doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.002
引用格式：曹邑泽，王雷，眭素刚，成立，叶胜利. 基于模型试验的废石格网-尾砂联合筑坝渗流与固结特性研究[J]. 矿冶，2026，35(1)：9-17.
CAO Yize, WANG Lei, SUI Sugang, CHENG Li, YE Shengli. Experimental study on seepage and consolidation characteristics of waste rock mesh-tailings combined dam construction[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 9-17.

基于模型试验的废石格网-尾砂联合筑坝渗流与固结特性研究

曹邑泽[1,2] 王 雷[1] 眭素刚[2] 成 立[1,2] 叶胜利[1,2]
（1. 昆明理工大学 国土资源工程学院，昆明 650093；
2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司，昆明 650051）

摘 要：废石格网筑坝法是一种创新性的尾矿处置工艺，通过废石与尾矿联合堆存，旨在改善尾砂的力学性能并加速其渗透固结进程。本文以龙都尾矿坝为工程背景，基于相似原理开展了废石格网尾矿坝室内模型试验，系统研究了不同废石颗粒级配、格网尺寸对尾矿坝浸润线埋深与单位渗流量的影响规律，并在确定最优级配与格网间距的基础上，进一步分析了不同坝坡比对尾砂静力学性质的影响。试验结果表明：采用粗颗粒含量最高的c级配废石格网时，坝体浸润线降低最为显著，单位渗流量亦达到最优；减小废石格网中心间距可进一步提升渗流量，同时促使浸润线下降；坝坡越缓，浸润线位置越低。固结特性方面，尾砂孔隙比随深度增加逐渐减小，符合自重固结规律；不同坝坡条件下，尾砂黏聚力均随取样深度增加而提高，固结后内摩擦角也略有增大。本研究为废石-尾矿联合筑坝的工程设计与参数优化提供了依据，并对推动尾矿坝荷载分担机制与协同筑坝技术的深入研究具有指导意义。

关键词：废石格网；尾矿坝；模型试验；渗流特性；固结力学
中图分类号：TD9 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854(2026)01-0009-09

Experimental study on seepage and consolidation characteristics of waste rock mesh-tailings combined dam construction

CAO Yize[1,2] WANG Lei[1] SUI Sugang[2] CHENG Li[1,2] YE Shengli[1,2]
(1. Falcuty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey and Design Institute Co. Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: The waste rock mesh dam construction method is an innovative tailings disposal technique that combines waste rock and tailings deposition to enhance the mechanical properties of tailings sand and accelerate the seepage consolidation process. Taking the Longdu tailings dam as the engineering background, this study conducted indoor model tests based on the similarity principle to systematically investigate the influence of different waste rock gradations and mesh sizes on the phreatic line depth and unit seepage flow of the tailings dam. After determining the optimal gradation and mesh spacing, the effect of different dam slope ratios on the static mechanical properties of the tailings sand was further analyzed. The test results showed that the use of waste rock mesh with the highest coarse-grained content (Grade C) significantly lowered the phreatic line and achieved the highest unit seepage flow. Reducing the center spacing of the waste rock mesh further increased the seepage flow while decreasing the phreatic line depth. A gentler dam slope corresponded to a lower phreatic line. Regarding consolidation characteristics, the void ratio of the tailings sand gradually decreased with depth, consistent with self-weight consolidation behavior.

收稿日期：2024-11-26
基金项目：兴颠英才支持计划(XDYC-CYCX-2022-0041)
第一作者：曹邑泽，硕士研究生，研究方向为地质工程。E-mail：1979076972@qq.com
通信作者：眭素刚，博士，正高级工程师；E-mail：39069954@qq.com

Under different slope conditions, the cohesion of the tailings sand increased with sampling depth, and the internal friction angle slightly improved after consolidation. This study provides a basis for the engineering design and parameter optimization of waste rock-tailings combined dam construction and offers guidance for further research on load-sharing mechanisms and collaborative dam-building technologies for tailings dams.

Key words: waste rock mesh; tailings dam; model test; seepage characteristics; consolidation mechanics

尾矿库作为堆存金属及非金属矿山分选出精矿后所排放尾矿废渣的场所，其安全稳定至关重要。我国作为矿业生产大国，每年产出大量尾矿废料，一旦尾矿坝发生失稳破坏，将严重威胁下游居民的生命与财产安全[1]。常规尾砂因颗粒细、渗透性低、抗剪强度弱，不利于直接筑坝；而废石具有粒径粗、渗透系数大、抗剪强度较高的特点。为此，有学者提出将尾矿与废石混合堆存，以期提升尾砂的抗剪强度与固结速率，并围绕尾矿-废石联合筑坝技术开展模型试验，探究格网筑坝方法的可行性[2]。

针对尾矿处理与综合利用，国内外学者已开展了广泛研究。杨晓炳等[3]通过建立废石-全尾砂高浓度充填料浆的均质化模型，解决了料浆易堵管的问题，指出掺入0.5%的PC可最优改善其流动性。李苏琦等[4]对含钛铁尾矿进行工艺矿物学研究，在适宜磨矿细度与磁选条件下，通过浮选工艺显著提升了钛的作业回收率。曾爱民等[5]采用“浓密+多频筛+压滤”联合工艺实现尾矿高效干排，回水利用率达95%，为尾矿库扩容与干堆工艺优化提供了参考。刘新等[6]通过对铜冶炼渣选工艺参数的系统调控，成功将尾矿含铜量降至0.16%以下，提高了铜的回收率。仝文慧等[7]通过三点弯曲实验发现，废石的掺入可有效增强尾砂胶结充填体的韧性。张静等[8]通对配比试验，确定了全尾砂与废石比例为4∶6、浓度78%时充填体性能较优。另有研究通过室内模型与数值模拟手段，分析了尾矿坝溃坝机理、尾砂沉积规律及渗流场特征[9-11]。高翎翔[12]、吴桐[13]则探讨了废石柱对尾矿坝渗流与稳定性的影响，以及废石级配与尾矿浆相互作用的规律。WICKLAND、BIGOT和PEDRETTI等[14-17]基于颗粒堆积理论，提出了预测尾矿-废石混合物压缩性的方法，并验证了其在改善力学性能、减少酸性排放方面的效果。

目前，相关研究多集中于尾砂-废石胶结充填与数值模拟分析，而针对二者联合堆存的实际施工工艺探讨仍较为有限。为此，本文通过室内模型试验，系统研究不同废石颗粒级配、格网参数及坝坡比对尾矿坝浸润线埋深、尾砂固结特性与压缩性质的影响，进而提出一种废石格网与尾矿砂联合筑坝的技术方法，旨在为矿山尾矿处置与废石资源化利用提供新途径，同时降低废石中有害物质对环境的潜在影响。

1 尾矿坝模型试验

1.1 尾矿库概况

室内模型试验所用尾砂取自云南玉溪龙都尾矿库。该库地处中山地貌区，切割程度中等，地形总体呈北东高、南西低趋势，与龙都河河谷走势相近。其东侧大鬼子山头标高为1 748.0 m，西南侧龙都河谷与戛洒江交汇处标高为493.25 m，相对高差超过1 000 m。坝址所在河谷近南北走向，谷坡陡缓受地层、岩性及地质构造控制明显：顺岩层倾向的北西岸坡度较缓，而反倾的东岸及砂岩分布区坡度较陡。

初期坝为透水堆石坝，坝顶标高550 m，坝高30 m，顶宽4 m，底宽120 m，坝长100 m，内坡比1∶1.75、外坡比1∶2。堆积坝总坡比为1∶5，堆积标高范围为550~730 m，堆坝总高180 m。堆坝方式分段变化：初期采用上游法筑至620 m标高；在620~700 m标高区间转为中线法堆筑；640 m以上又重新采用上游法继续堆筑至最终标高730 m，具体堆坝方式见图1。

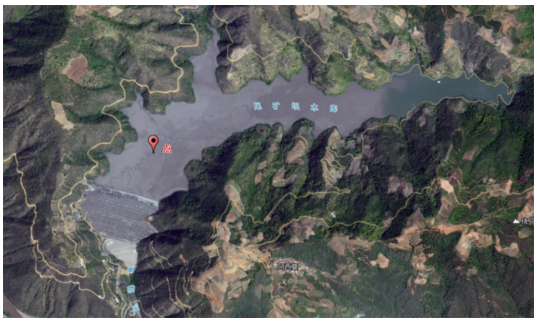


图1 尾矿库地形图

Fig. 1 Topographic map of the tailings pond

1.2 尾矿与废石联合堆存的基本原理

废石格网筑坝法，系指将特定级配的废石铺设成厚约60~70 cm的网格状结构，随后在其上排放尾矿砂。待尾矿砂经自然蒸发、渗透与固结过程，达到下一级子坝的堆筑强度要求后，再于其上铺设新一

层废石格网并续排尾砂。如此循环作业，最终构筑成完整的尾矿坝体。在筑坝过程中，废石格网主要铺设在每一期堆积子坝的下部。具体而言，于尾矿库建设初期，首层废石格网沿库底铺设，随后在网格内填充尾矿砂；待尾砂排放至设计标高后，再修筑下一期堆积子坝及其下的废石格网，依此递进。

该联合堆存方法具有以下显著优势：

1）强化排水固结：废石堆积体渗透系数高，通常比尾矿砂高出两个数量级以上，可被视为有效排水边界。此举将尾矿库原有的顶面单向排水条件，改良为“顶面＋四周”的三向排水体系，从而显著缩短深部尾矿的渗流路径，加速超静孔隙水压力的消散，促进尾砂固结。

2）提升结构强度：废石体自身强度较高，其介入犹如扩展的“碎石桩”复合体，能有效改善尾矿坝体的整体抗剪强度，进而增强坝体的抗滑稳定性。

3）增强抗震液化稳定性：尾矿坝上游局部区域是抗液化能力的薄弱环节。设置废石格网后，该区域渗透性增强，地震作用下累积的超静孔隙水压力得以迅速消散，从而显著提升坝体的抗液化稳定性。

1.3　试验模型相似比

依据龙都尾矿库（一等库）的设计资料，并综合考虑库区面积与试验可操作性，确定模型试验参数如表1所示。本次试验选取尾矿坝长550 m段进行模拟，重点研究尾矿坝-废石格网联合筑坝在渗流条件下，其浸润线及力学性质的演变规律。模型试验遵循几何相似原则，按1∶200的比例进行缩放。

表1　模型试验参数

Table 1　Model test parameters

建筑物	物理模型(1∶200)	实际原型
筑坝材料	透水堆石坝	透水堆石坝
初期坝坝高/m	0.15	30
初期坝内坡比	1∶1.75	1∶1.75
初期坝外坡比	1∶2	1∶2
坝高/m	0.5	100
坝长/m	0.5	100
总坝坡比	1∶5	1∶5
堆积子坝坡比	1∶2.5	1∶2.5

1.4　试验材料

为保障模型试验的准确性，尾砂取自龙都尾矿库现场。为分析堆坝尾砂的颗粒组成，在坝顶排放口随机选取4份尾砂样混合后进行颗粒分析试验，以避免局部颗粒过粗或过细的影响。将适量混合尾砂烘干后，置于不同孔径的土工筛上，采用YS-4型摇晃式筛析机进行筛分。尾砂颗粒组成图2。

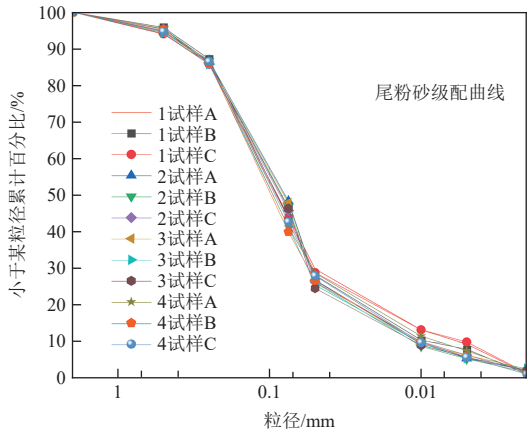


图2　尾砂的颗粒组成

Fig. 2　Particle compositions of the tailings

为减少误差，试验取三种平行试样，计算各粒径范围尾砂颗粒重量的平均值进行占比换算，进而得到小于某粒径颗粒的累计含量及粒径级配累积曲线。由图2可知，尾砂粒径主要集中在0.075~0.25 mm，大于0.074 mm的颗粒含量超过50%，据此判定试验尾砂为尾粉砂。其有效粒径d_{10}为0.009~0.012 mm，中间粒径d_{30}为0.050~0.055 mm，不均匀系数C_u在8.58~13.33，曲率系数C_c在2.27~2.90，表明该尾砂颗粒级配良好。

1.5　试验装置与废石格网布置

本次物理模型试验在云南省岩土工程与地质灾害重点实验室内完成。试验装置主要由供水系统、试验水槽、水位测量系统、水流收集系统四部分组成。其中，供水系统包括水箱、供水软管及阀门。试验中通过控制干滩长度稳定在50 cm后向模型库内注水，以模拟不同工况。试验水槽尺寸为3 000 mm（长）× 80 mm（宽）× 80 mm（高），其内部为由外砂框（见图3）与亚克力板构成的长方体空间。外砂框起到保护作用，防止亚克力板因受力过大而变形破坏。为减小边

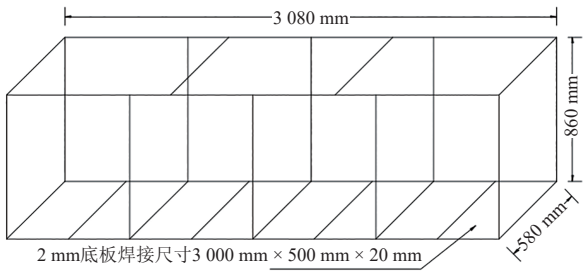


图3　试验水槽外砂框图

Fig. 3　Diagram of the external sand frame in the test tank

壁摩擦效应，模型浇筑前在水槽内壁涂抹了凡士林。为精准观测“尾矿坝生命线”——浸润线的变化，在水位测量系统设计了8组Φ12 mm的PVC测压管：管壁钻有小孔并用土工布包裹，一端通过水槽底部置于坝体内，另一端固定于水槽外壁形成U型管；测压管旁附有标尺贴纸，便于读数。测点分布于尾矿坝上游、坝体中部及近初期坝等关键位置（见图4），以确保能连续、准确地测得浸润线埋深。水流收集系统则用于测量不同试验条件下坝体的稳定渗流量，是研究渗流特性的重要依据。在试验水槽排水口处放置收集容器，配合秒表记录单位时间渗流量。



图4 尾矿坝模型装置照片

Fig. 4 Photo of the tailings dam model setup

废石格网的基本单元为采用土工布包裹废石制成的截面边长为2 cm的正方形柱体。为系统研究不同因素对排渗效果的影响，试验按以下方案进行布置：首先，在保持格网中心间距一致的条件下，对比不同废石级配的排渗效果，以分析级配影响；其次，通过改变废石格网中心间距（12 cm、22 cm），探究间距对排渗规律的作用；此外，除在堆积子坝下连续铺设的方式外，理论上亦可对比“间隔通铺”或“局部铺设”等不同铺设方式的固结与排渗效果。为控制变量，本次试验统一采用在堆积子坝下连续铺设废石格网的布置方式（试验模型见图5、图6）。

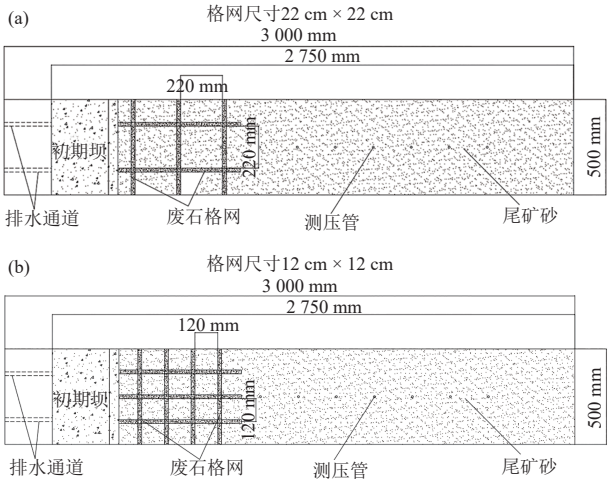


图5 尾矿坝模型平面图

Fig. 5 Plan view of the tailings dam model

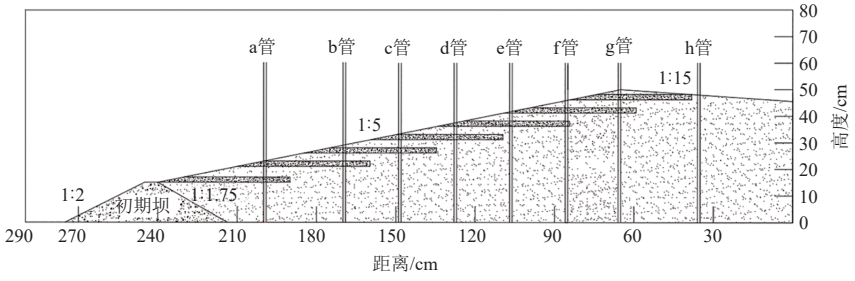


图6 尾矿坝模型剖面图

Fig. 6 Cross-sectional view of the tailings dam model

试验所用废石经等量替代法处理并筛分，其干密度介于1.66~2.40 g·cm^{-3}，直剪试验（CD）测得强度指标为：黏聚力C=135.0 kPa，内摩擦角φ=39.5°。按粒径区间百分含量划分了三种试验级配，见表2。

1.6 试验对比方案

本次模型试验旨在对比分析含废石格网尾矿坝与传统尾矿坝在渗流稳定性及尾砂固结力学性质方面的差异。试验首先设置不含废石格网的对照组（试验1组）。含废石格网试验共分7组（试验2~8组），具体包括：试验2、3、4组重点研究改变废石级配对坝体浸润线及渗流特性的影响；试验6、7、8组则主要探究改变坝坡比对浸润线及尾砂固结力学性质的影响。根据相关文献[18,19]，尾砂浆浓度过低会导致试验效果不明显，浓度过高（>50%）则易使浆体呈膏体状并引发淤堵问题。因此，本试验确定采用尾砂含量为40%的尾砂浆进行试验，以确保获得最佳的试验效果。详细的试验方案见表3。

表2 废石格网级配参数

Table 2 Gradation parameters of the waste rock mesh

级配组数	废石级配/%				废石尺（宽×厚）	废石间距
	0~2 mm	2~5 mm	5~10 mm	10~20 mm		
a	14	30	36	20	2 cm × 2 cm	12 cm × 12 cm
b	13	21	37	29		
c	12	12	37	39		

表3 废石-尾矿坝模型试验方案

Table 3 Test scheme for the waste rock-tailings dam model

试验组数	试验类型	废石级配/%				外坝坡比	废石间距
		0~2 mm	2~5 mm	5~10 mm	10~20 mm		
试验1	无废石对照组	无	无	无	无	1∶5	无
试验2	a级配试验组	14	30	36	20	1∶5	12 cm × 22 cm
试验3	b级配试验组	8	12	37	30	1∶5	
试验4	c级配试验组	12	16	33	39	1∶5	
试验5	间距试验组	12	16	33	39	1∶5	12 cm × 12 cm
试验6	坡比1∶5试验组					1∶5	
试验7	坡比1∶4试验组					1∶4	
试验8	坡比1∶3试验组					1∶3	

2 模拟试验结果分析

2.1 不同试验组单位时间渗流量分析

模型试验中，于尾矿坝库尾注水并保持恒定水头（46.67 cm），待下游渗流稳定后，使用带刻度量筒分别记录1、2、3 min的渗流体积（V），计算单位时间渗流量（$Q=V/t$），并取三次测量的平均值以确保结果准确性。单位时间渗流量（Q）越大，表明坝体渗透性越好，其对应的渗透系数通常也越高。

不同废石级配单位渗流量曲线如图7所示。由图7可知，所有含废石格网的尾矿坝模型，其单位时间渗流量（Q）均高于无废石对照组。其中，采用c级配废石的试验组渗流量最大，b级配次之，a级配最小。具体而言，a级配试验组的渗流量约为对照组的1.75倍，而c级配试验组则达到了对照组的2.23倍。渗流量随废石中粗颗粒含量的增加而显著升高。因此，后续试验选用渗流效果最优的c级配废石。

不同废石间距和不同坝坡比下的渗流量变化如图8、图9所示。如图8所示，无废石对照组的渗流量最小。在采用c级配废石的试验组中，格网中心间距为12 cm × 12 cm的试验组渗流量最大。这表明，废石格网间距越小，越有利于坝体渗流排水，单位时间渗流量越大。由图9可知，加入废石格网后，各试验组的渗流量均有所提升，但提升幅度受坝坡比影响。当坝坡比为1∶3时，渗流量提升最小（约为对照组的1.26倍）；坝坡比为1∶4时，提升幅度增大（约为对照组的1.78倍）。整体而言，随着坝坡比变陡（坡度增

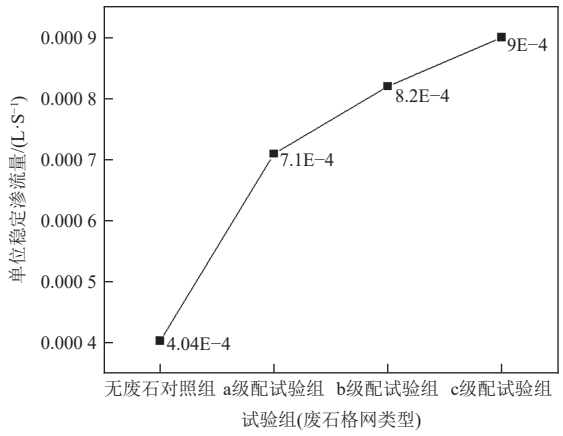


图7 不同废石级配单位渗流量曲线

Fig. 7 Unit seepage flow curves for different waste rock gradations

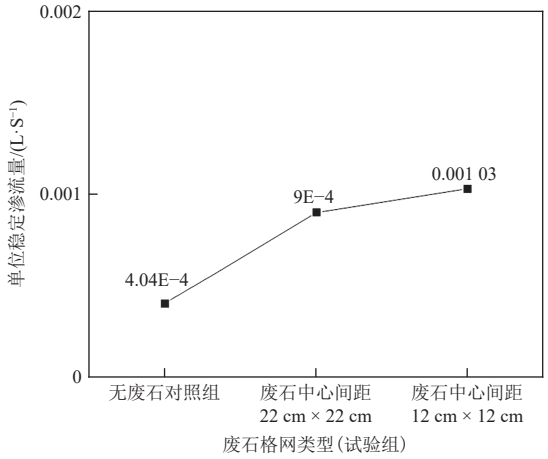


图8 不同废石间距单位渗流量曲线

Fig. 8 Unit seepage flow curves for different waste rock mesh spacings

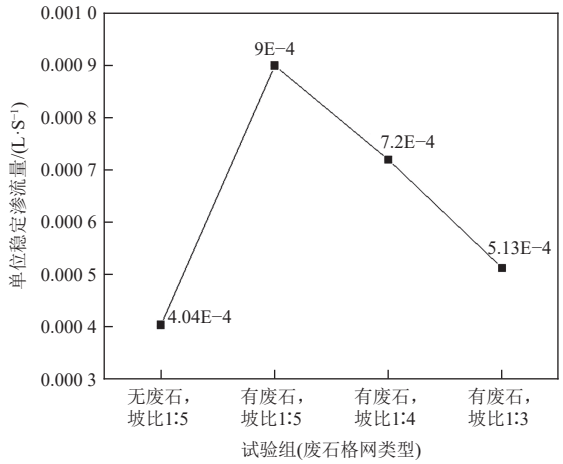


图9 不同坝坡比单位渗流量曲线

Fig. 9 Unit seepage flow curves for different dam slope ratios

加)，尾矿坝的渗流量呈现下降趋势，这可能与较陡的下游坡面不利于渗水顺利排出有关。这一结果说明，废石格网的设置能有效提升尾矿坝的渗流排水能力。其提升效果受废石级配、格网间距及坝坡比共同影响：粗颗粒含量越高、格网间距越小、坝坡比越缓(坡度越小)，则单位时间渗流量越大，排渗效果越佳。

2.2 不同试验组对浸润线埋深的影响

浸润线是影响尾矿坝稳定性的关键因素。为探究废石格网对降低浸润线的作用，试验通过改变废石级配、格网间距及坝坡比，测量了不同模型下的浸润线埋深，结果如图10~12所示。

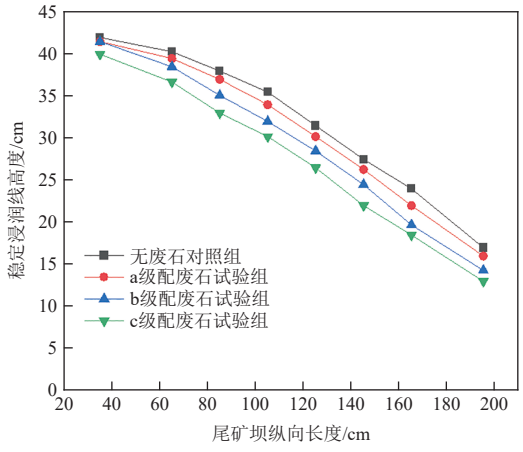


图10 不同废石颗粒级配浸润线埋深曲线

Fig. 10 Phreatic line depth curves for different waste rock gradations

由图10可知，采用c级配(粗颗粒含量最高)、b级配和a级配废石的试验组，其坝体平均浸润线埋深分别为27.34、29.08和30.69 cm。相较于无废石对照组，三者浸润线分别降低了3.54 、2.80和1.39 cm。这表明，废石中粗颗粒含量越高，对降低浸润线的效果越显著。由图11可见，间距为12 cm × 12 cm的试验组平均浸润线埋深为26.16 cm，间距为22 cm × 22 cm的试验组为27.49 cm，两者相比无废石对照组，浸润线分别降低了4.31 cm和3.54 cm。格网间距越小，排水通道越密集，降低浸润线的效果越好。从图12可以看出，在设置废石格网的情况下，不同坝坡比试验组的浸润线仍呈现规律性变化：坝坡比越陡(如1:3)，浸润线位置相对越高；坝坡比越缓(如1:5)，浸润线位置越低。尽管如此，所有含废石格网的试验组浸润线均显著低于无废石对照组，其中坡比1:5的试验组浸润线平均降低了3.54 cm，再次验证了废石格网的排水效用。综上可知，废石格网能有效降低尾矿坝浸润线，其效果与废石粗颗粒含量正相关，与格网间距负相关。虽然较缓的坝坡比本身有利于维持较低的浸润线，但废石格网的引入在不同坡比下

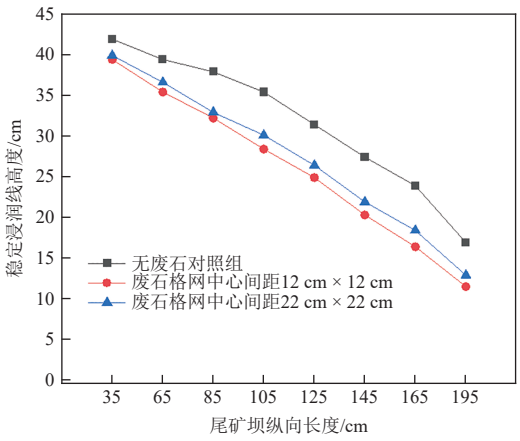


图11 不同废石格网间距浸润线埋深曲线

Fig. 11 Phreatic line depth curves for different waste rock mesh spacings

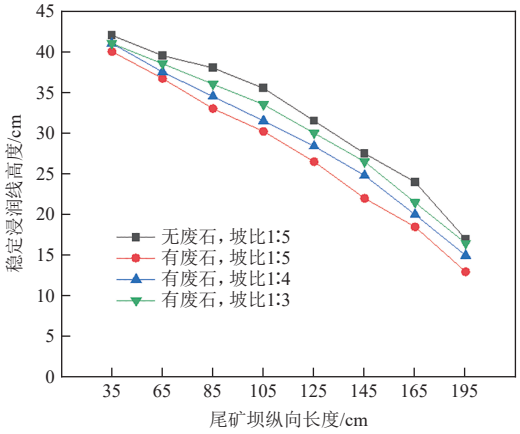


图12 不同坝坡比浸润线埋深曲线

Fig. 12 Phreatic line depth curves for different dam slope ratios

均能带来显著的附加降低效果。

2.3 不同坝坡比下尾砂静力学指标对比

在确定最优废石级配（c级配）与格网间距（12 cm × 12 cm）后，进一步研究不同坝坡比对尾砂固结后静力学性质的影响。在模型顶部以下18、28和38 cm深度处，采用梅花桩形布置取样（见图13），对比分析其孔隙比（e）、黏聚力（c）和内摩擦角（φ）。



图13 尾矿坝模型取样方法照片

Fig. 13 Photo of the sampling method in the tailings dam model

对该尾矿样的测试表明，其最大与最小孔隙比分别为1.09和0.48，天然孔隙比为0.60。试验控制相对密实度为0.70（>0.67），根据判别标准，尾砂试样处于密实状态。采用WG三联高压固结仪对不同坝坡比模型、不同深度处取得的尾砂样进行饱和固结试验，得到e-p曲线，如图14所示。

从图14可以看出，所有试验组均表现出同一规律：38 cm深度处的最终固结孔隙比小于28 cm和18 cm深度处。这表明在相同自重固结时间内，深度越大，固结程度越高，孔隙比减小越明显，符合尾砂的固结特性。固结压力在0~200 kPa时，孔隙比下降速率较快；压力大于200 kPa后，下降速率趋缓。对比不同试验组的e-p曲线，在相同固结压力下，坡比1∶5试验组的固结孔隙比最小，坡比1∶4次之，坡比1∶3较大，无废石对照组最大。这证明采用废石格网联合筑坝能有效加速尾砂排水固结，且在较缓的坝坡（1∶5）条件下固结效率最优。

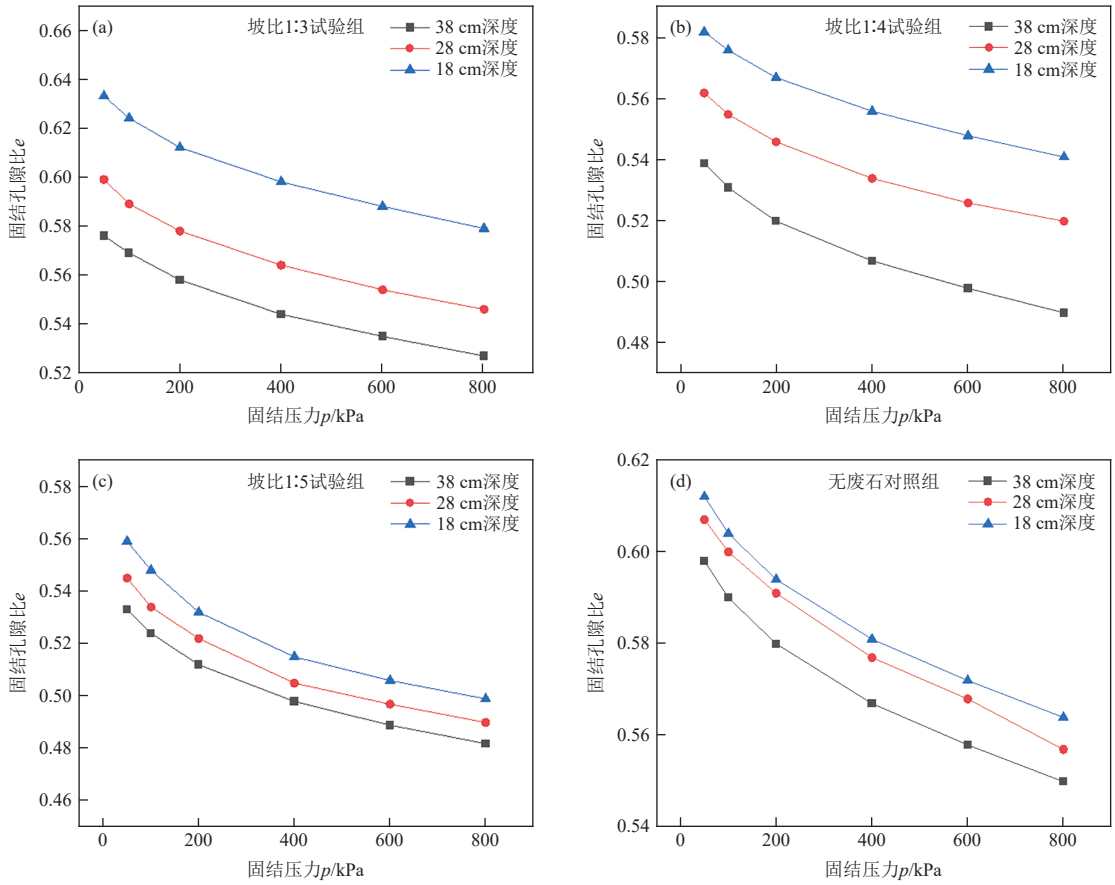


图14 不同坝坡比模型、不同深度处尾砂的e-p曲线

Fig. 14 e-p curves of tailings at different depths for models with different slope ratios

采用ZJ型应变控制式直剪仪对试样进行固结快剪试验，结果如图15所示。

从图15可以看出，所有试验组在固结后，黏聚力均有所提升。同一试验组内，提升幅度随取样深度增加而增大（38 cm处提升最大，18 cm处最小）。无论是固结前还是固结后，含废石格网的试验组其黏

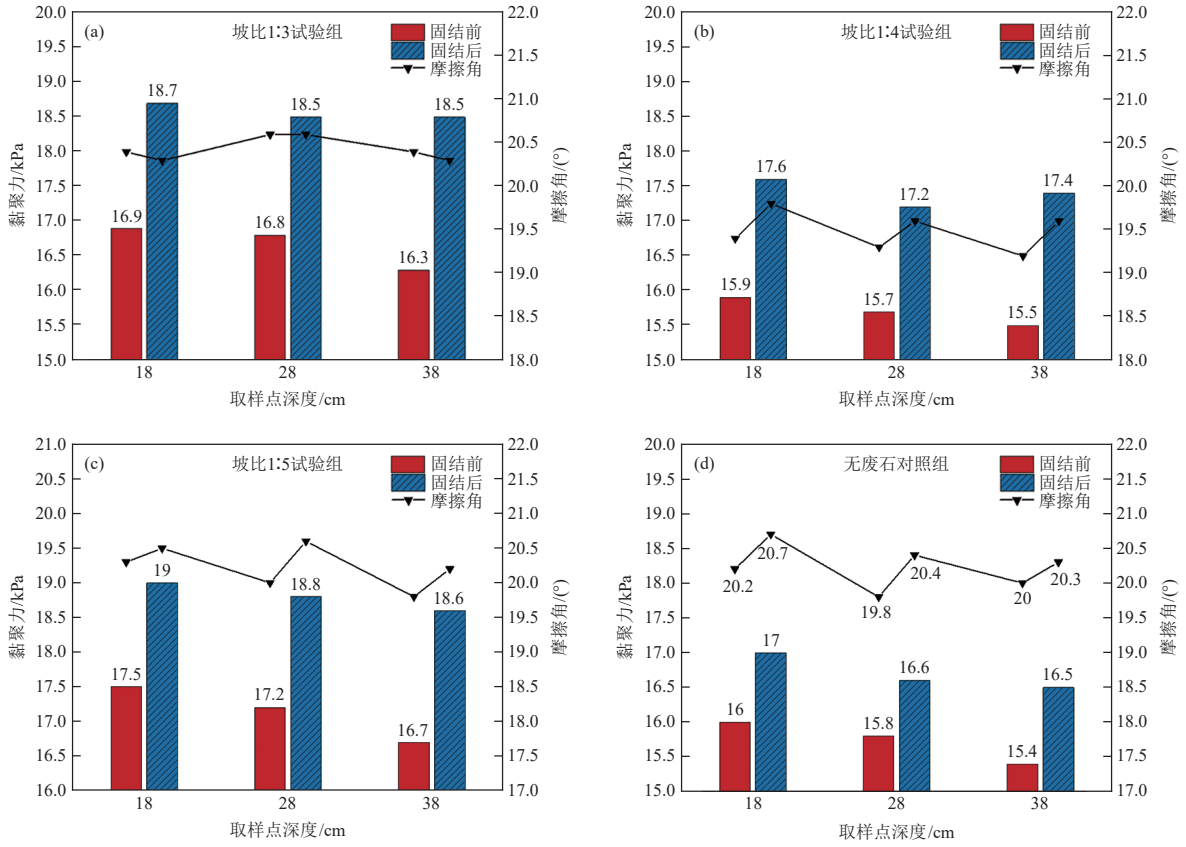


图15　不同坝坡比模型、不同深度处尾砂的力学指标变化

Fig. 15　Variations in mechanical indicators of tailings at different depths for models with different slope ratios

聚力均高于无废石对照组。其中，坡比1∶5试验组整体黏聚力较无废石对照组平均提升了约2.1 kPa。固结后，各试验组尾砂的内摩擦角均略有提高。上述结果说明，废石格网联合筑坝技术不仅能促进尾砂排水固结（降低孔隙比），还能显著改善其力学性质，特别是提高黏聚力。这种改善效果在坝体较深部位和较缓的坝坡条件下更为明显，从而整体上增强了尾矿坝的静力稳定性。

3　结论

1）废石级配是影响排渗效果的关键因素，粗颗粒含量越高，坝体单位时间渗流量越大，其中c级配（粗颗粒含量最高）效果最佳。同时，废石格网间距越小，排水路径越密集，排渗效果越显著。尽管坝坡变陡会一定程度抑制渗流，但所有含废石格网的试验组渗流量均显著高于传统无废石尾矿坝，证实了该技术改善坝体排水条件的有效性。

2）废石格网可显著降低坝体浸润线，提升渗流稳定性。废石粗颗粒含量增加与格网间距减小，均能有效降低坝体浸润线埋深。此外，较缓的坝坡有利于维持更低的浸润线。与无废石对照组相比，采用废石格网的各试验组浸润线均明显下降，表明该技术通过改善坝内排水，能够有效降低渗透破坏风险，增强尾矿坝的渗流稳定性。

3）联合筑坝技术能加速尾砂固结并改善其力学性质。在废石格网作用下，尾砂固结效率提高，表现为相同固结时间后孔隙比更低，且深度效应符合自重固结规律。力学特性方面，尾砂的黏聚力与内摩擦角均得到提升，且改善效果随取样深度增加而更为明显。这些静力学指标的增强，显著提升了尾矿坝体的抗剪强度，为其长期抗滑稳定与抗液化能力提供了关键保障。

参考文献

[1] 魏作安. 细粒尾矿及其堆坝稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
WEI Z A. Study on stability of fine tailings and their dam stacking[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.

[2] 梅国栋，王云海. 我国尾矿库事故统计分析与对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(3): 211-213.
MEI G D, WANG Y H. Research on statistical analysis and countermeasures of tailings pond accidents in China[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(3): 211-213.

[3] 杨晓炳，尹升华，郝硕，等. 废石全尾砂高浓度充填料浆的均质化模型[J]. 工程科学学报，2022, 44(7): 1115-1125.
YANG X B, YIN S H, HAO S, et al. Homogenization model of high concentration filling slurry of waste tailings[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(7): 1115-1125.

[4] 李苏琦，郭秀兰，龚祥，等. 攀枝花某含钛铁尾矿工艺矿物学及钛回收工艺探索[J]. 矿冶，2024, 33(1): 103-109.
LI S Q, GUO X L, GONG X, et al. Process mineralogy and titanium recovery process of titanium-bearing iron tailings from Panzhihua[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(1): 103-109.

[5] 曾爱民，涂晓琴，吴泽洲. 尾矿干排工艺与设备优化设计研究[J]. 矿冶，2021, 30(5): 24-27.
ZENG A M, TU X Q, WU Z Z. Research on optimization design of tailings dry discharge process and equipment[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(5): 24-27.

[6] 刘新，傅振南，张志辉. 铜冶炼炉渣选矿降低尾矿含铜工艺控制的实践[J]. 矿冶，2022, 31(1): 19-24.
LIU X, FU Z N, ZHANG Z H. Practice of process control for reducing copper content in tailings from copper smelting slag[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1): 19-24.

[7] 仝文慧，朱万成，牛雷雷. 废石尾砂胶结充填体断裂特性试验研究[J]. 金属矿山，2021(12): 118-123.
TONG W H, ZHU W C, NIU L L. Experimental study on fracture characteristics of waste tailings consolidated backfill[J]. Metal Mine, 2021(12): 118-123.

[8] 张静，刘再涛，李永新，等. 全尾砂和废石联合胶结充填体最佳配比及应用[J]. 矿冶工程，2020, 40(3): 10-14.
ZHANG J, LIU Z T, LI Y X, et al. Optimal ratio of tailings and waste rock combined cemented backfill and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(3): 10-14.

[9] 李涛，刘国栋，王聪，等. 砭家沟尾矿库渗透特性及灾害防治研究[J]. 矿业研究与开发，2019, 39(11): 99-104.
LI T, LIU G D, WANG C, et al. Research on permeability characteristics and disaster prevention of Bianjiagou tailings pond[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(11): 99-104.

[10] 杨玉婷，王光进，艾敏，等. 尾矿库渗流溃坝模型试验研究[J]. 矿冶，2019, 28(5): 15-20.
YANG Y T, WANG G J, AI M, et al. Model test of seepage and dam break in tailings pond[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(5): 15-20.

[11] 谢意，曹海莹，周城屹，等. 考虑土层界面效应的尾矿坝渗流稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术，2024, 20(6): 154-160.
XIE Y, CAO H Y, ZHOU C Y, et al. Analysis of seepage stability of tailings dam considering soil layer interface effect[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(6): 154-160.

[12] 高翎翔. 内置废石柱尾矿坝渗流特性及稳定性研究[D]. 衡阳：南华大学，2019.
GAO L X. Study on seepage characteristics and stability of tailings dam with built-in waste rock column[D]. Hengyang: University of South China, 2019.

[13] 吴桐. 废石堤网尾矿坝渗流特征及稳定性分析[D]. 南昌：南昌大学，2022.
WU T. Seepage characteristics and stability analysis of tailings dam in waste rock embankment network[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

[14] WICKLAND E B, WILSON G W, WIJEWICKREME D. Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(9): 928-945.

[15] WICKLAND B E, WILSON G W, WIJEWICKREME D. Hydraulic conductivity and consolidation response of mixtures of mine waste rock and tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4): 472-485.

[16] BIGOT M, PALTSEVA A, HENAO T, et al. Metal-binding hydrogel particles alleviate soil toxicity and facilitate healthy plant establishment of the native metallophyte grass Astrebla lappacea in mine waste rock and tailings[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 248-249: 424-434.

[17] PEDRETTI D, MAYER K U, BECKIE R D. Evaluating dual-domain models for upscaling multicomponent reactive transport in mine waste rock[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2022, 244: 103931.

[18] 杜林华. 我国矿山尾矿、废石综合利用现状及其管理制度建设研究[D]. 北京：中国地质大学(北京), 2008.
DU L H. Research on the status quo and management system construction of comprehensive utilization of mine tailings and waste rock in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.

[19] 黄保平，孙从露，邵龙潭，等. 尾矿库高浓度输送低浓度排放新工艺[J]. 矿业研究与开发，2015, 35(9): 91-96.
HUANG B P, SUN C L, SHAO L T, et al. New technology of high concentration transportation and low concentration discharge of tailings pond[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(9): 91-96.