冻融循环条件下尾矿材料力学行为的关键影响因素研究*

刘昊[1],黄刚[1],张骥[2],印提军[2],杨云钦[1],杨超凡[1],陈静[3]

(1.武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
2.安徽马钢矿业资源集团姑山矿业有限公司, 安徽 马鞍山市 243000;
3.湖北工业大学 创新创业学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:探究了冻融循环作用下尾矿材料力学特性的演变规律,以期为尾矿坝的安全性和稳定性评估提供理论依据。对不同含水率的尾矿试样进行了1,3,5,7,9次冻融试验,并在100 kPa至400 kPa的围压条件下进行了三轴剪切试验。试验结果表明,随着冻融循环次数的增加,尾矿的宏观结构变形显著增大,尤其是当含水率为15%时,经过7次冻融循环后,尾砂的孔隙结构发生了显著变化,0~250 μm^3 体积级别的孔隙数量明显增多。此外,研究发现增大围压可以提高尾矿的弹性模量,并抑制冻融循环作用对尾矿的损伤。尾矿的变形模量在经历5次冻融循环后趋于稳定,而高含水率的尾矿样本展现出较低的黏聚力、内摩擦角和变形模量。

关键词:尾矿;冻融循环;三轴剪切;力学参数

中图分类号:TD926.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)04-0039-07

Study on the Key Influencing Factors of the Mechanical Behavior of Tailings Materials Under Freeze-Thaw Cycles

LIU Hao[1], *HUANG Gang*[1], *ZHANG Ji*[2], *YIN Tijun*[2], *YANG Yunqin*[1], *YANG Chaofan*[1], *CHEN Jing*[3]

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
2.Anhui Masteel Mining Resources Group Gushan Mining Co., Ltd., Maanshan, Anhui 243000, China;
3.School of Innovation and Entrepreneurship, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: The evolution law of mechanical properties of tailings materials under freeze-thaw cycles is explored to provide a theoretical basis for the safety and stability evaluation of tailings dams. The tailings samples with different water contents were subjected to 1, 3, 5, 7, 9 freeze-thaw tests, and triaxial shear tests were performed under confining pressure conditions of 100 kPa to 400 kPa. The test results show that with the increase of the number of freeze-thaw cycles, the macroscopic structural deformation of the tailings increases significantly. Especially when the water content is 15 %, after 7 freeze-thaw cycles, the pore structure of the tailings changes significantly, and the number of pores at the volume level of 0-250 μm^3 increases significantly. In addition, it is found that increasing confining pressure can improve the elastic modulus of tailings and inhibit the damage of tailings caused by freeze-thaw cycles. The deformation modulus of the tailings tends to be stable after 5 freeze-thaw cycles, while the tailings samples with high water content show lower cohesion, internal friction angle and deformation modulus.

Key words: Tailings, Freeze-thaw cycle, Triaxial shear, Mechanical parameter

0 引言

冻融循环作用[1]广泛存在于自然界中,对尾矿的力学性质和稳定性具有重要影响。了解冻融循环作用对尾矿力学参数的影响,有助于确保尾矿坝的安全性和环境保护。对于某些寒冷的地区而言,冻结和融化作用会导致尾矿的力学强度和抗变形能力降低,从而影响尾矿坝的安全性[2]。

目前已有学者研究了冻融循环作用对不同干容重、不同含水率土样的抗剪强度的影响[3-4]。LI等[5]通过在不同温度条件下对不同含水率的人工冻土进行三轴蠕变试验,发现当试验温度为-10 ℃

* **收稿日期**:2024-04-19
基金项目:国家自然科学基金面上项目(42271296)
作者简介:刘昊(1999—),男,四川内江人,硕士,主要从事矿山安全方面的研究工作。E-mail:15282107451@163.com
通信作者:黄刚(1986—),男,湖北黄冈人,博士,副教授,主要从事采矿工程、爆破工程方面的研究工作。E-mail:huanggang2016@whut.edu.cn

时,随着冻融循环次数的增加,强度先增加后减小,但变化幅度不大。艾凯明等[6]研究了开放条件以及密封条件下冻融循环对尾矿材料的影响,发现当冻融循环达到 6 次之后,开放条件下的尾矿试样表面开始出现龟裂,密封组则无明显裂纹,而开放组与密封组的尾矿的含水率分别在冻融循环达到 12 次和 9 次后趋于稳定,这一发现为冻融次数的设置提供了参考。张二军等[7]采用压汞法研究了冻融循环作用下尾矿孔隙率和孔隙体积变化规律,发现冻融循环作用导致的尾矿颗粒大小的变化以及颗粒间骨架结构的破坏是尾矿孔隙率与孔隙体积变化的主要原因,并且尾矿孔隙体积随着冻融次数的增加而增大,孔隙率先增大后减小再缓慢增大。而何向荣等[8]则认为冻融循环作用不是尾矿剪切破坏的主要因素,并提出采用合理的放矿速率及放矿方式能够有效提高尾矿的抗剪强度。JIANG 等[9]发现冻融循环作用会对尾矿表面产生显著破坏,同时尾矿样品的抗压强度也随着降低。LIU 等[10]提出了一种能够预测冻融尾矿变形特性的本构模型,并验证了其可靠性,由此进一步佐证了冻融尾矿损伤规律的可预测性。

然而,目前关于冻融循环作用对尾矿材料力学参数演变规律的系统性研究仍然不足,这限制了对尾矿坝在冻融环境下的行为的深入理解。因此,本文系统地研究不同含水率和围压条件下尾矿材料力学参数的变化规律,通过开展冻融循环试验,研究冻融循环作用对尾矿力学参数的影响,包括尾矿的孔隙度、以及三轴剪切试验中不同围压下尾矿的黏聚力、内摩擦角、变形模量,以期为尾矿坝的安全性和稳定性评估提供理论依据。

1 冻融循环作用下尾矿材料细观结构变化研究

1.1 试样制备及方案

试验所用尾矿取自安徽省白象山铁矿。通过细筛筛分,得出尾矿的粒径级配,见表 1。

表 1 尾矿材料粒径级配

Table 1 Particle size gradation of the tailings

粒径/mm	比例/%
[0, 0.15)	19.05
[0.15, 0.3)	57.94
[0.3, 0.6]	23.01

试样制作参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)[11],同时为满足 CT 扫描目标分辨率所需的尺寸要求,将尾矿材料制成 40 mm×40 mm×40 mm 的正方体。为探究含水率 ω 对试样冻融损伤的规律,除含水率为 15%的试样之外,还制备了含水率为 17%和 19%的试样作为对照组,按照冻融试验方案进行分组冻融处理,每组 3 个试样。

采用 HDM-10C 型冻融试验机冻融试样,冻结温度设定为−20 ℃,时间设定为 8 h;融解温度设定为 20 ℃,融解时间为 8 h。综合考虑已有研究成果,设定冻融循环次数最多为 9 次[12],共分为 0, 1, 3, 5, 7, 9 次,共 6 组。为了防止试样水分的挥发或迁移,用保鲜膜包裹试样后再进行冻融处理。

1.2 冻融尾矿 CT 扫描结果及分析

1.2.1 冻融循环下尾矿的质量变化规律

冻融处理完成后,首先称量其质量,并与冻融前的质量数据对比,试验结果见表 2,冻融处理后的试样如图 1 所示。从冻融 7 次开始,冻融前后平均质量损失极小,因此包裹了保鲜膜的试样,可以认为其含水率保持相对稳定。

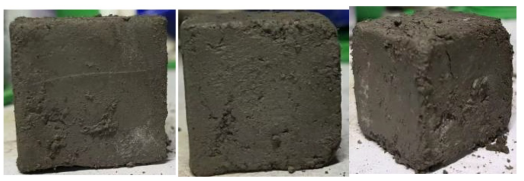
表 2 尾矿冻融前后质量对比

Table 2 Quality comparison of the tailings before and after freezing and thawing

冻融次数/次	含水率/%	试样平均质量/g		质量损失率/%
		冻融前	冻融后	
1	15	139.7	139.4	0.214
	17	137.2	136.9	0.219
	19	133.8	133.2	0.448
3	15	138.8	138.6	0.144
	17	137.7	137.6	0.073
	19	134.6	134.5	0.074
5	15	141.9	140.0	1.339
	17	136.4	136.0	0.293
	19	134.5	134.4	0.074
7	15	140.2	140.1	0.071
	17	138.1	137.6	0.362
	19	133.5	133.2	0.224
9	15	139.6	138.9	0.501
	17	136.7	135.7	0.732
	19	134.8	134.4	0.297

结合图 1(a)至图 1(c)可知,在经过 1 次冻融后,试样的宏观形态基本保持完整,含水率 ω=19%的试样表面出现了脱落;经过 3 次冻融后,ω=19%的试样产生了一定的宏观变形,并且其表面产生的裂隙损伤数量也明显多于同组中含水率较低的其他试样;而当冻融次数达到 5 次之后,ω=15%的试样

开始产生形变,而 ω 更高的试样则产生了明显的宏观变形。从图 1(d)可以看出,冻融次数达到 7 次后,$\omega=15\%$的试样产生了较为明显的宏观变形。



ω=15% ω=17% ω=19%

(a) 冻融循环 1 次



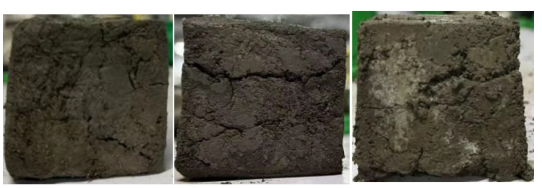
ω=15% ω=17% ω=19%

(b) 冻融循环 3 次



ω=15% ω=17% ω=19%

(c) 冻融循环 5 次



ω=15% ω=17% ω=19%

(d) 冻融循环 7 次



ω=15% ω=17% ω=19%

(e) 冻融循环 9 次

图 1 冻融试样外观形貌

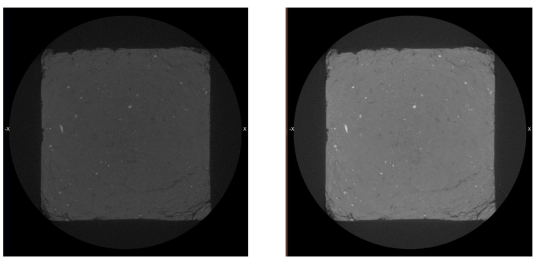
Fig.1 The appearance and morphology of freeze-thaw specimens

从图 1 的组间对比以及组内对比可以看出:随着冻融循环次数的增加,尾矿的形变程度逐渐增大,且宏观裂隙及损伤数量越多、越明显;在冻融循环次数相同的情况下,尾矿试样的含水率越高,越容易产生形变以及损伤。

由于在冻融循环达到 7 次时,$\omega=15\%$的试样开始产生较明显的形变,因此选择该条件的试样进行 CT 扫描,同时将未经冻融的试样作为对照组进行对照分析。

1.2.2 冻融循环对尾矿孔隙演化的影响

采用型号为 Xradia 510 Versa 的高分辨三维 X 射线显微成像系统获取尾矿 CT 图像,然后通过 Dragonfly 三维可视化软件中自带的中值算法对 CT 图像进行降噪处理,处理前后的图形如图 2 所示。由图 2 可以看出,经过降噪处理后,图像中的矿物颗粒以及孔隙分布更加清晰,同时也保留了原始图像的相关细节。



(a) 降噪前 (b) 降噪后

图 2 降噪前后对比

Fig.2 Comparison of tailings CT images before and after noise reduction

经过图像处理及分析后,得出尾矿的孔隙率数据为:未经冻融处理的尾矿试样的孔隙率为2.53%,经过 7 次冻融处理的尾矿试样的孔隙率为 14.98%。结合图 1 可知,冻融循环作用会导致尾矿的孔隙率显著增大,继而产生宏观上的形变以及损伤,并且这两种效应与试样的含水率呈正相关[13]。孔隙率增大的原因是尾矿原生孔隙中存在水,在温度的周期性变化过程中孔隙水的体积随之产生周期性的增大与减小,导致孔隙体积逐渐增大,尾矿固体颗粒也因此受到挤压。当冻融循环作用达到一定周期后,孔隙体积的增大导致试样产生宏观裂隙与损伤,而尾矿颗粒受到挤压作用产生的位移逐渐累积,导致试样产生宏观形变。

此外,考虑到低温从表面传递到试样中心需要额外花费时间,在冻结周期为 8 h 的工况下,试样中心部分受到-20 ℃的温度作用的时长低于理论设定值 8 h。根据已有研究[14-15],铁尾矿的导热系数为 2.47 W/(m·k),比热容为 760 J/(kg·℃),试验中试样的平均质量为 137.2 g,则要让一个试样从室温(20 ℃)降至-20 ℃所需要的热量为:

$$Q=cm\Delta T=4\ 170.88\ \text{J} \tag{1}$$

式中:c 为比热容,取 760 J/(kg·℃);m 为质量,取 137.2 g;ΔT 为温度差,取 40 ℃。

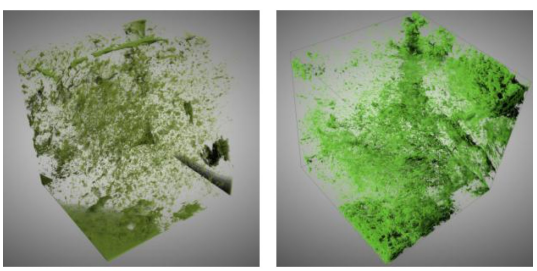
同时根据傅里叶定律:

$$Q=-\frac{\lambda A\Delta T}{h}\Delta t \tag{2}$$

式中:λ 为导热系数,取 2.47 W/(m·k);A 为横截面积,取 1.6×10^{-3} m^2;h 为传播距离,取 0.02 m;Δt 为时间,s。

联立式(1)与式(2)可得,尾矿试样整体温度下降到−20 ℃所需的时间为:Δt=538.46 s,即试样整体降至−20 ℃的时间不超过 10 min,因此温度传播额外花费的时间对尾矿孔隙扩展造成的影响可以忽略不计。

为研究冻融 7 次后试样的孔隙度,在 CT 数据处理中截取了试样正中心尺寸为 35 mm×35 mm×35 mm 的正方体空间内的孔隙分布情况,如图 3 所示。冻融 7 次后的尾矿孔隙相比未冻融时的规模有所增大,但主要分布在试样的靠外侧,而试样的中心部分较为完整,孔隙情况与未冻融尾矿比较接近。



(a) 未冻融 (b) 冻融 7 次

图 3 尾矿孔隙空间分布

Fig.3 Spatial distribution of tailing pores

未冻融和冻融 7 次试样的体积分布情况见表 3 和表 4。从表 3 和表 4 可以看出,冻融循环作用后,0～250 μm^3 体积规模的孔隙数量增长最多,这说明在冻融循环作用后产生了大量的新孔隙。受温度影响,尾矿颗粒间的接触被破坏,在挤压作用下产生位移,进而产生了新的孔隙。体积为 750～1 000 μm^3 的孔隙数量有所减少,其原因可归纳为:部分尾矿颗粒在挤压作用或者孔隙液相水迁移过程中从原本位置迁移至大孔隙中,这一进程导致产生新的小孔隙以及大孔隙数量的减少。体积在 750～1 000 μm^3 范围内的部分孔隙互相连通形成了体积更大的孔隙,导致这一体积范围内的孔隙数量减少。体积大于 1 000 μm^3 的孔隙数量增加,其原因是孔隙中的各相物质产生体积变化造成原生孔隙体积增大,最大连通孔隙体积的增大进一步导致孔隙连通性增强[16]。

表 3 尾矿冻融前后不同体积孔隙的分布情况

Table 3 Distribution of pores with different volumes in the tailings berfore and of the freezing-thawing cycles 个

冻融次数/次	0～250 μm^3	250～500 μm^3	500～750 μm^3	750～1 000 μm^3	>1 000 μm^3
0	591 475	71 588	25 904	47 815	14 210
7	1 688 501	230 920	86 193	44 697	21 958

表 4 尾矿冻融前后最大连通孔隙体积情况

Table 4 Maximum connected pore volume in tailings before and after freezing and thawing

冻融次数/次	最大连通孔隙体积/μm^3
0	1.8×10^6
7	6.7×10^6

2 冻融循环作用下尾矿力学特性试验研究

2.1 试样制备及方案

试样制作参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)。试样直径为 39.1 mm,高为 80 mm。先将尾矿烘干至恒重,然后加水并搅拌均匀,制备含水率为 15%的尾矿试样;用模具制备试块,并测量试样尺寸,检验试块是否完好;将试块用保鲜膜封存,将需要进行冻融循环处理的试块放入冻融循环机。

通过 DYNTTS 型伺服电机控制的三轴剪切测试系统,在固定围压下,逐渐增加轴向压力,直到试块破坏。首先对试块进行冻融处理,冻融次数分别为 0,1,3,5,7,9 次,共 6 组,分别在 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 的围压下进行加载试验,测得不同围压下的试块强度。

2.2 尾矿三轴试验结果分析

未冻融尾矿的试验结果如图 4 所示,其应力-应变曲线在不同围压下表现出相似的特征,围压增大后偏应力的峰值也相应增大。在三轴试验中,一般采用应力-应变曲线中弹性阶段区域的斜率表示弹性模量[17]。从图 4 可以看出,随着围压增大,尾矿的弹性模量有增大的趋势[18],同时在加载达到峰值时的应变值也有增大。

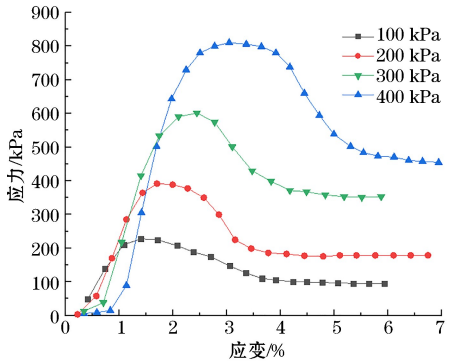


图 4 未冻融尾矿三轴剪切曲线

Fig.4 Triaxial shear curves of unfrozen and thawed tailings

图 5 给出了不同围压加载条件下,经历不同循环冻融次数的尾矿试样的偏应力变化规律。从图 5 可以看出,随着冻融循环次数的增加,尾矿的力学强度逐渐降低[19]。在第 1 次冻融之后试块强度的降低幅度最大,随后逐渐趋于稳定。在围压为 100 kPa 时,尾矿峰值偏应力在冻融循环 7 次后降低了 4%,冻融循环 9 次后降低了 1.79%,即在冻融循环 7 次之后,冻融循环作用对尾矿的损伤效果已经接近阈值,偏应力的峰值趋于稳定。在围压为 200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 的试验中,尾矿均表现出了相似的力学性质,区别在于随着围压的升高,冻融导致的尾矿偏应力降低的幅度逐渐减小,以冻融循环 1 次为例,200 kPa 的围压下尾矿偏应力降低了 14.15%,300 kPa 的围压下降低了 11.30%,400 kPa 的围压下降低了 7.94%。这一现象说明增大围压能够抑制冻融循环对尾矿的损伤作用。

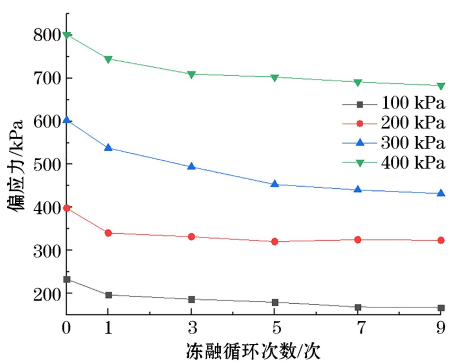


图 5 不同围压下冻融次数与偏应力关系

Fig.5 Relationship between the numbers of freezing and thawing and the bias stress under different circumferential pressures

2.3 尾矿力学参数分析

尾矿在不同冻融循环次数及不同围压条件下的各项力学性能指标参数见表 5 和表 6。

表 5 不同冻融循环次数下的尾矿黏聚力与内摩擦角

Table 5 Cohesion and internal friction of tailings under different times of freezing-thawing cycles

冻融次数/次	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	15.16	18.35
1	10.01	14.34
3	11.03	12.61
5	10.01	11.39
7	9.67	10.60
9	8.98	11.79

表 6 不同冻融次数与不同围压下的尾矿变形模量

Table 6 Deformation modulus of tailings under different freezing-thawing times and circumferential pressures

冻融次数/次	变形模量/MPa			
	围压 100 kPa	围压 200 kPa	围压 300 kPa	围压 400 kPa
0	15.33	22.01	25.35	26.69
1	14.10	19.05	22.19	23.83
3	12.64	18.63	19.20	21.16
5	10.12	17.54	18.66	20.82
7	10.22	16.93	18.69	20.11
9	9.99	15.56	18.40	19.32

尾矿力学参数的变化趋势与通过统计拟合得到的曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,尾矿的黏聚力、内摩擦角以及变形模量均随着冻融次数的增加而降低,最终收敛于某一稳定值。前 3 次冻融导致的各参数的减小幅度较大,随后变化幅度逐渐降低。通过指数函数对这 3 个参数的离散点进行拟合,所得拟合函数的拟合优度 R^2 均较高,说明这 3 个参数与冻融循环次数的关系接近于指数函数规律[20]。力学参数与冻融次数之间的拟合函数关系式见式(3)至式(8)。

(1) 黏聚力 c 与冻融循环次数 n 的关系:

$$c=9.922+5.238\times e^{\frac{-n}{0.245}} \tag{3}$$

(2) 内摩擦角 φ 与冻融循环次数 n 的关系:

$$\varphi=11.293+6.965\times e^{\frac{-n}{1.366}} \tag{4}$$

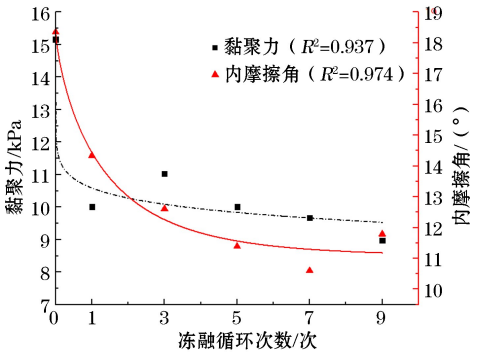
(3) 围压为 100~400 kPa 时变形模量 E 与冻融循环次数 n 的关系:

$$E_{100}=9.083+6.367\times e^{\frac{-n}{3.983}} \tag{5}$$

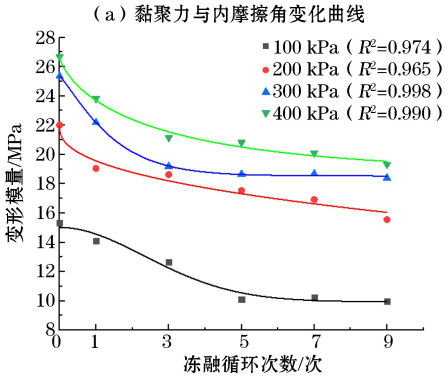
$$E_{200}=15.220+6.156\times e^{\frac{-n}{4.497}} \tag{6}$$

$$E_{300}=18.434+6.966\times e^{\frac{-n}{1.518}} \tag{7}$$

$$E_{400}=19.671+6.928\times e^{\frac{-n}{2.108}} \tag{8}$$



（a）黏聚力与内摩擦角变化曲线



（b）变形模量变化曲线

图 6 冻融循环作用后尾矿力学性能变化

Fig.6 Changes in mechanical properties of tailings after freeze-thaw cycle action

从图 6(a)可以看出，尾矿的黏聚力在经过一次冻融循环后变化幅度为 33.97%，随着冻融次数的增加，变化幅度总体上逐渐减小，在冻融循环 9 次之后比未经过冻融处理的尾矿降低了 40.77%。在试验中经历不同冻融循环次数后，内摩擦角比前一次冻融循环试验的降低幅度分别为 21.86%、12.06%、9.67%、6.94%，可以明显看出，在冻融循环 5 次之后，内摩擦角的值已趋于稳定。从图 6(b)可以看出，尾矿的变形模量随着围压的增加而明显增大，在冻融循环 5 次之后，变形模量的值基本保持稳定。

冻结过程中，尾矿孔隙中的液态水受冷凝结成冰，体积膨胀，造成孔隙体积增大，同时尾矿颗粒体积受冷收缩，两种效应叠加造成颗粒之间的接触破坏；在升温融解过程中，固态水融化，体积减小并小于孔隙体积，因而可能产生流动，对尾矿颗粒之间的摩擦与接触产生弱化。由于在冻融过程中试样被密封，含水率变化极小，可以忽略，导致升温融解过程中的融沉与重固结作用效果无法弥补冻胀作用对强度的削弱作用，导致试样的宏观强度降低。而孔隙体积的增大以及颗粒接触的减少导致试样的黏聚力和内摩擦角显著降低。

基于上述分析，结合不同含水率的尾矿试样在冻融循环后的形貌及孔隙率变化规律，发现冻融后的孔隙体积随着含水率的增加而增大，因此，较高含水率的试样，在经历冻融循环后，其力学强度、黏聚力、内摩擦角和变形模量均显著下降[6,21]。

3 结论

通过 CT 扫描试验以及室内三轴剪切试验，研究了冻融循环次数、含水率对尾矿试件裂隙数量和强度等力学参数的影响规律，并探究了试样的损伤破坏机理，得出以下主要结论。

（1）尾矿的宏观结构变形和孔隙结构随着冻融循环次数的增加而显著变化，尤其是在含水率为 15%时，经过 7 次冻融循环后，0～250 μm^3 体积级别的孔隙数量明显增多。

（2）增大围压可以有效提高尾矿的弹性模量，并抑制冻融循环造成的损伤，而尾矿的变形模量在 5 次冻融循环后趋于稳定。

（3）高含水率的尾矿样本在冻融循环后展现出较低的黏聚力、内摩擦角和变形模量，这表明含水率是影响尾矿力学行为的关键因素。通过 CT 扫描试验和三轴剪切试验，揭示了冻融循环下尾矿力学参数的演变规律，并建立了尾矿力学参数与冻融循环次数之间的指数函数关系。

参考文献(References)：

[1] 魏作安，杨永浩，徐佳俊，等.人工冻结尾矿力学特性单轴压缩试验研究[J].东北大学学报(自然科学版)，2016，37(1)：123-126+142.
WEI Zuoan，YANG Yonghao，XU Jiajun，et al. Experimental study on the mechanical properties of frozen tailings by uniaxial compression tests [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science)，2016，37(1)：123-126+142.

[2] 侯运炳，曹曙雄，丁鹏初，等.冻融循环对全尾砂固结体强度的影响[J].金属矿山，2019(1)：34-39.
HOU Yunbing，CAO Shuxiong，DING Pengchu，et al. Effect offreeze-thaw cycle on the intensity of consolidated full tailings[J]. Metal Mine，2019(1)：34-39.

[3] 王铁行，罗少锋，刘小军.考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融循环强度试验研究[J].岩土力学，2010，31(8)：2378-2382.
WANG Tiexing，LUO Shaofeng，LIU Xiaojun. Testing study of freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content [J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(8)：2378-2382.

[4] 董晓宏,张爱军,连江波,等.长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J].工程地质学报,2010,18(6):887-893.
DONG Xiaohong, ZHANG Aijun, LIAN Jiangbo, et al. Laboratory study on shear strength deterioration of loess with long-term freezing-thawing cycles [J]. Journal of Engineering Geology,2010,18(6):887-893.

[5] LI Dongwei, YANG Xin, CHEN Junhao. A study of triaxial creep test and yield criterion of artificial frozen soil under unloading stress paths [J]. Cold Regions Science and Technology,2017,141:163-170.

[6] 艾凯明,周科平,胡建华,等.寒区尾矿力学特性的环境响应试验[J].矿冶工程,2014,34(3):4-8.
AI Kaiming, ZHOU Keping, HU Jianhua, et al. Experiment on environmental response of tailings' mechanical properties in cold regions[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2014,34(3):4-8.

[7] 张二军,王彪,梁冰,等.冻融循环作用下尾矿砂孔隙率变化规律研究[J].非金属矿,2018,41(1):53-55.
ZHANG Erjun, WANG Biao, LIANG Bing, et al. Study on pore variation of tailings sand under freeze-thaw cycles[J]. Non-Metallic Mines,2018,41(1):53-55.

[8] 何向荣,徐鹏飞.高海拔地区循环冻融尾矿抗剪强度及细观分析[J].科技创新与应用,2020(11):58-60+63.
HE Xiangrong, XU Pengfei. Study and microscopic analysis on the shear strength of tailings in high-altitude areas under freeze-thaw cycles[J]. Technology Innovation and Application, 2020(11):58-60+63.

[9] JIANG Fuliang, HAO Yuying, WU Haonan, et al. Study on damage degradation and radon emission from uranium tailing polymer-solidified soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,2022,33(4):1573-1583.

[10] LIU Youneng, LIU Enlong, YIN Zhenyu. Constitutive model for tailing soils subjected to freeze-thaw cycles based on meso-mechanics and homogenization theory [J]. Acta Geotechnica,2020,15(9):2433-2450.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设.土工试验试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural development of the People's Republic of China. Standard of geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S].Beijing:China Planning Press,2019.

[12] 刘友能,黄润秋,刘恩龙,等.冻融循环对云贵高原尾矿土力学性质的影响[J].西南交通大学学报,2020,55(5):1052-1059.
LIU Youneng, HUANG Runqiu, LIU Enlong, et al. Influence of freezing-thawing cycles on mechanical properties oftailing soil at Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2020,55(5):1052-1059.

[13] 李辉,陈勇升,李鑫林,等.高寒地区厚煤层上冻土体冻融循环后破坏特征研究[J].矿业研究与开发,2024,44(3):114-120.
LI Hui, CHEN Yongsheng, LI Xinlin, et al. Study on the failure characteristics of frozen soil after freeze-thaw cycle on thick coal seam in high cold area[J]. Mining Research and Development,2024,44(3):114-120.

[14] 许孝臣,盛金昌.渗流-应力-化学耦合作用下单裂隙渗透特性[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2009(增刊1):270-272.
XU Xiaochen, SHENG Jinchang. Permeability of single fracture under coupled hydrological-mechanical-chemical action[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2009(Suppl.1):270-272.

[15] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:中国水利水电出版社,1990.
MAO Changxi. Seepage computation analysis & control [M]. Beijing:China Water & Power Press,1990.

[16] 袁军伟,夏静怡,初绍飞.冻融循环对煤体孔隙结构的改造特征[J].煤矿安全,2022,53(2):33-39.
YUAN Junwei, XIA Jingyi, CHU Shaofei. Transformation characteristics of pore structure of coal by freezing-thawing cycle[J]. Safety in Coal Mines,2022,53(2):33-39.

[17] 张钫,郭树恒,史铭锴.预应力混凝土用钢绞线弹性模量不确定度来源分析及评定[J].金属制品,2023,49(6):44-47.
ZHANG Fang, GUO Shuheng, SHI Mingkai. Analysis and evaluation of elastic modulus uncertainty source of steel strands for prestressed concrete[J]. Metal Products,2023,49(6):44-47.

[18] 王平,胡彦,程爱平,等.基于三轴试验与数值模拟的大理岩破坏特征研究[J].矿冶工程,2022,42(6):1-6.
WANG Ping, HU Yan, CHENG Aiping, et al. Failure characteristics of marble based on triaxial test and numerical simulation[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(6):1-6.

[19] 刘博,苟永刚,叶明珠,等.高寒区冻融环境下岩体爆破漏斗试验研究[J].爆破,2024,41(3):60-68+110.
LIU Bo, GOU Yonggang, YE Mingzhu, et al. Experimental study on blasting crater of rock mass under freeze-thaw environment in high cold region[J]. Blasting,2024,41(3):60-68+110.

[20] 刘耀辉,陈志敏,郭利民,等.冻融循环作用下冻结冰碛土剪切特性[J].中国科技论文,2023,18(2):166-171+203.
LIU Yaohui, CHEN Zhimin, GUO Limin, et al. Shear characteristics of frozen moraine soil under freeze-thaw cycle [J]. China Sciencepaper,2023,18(2):166-171+203.

[21] 金佳旭,宋晨光,陈亿军,等.冻融循环次数和含水率对尾细砂力学性质的影响研究[J].实验力学,2017,32(3):431-438.
JIN Jiaxu, SONG Chenguang, CHEN Yijun, et al. On the influence of freeze-thaw cycles and moisture content on the mechanical properties of tailings fine sand[J]. Journal of Experimental Mechanics,2017,32(3):431-438.