**编者按：**《岩土力学》已于 2019 年入选“中国科技期刊卓越行动计划”梯队期刊建设项目，以此为契机，《岩土力学》期刊社决定自 2021 年起开辟“岩土力学卓越论坛”栏目，主要刊登我国岩土力学与工程界著名专家学者及其研究团队的科研成果和重大项目研究新进展，进一步推动岩土力学与工程领域的学术交流，促进中国岩土力学与工程的健康可持续发展。本期推出杨春和院士的撰文作为“岩土力学卓越论坛”开篇之作，以飨读者。

岩土力学卓越论坛

**DOI：**10.16285/j.rsm.2020.1653

# 大型高尾矿坝灾变机制与防控方法

杨春和[1]，张 超[1]，李全明[2]，于玉贞[3]，马昌坤[1]，段志杰[3]

（1. 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；2. 中国安全生产科学研究院，北京 100012；3. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084）



**摘 要：**大型高尾矿库隐患治理是“十三五”期间遏制重特大事故的重要任务和重点工程之一。高应力下尾矿材料的细观结构和宏观力学特性演化、大型尾矿坝沉积规律及复杂条件下高尾矿坝的劣化理论是其中的关键问题。为揭示尾矿细观结构特性，对尾矿材料进行了光学显微镜观察、电镜扫描和 CT 扫描处理，建立了尾矿材料的三维重构模型；为揭示高压下尾矿材料的力学特性，对尾矿进行了高应力三轴试验、高应力渗透固结联合试验，研究了高应力下尾矿材料的强度、渗透和固结特性；为揭示尾矿的沉积特性，进行了尾矿材料的大型模型试验，得到了矿浆流动、淤积形态、尾矿料物理力学性质的空间分布以及夹层结构在空间内的分布规律；为揭示高尾矿坝的失稳机制，通过理论分析与数值模拟，对高压下尾矿的强度准则进行了讨论，高尾矿坝的稳定性分析建议使用强度折减法；为揭示尾矿的排渗设施淤堵机制与服役性能，进行了尾矿−土工布渗透试验以及微观观测，发现细粒尾矿更容易产生物理淤堵，且化学淤堵程度与溶液中离子的种类和浓度有关；为了推进尾矿坝风险管控技术，搭建了尾矿库重大风险评估监测系统平台，以便实现尾矿库基础数据的提取、实时风险预警等智能化功能。通过以上坝体劣化理论研究、溃坝灾害评估与预警，提升了我国大型高尾矿库筑坝与灾害防控水平。

**关 键 词：**高尾矿坝；灾变机制；防控方法；三维重构；力学特性；稳定性；监测系统

**中图分类号：**TD 326 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2021) 01－0001－17

# Disaster mechanism and prevention methods of large-scale high tailings dam

YANG Chun-he[1], ZHANG Chao[1], LI Quan-ming[2], YU Yu-zhen[3], MA Chang-kun[1], DUAN Zhi-jie[3]

（1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China; 3. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China）

**Abstract:** The control of hidden hazards of large-scale high tailings ponds is an important task and key project to contain major accidents during the "13th Five-Year Plan" period. Key issues closely related to this research topic are the evolution of the meso-structure and macro-mechanical properties of tailings materials under high stress, the sedimentary regularity of large tailings dams, and the theory of degradation of high tailings dams under complex conditions. In order to reveal the meso-structure characteristics of the tailings, the tailings materials can be screened by optical microscope, electron microscope scanning, and CT scanning. In this paper, a three-dimensional reconstruction model of the tailings materials is established. In order to reveal the mechanical properties of tailings materials under high pressure, a high-stress triaxial experiment and high-stress conjoined

收稿日期：2020-09-10 修回日期：2020-11-10
基金项目：国家重点研发计划（No. 2017YFC0804600）。
This work was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFC0804600).
第一作者简介：杨春和，男，1962 年生，中国工程院院士，博士，研究员，博士生导师，现任中国科学院武汉岩土力学研究所学术委员会主任，国家杰出青年基金获得者、长江学者奖励计划特聘教授、第 8 届中国工程院光华工程技术奖获得者、973 首席科学家、全国五一劳动奖章获得者。长期从事尾矿坝灾变机制与防空技术的研究工作，是我国尾矿坝灾变防控领域的引领者之一。E-mail: chyang@whrsm.ac.cn

consolidation permeability tests are carried out, and the strength, permeability and consolidation characteristics of the tailings materials under high stress are analyzed. To reveal the sedimentary characteristics, a large-scale model test of tailings materials is carried out. The spatial distribution of the slurry flow, siltation form, the physical and mechanical properties of the tailings, and the spatial distribution of the sandwich structure are obtained. To reveal the failure mechanism of high tailings dams, the strength criteria of tailings under high pressure are discussed through theoretical analysis and numerical models. The strength reduction stability analysis of high tailings dams is recommended. In order to reveal the clogging mechanism and service performance of tailings drainage facilities, tailings-geotextile permeability tests and microscopic observations are carried out. Fine-grained tailings are more prone to physical blockage, and the degree of chemical blockage is related to the type and concentration of solution ions. In order to promote the risk management and control technology of tailings dams, a major risk assessment and monitoring system platform for tailings dams are put forward, which can realize the extraction of basic data of tailings dams, real-time risk warning and other intelligent functions. Through the above-mentioned research activities, the level of dam building, disaster prevention and the control of large-scale high tailings ponds in China have been substantially improved.

**Keywords:** high tailings dam; disaster mechanism; prevention methods; three-dimensional reconstruction; mechanical properties; stability; monitoring system

## 1 引 言

尾矿是由矿石磨细并选取“有用组分”后所排放的固体废弃物[1]，尾矿坝则是为了将尾矿有效储存堆筑成的坝体，是矿山生产的一种必然产物。尾矿的堆存是一个动态工程，从矿山开始的开采到最后的终结，尾矿坝一直在变化之中，包括坝体几何形状的变化、坝体高度的不断提高、体积的不断增大以及坝内渗流场应力场的变化等等[2-5]。尾矿坝的填筑必然带来占用土地和坝体安全两个问题[6]。我国由于人口众多且居住密集，70%的尾矿坝下游有人居住或有生产活动，一旦发生溃坝，将直接危及人民生命财产的安全，损失之巨、影响之大备受社会大众和政府相关部门的关注。

经统计，我国现有尾矿坝 12 655 座，其中危险病坝占 1/3，且具有的特点是数量大、新增数量多、高危险坝数量多且分布广[7]。我国尾矿坝 90%以上采用上游式筑坝方式，本身溃坝风险高。目前，尾矿坝建设选址难、审批难、费用高等问题，成为制约我国矿业和经济发展的瓶颈；尾矿坝安全问题、环境问题、生态问题突现，使政府和企业都倍感压力。

目前，尾矿坝已列为我国安全生产的 9 个重大危险源之一，是高势能“人造泥石流”源体，威胁着下游群众生命财产安全和环境生态。一旦发生事故，损失之巨、影响之大令人震惊[8]。克拉克大学的公害评定小组的研究数据表明，尾矿坝发生事故的危害，在世界的 93 种事故、公害的隐患中名列第 18 位，次于核武器爆炸、DDT（即二氯二苯基三氯乙烷）灾害，比航空失事、火灾危害更大，直接造成百人以上死亡的事故已不鲜见[9]。2008 年的山西“9·8”特别重大尾矿坝溃坝事件造成了尾砂泄流量为 26.8 万 $m^3$，水泥砂过流面积为 30.2 $hm^2$，下游 2 500 m 的厂矿和居民受灾，导致 281 人死亡、34 人受伤，是我国损失最为惨重的尾矿坝特大事故[10]。2019 年 1 月 25 日，巴西淡水河谷公司的位于 Brumadinho 的尾矿坝溃坝，导致 363 人死亡或失踪，造成了重大的人员伤亡和财产损失，并带来了严重的环境污染。随着科技的发展和管理水平的提升，尾矿坝的安全威胁稍有降低，但是随着选矿技术的发展和土地使用的制约，尾矿坝必然朝着细粒筑坝与高堆尾矿坝方向发展，可以预计尾矿坝隐患和灾害将会更加突出。

随着经济的高速发展，我国对矿产资源需求量不断增加，特别是贫矿的大量开发，导致尾矿量快速增长，出现了一批 200、300 m 的高坝[11]。尾矿坝安全属于交叉学科，在尾矿坝新型筑坝工艺、溃坝冲击与演化、健康诊断与灾害预警、防控理论及技术研究方面基础较为薄弱，尤其是在尾矿坝沉积规律与三维地质模型、溃坝启动机制与时空演化过程仿真、尾矿坝健康诊断、预警与应急处置、灾害防治技术等缺乏系统理论的支撑，严重地制约了我国矿山安全与健康方面的发展[12]。

总的来说，大型高尾矿坝灾变机制与灾害防控研究的深入开展有助于不同学科之间的交叉配合，同时提升了尾矿坝防灾减灾的认知能力，从“被动救灾”到“主动防灾”的重大转变，为实现我国矿业的可持续安全发展奠定理论基础，符合我国在工程建设、社会发展、安全意识与科技创新等方面的重大需求，具有十分重要的研究价值和显著的社会效益。

本文依托国家“十三五”重点研发计划——大型高尾矿库溃坝灾害防控关键技术研究及应用示范项目，主要介绍项目在尾矿细观结构、力学行为以及尾矿坝沉积规律、高尾矿坝失稳机制、排渗滤层化

学淤堵以及灾害防控发面的成果。

## 2　尾矿细观结构与特性

### 2.1　尾矿细观结构

图 1 为尾矿试样的显微照片，可以看出尾矿颗粒在透光性方面存在一定的区别，这说明了尾矿颗粒成分不单一，在细观角度上尾矿不能视为单一性质的材料[13]，而且不同成分的颗粒在粒径和形状方面有很大区别。

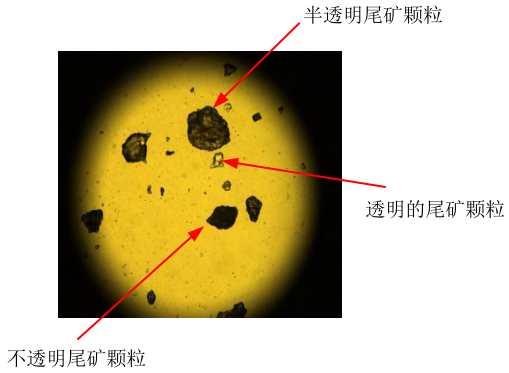
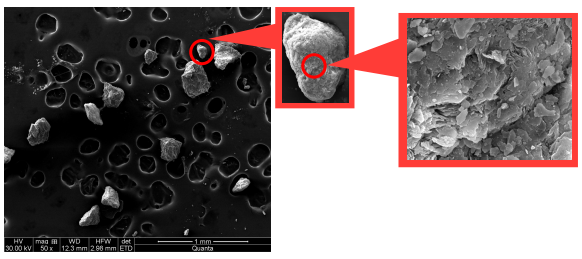
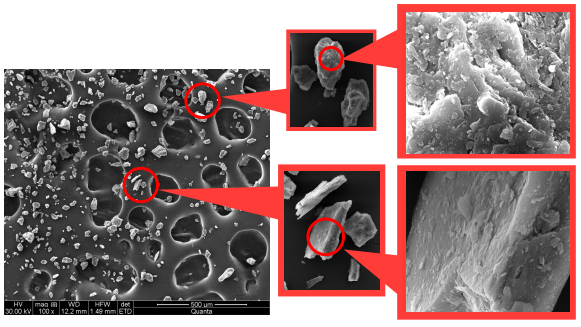



**图 1　尾矿的显微照片**
**Fig.1　Micrograph of tailings**

图 2 显示了砂粒和粉粒尾矿的电镜扫描照片。砂粒和粉粒的形态有明显区别，砂粒尾矿中粒状粒状颗粒占多数，而粉粒尾矿中除粒状颗粒外，还存在一些片状颗粒，而且砂粒尾矿表面更加粗糙。



(a) 砂粒



(b) 粉粒

**图 2　不同粒径尾矿的形态和表面形貌**
**Fig.2　The morphology and surface morphology of tailings with different particle sizes**

尾矿颗粒按图 2 观察可以分为黏土矿物型颗粒、非黏土矿物型颗粒、混合矿物型颗粒以及金属矿物型颗粒（试样中的黏土矿物主要是伊利石和绿泥石，非黏土矿物主要是石英、方解石、铁白云石长石和石膏）[14]。混合矿物型颗粒和金属矿物型颗粒占比不大，所以对黏土矿物颗粒和非黏土矿物颗粒进行了研究。图 3 为部分矿物颗粒的显微图像。从图中可以看出，黏土矿物型颗粒的棱角少，表面粗糙性不强，容易形成有明显层状特征的碎屑，形状主要为板状。而非黏土矿物颗粒的表面棱角多，颗粒强度高，形成的颗粒碎屑主要是粒状，且具有尖锐的角。



(a) 非黏土矿物颗粒　(b) 非黏土矿物颗粒碎屑　(c) 非黏土矿物颗粒形态



(d) 黏土矿物颗粒　(e) 黏土矿物颗粒碎屑　(f) 黏土矿物颗粒形态

**图 3　黏土矿物颗粒和非黏土矿物颗粒的显微图像**
**Fig.3　Microscopic images of clay mineral particles and non-clay mineral particles**

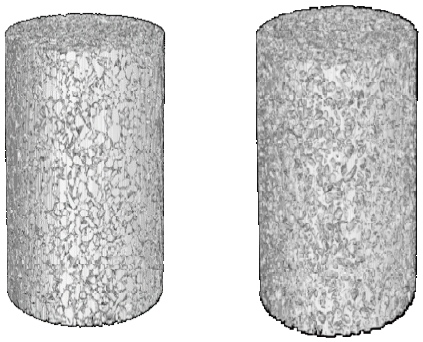
### 2.2　三维数值重构

X 射线计算机断层成像技术（computed tomography，CT）用于无损探测材料内部微观结构，近些年来 CT 技术在岩土材料的微观结构领域中取得了许多研究成果[15-19]，通过对 CT 扫描的断层数字图像处理，可以很好地将其内部颗粒与孔隙区分开，但扫描得到的二维 CT 图像仅仅是沿试样高度的二维横向剖面图，若要研究尾矿颗粒各向异性还是不够的，这就需要对二维 CT 图像进行三维重构。三维重构实现方法目前有面绘制和体绘制两种，对比两种重构方法的优缺点如表 1 所示。对比面效果表明，选择体绘制方法得到的 CT 扫描图像能更准确地对尾矿内部细观结构进行三维重构。

**表 1　面绘制与体绘制重构方法对比**
**Table 1　Comparison of surface rendering and volume rendering reconstruction methods**

| 绘制方法 | 内存要求 | 运行速度 | 重构效果 | 操作对象 | 不足之处 |
|---|---|---|---|---|---|
| 面绘制 | 较小 | 较快 | 细节信息易丢失 | 二维图像 | 边界信息提取不够准确 |
| 体绘制 | 较大 | 较慢 | 细节保存完整 | 三维体数据 | 噪声重叠现象突出 |

根据 CT 图像的灰度进行统计，选择颗粒和孔隙分割的阈值，然后将 500 张 CT 扫描图像采用体绘制重构方法进行三维重构，三维重构模型如图 4(a)所示，图 4(b)为尾矿孔隙三维重构图，可以明显看出凹陷的颗粒轮廓。



(a) 体绘制三维重构模型 (b) 孔隙三维重构模型

**图 4 三维重构模型**

**Fig.4 Three-dimensional reconstruction models**

对三维重构模型在不同角度切面，可以获取任意角度的剖面图。通过对剖面图进行图像处理即可提取出其颗粒信息，便于对其细观结构进行研究。为尾矿的各向异性研究奠定基础。

### 2.3 细观结构表征

对尾矿颗粒形态的表征是尾矿细观结构表征的关键，表征颗粒形态的因素有颗粒的形状因子 $F_s$ 和表面粗糙度 $S$，采用 ImageJ 软件在对颗粒边界信息提取时能够直接获得颗粒单元的基本参数，如颗粒周长、面积、粗糙度、角度等物理参数[20]。

形状因子是颗粒边界周长和颗粒等面积圆的周长的比值，按如下公式计算[21]：

$$F_s = \frac{P}{2\pi r} \tag{1}$$

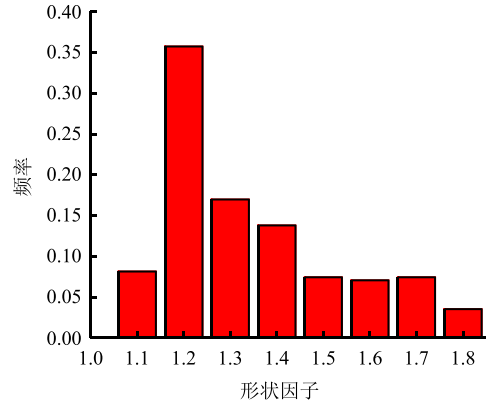
式中：$P$ 为颗粒周长；$r$ 为等效半径，$r = \sqrt{A/\pi}$；$A$ 为颗粒面积。按式（1）计算圆的形状因子为 1.0，长短轴比是 1.5 的椭圆形状因子为 1.08，长短轴比是 3.0 的椭圆形状因子为 1.31。可以看出：形状因子值越远离 1 时，表示该颗粒越偏离圆形。

表面粗糙度 $S$ 按颗粒面积 $A$ 与颗粒外凸多边形的面积 $A_o$ 的比值计算：

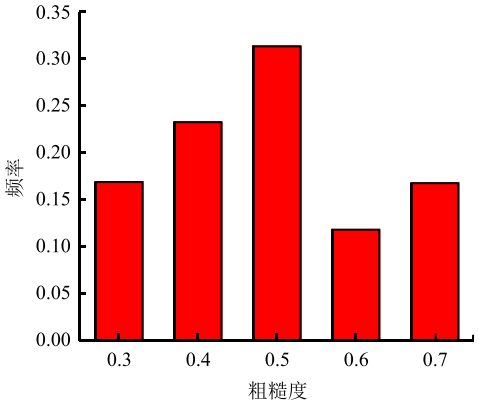
$$S = \frac{A}{A_o} \tag{2}$$

按式（2）计算表面粗糙度值越接近 1 时，该颗粒表面越光滑。

尾矿颗粒的形状因子−频率分布直方图如图 5(a)所示，尾矿颗粒形状因子主要分布在 1.1～1.4 之间，分布在该区间的颗粒超过 70%。可以看出颗粒二维形态主要近似于长短轴比为 1.5～3.0 的椭圆。由式（2）计算颗粒的表面粗糙度频率分布直方图如图 5(b)所示，粗糙度大部分不超过 0.5，且粗糙度不超过 0.5 的颗粒超过总数的 70%，说明该尾矿颗粒表面形状极不规则，棱角较多，粗糙不平。




(a) 形状因子−频率分布直方图




(b) 颗粒表面粗糙度−频率直方图

**图 5 尾矿颗粒形状因子及粗糙度频率分布直方图**

**Fig.5 Histograms of shape factor and roughness frequency distribution of tailings particles**

由于利用筛分法确认颗粒级配时，标准筛的最小粒径为 0.075 mm，部分小于该粒径的颗粒可能没有被筛出，但基于 CT 技术计算的级配曲线能够显示出没有被筛出的这部分颗粒分布，弥补了筛分法在极细颗粒测量不准的不足。根据 CT 图像提取出尾矿实际颗粒面积，然后计算出粒径，得到颗粒级配，并绘制颗粒级配曲线，步骤如下：

（1）计算出颗粒的等效直径 $d$（$d$=2$r$）。

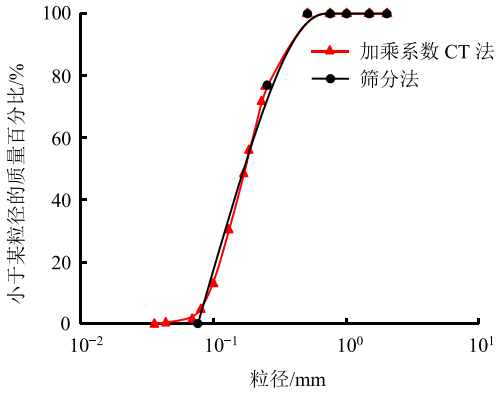
（2）将小于等效粒径 $r$ 的质量百分比含量转换为小于等效粒径 $r$ 的面积百分比含量，从而计算出小于等效直径 $d$ 的颗粒面积之和 $A_d$（同一尾矿的颗粒相对密度按相同处理）。

（3）小于等效直径 $d$ 的质量百分比含量 $p$ 为

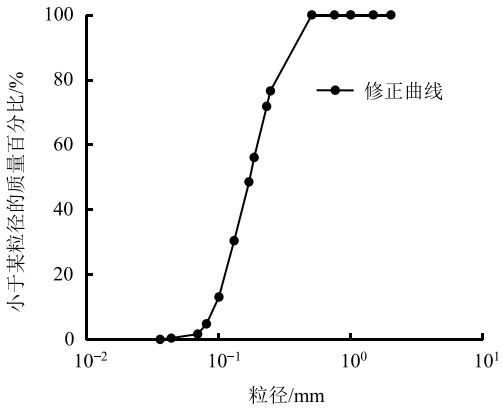
$$p = A_d / A_t \tag{3}$$

式中：$A_t$ 为截面所有颗粒面积之和。

由于粒径阈值不受筛子尺寸的限制，使得基于 CT 技术计算的级配曲线较筛分法级配曲线更具体。因此，可以采用 CT 技术计算的颗粒级配曲线对筛分法曲线进行修正，修正前后的曲线分别如图 6(a)、6(b)所示，采用修正法后的颗粒分析曲线符合实际。




(a) CT 级配曲线与筛分曲线




(b) 修正后的颗粒级配曲线

**图 6　基于 CT 图像与筛分法计算的颗粒级配曲线**

**Fig.6　The grain grading curves based on CT image and screening method**

基于 CT 图像计算的不均匀系数为 2.112，采用筛分法计算的不均匀系数为 2.198，二者相差 3.91%；基于 CT 图像计算的曲率系数为 0.910，采用筛分法计算的曲率系数为 0.855，二者相差 6.51%。这表明基于 CT 图像计算误差较小，说明基于 CT 图像计算的颗粒级配曲线可以真实地反映尾矿颗粒级配的不均匀程度。计算误差源于基于 CT 图像计算的粒径是二维图像中颗粒的等效直径，而筛分法计算的是颗粒在三维空间中的粒径。

## 3　高应力条件下尾矿力学特性

### 3.1　高应力本构关系

岩土材料的本构关系是反映岩土材料力学特性的数学表达式[22-26]，低压下土体本构关系研究已较成熟，常用的有剑桥模型[27]、莱特–邓肯模型[28]及清华模型[29]，高应力下土体的本构关系较少。基于改进的高应力三轴仪对不同密度尾矿进行了最高围压为 5 MPa 的三轴压缩试验，在围压大于 0.8 MPa 时，尾矿材料应力–应变曲线表现为应变硬化型；在常压下，随着密度的增加，尾矿材料更容易发生应变。主要原因是密实尾矿在常压剪切过程中，由于剪切面颗粒的定向排列作用致使局部剪切带内的颗粒成为松散结构，降低了尾矿的强度，发生脆性失稳。在高围压下，尾矿试样峰值强度存在非线性关系。Konder[30]在大量常压下建立了双曲线本构关系，仅能反映正常固结土的应变硬化行为：

$$(\sigma_1-\sigma_3)=\frac{\varepsilon}{D+f\varepsilon} \tag{4}$$

式中：$\varepsilon$ 为应变；$D$、$f$ 均为材料常数；$\sigma_1$ 为轴向应力；$\sigma_3$ 为围压，可由下式确定：

$$D=g(\sigma_3)^{-a} \tag{5}$$

$$f=\frac{R_f(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi+2\sigma_3\sin\varphi} \tag{6}$$

式中：$g$ 为材料常数；$\varphi$ 为内摩擦角；$R_f$ 为破坏比；$a$ 为拟合参数。参数 $D$ 代表试验过程中初始模量的倒数。由于高围压下（1.2～5.0 MPa）不存在应变软化，参数 $f$ 代表的是试验过程中极限偏差应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ 的倒数。在高围压下，试样峰值强度存在非线性，因此式（4）～（6）不适用于高围压条件。对于高围压条件，殷家瑜[31]给出了以下关系式：

$$f=k(\sigma_3)^{-b} \tag{7}$$

式中：$k$、$b$ 均为材料常数。

结合式（4）～（7），可得高围压条件下应力–应变关系：

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_1-\sigma_3}=g(\sigma_3)^{-a}+k(\sigma_3)^{-b}\varepsilon \tag{8}$$

干密度为 1.4 g/cm$^3$ 时应力–应变拟合情况如图 7 所示。应力–应变曲线与拟合曲线吻合良好。

### 3.2　应力对渗透固结的影响

高应力条件下尾矿材料的渗透和固结特性的研究是尾矿坝内渗流场分析和稳定性分析的基础[32-35]。基于新研制的“高应力渗压仪”对不同性质尾矿材料进行了高应力条件下的渗透固结联合试验（黏性尾矿、粉性尾矿和砂性尾矿），即在每一级固结试验后维持固结压力进行渗透试验，最大固结压力为 5 MPa。研究表明，渗透系数随着固结压力的增大而减小，粗颗粒尾矿内会形成大孔隙渗流通道，而细颗粒尾矿内为四散的渗流模式。粗、细尾矿的渗透系数随着固结压力的改变率不同，这与不同尾矿

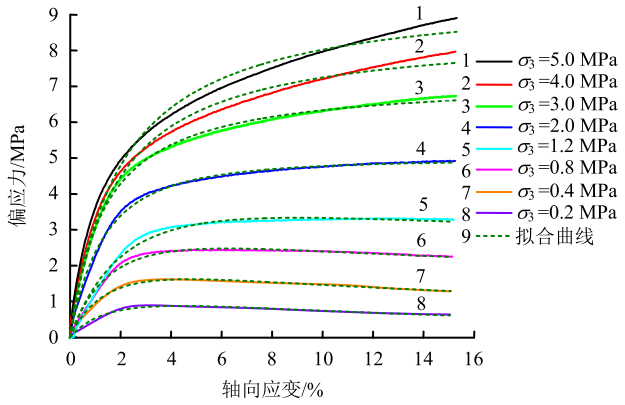



图 7 应力–应变曲线

**Fig.7 Stress-strain curves**

的压缩性质有关。将尾矿渗透系数改变率定义为参数 $k_k$。对 $k_k$ 分析可知，当固结压力达到 5.0 MPa 时不同级配的尾矿 $k_k$ 趋于同一值–0.23。高应力消除了不同性质尾矿的渗透系数改变率的影响。主要原因是：细粒尾矿比粗粒尾矿压缩性好，意味着细粒尾矿随固结压力的增大，孔隙比变化率高于粗粒尾矿。高应力条件下尾矿材料的破碎增加了粗粒尾矿的可压缩性，从而平衡了不同性质尾矿的渗透系数改变率。

在固结过程中，土体的渗透性会随着有效应力的增大而减小。分析孔隙比 $e$ 和渗透系数 $k_v$ 关系是研究土渗透特性的重要途径之一。计算公式如下：

$$k_v = Be^H \tag{9}$$

式中：$H$、$B$ 为对应的黏土渗透特性参数，该模型也可以表示为

$$\lg k_v = C\lg e + \lg H \tag{10}$$

对于模型 $\lg e - \lg k_v$，该模型参数 $C$ 的变化范围 2.718～4.119。参数 $B$ 的变化范围 3.629～10.40。决定系数 $R^2$ 均在 0.841 以上，拟合效果合适（如图 8 所示），模型可取。

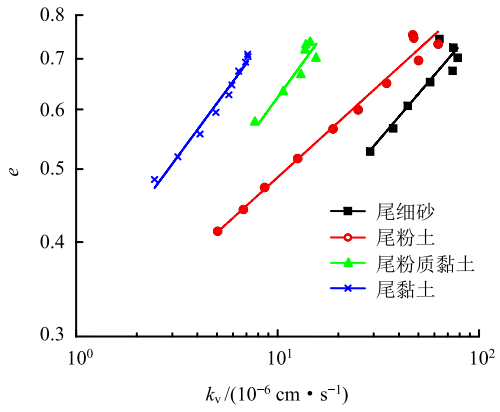



图 8 $\lg e$-$\lg k_v$ 曲线

**Fig.8 $\lg e$-$\lg k_v$ curves**

## 4 尾矿沉积特征与规律

在尾矿库放矿成坝过程中，矿浆在水平向流动的同时发生竖向沉积，形成了复杂的沉积结构[36-39]。由于矿浆流动过程受矿砂浓度、流速、颗粒成分等内部因素以及放矿工艺、降雨等外部因素综合影响，尾矿沉积形成的坝体结构表现出明显的时空变异性[40-42]。这种变异性一方面表现在尾矿库内部结构并不具备土石坝等人工修筑结构物中明显的材料分区，而是呈现出受水力沉积所控制的多元结构。例如一定程度的水力分选、坝体内部普遍存在且无序的沉积夹层结构；另一方面，沉积物固结程度、抗剪强度以及渗透特性等物理力学性质也会随着坝体的升高而逐渐演化。尾矿库复杂的内部结构可为坝体安全带来了极大风险，也为尾矿坝设计以及后期运营维护带来了巨大挑战。当前世界各地尾矿库溃坝事故时有发生，主要原因之一是人们对于坝体结构及材料特性认识不足，严重影响设计人员对坝体浸润线、强度特征等坝体稳定性因素的判断[43]。

矿浆流动是一种典型的两相流，遵循泥沙运动力学的基本规律[44-46]。然而尾矿浆体浓度普遍高达 20%～50%。近些年，更是大力发展浓度超过 65% 的膏体放矿工艺。尾矿浆的流体结构及水动力学特征与传统河流泥沙研究存在较大差异，这意味着传统泥沙研究的经典理论在尾矿浆运动过程中的适用性值得探讨。

本节开发了大型室内尾矿沉积模型试验设备，通过现场探测与室内大型沉积模型试验相结合的方法来研究尾矿库沉积结构特征，探讨尾矿颗粒特征、排放方式、地形等对尾矿沉积特性的影响，确定了影响尾矿沉积特性的几大关键因素。结合实际尾矿库现场勘察结果，分析不同部位、层位尾矿粒度形态和级配等沉积特性、尾矿夹层空间分布与物理力学特性，最终揭示尾矿分层沉积机制及空间沉积各向异性特征。

### 4.1 尾矿沉积模型试验研究

利用模型试验研究尾矿浆体冲淤过程，涉及矿砂和水两相流运动，模型试验不仅需要满足水流运动相似条件，同时也应该考虑泥沙淤积相似问题[47-48]。尾矿沉积模型试验与传统的泥沙模型试验不同之处在于，对于尾矿沉积堆坝的内部结构，不仅应考虑颗粒粒度和级配等沉积特征，还需要考虑沉积物的力学特征以及渗透性等土力学性质。这就要求模型试验应采用原型尾矿砂样。若采用原型砂样，考虑到试验场地和仪器设备的限制，要严格满足水流相似和泥沙运动相似比尺极其困难。在过去关于尾矿

库沉积的模拟试验中这些困难均会出现，加之规模较小，所以主要用于研究其内在原理，而难以建立模型试验与原型的定量化关系[49]。为此，本节研发了尾矿库大型沉积模拟装置（见图 9）。采用基于相似比的方法，进行 1:1 的原型试验。

所开发的沉积模型装置包括搅拌系统、泵送排放系统、沉积模型槽以及尾流回流系统，可以模拟现场尾矿排放的多种工况。为了实现矿浆的原型排放，搅拌系统和泵送排放系统包括一个 3 $m^3$ 的大型搅拌池以及两台功率达到 75 kW 的蠕动喂料泵，其整体排放性能基本可以与现场实际尾矿库一致。沉积模型槽长为 20 m，宽为 2 m，高为 1 m，3 个方向的尺寸均能够为尾矿浆体自由流动提供充足的空间，从而达到模型试验的边界条件与现场实际尾矿库基本相同的效果。模型槽端壁和底部可以设置排水装置以模拟实际尾矿库的渗透排水条件。此外，为了得到浆体流动沉积全过程精细化的数据，以实现对坝体沉积规律的定量分析，一套先进的监测系统也是必不可少的。本节利用了高清摄像机、粒子图像测速法（particle image velocimetry，简称 PIV）表面流场测量系统、三维激光扫描成像设备、孔压和土压力计等设备，实现了对尾矿浆体流动、沉积、固结全时域的监测。

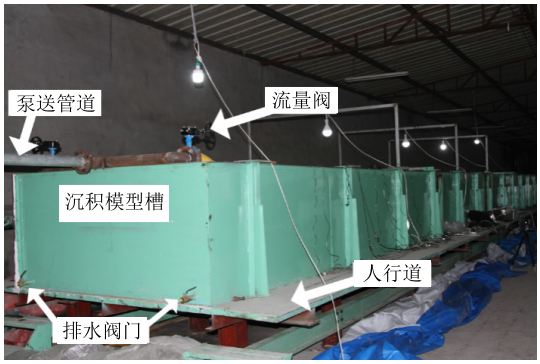



**图 9　沉积模型试验装置图**

**Fig.9　Sedimentation model test facility diagram**

### 4.2　沉积模型试验结果分析与沉积规律研究

模型试验观测到的矿浆流动特征与实际尾矿库一致。试验成功地模拟了尾矿库中普遍存在的扇形区、冲沟游荡区以及沟后层流区等沉积地貌特征。值得指出的是，不同地貌处矿浆流动各具特征。根据 PIV 表面流场测量系统的结果，扇形区段内流体流速大、厚度小，该处以淤积作用为主；冲沟区段处冲沟发育，由于冲沟的分叉和交汇形成了类似于河流地貌的河漫滩和心滩等地貌，冲沟内与河漫滩处浆体运动形式也存在较大差异。在流槽末端尾矿浆的流动形式较为简单。本节通过室内模型试验实现了对全域内尾矿浆流动特征的精确定量测试，建立了矿浆水动力学特征与尾矿库最终淤积形态之间的联系，这在已有的文献中很难查到。

在沉积模型试验中，对放矿结束后堆积体的形态和干滩坡度进行测量，并在堆积体内不同部位处取样，分别进行颗分试验得到颗粒粒度和级配。每次放矿完成后，堆积体静置一段时间，使其固结，并取样进行直剪、固结和渗透试验。上述试验分别得到了尾矿料的颗粒粒度成分、抗剪强度以及渗透性的空间分布。本节还结合实际尾矿库中尾矿排放工艺，考虑矿浆浓度、放矿流速以及放矿管的布置方式等因素，研究上述因素对于尾矿料物理力学性质空间分布的影响。结果表明，矿浆浓度和放矿流速可以改变放矿流体内部性质（如黏度）以及流场分布两方面条件，进而影响尾矿沉积以及坝体最终的沉积结构。对于实际尾矿库放矿设计，可根据多次模型试验确定出最佳的放矿参数。

尾矿库内常存在杂乱分布的夹层，夹层因其渗透系数小、强度低，严重降低坝体的稳定性[50-51]。本节的模型槽在设计过程中充分考虑到对夹层的观察。沉积槽单侧采用透明有机玻璃，观察到 3 种形式的夹层分布：砂层中含粉砂或泥质夹层、泥质沉积层中夹砂质透镜体以及沉积互层形式。夹层与其周围土层之间的土性、颗粒粒度和抗剪强度均差异巨大，3 种形式的夹层分布对于尾矿库的稳定性影响也有所不同。

综合尾矿沉积模型试验结果，得到矿浆流动、淤积形态、尾矿料物理力学性质的空间分布以及夹层结构在空间内的分布。结合水力学、泥沙运动力学以及土力学等理论，揭示了尾矿库各种放矿工艺下尾矿沉积的一般规律。一方面研究结果让工程设计人员对于尾矿坝体结构有更深入的理解，指导设计施工；另一方面，也便于尾矿坝体结构的建模，以及进行数值计算分析。

## 5　高尾矿坝失稳机制

### 5.1　高应力强度准则

常压下峰值强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 与围压呈现出很好的线性相关性。然而高压下，峰值强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 呈现出向下偏转的发展趋势，这说明高围压下尾矿强度存在明显的非线性，即尾矿的强度参数内摩擦角不是一个常值。为描述高应力条件下尾矿材料的强度特征，学者们提出了许多非线性的强度准则。抛物线 Mohr 强度准则因其表达式中剪应力指数为不

变参数导致曲线弯曲程度有限。双曲线 Mohr 强度准则因其具有渐近线特性，在高应力条件下将造成剪应力与正应力呈水平线性变化，与试验数据不符。采用幂函数型 Mohr 强度包络线来描述尾矿在高围压下的强度特征[11]：

$$\tau = m\sigma^n + l \tag{11}$$

式中：$m$、$n$、$l$ 均为材料常数；$\sigma$ 为正应力；$\tau$ 为剪应力。

利用式（11），采用迭代法对试样数据进行拟合分析。图 10 展示了密度为 1.4 g/cm$^3$ 尾矿材料的拟合效果，相关系数均在 0.95 以上。尾矿材料在高压条件下的强度特性可用幂函数型 Mohr 强度准则较好地进行描述。试样密度越大，强度包络线的线性增长率越小，强度包线的非线性程度也较大。因此建议常压下的内摩擦角仍用传统直线型 Mohr-Coulomb 获取，高围压下的内摩擦角采用幂函数型 Mohr 强度获取：

$$\varphi = \begin{cases} \arctan\left(\dfrac{\tau - c}{\sigma}\right), & \sigma_3 \leqslant 0.8\ \text{MPa} \\ \arctan(mn\sigma^{n-1}), & \sigma_3 > 0.8\ \text{MPa} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$c$ 为黏聚力。

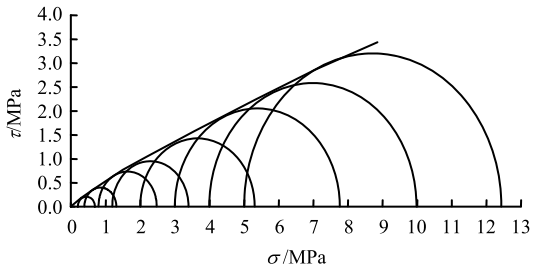



**图 10 幂函数型 Mohr 强度准则拟合**

**Fig.10 Power function fitting of Mohr strength criterion**

### 5.2 高尾矿坝稳定性研究

对于尾矿材料的高压特性，根据尾矿料高压试验表明，高应力下尾矿砂的应力–应变曲线不符合双曲线的变化规律，内摩擦角比低压下减少了 7°～15°。因此，将低压试验的结论用于高尾矿坝稳定性分析的设计是偏于危险的。

张超等[50]进行了围压高达 2.6 MPa 的三轴试验，考虑高应力下强度折减后磷石膏材料内摩擦角降低了 9°，对坝体进行了一系列稳定性计算。其结果显示，坝体越高，安全系数降低越明显。对于高尾矿坝，在超过一定高度时需考虑对坝体按深度进行分层，各层取不同的强度参数折减系数进行稳定性分析，这样得出的结果会更加符合实际情况。

在不考虑和考虑高压强度折减的两种条件下，对一个坝高为 300 m、坡比为 1∶3、密度为 1.6 g/cm$^3$ 的尾矿坝分层进行稳定性分析。由于高压条件下尾矿坝稳定性分析的文献有限，且本节主要研究高压折减对坝体稳定性的影响，在考虑坝体高压强度折减时，只降低了尾矿材料的内摩擦角，而没有考虑内聚力的折减。3.1 节中，800 kPa 以上的围压定义为高压，侧压系数按 0.5 考虑，计算出对应坝体高度为 100 m。当坝高超过 100 m 时，考虑内摩擦角的折减，结合式（11）、（12）以及图 10 的曲线拟合，取 $m$= 0.654 8，$n$=0.843 9。取 50 m 一层，计算出节点处的内摩擦角，图 11 中已标记出节点处内摩擦角，某一土层强度取上下节点内摩擦角数值的平均值。计算出不考虑高压强度折减正常运行下瑞典法计算安全系数为 1.12，考虑高压强度折减的安全系数为 0.93。由此可见，高尾矿坝的稳定性分析考虑高应力强度准则是有必要的。

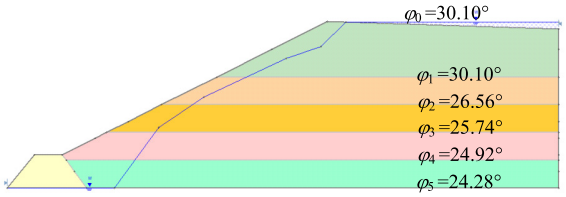



**图 11 考虑高压强度折减的尾矿分层**

**Fig.11 Tailings stratification with high pressure strength reduction**

## 6 排渗设施淤堵机制与服役性能演化

上游法筑坝形成的尾矿库排渗系统容易淤堵，造成坝内浸润线较高，严重降低坝体的静动力稳定，甚至导致尾矿库溃坝。统计结果表明，尾矿库排渗不良，库内浸润线过高是上游法尾矿库溃坝事故的主要原因之一。

按产生的原因和作用机制淤堵可分为 3 种类型[51]：①物理淤堵：渗流水中携带土的细颗粒在孔隙中沉积或滞留；②化学淤堵：渗流水中含有各种离子，在特定的化学环境下发生沉淀，形成了不溶于水的生成物，如 $CaCO_3$、$Fe_2O_3$ 等，逐渐堆积在土体孔隙中；③生物淤堵：微生物在尾矿的孔隙中繁殖，形成的微生物群堵塞土体孔隙。一般情况下是综合淤堵，即同时存在以上 3 种或其中两种类型的淤堵。

目前，针对尾矿坝淤堵的研究存在较大的局限性[52-56]。学者们往往对实际尾矿库淤堵条件进行简

化，单纯从浑水试验或砂柱试验出发，研究单一的某种淤堵形式；而很少进行针对实际尾矿库的淤堵模型试验，同时考虑包含上述 3 种淤堵模式的系统性淤堵机制。此外，部分学者采用简化的方法考虑淤堵造成坝体渗透系数降低的影响，并将变化的渗透系数作为一个参数输入至计算模型中，以分析坝体渗流和浸润线变化。这种方法并未体现尾矿坝复杂的淤堵机制，其渗透系数的变化也往往依赖于经验，与实际情况不一定相符。淤堵机制也大多是搬用地下水回灌、污水处理等其他方面的研究成果，针对尾矿坝淤堵的研究较少。总体来说，当前针对尾矿库淤堵造成的坝体排渗性能演化尚未形成系统性成果，淤堵机制、实际现象及其造成的影响之间尚未建立起有机的联系。

本节开发了排渗设施淤堵模拟设备，并进行室内模型试验，研究了不同应力变形条件下排渗设施及周围尾矿料结构和孔隙分布的变化规律以及细颗粒在排渗设施中的运移规律；开展了不同颗粒级配下尾矿迁移过程细观试验，揭示了尾矿材料物理淤堵机制。研究不同化学溶液入渗尾矿材料淤堵效应，并结合微观结构观察，分析了尾矿料和土工布化学淤堵机制。综合考虑上述几种淤堵形式，通过尾矿库渗透淤堵室内模型试验，结合实际尾矿库工程，形成了尾矿库排渗设施淤堵机制系统性成果。

### 6.1　尾矿库排渗设施淤堵形成机制研究

由于发生生物淤堵所要求具备的条件较多，在实际尾矿库中排渗系统的淤堵以物理淤堵和化学淤堵为主，本节重点对物理淤堵和化学淤堵的形成机制进行了探究。

#### 6.1.1　物理淤堵机制

尾矿库内物理淤堵模式包括两个层面的内容，一方面是排渗系统中反滤层（例如土工布的淤堵），另一方面尾矿颗粒在外荷载以及渗流过程中内部孔隙结构发生了变化而形成的淤堵现象。

土工布作为排渗系统中最重要的组成部分，其渗透性能决定了排渗系统的工作效率。当土工布受压或者纤维内存在充填物时，其渗透率会大大降低。根据土工布手压荷载后的渗透系数的分析，反滤层土工布的渗透系数随着垂直荷载的增加而减小，当垂直压力为 1 MPa 时，土工布的渗透系数减小了近 96%。

尾矿坝排渗性能与排渗设施的淤堵和尾矿砂自身的渗透性能有关。近些年来，随着尾矿坝筑坝朝着超高、超细的方向发展，坝底附近的尾矿料所受荷载可以达到非常高的量级。为了研究垂直荷载大小和细粒含量对尾矿渗透系能的关系，本节对原状尾矿进行了最大压力为 2 MPa 的垂直渗透试验。结果表明，试样所受垂直荷载越大，尾矿渗透系数越小。在压力到达 0.5 MPa 以前，渗透系数随垂直荷载的增加而急剧减小了 77.4%，此时尾矿试样处于压密阶段。压力到达 0.5 MPa 后，渗透系数随垂直压力增加而缓慢减小，试样孔隙度随垂直荷载的增加几乎线性减小。渗透系数和孔隙率的变化趋势并不呈线性关系，这是由于试样的渗透性影响因素较多，如有效渗流通道。孔隙压密阶段，有效渗流通道数量急剧减小，但孔隙率下降 35%以后，渗流通道数量缓慢减小。典型结果如图 12 所示。

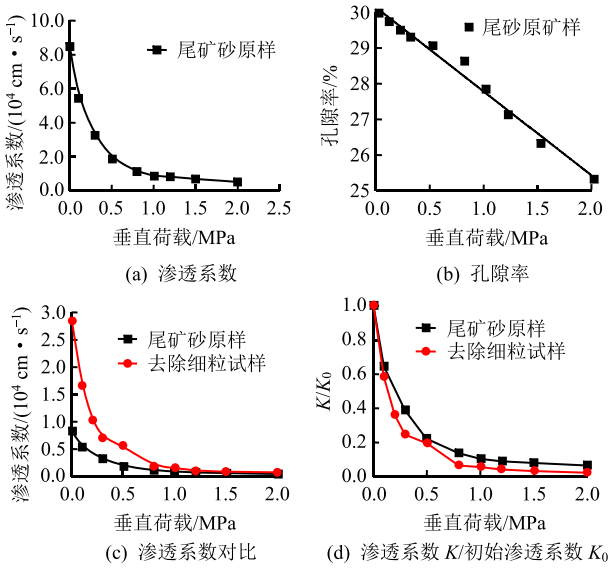



**图 12　渗透参数与垂直压力的关系**

**Fig.12　Relationships between permeability parameters and vertical pressure**

渗透性质的降低主要是由于细粒尾矿中含有较多的粉粒、黏粒，因为颗粒粒度小、比表面积大，在有水流过时容易形成黏稠状的尾矿砂浆吸附在土工布及多孔介质表面，使得渗透性能变差，且在水流沉积分选的过程中细颗粒尾矿穿过粗颗粒的间隙向反滤层土工布和排渗管中移动，容易沉积形成物理淤堵。在无外垂直荷载时，不含细颗粒的尾矿的渗透系数是含细粒尾矿的数倍，但随着垂直荷载增加到 0.75 MPa 后，细粒含量对尾矿渗透性能影响显著降低，变化趋势平稳。此外，考虑到不同粒径的尾矿填埋土工布后，渗流过程中尾矿在水力运移的作用下将会堵塞土工布纤维孔隙，进而导致整体的渗透系数会有不同程度的变化，如图 13 所示。根据试验结果可知，尾矿−土工布组合试样在清水渗流的条件下，由于物理淤堵的作用，其整体渗透系数均有不同程度的下降，其中粒径较小一组渗透系数

下降幅度较大，粒径较大一组次之，但两组试样的渗透系数最终都趋于稳定。

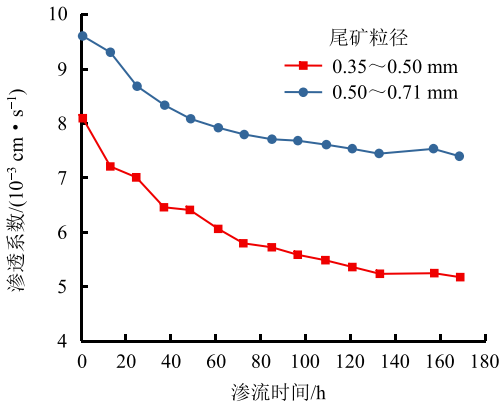



**图 13 尾矿−土工布渗透系数测试结果**
**Fig.13 Test results of permeability coefficient of tailing-geotextile**

综合以上研究结果，尾矿库的排渗设施物理淤堵主要产生在尾矿颗粒骨架间隙和土工布纤维孔隙中，产生机制与土工布有效孔径、垂直压力及尾矿细粒含量有关，其渗透性能与垂直压力和细粒含量呈近负线性相关。

6.1.2 化学淤堵机制

尾矿水中的金属离子对尾矿砂、反滤层土工布产生不容忽视的化学淤堵，这种化学效应受溶液离子浓度、化学成分等因素影响。根据尾矿水中离子种类及浓度的检测结果可知，尾矿水中主要的离子包括 $Ca^{2+}$、$Fe^{3+}$、$Fe^{2+}$、$SO_4^{2-}$、$Cl^-$，土工布在上述溶液中浸泡后性质发生了明显改变。将未浸泡土工布按直径为 13.5 cm 制成圆形布片 5 块以及粒径为 0.15～0.30 mm 的尾矿砂 200 g，分别放入化学溶液中浸泡 7 d，之后在烘箱烘干后取出，土工布试样由珍珠白色变为黄褐色且质感变硬，弹性降低、塑性增强；尾矿砂由土黄色松散状颗粒态变为红褐色伴有明显固结的颗粒态。随后将浸泡后的土工布试样依次进行了垂直渗透系数测试，与未浸泡的土工布相比，渗透系数下降了约 17%。

从微观结构上来看，与未浸泡的土工布相比，浸泡后的土工布纤维有些许收缩，与未浸泡时的柔韧状态相比变得更为僵硬，纤维上明显有沉积物均布附着，偶有较大的椭球状沉积物固结，土工布有效孔径减小，如图 14 所示。将尾矿料在同样条件下的化学溶液浸泡后，其微观结构也发生了变化。根据尾矿微观结构图可知（图 15），水筛后获得的粒径为 0.15～0.30 mm 的尾矿试样颗粒间无黏结，较为松散，颗粒棱角分明，颗粒表面粗糙度较大，比表面积较大；经化学溶液浸泡后的尾矿试样颗粒间明显产生黏结，导致颗粒间孔隙减小，尾矿颗粒表面变得较为圆润，粗糙度降低。放大 5 000 倍后，可观察到疑似化学溶液中产生的难溶颗粒以近似圆球状黏附在尾矿颗粒表面。

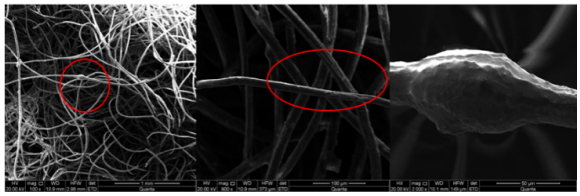
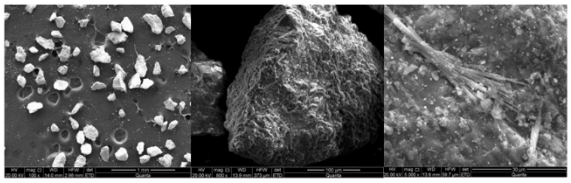
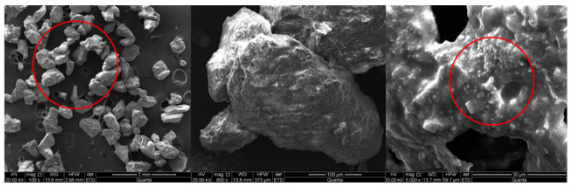


**图 14 浸泡后土工布微观结构电镜扫描图**
**Fig.14 Scanning electron microscopy of geotextile microstructure after soaking**



(a) 尾砂原样微观结构



(b) 浸泡后尾矿微观结构

**图 15 尾矿砂微观结构**
**Fig.15 Microstructure of tailing ore**

综合来看，尾矿水中的金属离子随尾矿水在多孔介质孔隙和排渗设施迁移的过程中对排渗设施将会产生明显的化学淤堵作用，这些金属离子化学反应产生的胶体类难溶物质是导致尾矿坝排渗设施发生化学淤堵的直接原因。其淤堵的严重程度与金属离子的种类和浓度有关。

溶液离子浓度、化学成分在不同粒径尾矿颗粒和土工布中产生的淤堵效应也存在较大差异，研究这种差异对于实际尾矿库排渗设施的设计具有重要的参考价值。本节综合考虑了尾矿库中常见的渗滤液粒子成分，定量研究尾矿水中金属离子对尾矿材料、反滤层土工布渗透性能的影响。尾矿料中的淤堵程度通过其渗透系数的变化来衡量。土工布的反滤性能则利用其中的沉积物侵入水平来定量描述。土工布中沉积物的侵入水平是反映土工布反滤性能下降程度的重要指标，土工布中沉积物的侵入水平越大，土工布的反滤性能下降幅度越大；反之，则越小。土工布沉积物侵入水平是指受沉积物侵入后

的土工质量与未侵入时的质量之比。

对粒径为 0.50～0.71 mm 的尾矿分别在尾矿水、$FeCl_2$ 溶液和 $CaCl_2$ 溶液的渗流条件下的试验结果进行对比分析，可得出其渗透系数的变化规律为：与尾矿水相比，当溶液中的 $Ca^{2+}$、$Fe^{2+}$浓度增大时，尾矿渗透系数的减小速率和下降幅度均增大；$Fe^{2+}$对尾矿产生的淤堵作用明显高于 $Ca^{2+}$。出现上述规律的原因为：尾矿水中离子浓度低；$Fe^{2+}$产生含铁难溶化合物的速率高于 $Ca^{2+}$产生难溶含钙化合物的速率。

根据不同溶液的渗透系数的测试试验，可以计算出土工布的侵入水平。结果表明，若在同种浓度的 $FeCl_2$ 溶液和 $CaCl_2$ 溶液渗流条件下，前者对土工布的侵入水平较后者大；在同种并且浓度相同的化学溶液渗流条件下，土工布的侵入水平基本保持一致，相差不大；当化学溶液浓度依次增大时，土工布侵入水平相应的增大。

### 6.2　尾矿库排渗系统淤堵模拟试验及实际尾矿库验证

#### 6.2.1 尾矿库排渗系统淤堵模拟试验

设计了一套箱式尾矿排渗系统淤堵模拟试验设备，模拟了尾矿坝排渗系统在实际排渗过程中的淤堵情况。该试验装置用于综合分析实际尾矿库中存在的渗透淤堵机制，并定量研究了尾矿排渗设施排渗性能随排渗时间的变化规律。

试验结果表明，循环渗流试验后，排渗管和土工布表面产生了大量的菌丝，因此可以说明生物群落较多；最底层排渗管外包裹的土工布由于埋深较大，基本隔绝了空气。因此，土工布表面仅发生了物理淤堵，而中间层排渗管外包裹的土工布却由于其埋深较浅，与空气接触较多，产生了较为严重的化学淤堵。

#### 6.2.2 实际尾矿库排渗设施服役性能分析

本节以江西铜业集团银山矿业有限责任公司旧尾矿库为样板工程，对其进行了现场踏勘与取样工作，进一步分析了实际尾矿库的排渗设施服役性能。

地下开挖的土工布平均渗透系数为 0.18 mm/s，排水井附近的土工布平均渗透系数为 0.67 mm/s，未使用的土工布平均渗透系数为 0.92 mm/s。

由垂直渗透率试验可知，地下开挖的土工布和排水井附近的土工布均发生了不同程度的淤堵，其中地下开挖出的土工布已发生严重的淤堵。

进行土工布 SEM 扫描，分析土工布的微观结构；尽可能将土工布分层剥离，分析不同位置处微观结构的差异性并对比初始情况下的结构。结果表明，坝体服役一定时间后，土工布微观结构变化较大，土工布表面及内部可以发生较为严重的机械淤堵；土工布纤维上产生较为严重的化学−生物淤堵。随着使用时间增加，土工布表层与内部固结成饼状，完全淤堵。这与尾矿渗透淤堵模型试验的结果一致，从而也支撑了对尾矿库物理、化学淤堵的机制分析。

## 7　尾矿坝灾害风险管控

### 7.1　尾矿库基础数据一张图

综合一系列研究成果，本节实现了不同类型、不同监测方式尾矿库安全信息的接口汇集和存储方法：非结构化数据采用分布式 MapReduce 技术；实时类数据采用 S4、Esper、Storm 流处理技术；结构化数据采用 MPP RDB、SMP OLTP、MPP OLAP 等关系型数据库技术。通过传感器网络、移动物联网等已接入示范尾矿库数据。

围绕基础数据库，构建了数据“采、存、管、用”机制，实现尾矿库灾害预警预报及应急保障平台全国、省级、市级和企业级一张图展示。全国基础数据一张图整合全国矿山企业的基本信息，对全国 6 000 多家尾矿库企业进行矢量化处理，实现企业的定位查询。查看全国不同省市、不同矿山等级企业数量分布（柱状+颜色）。支持左右仪表盘与三维的交互、信息钻取。江西省基础数据一张图如图 16 所示。

### 7.2　尾矿库风险预警一张图

建立了尾矿库三维立体模型，在三维模型中，能展现危险隐患的位置及其隐患等级。在应急救援过程中，救援人员可根据隐患位置及隐患等级的不同选择最优的救援路线，使救援工作安全高效的进行。

基于全国尾矿库基础数据和尾矿库固有风险建立宏观指标评估体系。结合气象数据和尾矿库本身固有风险，建立了区域性宏观预警评估指标体系，完成了预警指标体系建设及平台可视化展示。

全国风险预警一张图将灾害天气预警（降水、气温、风力风向）信息、风险预警模型预警信息基于一张图呈现，实时掌控当日、未来 3 d、未来 7 d 可能的重大风险预警，便于及时采取措施。江西省风险预警一张图如图 17 所示。

企业风险预警一张图如图 18 所示，将灾害天气预警（降水、气温、风力风向）信息、企业风险信息基于一张图呈现，实时企业风险分布情况，便于加强防控。

### 7.3 尾矿库系统平台简介

尾矿库重大风险评估监测系统平台是在智能检测成套装备、仿真分析系统、三维动态信息数据库和宏观预警模型的基础上，通过三维 GIS 系统及图像建模，努力建设为全国尾矿库的宏观风险预警中心，为相关政府机关提供区域性尾矿库风险评估等级和灾害预警决策的支持，为增高尾矿库扩容及尾矿库高坝企业提供了重大隐患无损探测技术支撑，从而有效地提高我国对高风险尾矿库灾害的防控能力。

该系统优势体现为：基于 B/S 的应用程序，支持不同级别相关政府部门机关的分级授权浏览、企业管理应用；结合实时气象信息，可对未来 7 d 可能存在的重大风险进行预警；卫星遥感联合无人机的三维巡检，能有效地监测到尾矿库关键指标的动态变化（见图 19）；该系统可实现数值仿真、风险诊断、风险预测预警、应急决策分析应急模拟演练、电子地图识别等功能。




图 16 基础数据一张图（江西省）

**Fig.16 A screenshot of basic data demonstration（Jiangxi Province）**




图 17 风险预警一张图（江西省）

**Fig.17 A screenshot of risk warning demonstration（Jiangxi Province）**




图 18　企业风险预警图（江西省）

**Fig.18　A screenshot of enterprise risk warning demonstration（Jiangxi Province）**




图 19　卫星遥感结合无人机三维巡检对比图

**Fig.19　A screenshot of satellite remote sensing combined with UAV Three-dimensional patrol comparison**

## 8　结　论

（1）尾矿粗粒和细粒具有不同的颗粒形状及表面粗糙度，利用 CT 扫描技术对尾矿材料细观结构进行三维重构，并结合 ImageJ 软件对颗粒边界信息及颗粒单元的基本参数进行了提取。相对于传统量测方法，利用该三维重构技术能进行颗粒形状因子、粗糙度等基本参数的计算和颗粒级配的准确表达。高应力条件下尾矿材料的力学特性不同于低压状态下，在围压达到 1.2 MPa 时尾矿材料应力−应变曲线表现出应变硬化型。本文总结出了高压下尾矿材料应力−应变关系和高压下尾矿材料采用幂函数的强度特征，与试验数据吻合较好。高应力条件下尾矿材料的渗透性的变化主要是由于高压下颗粒破碎引起的，本文总结了高压下尾矿材料的渗透系数和孔隙比的关系，与试验数据吻合较好。

（2）基于新研发尾矿库大型沉积模拟装置进行了模型试验，试验成功模拟了尾矿库中普遍存在的扇形区、冲沟游荡区以及沟后层流区等沉积地貌特征，建立了矿浆水动力学特征与尾矿库最终淤积形

态之间的联系。尾矿库的排渗设施物理淤堵主要产生在尾矿颗粒骨架间隙和土工布纤维孔隙中，产生机制与土工布有效孔径、垂直压力及尾矿细粒含量有关，其渗透性能与垂直压力和细粒含量呈近负线性相关；尾矿水中的金属离子随尾矿水在多孔介质孔隙和排渗设施中迁移的过程中对排渗设施将会产生明显的化学淤堵作用。这些金属离子化学反应产生的胶体类难溶物质是导致尾矿坝排渗设施发生化学淤堵的直接原因。其淤堵的严重程度与金属离子的种类和浓度有关。利用强度折减准则对高尾矿坝坝体分层取强度指标进行计算。坝体安全系数相对于没有采取强度折减法明显下降。由此，尾矿高坝的稳定性分析考虑高压强度折减是有必要的。

（3）尾矿库重大风险评估监测系统平台是在智能检测成套装备、仿真分析系统、三维动态信息数据库和宏观预警模型的基础上，通过三维 GIS 系统及图像建模，努力建设为全国尾矿库的宏观风险预警中心，为相关政府机关提供区域性尾矿库风险评估等级和灾害预警决策的支持，为增高尾矿库扩容及尾矿库高坝企业提供了重大隐患无损探测技术支撑，从而有效地提高我国对高风险尾矿库灾害的防控能力。

致谢：本文相关工作与成果是在蔡美峰院士、陈祖煜院士的指导下，在王媛教授、李青教授、米占宽教授级高工、蔡红教授级高工、周汉民教授级高工及马海涛高工等多位专家支持下以及“大型高尾矿库溃坝灾害防控关键技术研究及应用示范”项目组全体成员的共同努力下完成的，在此表示诚挚的感谢！

## 参 考 文 献

[1] 杨春和, 张超. 尾矿坝安全评价与病患治理[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 2006.
YANG Chun-he, ZHANG Chao. Safety evaluation and patient management of tailings dam[M]. Wuhan: Hubei People’s Publishing House, 2006.

[2] 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(增刊 1): 145-148.
ZHANG Chao, MA Chang-kun, YANG Chun-he, et al. Effects of particle diameter on shear strength of tailings and stability of tailings dams[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.1): 145-148.

[3] 李全明, 王云海, 张兴凯, 等. 尾矿库溃坝灾害因素分析及风险指标体系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(3): 50-53.
LI Quan-ming, WANG Yun-hai, ZHANG Xing-kai, et al. Analysis of disastrous factors concerning tailing dam failing and research on risk index system[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2008, 4(3): 50-53.

[4] 吴小刚, 汪斌, 项宏海, 等. 饱和细粒尾矿大变形固结试验在尾矿库的研究及应用[J]. 金属矿山, 2009(2): 53-56.
WU Xiao-gang, WANG Bin, XIANG Hong-hai, et al. Research and application of the large strain consolidation of saturated fine-grained tailings in tailings reservoir[J]. **Metal Mine**, 2009(2): 53-56.

[5] 陈守义. 尾矿坝细粒泥层内超静孔隙水压力的近似估算方法[J]. 岩土力学, 1991, 12(1): 47-57.
CHEN Shou-yi. Approximate estimation method of excess pore water pressure in fine mud layer of tailings dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1991, 12(1): 47-57.

[6] 李全明, 王云海, 廖国礼. 尾矿库安全评价中的科学问题及评价方法探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(6): 53-57.
LI Quan-ming, WANG Yun-hai, LIAO Guo-li. Study on scientific issue and evaluation method in safety assessment of tailing reservoir[J].**Journal of Safety Science and Technology**, 2006, 2(6): 53-57.

[7] 李广治. 基于上游式快速高堆坝工艺及关键力学问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
LI Guang-zhi. Key mechanics issues and construction technologies for the rapid raise of high tailings dam by using the upstream method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[8] 梅国栋. 尾矿库溃坝灾害脆弱性评估指标体系及方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 11-15.
MEI Guo-dong. Research on the dam-break hazard vulnerability assessment index system and methods of tailings pond[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2012, 8(12): 11-15.

[9] KOMNITSAS K, KONTOPOULOS A, LAZAR I, et al. Risk assessment and proposed remedial actions in coastal tailings disposal sites in Romania[J]. **Minerals Engineering**, 1998, 11(12):1179-1190.

[10] 闪淳昌, 张振东, 钟开斌, 等. 襄汾"9·8"特别重大尾矿库溃坝事故处置过程回顾与总结[J]. 中国应急管理, 2011(10): 13-18.

SHAN Chun-chang, ZHANG Zhen-dong, ZHONG Kai-bin, et al. Review and summary of the disposal process of "9·8" especially serious tailings pond dam break accident in Xiangfen[J]. **China Emergency Management**, 2011(10): 13-18.

[11] ZHANG C, CHEN Q L, PAN Z K, et al. Mechanical behavior and particle breakage of tailings under high confining pressure[J]. **Engineering Geology**, 265.

[12] 马海涛. 矿山采空区灾害风险分级与失稳预警方法[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
MA Hai-tao. Study on method of risk classification and instability forecasting of goaf[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.

[13] 巫尚蔚, 杨春和, 张超, 等. 干滩表层沉积尾矿的细观几何特征研究[J].岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 768-777.
WU Shang-wei, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. Microscopic geometric characteristics of surface sedimentary tailings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(4): 768-777.

[14] 巫尚蔚, 杨春和, 张超, 等. 粉粒含量对尾矿力学特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 2007-2017.
WU Shang-wei, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. The effects of silt content on the mechanical properties of tailings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(8): 2007-2017.

[15] 郎颖娴, 梁正召, 段东, 等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1204-1212.
LANG Ying-xian, LIANG Zheng-zhao, DUAN Dong, et al. Three-dimensional parallel numerical simulation of porous rocks based on CT technology and digital image processing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1204-1212.

[16] 李果, 张茹, 徐晓炼, 等. 三轴压缩煤岩三维裂隙 CT 图像重构及体分形维研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1633-1642.
LI Guo, ZHANG Ru, XU Xiao-lian, et al. CT image reconstruction of coal rock three-dimensional fractures and body fractal dimension under triaxial compression test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1633-1642.

[17] SATO T, ONDA K, OTANI J. Development of a new loading test apparatus for microfocus X-ray CT and its application to the investigation of soil behavior surrounding driven open-section piles[J]. **Soils and Foundations**, 2018, 58(3):

[18] ZHANG G, LIU E L, CHEN S J, et al. Micromechanical analysis of frozen silty clay-sand mixtures with different sand contents by triaxial compression testing combined with real-time CT scanning[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2019, 168.

[19] ZHANG Z B, ZHOU H, LIN H, et al. Puddling intensity, sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils[J]. **Geoderma**, 2016, 262: 155-164.

[20] 李丹, 汪洪平, 张超, 等. 基于 CT 扫描的尾矿细观结构表征研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(7): 574-582.
LI Dan, WANG Hong-ping, ZHANG Chao, et al. Study on meso-structure characteristics of tailings based on CT scanning[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2020, 53(7): 574-582.

[21] HENTSCHEL M L, PAGE N W. Selection of descriptors for particle shape characterization[J]. **Particle & Particle Systems Characterization**, 2003, 20(1):25 -38.

[22] 张建隆. 尾矿砂力学特性的试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(6): 685-689.
ZHANG Jian-long. Experimental study on mechanical properties of tailing sand[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering**, 1995, 28(6): 685-689.

[23] 曹作忠, 罗昌明, 张默. 尾矿渗透固结特性分类研究[J]. 金属矿山, 2018, 25(7): 65-69.
CAO Zuo-zhong, LUO Chang-ming, ZHANG Mo. Study on classification of osmotic consolidation characteristics of tailings[J]. **Metal Mine**, 2018, 25(7): 65-69.

[24] 王飞跃, 杨铠腾, 徐志胜, 等. 基于浸润线矩阵的尾矿坝稳定性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 840-844.
WANG Fei-yue, YANG Kai-teng, XU Zhi-sheng, et al. Stability analysis of tailings dam based on saturation line matrix[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 840-844.

[25] 罗晓辉, 白世伟, 万凯军, 等. 尾矿坝渗透静力稳定分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 560-564.

LUO Xiao-hui, BAI Shi-wei, WAN Kai-jun, et al. Seepage static stability analysis of tailings dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 560-564.

[26] 徐宏达. 上游式尾矿坝的沉积规律[J]. 有色矿山, 2003(5): 40-43.
XU Hong-da. The sedimentary law of the upstream tailing dam[J]. **China Mine Engineering**, 2003(5): 40-43.

[27] 谢孔金, 谢协忠, 王霞. 尾矿坝坝体沉积尾矿的力学性质分析与研究[J]. 西部探矿工程, 2005(9): 49-50.
XIE Kong-jin, XIE Xie-zhong, WANG Xia. Analysis and research on mechanical properties of tailings deposited in dam body of tailings[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2005(9): 49-50.

[28] 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, 29(增刊 2): 3710-3718.
YIN Guang-zhi, JING Xiao-fei, WEI Zuo-an, et al. Study of model test of seepage characteristic and field measurement of coarse and fine tailings dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl. 2): 3710-3718.

[29] KÜPPER A M, Design of hydraulic fill[D]. Ottawa: University of Alberta. 1991.

[30] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1963, 89(1): 115-143.

[31] 殷家瑜, 赖安宁, 姜朴. 高压力下尾矿砂的强度与变形特性[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(2): 1-10.
YIN Jia-yu, LAI An-ning, JIANG Pu. Strength and deformation characteristics of tailings under high pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1980, 2(2): 1-10.

[32] 梁冰, 吕志强, 金佳旭, 等. 排浆速度对尾矿沉积影响的模型试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(6): 880-887.
LIANG Bing, LÜ Zhi-qiang, JIN Jia-xu, et al. A model test study on the influence of discharge velocity on tailings deposition[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2017, 32(6): 880-887.

[33] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35-41.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. Consider the constitutive relation of soil structure[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 35-41.

[34] 张嘎, 张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1587-1591.

[35] 姚仰平, 张丙印, 朱俊高. 土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 127-150.
YAO Yang-ping, ZHANG Bing-yin, ZHU Jun-gao. Behaviors，constitutive models and numerical simulation of soils[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(3): 127-150.

[36] 罗汀, 路德春, 姚仰平. 考虑应力路径影响下砂土的三维本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 688-693.
LUO Ting, LU De-chun, YAO Yang-ping. Three-dimensional constitutive model of sand considering stress path[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 688-693.

[37] SHAHROUR I, REZAIE F. An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 1997, 21(1): 21-39.

[38] 徐舜华, 徐光黎, 程瑶. 土的剑桥模型发展综述[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(3): 27-32.
XU Shun-hua, XU Guang-li, CHENG Yao. A review of the development of Cambridge models of soil[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2007, 24(3): 27-32.

[39] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[40] 李广信. 土的清华弹塑性模型及其发展[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 1-10.
LI Guang-xin. Tsinghua elastoplastic model of soil and its development[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(1): 1-10.

[41] YIN G Z, LI G Z, WEI Z A, et al. Stability analysis of a copper tailings dam via laboratory model tests: a Chinese case study[J]. **Minerals Engineering**, 2011, 24(2): 122-130.

[42] 徐海良, 曾义聪, 陈奇, 等. 深海采矿矿浆泵内颗粒流动规律的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 84-90.

XU Hai-liang, ZENG Yi-cong, CHEN Qi, et al. Numerical simulation of particle flow trajectory in slurry pump for deep-sea mining[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2017, 48(1): 84-90.

[43] 徐自力, 屠珊, 杜秀杰. 弯曲圆管中矿浆湍流场的三维数值模拟及分析[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(5): 46-49.
XU Zi-li, TU Shan, DU Xiu-jie. Three-dimensional numerical simulation and analysis of slurry turbulent field in a curved circular pipe[J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**, 2000, 34(5): 46-49.

[44] 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.

[45] GOMES L E D O, CORREA L B, SÁ F, et al. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil[J]. **Marine Pollution Bulletin**, 2017, 120(1-2):28-36.

[46] GAO J, FOURIE A. Studies on thickened tailings deposition in flume tests using the computational fluid dynamics (CFD) method[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2019, 56(2): 249-262.

[47] 钱宁. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
QIAN Ning. Mechanics of sediment transport[M]. Beijing: Science Press, 1983.

[48] 张东明, 郑彬彬, 尹光志, 等. 高浓缩分级尾矿上游法堆坝及模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1832-1838.
ZHANG Dong-ming, ZHENG Bin-bin, YIN Guang-zhi, et al. Model tests on upstream dam-building method using concentrated and classified tailings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 1832-1838.

[49] SOUTHARD J B, BOGUCHWAL L A, ROMEA R D. Test of scale modelling of sediment transport in steady unidirectional flow[J]. **Earth Surface Processes & Landforms**, 2010, 5(1): 17-23.

[50] 张超, 余克井, 杨春和, 等. 磷石膏高坝稳定性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 1): 113-117.
ZHANG Chao, YU Ke-jing, YANG Chun-he, et al. Stability analysis of high phosphogypsum dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Suppl. 1): 113-117.

[51] 高亚伟. 尾矿材料淤堵机理及对坝体渗透性的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
GAO Ya-wei. Study on the silting mechanism of tailing material and its influence on the permeability of dam body[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.

[52] CUNNINGHAM A B, CHARACKLIS W G, ABEDEEN F, et al. Influence of biofilm accumulation on porous media hydrodynamics[J]. **Environmental Science and Technology**, 1991, 25(7): 1305-1311.

[53] VEYLON G, STOLTZ G, MÉRIAUX P, et al. Performance of geotextile filters after 18 years' service in drainage trenches[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2016, 44(4): 515-533.

[54] VANDEVIVERE P, BAVEYE P. Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic Bacteria in sand columns[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1992, 56(1): 1-13.

[55] PALMEIRA E M, BEIRIGO E A, GARDONI M G. Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2010, 28(2): 136-148.

[56] 杨春和, 李泽华, 冒海军, 等. 尾矿坝排渗系统淤堵机理试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(3): 845-854.
YANG Chun-he, LI Ze-hua, MAO Hai-jun, et al. Experimental study on the clogging mechanism of drainage system in tailings dam[J]. **Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)**, 2019, 44(3): 845-854.