

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.018

# 微波改良膨胀土冻融循环作用下的性能研究

汪鹏程, 刘明

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章针对冻融循环作用下微波加热处理膨胀土的有效性问题进行相关试验测试,利用工业微波炉对膨胀土分别进行不同时间微波高温加热改良,对经过0、1、3、6、10次冻融循环作用后的试样进行体积变形、抗压强度、X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)和微观结构试验。结果表明:在最佳含水率下,不同微波加热时间下的试样在冻融循环过程中均表现为“冻缩融胀”;冻融循环作用下微波加热后的膨胀土试样无侧限抗压强度和弹性模量均随冻融循环次数增加而降低,尤其在开始阶段影响最大;相同冻融循环次数下,微波加热改良后的膨胀土土体强度和弹性模量均随微波加热时间增加而增加,微波加热作用有效地降低了冻融破坏作用;冻融循环作用对微波加热膨胀土试样微观孔隙面积的影响呈现随冻融循环次数的增加,大孔隙面积占比增多,而小孔隙减少,表明冻融循环作用对土体结构性影响很大。

**关键词:**冻融循环;微波加热;膨胀土;MATLAB软件;微观特性

**中图分类号:**TU463 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)01-0119-08

## Study on the performance of microwave modified expansive soil under freeze-thaw cycles

WANG Pengcheng, LIU Ming

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In this paper, the effect of cyclic freezing and thawing on the physical and mechanical properties of expansive soil improved by microwave heating is studied. The industrial microwave oven is used to heat the expansive soil at high temperature for different times to improve the original expansive soil. The volume deformation, compressive strength, X-ray diffraction(XRD) and microstructure tests were carried out on the samples after 0, 1, 3, 6 and 10 cycles of freeze-thaw. The results showed that under the optimum moisture content, the soil samples at different microwave times show “freeze shrinkage and thaw expansion” during the cyclic freeze-thaw process. The unconfined compressive strength and elastic modulus of expansive soil after microwave heating under freeze-thaw cycles decrease with the increase of freeze-thaw cycles, especially at the beginning stage. Under the same freezing and thawing times, the strength and elastic modulus of the improved expansive soil by microwave heating increase with the increase of microwave time, and the microwave effect effectively reduces the freezing and thawing damage. The effect of freeze-thaw cycles on micro-pore area of microwave modified expansive soil is as follows: the more freeze-thaw cycles, the higher the proportion of large pore area, and the lower that of small pore area. It shows that the freeze-thaw cycles have a great impact on the soil structure.

**Key words:** freeze-thaw cycle; microwave heating; expansive soil; MATLAB software; microscopic characteristics

**收稿日期:**2023-03-13; **修回日期:**2023-04-01

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(12272119);国家自然科学基金联合基金资助项目(U1965101)

**作者简介:**汪鹏程(1968—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

## 0 引言

膨胀土是一种由较多蒙脱石和伊利石等亲水性物质组成的有很强亲水性的黏性土<sup>[1]</sup>,具有遇水膨胀、失水收缩的特点<sup>[2]</sup>。我国淮河以北地区会出现季节性冻土,许多建筑工程受季节变化的影响较大,出现冬季冻胀、春季融陷的现象,对建筑结构造成很大破坏,产生经济损失<sup>[3]</sup>。目前,膨胀土在未经处理之前不能作为建筑物地基和路基,且周而复始的冻融交替作用极大影响着土的强度和结构性<sup>[4]</sup>,对建筑物构成极大危害。因此对于研究改良膨胀土在冻融循环作用下的物理性质显得尤为重要。

目前,对于工程中的膨胀土土体,常用改良方法有添加稳定性高、强度高的材料和混合添加多种改良材料<sup>[5]</sup>。在此基础上,也有许多国内外学者研究了改良后的膨胀土在冻融循环作用下的物理性质变化。文献<sup>[6]</sup>用石灰改良膨胀土的特性,结果表明:石灰掺量越多,冻融作用对黏聚力影响越大;相同冻融次数下,石灰掺量越多,内摩擦角越大。文献<sup>[7]</sup>通过在膨胀土中加入风化砂,研究冻融循环作用对膨胀土收缩变形的影响,结果表明,添加风化砂可以降低冻融循环对土样的变形作用。文献<sup>[8-9]</sup>分别利用赤泥-钢渣粉和水泥-粉煤灰对膨胀土进行改良,并研究各自在冻融循环下的物理力学特性。

对于高温加热改良土,国内外也有许多学者研究。文献<sup>[10]</sup>对 3 种黏土高温加热,发现黏土的液塑限、最佳含水率随温度的上升而降低;文献<sup>[11]</sup>研究了高温对钠化膨润土的作用,发现 800 °C 高温使蒙脱石结构完全破坏,膨润土热稳定性下降;文献<sup>[12]</sup>研究发现随着受热时间的增加,膨润土的比重、自由膨胀率在半个月后急剧下降;文献<sup>[13]</sup>对引江济淮河道土进行微波加热,发现随着微波时间的增加,土的抗剪强度显著上升。

目前,多数研究都是用化学和物理方法改良膨胀土,提高了改良膨胀土的强度,降低了膨胀性。微波加热后的膨胀土强度得到了提高,但关于冻融循环作用下加热后膨胀土的物理特性研究很少,因此有必要通过试验探究冻融作用下微波加热后膨胀土的性能及其变化。

本文对不同微波加热时间下的重塑膨胀土试样经冻融循环后进行物理力学性质试验和测试,探讨冻融循环次数、微波加热时间对膨胀土力学性能的影响规律,分析冻融循环对微波加热膨胀

土的破坏机理和微波作用对提高抗冻融的破坏性能。该研究对膨胀土地区工程建设有一定参考意义。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验材料

试验膨胀土取自引江济淮中线工程施工区河道内,取样深度约为 1.1 m,选此处代表性土样,其颜色呈黄褐色。通过室内试验测得土样基本物理参数为:塑限 24%,液限 54%,塑性指数 30,自由膨胀率 52%,最佳含水率 21%,最大干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验方案

首先烘干后过 2 mm 筛后的膨胀土分别进行 0、5、10、15 min 的微波加热。膨胀土放置于工业微波炉的微波腔体内,选择功率为 3 kW,设定加热时间为 5 min 开始加热。为保证土样受热均匀,加热到规定时间 1/2 时,将土样上下搅拌,再次进行加热。按上述步骤在相同条件下分别进行 10、15 min 微波加热(0 为不进行微波加热的膨胀土),试验加热 5、10、15 min 完成后立即测土样温度,分别为 295、490、605 °C,土样形态如图 1 所示。由图 1 可知,土样颜色逐渐变深,由黄褐色向砖红色转变,说明土样成分已经改变。相同加热时间下,试样颜色相同,说明整体受热均匀。

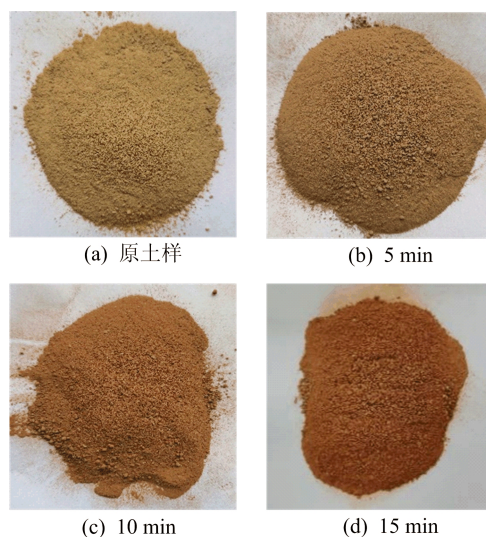


图 1 微波加热前、后土样形态

在最佳含水率条件下,将不同微波加热时间土样制作成试验所需要的圆柱体,如图 2 所示。

在进行冻融循环试验之前,对每个试样先用保鲜袋密封,防止在冻融循环过程中试样水分损

失,再放入冰箱中。试样在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温试验箱中经过 12 h 冰冻,然后在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验箱中融化 12 h,可以达到试验要求<sup>[14-17]</sup>,且预试验中切开试样,没有发现冰渣和冻土的存在,认为试样解冻完成。试样大多数在冻融循环作用 10 次后物理力学性质趋于稳定,因此本试验共进行 10 次冻融循环。



图 2 击实圆柱试样

为了探究冻融循环过程中微波改良膨胀土的变形规律,对冻结和融化后试样进行直径和高度测量。利用游标卡尺对圆柱试样直径沿高度方向测 5 次,试样高度测 2 次,均取平均数为实际直径和实际高度。利用电子天平称对试样称量,进行质量变化分析。

为了研究不同冻融循环次数对微波膨胀土力学参数的影响,对经过 0(未冻融状态)、1、3、6、10 次冻融循环作用后的膨胀土试样进行无侧限压缩试验(加载速率为 $0.5\text{ mm/min}$ ,当压力表示数停止不动或后退时停止试验)。

微观结构试验取试验后破坏试样内部(尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的切片)作为拍照面。高清电镜相机拍取切片内部结构图像,再利用 MATLAB 数学工具处理图像<sup>[18]</sup>,将图像转化为可读二值图像,并编写代码对二值图像进行计算分析,得出孔隙面积分布信息。

在破坏试样中取适量土烘干分别进行 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析,微波加热前、后土样 XRD 图谱如图 3 所示。

从图 3 可以看出:加热会导致曲线峰值变化,是由于微波加热使得矿物分解;同时高温会使蒙脱石层间水脱出,造成层间坍塌,晶格重新排列,碱性阳离子吸附能力提高,蒙脱石转化为蒙脱石-伊利石混层矿物,持续高温作用下进一步转变为伊利石和其他矿物。

统计得到的矿物质量分数变化见表 1 所列。从表 1 可以看出,蒙脱石和石英质量分数下降,而伊利石和钠长石质量分数上升。

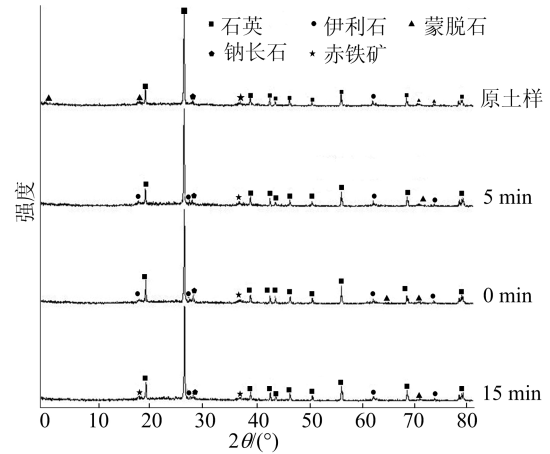


图 3 微波加热前、后土样 XRD 图谱

表 1 不同微波加热时间下土样主要矿物质量分数 %

时间/min	蒙脱石	伊利石	石英	钠长石	其他物质
0	32.5	22.5	21.4	18.2	5.4
5	30.6	28.2	20.2	15.2	5.8
10	26.3	30.5	20.6	16.1	6.5
15	23.8	32.8	16.1	20.5	6.8

### 1.3 试样制备

按照《土工试验方法标准》<sup>[19]</sup>制作直径为 $39.1\text{ mm}$ 、高度为 $80\text{ mm}$ 的圆柱状试样,采用分层击实法制作试验试样。分别称取微波加热 0、5、10、15 min 膨胀土,再称取最优含水率对应的水,利用喷壶将水喷洒于膨胀土上,充分搅拌均匀后装入保鲜袋,润湿 24 h 以备制样。按照最大干密度计算所需土样,称取 $185.97\text{ g}$ 湿土,均分 3 次装入模具中。每次压实后将表面拉毛,在第 3 次土样装完后,利用千斤顶将土样压实。以微波加热 5 min 土样为例制作 10 个试样,每 2 个 1 组对照试验,10 个试样完成 0、1、3、6、10 次循环后的无侧限抗压试验后(其中循环 10 次的试样进行体积和质量测试),取代表性圆柱试样,从试样中心部分环切 2 个结构保持完整的小试样在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干做微观试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冻融循环过程中膨胀土质量和体积变化

在冻融循环试验过程中连续 10 d 测量圆柱形膨胀土试样的直径和高度,取其平均值为试样的实际直径和实际高度,计算试样的体积,同时测量其质量。

为比较相同含水率条件下微波加热膨胀土试样的体积变化规律,引入无量纲参数  $\Delta V$ 。定义  $\Delta V$  等于体积变化量与初始体积之比,即体积变化率<sup>[16]</sup>,计算公式如下:

$$\Delta V = (V_0 - V_i) / V_0 \times 100\% \quad (1)$$

其中:  $V_0$  为初始体积;  $V_i$  为冻融循环  $i$  次后的体积;  $i=1, 2, 3, \dots, 9, 10$ 。

同上, 质量变化率  $\Delta m$  定义为质量变化量与初始质量之比, 计算公式如下:

$$\Delta m = (m_0 - m_i) / m_0 \times 100\% \quad (2)$$

其中:  $m_0$  为初始质量;  $m_i$  为冻融循环  $i$  次后的质量;  $i=1, 2, 3, \dots, 9, 10$ 。

膨胀土试样质量变化率随冻融循环次数的变

化情况见表 2 所列。由表 2 可知, 不同微波加热时间下 4 组试样最大质量变化率为 0.445 1%, 最小为 0.013 9%, 可以忽略水分损失, 认为试验密封性良好。冻结时质量损失较融化状态普遍增大, 且随冻融循环次数增加, 质量变化率逐渐增加, 这是由于试验中冻结时少量水分从试样冒出形成冰晶残留在保鲜膜上, 而后融化时冰晶形成水珠重新被试样吸收, 导致质量损失前者比后者大。

表 2 冻融循环作用下膨胀土试样的质量变化率

次数	%							
	0 min		5 min		10 min		15 min	
	冻结	融化	冻结	融化	冻结	融化	冻结	融化
1	0.212 0	0.134 1	0.145 0	0.075 1	0.013 9	0.084 0	0.014 9	0.065 0
2	0.242 0	0.131 2	0.185 2	0.134 1	0.015 9	0.099 5	0.030 1	0.121 1
3	0.241 1	0.135 0	0.223 5	0.231 0	0.020 5	0.123 6	0.070 4	0.201 0
4	0.282 2	0.215 2	0.175 4	0.301 5	0.021 6	0.213 0	0.089 5	0.220 1
5	0.384 0	0.256 0	0.201 2	0.322 1	0.021 8	0.288 9	0.089 9	0.223 1
6	0.385 1	0.222 1	0.375 3	0.322 0	0.020 1	0.289 9	0.020 4	0.023 3
7	0.374 3	0.374 1	0.175 1	0.211 3	0.022 0	0.299 5	0.030 3	0.175 2
8	0.345 0	0.246 6	0.175 1	0.275 2	0.074 5	0.356 8	0.090 5	0.165 1
9	0.365 4	0.291 1	0.212 1	0.171 2	0.120 1	0.384 5	0.275 0	0.400 6
10	0.445 1	0.359 0	0.121 0	0.355 9	0.094 5	0.325 5	0.350 4	0.185 3

试样冻结、融化状态下体积变化率如图 4 所示。

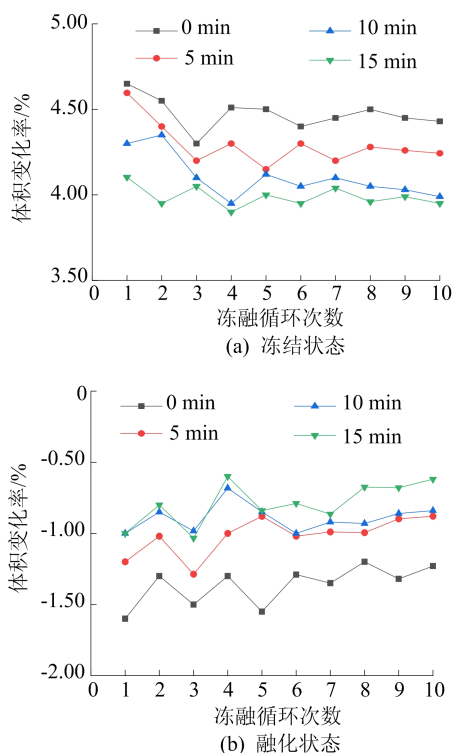


图 4 冻融循环作用下膨胀土试样的体积变化率

从图 4 可以看出: 在含水率均为 21% 的条件下, 4 组不同微波加热时间膨胀土试样在冻融过程中均表现为“冻缩融胀”(膨胀为负, 收缩为正); 首次冻结后体积变化率最大, 分别为 4.65%、4.59%、4.43%、4.20%; 随着冻融循环次数的增加, 体积变化率呈现波浪式减小, 向水平轴靠近; 同一冻融循环次数下, 体积变化率随微波加热时间增加而减小, 说明微波加热有效减小了试样体积变化率。

微波加热下高温使得膨胀土矿物成分发生了较大改变, 颗粒分解重新排列。矿物成分的相互转变改善了试样内部微观晶体的结合方式, 使得水分相态的改变对膨胀土内部结构影响降低。试验经过 10 次冻融循环后试样的体积均大于初始状态时的体积, 这部分变形是由水分相变引起的塑性变形<sup>[20]</sup>, 具有不可恢复性。

微波加热时间越长的试样体积变化越小, 未进行微波加热膨胀土试样最大体积变化率为 4.65%, 微波加热 15 min 膨胀土试样最大体积变化率为 4.21%, 较前者减少了 10.71%。原因是微波加热作用导致土矿物成分发生改变, 分解成其他物质(主要是蒙脱石和石英质量分数下降, 而

伊利石和钠长石质量分数上升)。这使得土颗粒与水分子的结合更加紧密,颗粒吸水、失水能力下降,冻融循环作用下土体体积不易变形。另一方面,微波加热使土颗粒形状发生改变,改善了土颗粒级配,使得土样内部结构更加均匀,小、中孔隙较多,水分变化对试样体积影响减小<sup>[13]</sup>。

### 2.2 冻融循环过程中膨胀土变形机制分析

膨胀土是非饱和土,常温下一般是由土颗粒、水和气体组成的三相体系,低温时土中水大部分变成冰,此时膨胀土为由土颗粒、水、冰和气体组成的四相体系<sup>[21]</sup>。膨胀土土颗粒在冻融循环过程中体积不会变化,气体受温度影响也不大,因此土体的体积变化主要是由水分相态变化和膨胀土胀缩性相互作用的结果。

试验中试样含水率为 21%,饱和度较小,空隙气体含量多。冻结过程中试样中水变成冰,体积变大,挤出了空隙中的气体并占据空隙,假设此时试样产生的膨胀量为  $\Delta V_1$ ;同时,膨胀土土颗粒失水收缩,具备充足的收缩空间,导致试样产生的收缩量为  $\Delta V_2$ ;由于  $\Delta V_1 < \Delta V_2$ ,试样宏观表现为体积收缩。融化时,试样中冰化成水体积缩小,假定产生的收缩量为  $\Delta V_3$ ,土颗粒遇水产生的膨胀量为  $\Delta V_4$ ,当  $\Delta V_3 < \Delta V_4$  时,膨胀土宏观上表现为体积增大。

### 2.3 冻融循环作用对膨胀土力学性质的影响

膨胀土试样在冻融过程中水分的相态是动态变化的,表现为含水率的上升和下降。水冻成冰、冰融成水,土样不断发生失水收缩、遇水膨胀。且伴随着水分迁出(冻结后土样表面出现大量冰晶)与浸入(融化时表面水分被土样吸收),微观层面上膨胀土的土颗粒发生错动、重新排列,试样内部结构遭到破坏<sup>[22]</sup>。

在宏观层面上,膨胀土的体积发生胀缩循环。由于冻结时水分析出,含水量下降,试样变脆,试样表面拉力超过试样自身抗拉强度<sup>[23]</sup>,导致表面出现微小裂缝,如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着冻融循环次数的增加裂隙数量和长度均不同程度增加。

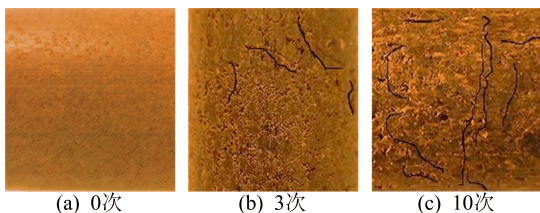


图 5 不同冻融循环次数下加热 10 min 膨胀土试样表面裂缝

### 2.3.1 应力-应变曲线分析

不同微波加热时间膨胀土试样的应力-应变曲线如图 6 所示。由图 6 可知,膨胀土试样的应力-应变曲线均属于软化型曲线,冻融作用对曲线影响很大,以第 1 次冻融循环作用最为突出。

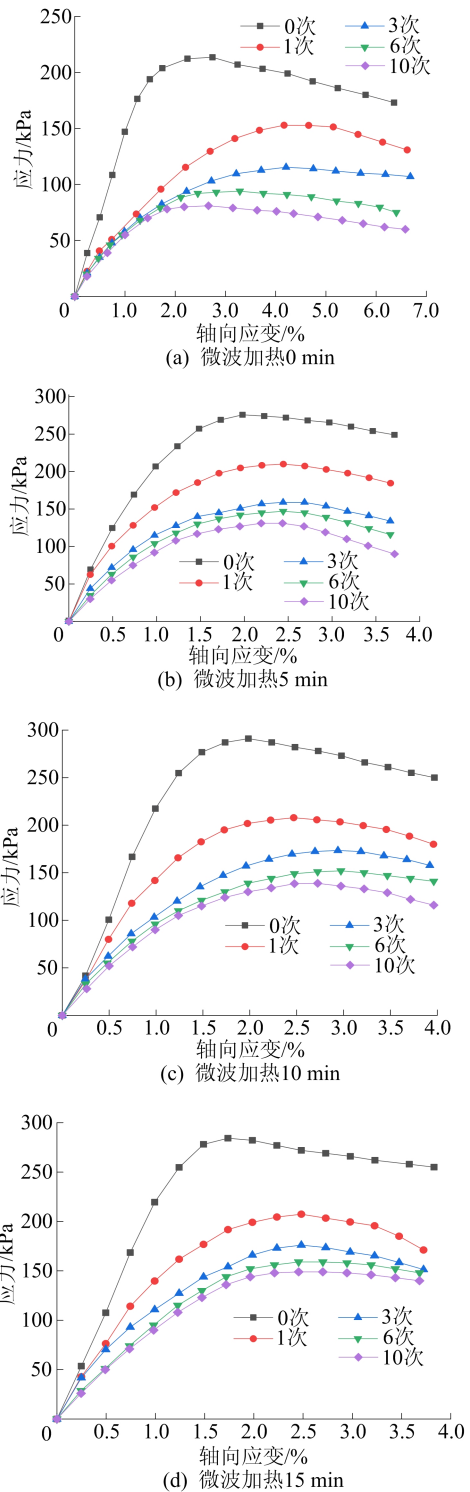


图 6 冻融循环作用下膨胀土试样应力-应变曲线

从图 6 可以看出:初始状态下(冻融 0 次)微

波加热和未微波加热膨胀土试样的塑性变形历时很短,很快达到强度峰值(在应变 2.0%附近出现)之后发生软化随后趋于稳定;随着冻融循环次数的增加,曲线逐渐“矮小、扁平”,且峰值应变有所增加;在冻融循环次数相同时,微波加热时间越长,曲线峰值越大,且达到峰值时,应变也有所减小。对比图 6 可知,由于含水率相同,曲线的变化趋势相同,分为“上升段”“下降段”“残余段”3 段,但最大应力随微波加热时间增加而变大,且微波加热时间越长,曲线上升段越陡。原因是微波加热使试样矿物分解,矿物的晶格被破坏,层间水析出,改变了矿物的原始质量分数,使得土体颗粒之间的排列紧密。相同冻融循环次数下,曲线峰值越大,试样表现得越“坚硬”。

### 2.3.2 冻融循环作用对强度的影响

对于软化型应力-应变曲线来说,取峰值点作为试样的抗压强度<sup>[24]</sup>。为了直观地看出冻融循环作用对微波加热后膨胀土强度的影响,引入一个无量纲参数  $Q$ ,定义为冻融循环  $i$  次后膨胀土试样的无侧限抗压强度与初始试样的无侧限抗压强度之比,计算公式为:

$$Q = \frac{P_i}{P_0} \quad (3)$$

其中: $P_0$  为初始试样无侧限抗压强度; $P_i$  ( $i=0, 1, 3, 6, 10$ ) 为冻融循环  $i$  次后的试样无侧限抗压强度。

不同微波加热时间下膨胀土试样  $Q$  随冻融循环次数的变化如图 7 所示。

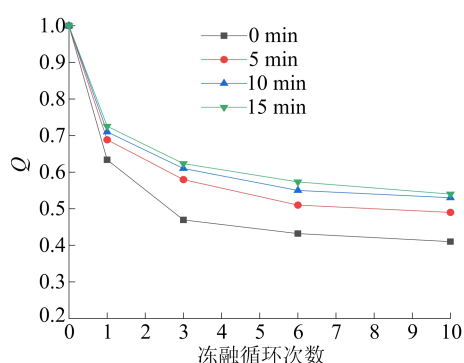


图 7  $Q$  随冻融循环次数的变化

从图 7 可以看出,冻融循环作用对强度影响较大,尤其首次冻融循环作用对土体强度的破坏作用最为明显,微波加热 0 min 膨胀土强度衰减达到 37.0%,而微波加热 15 min 膨胀土强度衰减为 26.5%。可见初次冻融对试样内部结构产生的损伤最大,随着冻融循环的继续,试样结构受到的破

坏不断增加,试样强度渐渐降低,最终趋于稳定。前 3 次冻融循环后试样强度衰减大部分完成,而后随着冻融循环次数增加衰减趋势减小,冻融循环 6 次和 10 次曲线已经非常接近。这说明微波加热能有效降低冻融循环作用下试样强度的损失,微波加热时间越长, $Q$  值越大,强度损失越小。

### 2.3.3 冻融循环作用对弹性模量的影响

弹性模量是表征土体力学性质的一个重要参数。参考文献[25]取应力-应变曲线中应变为 1.0% 所对应的割线模量作为土的弹性模量,计算公式为:

$$E = \frac{\sigma_{1.0\%}}{\varepsilon_{1.0\%}} \quad (4)$$

同样引入一个无量纲参数  $F$ ,定义为冻融循环作用后膨胀土试样的弹性模量与初始试样的弹性模量之比,计算公式为:

$$F = \frac{E_i}{E_0} \quad (5)$$

其中: $E_0$  为初始试样弹性模量; $E_i$  ( $i=0, 1, 3, 6, 10$ ) 为冻融循环  $i$  次后试样的弹性模量。

不同微波加热时间下膨胀土试样的  $F$  随冻融循环次数的变化如图 8 所示。由图 8 可知,弹性模量随着冻融循环次数的增加,呈现出指数减小的规律。首次冻融循环作用后膨胀土试样的弹性模量下降最大,微波加热 0 min 膨胀土的衰减达到 44.1%,而微波加热 5、10、15 min 的衰减约为 32.0%;3 次冻融循环后变化率大大减小,趋于平稳。从应力-应变曲线可知,微波加热试样的弹性模量比未微波加热试样大,在 10 次冻融循环过程后,其微波加热试样弹性模量的衰减更小。

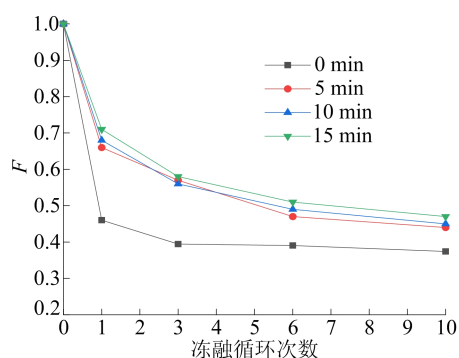


图 8  $F$  随冻融循环次数的变化

## 3 微观结构分析

冻融循环过程中膨胀土中水分、冰晶生长、水分迁移和胀缩变形等发生变化,改变了内部孔隙

和通道,对膨胀土内部结构产生了巨大的影响。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图片放大倍数为 100 倍、像素为 1 024 × 960,经过降噪、二值化、反色处理后的图像如图 9 所示。二值化时阈值<sup>[26]</sup>选择其峰值的 80%时,结果更加真实可靠。图 9c 中,黑点表示孔隙,白色部分代表颗粒边缘。利用 MATLAB 相关程序<sup>[18]</sup>提取孔隙面积参数,通过 imtool 图像工具,测出图像右下标尺的像素长度,从而得到像素微米的换算值 P/U(像素/微米)为 0.67。统计得到的数值为像素单位,乘以换算值后得到孔隙面积。

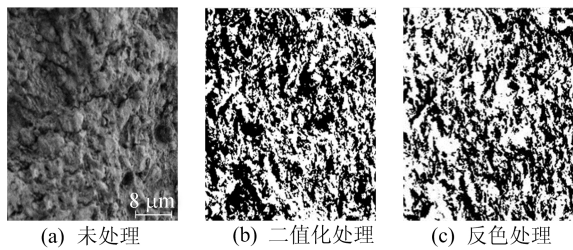


图 9 试样照片处理图

不同微波加热时间试样内部微观孔隙面积占比随冻融循环次数的变化如图 10 所示。

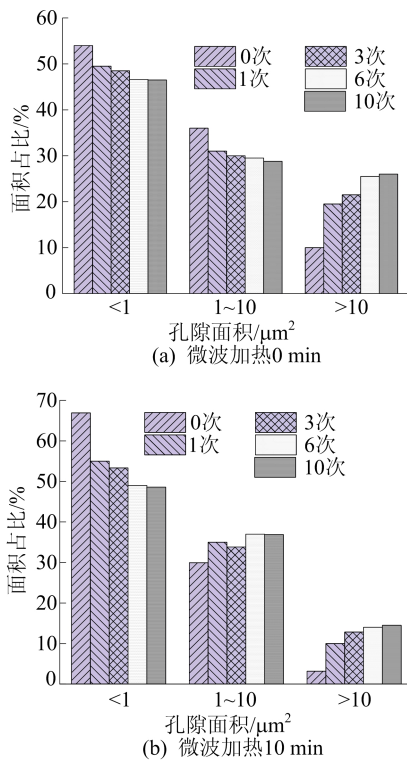


图 10 不同微波加热时间下的孔隙面积分布

由图 10 可知:微波加热后的膨胀土试样 3 类孔隙面积占比均在 1 次冻融时变化很大,且随着

冻融循环次数的增加,微波加热后试样孔隙面积<math><1 μm^2</math>占比逐渐减小,孔隙面积>math>10 μm^2</math>占比逐渐增加;6 次冻融循环后变化基本不明显。从图 10b 可以看出,经过第 1 次冻融,孔隙面积<math><1 μm^2</math>占比从 67.50%下降到 55.10%,而孔隙面积 1~math>10 μm^2</math>和>math>10 μm^2</math>占比分别提高了 5.10%和 7.01%。冻融循环次数超过 6 次后,空隙面积占比几乎不变。表明第 1 次冻融对土体结构产生的破坏最大,孔隙变化剧烈,其后趋于稳定。

从图 10 可以看出,相同冻融循环次数下,微波加热 10 min 与微波加热 0 min 膨胀土相比,前者孔隙面积<math><1 μm^2</math>的占比较后者最大增加了 13.50%,而空隙面积>math>10 μm^2</math>的占比减小了 12.01%。从微观上来看,微波加热后的膨胀土不仅矿物成分改变,而且土体内部颗粒之间的排列方式和黏结方式也发生改变,使土壤结合更加紧密。土颗粒之间空隙随之改变,限制了冻融过程中水分变化空间,降低了冻融作用对试样的损害,宏观上表现为试样强度和弹性模量的提高。

#### 4 结 论

本文对微波加热重塑膨胀土在冻融循环作用下的物理力学特性进行研究,得到如下结论:

1) 在含水率均为 21%的情况下,微波加热和未微波加热膨胀土试样体积变化规律都表现为“冻缩融胀”,体积变化率的最大值发生在首次冻结后的土体收缩阶段;相同情况下,微波加热膨胀土试样比未微波加热膨胀土试样体积改变量更小。

2) 膨胀土力学性质受首次冻融作用影响最大,随冻融循环次数增加,应力-应变曲线越来越平缓。微波加热时间越长,曲线上升越快,峰值越大;10 次冻融循环后微波加热膨胀土试样较未微波加热峰值下降更少。

(3) 微波加热时间不同,膨胀土的力学参数随着冻融循环次数的变化幅度也不同。微波加热时间越长,膨胀土试样的强度和弹性模量受冻融循环作用的影响越小。

4) 冻融循环过程中膨胀土试样的孔隙面积有所增加,且随着冻融循环次数增加,小孔隙面积占比减小,中、大孔隙面积占比逐渐增加。相同冻融循环次数下,微波加热时间越长,小孔隙面积越多。微波加热膨胀土试样冻融循环 10 次孔隙面积较未微波加热试样的变化小,说明微波能有效降低冻融循环对土体内部结构的破坏作用。

## [参 考 文 献]

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984:9-11.
- [2] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997:25-26.
- [3] 张向东, 任昆. 冻融循环下煤渣改良土的强度及屈服特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12):3371-3378.
- [4] ZAMAN M M, NAJI K N. Effect of freeze-thaw cycles on class C fly ash stabilized aggregate base[C]//Proceedings of the 82nd Annual Meeting of Transportation Research Board (TRB). [S. l. :s. n. ], 2003:14-15.
- [5] 胡晓军, 吴延枝. 膨胀土改良技术研究综述[J]. 合肥学院学报(自然科学版), 2014, 24(4):80-85.
- [6] 唐东旗, 姚秀芳, 王晓岗, 等. 石灰改性膨胀土冻融循环的强度效应研究[J]. 许昌学院学报(自然科学版), 2022, 41(2):91-94.
- [7] 杨俊, 刘世宣, 张国栋. 冻融循环对风化砂改良膨胀土收缩变形影响研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2):75-81.
- [8] 郝雅芬. 冻融循环下赤泥-钢渣改性水泥土力学性能劣化的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [9] 宋爱苹, 张亚飞. 冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性[J]. 中外公路, 2017, 37(3):221-223.
- [10] MAJED M A, NABIL M A, MOUSA F A. Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils[J]. Applied Clay Science, 2001, 20(3):129-135.
- [11] 秦亚婷, 彭同江, 孙红娟, 等. 高温处理对钠化膨润土蒙脱石结构变化的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(3):159-164.
- [12] 曾召田, 邵捷昇, 莫红艳, 等. 高温状态下受热时间对膨润土物性指标的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3):463-469.
- [13] 蒋银强. 微波加热对膨胀土性质影响的试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [14] WANG D, MA W, NIU Y, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of qinghai-tibet clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1):34-43.
- [15] 常丹, 刘建坤, 李旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7):1496-1502.
- [16] 许雷, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2):167-174.
- [17] 严浩然, 王伟, 王林霞, 等. 冻融循环下纳米黏土改性滨海水泥土的微观结构[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11):4562-4569.
- [18] 苗得雨, 白晓红. 基于 Matlab 的土体 SEM 图像处理[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6):141-146.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019:185-189.
- [20] VIKLANDER P P. permeability and volumc changes in till due to cyclic frezc thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3):471-477.
- [21] ANDERSLAND O B. Frozen ground engineering[M]. New York: Chapman Hall, 2003:54-60.
- [22] 张泽, 马巍, 齐吉琳. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6):1904-1914.
- [23] 王晓燕, 姚志华, 党发宁, 等. 裂隙膨胀土微观结构演化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):92-100.
- [24] 谈云志, 吴翮, 付伟, 等. 改良粉土强度的冻融循环效应与微观机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(10):2827-2834.
- [25] LEE W, BOHRA N C, ALTSCHAEFFL A G. Resilient modulus of cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2):131-136.
- [26] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2):406-412.

(责任编辑 闫杏丽)

## (上接第 118 页)

- [27] PASAOGLU O T, SENELMIS A, HELVACI O, et al. FGF23,  $\alpha$ -Klotho and vitamin D mediated calcium-phosphate metabolism in haemodialysis patients[J]. Journal of Medical Biochemistry, 2021, 40(2):160-166.
- [28] AKIMBEKOV N S, DIGEL I, SHERELKHAN D K, et al. Vitamin D and phosphate interactions in health and disease [M]//Phosphate metabolism from physiology to toxicity. [S. l. ]: Springer, 2022:37-46.
- [29] NAKATANI T, OHNISHI M, RAZZAQUE M S. Inactivation of klotho function induces hyperphosphatemia even in presence of high serum fibroblast growth factor 23 levels in a genetically engineered hypophosphatemic (Hyp) mouse model [J]. The FASEB Journal, 2009, 23:3702-3711.
- [30] MARTIN A, DAVID V. Transcriptomics: a solution for renal osteodystrophy? [J]. Current Osteoporosis Reports, 2020, 18(3):254-261.
- [31] KURO O M. Phosphate as a pathogen of arteriosclerosis and aging[J]. Journal of Atherosclerosis and Thrombosis, 2021, 28(3):203-213.

(责任编辑 闫杏丽)