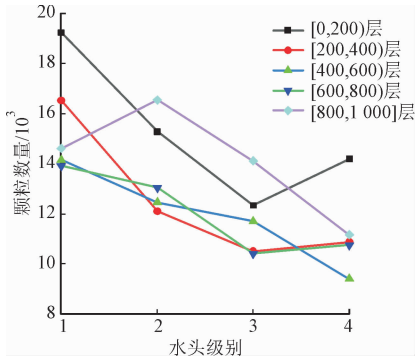


(a)[0,10) μm 颗粒

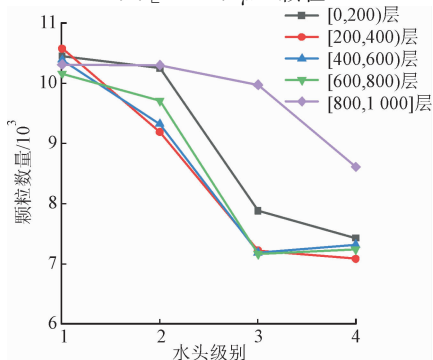


(d)[40,75] μm 颗粒

图 15 各级水头下不同粒径尾矿颗粒数量分布情况



(b)[10,20) μm 颗粒



(c)[20,40) μm 颗粒

(2)从 2 级水头到 3 级水头,0~800 层试样中 0~10 μm 颗粒下降趋势变得缓慢,而 20~75 μm 颗粒开始迅速下降。从中可以看出:在渗透破坏过程中,渗流通道和孔隙不断发展扩大,使 20~75 μm 颗粒充分流动;在 800~1 000 层试样中,由于 20~75 μm 的细粒含量在上一级水头加载中已经迁移,所以颗粒数量下降不明显,相比而言 40~75 μm 颗粒粒径的细粒尾砂迁移较 20~40 μm 的颗粒迁移现象明显,印证了细粒尾矿砂的粒径迁移与水头加载值呈现正比关系。

(3)从 3 级水头到 4 级水头,0~75 μm 颗粒总体上呈现出增长的趋势,可以看出,尾矿试样完全破坏后渗流通道和孔隙继续发展扩大,且在卸压后 CT 扫描尾矿试样时尾矿颗粒在渗流通道中沉降作用明显,说明内部形成了贯通的渗透破坏通道。

3.4 尾矿砂微观结构与渗流进程的耦合作用

结合本文试样宏观试验现象和微观结构可知:试样渗透破坏主要由细颗粒迁移所致,随着细颗粒含量

的减少,连通孔隙的体积不断增大,关系见图 16。

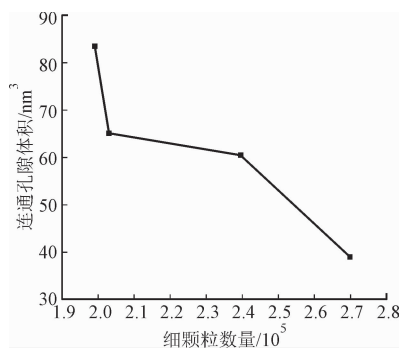


图 16 细颗粒含量与连通孔隙体积关系图

在渗流前,30%细粒尾矿砂存在一部分微小的连通孔隙结构。开始渗流时,0~20 μm 的小颗粒在渗透力的作用下,开始沿着连通孔隙进行迁移,试样内部的连通孔隙不断增大,连通孔隙直径也不断增大,此时细颗粒含量减少速度较快,连通孔隙体积增大也较快。在增大水头加载值至渗透破坏发生前,随着渗流压力增大,0~20 μm 颗粒迁移更快,20~75 μm 颗粒也开始发生迁移,但连通孔隙体积变化不大,说明内部已形成稳定的贯通渗流通道,细颗粒可以直接由渗流通道流出,

随着细颗粒的不断迁移、试样连通孔隙体积的增大,试样会发生管涌破坏。试样发生破坏后,迁移颗粒的粒径更大,迁移数量较之前会有所减少,但随着大颗粒的迁移,试样内部孔隙体积会快速增大,直至试样完全破坏。

4 结 论

本文通过对颗粒粒径小于 75 μm 、质量分数为 30%的细粒尾矿砂进行了逐级增加渗透压力的渗透破坏实验,采用 CT 扫描技术,实现细粒尾矿砂在渗透破坏过程中的细观三维重构,说明该尾矿砂发生渗透破坏主要由细粒含量的迁移导致的管涌破坏所致。在渗透破坏进程中,内部连通孔隙不断发育,逐层孔隙率不断扩大,形成贯通的渗透破坏通道。

(1)尾矿砂试样在渗流过程中细颗粒数量发生变化,渗透破坏发生主要由细粒含量迁移所致,且迁移颗粒粒径与水头加载值呈正比关系,即水头加载值越大,可迁移颗粒粒径越大。

(2)尾矿砂试样渗透破坏类型为管涌破坏。试样发生破坏后,各级粒径细颗粒沉降均匀,间接说明试样内部形成了贯通的渗透破坏通道。

(3)管涌型渗透破坏试样在渗流过程中,随着水头加载值增大,细颗粒不断向渗流方向迁移,内部逐

层孔隙率不断增大,连通孔隙直径也不断变大,连通孔隙体积明显增大,最终经过不断发育形成贯通的渗透破坏通道,导致试样发生破坏。

参考文献:

- [1] 王昆,杨鹏,吕文生,等.尾矿库溃坝灾害防控现状及发展[J].工程科学学报,2018,40(5):526-539.
WANG Kun, YANG Peng, LÜ Wensheng, et al. Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5), 526-539.
- [2] 李长洪,卜磊,陈龙根.尾矿坝致灾机理研究现状及发展态势[J].工程科学学报,2016,38(8):1039-1049.
LI Changhong, BU Lei, CHEN Longgen. Research situation of the disaster-causing mechanism of tailing dams and its developing trend [J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(8): 1039-1049.
- [3] 于沉香,程江涛.细粒尾矿物理力学参数统计分析[J].路基工程,2015(4):95-100.
YU Chenxiang, CHENG Jiangtao. Statistical analysis of physical and mechanical parameters of fine tailings [J]. Subgrade Engineering, 2015(4): 95-100.
- [4] 张广伟,仝丽娟,李泽理.超细尾矿处理方法及开发利用探讨[J].金属矿山,2017(2):171-177.
ZHANG Guangwei, TONG Lijuan, LI Zeli. Discussion on treatment method and development and utilization of ultrafine tailings [J]. Metal Mine, 2017(2): 171-177.
- [5] 周庆云,孙健,李育红,等.几种尾矿的物理力学性质比较[J].岩土工程界,2009,12(4):38-41.
ZHOU Qingyun, SUN Jian, LI Yuhong, et al. Comparison of physical and mechanical properties of several tailings [J]. Geotechnical Engineering, 2009, 12(4): 38-41.
- [6] 潘建平,王宇鸽,宋应潞.细粒含量对高应力尾砂不排水剪切强度特性的影响[J].金属矿山,2015(9):166-169.
PAN Jianping, WANG Yuge, SONG Yinglu. Effect of fine particle content on undrained shear strength characteristics of high stress tailings [J]. Metal Mine, 2015(9): 166-169.
- [7] 何新宁.细粒尾矿料力学特性及其筑坝静动力分析[D].西安:西安理工大学,2017:2-4.
- [8] 尹光志,魏作安,万玲,等.细粒尾矿堆坝加筋加固模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(6):1030-1034.
YIN Guangzhi, WEI Zuo'an, WAN Ling, et al. Ex-

- perimental study on reinforcement model of fine tailings dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1030-1034.
- [9] 尹光志, 敬小非, 魏作安, 等. 粗、细尾砂筑坝渗流特性模型试验及现场实测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010(s2): 3710-3718.
- YIN Guangzhi, JING Xiaofei, WEI Zuo'an, et al. Model test and field test study on seepage characteristics of crude and fine tail sand dams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(s2): 3710-3718.
- [10] 乔兰, 屈春来, 崔明. 细粒含量对尾矿工程性质影响分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 923-927, 945.
- QIAO Lan, QU Chunlai, CUI Ming. Analysis of influence of fine particle content on engineering properties of tailings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 923-927, 945.
- [11] 张超, 马昌坤, 杨春和, 等. 粒径对尾矿抗剪强度及坝体稳定性影响 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增1): 145-148.
- ZHANG Chao, MA Changkun, YANG Chunhe, et al. Effects of particle diameter on shear strength of tailings and stability of tailings dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(s1): 145-148.
- [12] 林雪松, 陈殿强, 王来贵, 等. 细尾矿砂破坏准则的测试与安全影响 [J]. 中国安全生产科学技术, 2017(11): 50-55.
- LIN Xuesong, CHEN Dianqiang, WANG Laigui, et al. Test and safety impact of fine tailings sand damage criterion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017(11): 50-55.
- [13] 张志军, 李亚俊, 刘玄钊, 等. 基于颗粒级配均匀设计的尾矿坝中毛细水上升规律研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2014(6): 45-50.
- ZHANG Zhijun, LI Yajun, LIU Xuanzhao, et al. Research on the rising law of capillary water in tailings dam based on particle grading uniform design [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014(6): 45-50.
- [14] 张千贵, 王雅梦, 李广治, 等. 尾矿坝变形细观力学术理的颗粒流数值模拟 [J]. 重庆大学学报, 2015, 38(3): 71-79.
- ZHANG Qiangui, WANG Yameng, LI Guangzhi, et al. Numerical simulation of particle flow in meso-mechanical mechanism of tailings dam deformation [J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(3): 71-79.
- [15] 张铎, 刘洋, 吴顺川, 等. 基于离散-连续耦合的尾矿坝边坡破坏机理分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1473-1482.
- ZHANG Duo, LIU Yang, WU Shunchuan, et al. Failure mechanism analysis of tail dams based on coupled discrete and continuous coupling method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1473-1482.
- [16] 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 Zuo'an, et al. Experimental study on pore water migration characteristics and mechanism of fine structure of tailings [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 71-79.
- [17] BU Lei, ZHOU Hanmin, LI Changhong. Three-dimensional stability analysis of fine grained tailings dam with complex terrain by means of up-stream method electronic [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016(10): 3905.
- [18] 谢羽佳. 尾矿坝渗透破坏特性试验研究 [D]. 成都: 西南科技大学, 2015: 7-8.
- [19] ZHANG P H, LEE Y I, ZHANG J L. A review of high-resolution X-ray computed tomography applied to petroleum geology and a case study [J]. Micron, 2019, 124: 102702.
- [20] 韩峰. 陕北两种筑坝土料渗透破坏机理的对比试验研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 14-15.
- [21] SAXENA N, HOFMANN R, ALPAK F O, et al. Effect of image segmentation & voxel size on micro-CT computed effective transport & elastic properties [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 972-990.
- [22] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [23] 刘治清, 宋晶, 杨玉双, 等. 饱和细粒土固结过程的三维孔隙演化特征 [J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 931-940.
- LIU Zhiqing, SONG Jing, YANG Yushuang, et al. Three-dimensional pores evolution characteristics during consolidation process of saturated fine-grained soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 931-940.

(编辑 杜秀杰)