

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0028

YUN Qingfei, ZHANG Ze, MING Jiao, et al. Experimental study on morphometric changes of sand particles under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1):205-215. [恽晴飞, 张泽, 明姣, 等. 冻融作用下砂土颗粒形态变化规律研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1):205-215.]

## 冻融作用下砂土颗粒形态变化规律研究

恽晴飞<sup>1,2</sup>, 张 泽<sup>2,3,4</sup>, 明 姣<sup>2</sup>, 付翔宇<sup>1,2</sup>, 周成林<sup>2</sup>, Andrey MELNIKOV<sup>5</sup>

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 东北林业大学 土木工程学院/寒区工程与科学技术研究院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 4. 东北林业大学 东北多年冻土区地质环境系统教育部野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150040; 5. 俄罗斯科学院 新西伯利亚分院 梅尔尼科夫冻土研究所, 俄罗斯 雅库茨克 117997)

**摘 要:** 土壤中的石英颗粒的表面形态不仅是该沉积物物源区沉积环境、搬运机制的信息载体, 同时也会直接影响到砂土的宏观物理特性, 对力学和实际工程有着重要的意义。借助显微与高精度图像处理技术, 采用长径比、磨圆度两个量化指标, 对经过不同次数冻融作用的两组砂土颗粒进行观察。结果表明: 砂土颗粒在冻融循环过程中, 由于颗粒之间的相互作用, 磨圆度先增大后减小, 最后趋于稳定; 长径比先减小, 后增加, 最后趋于稳定。长径比与磨圆度的变化曲线共轭。

**关键词:** 冻融循环; 砂土; 颗粒形态; 磨圆度; 长短径比

**中图分类号:** P642. 14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)01-0205-11

### 0 引言

由于石英颗粒自身硬度较大, 化学性质稳定, 不易受外部物理作用的影响。所以一旦石英颗粒表面形态发生变化, 就可以保存较长的时间。因此石英颗粒可以作为一种良好的古气候环境的信息载体, 帮助我们反向推测出其沉积地区的历史环境变迁<sup>[1-3]</sup>。同时, 石英颗粒的某些微观特征, 影响着颗粒的空间排列及颗粒的破裂概率, 所以研究砂土颗粒在冻融作用下微观特征的变化规律, 可以很好地揭示其宏观物理力学特性变化的规律<sup>[4-5]</sup>。

随着电子显微镜的不断发展, 扫描电镜自20世纪中叶问世以来, 由于其有着客观、直观, 统计性良好等优点, 已经广泛应用在了颗粒表面形态的研究中<sup>[6-7]</sup>。在以往对颗粒形态的研究中, 涂新斌等<sup>[8]</sup>比较全面地介绍了在颗粒形状分析中常用的参数, 并指出利用颗粒面积和周长得到的参数 $S_{11}$ 是描

述颗粒形状效果比较好的参数之一。Altuhafi等<sup>[9]</sup>在利用电镜扫描技术研究颗粒长宽比、圆度和凸度时, 提出了颗粒形状的量化方法。Mora等<sup>[10]</sup>认为, 凸度比起圆度、形状因子, 更能反映出颗粒的棱角性。Yang等<sup>[11]</sup>根据长宽比、球形度和凸度的变化趋势, 得出颗粒形状参数总体变化规律(overall regularity), 即总体变化规律越大, 颗粒形状越规则, 越接近圆形。Rausch等<sup>[12]</sup>在利用扫描电镜研究火山灰烬颗粒轮廓分形特征时, 得出了火山灰烬颗粒具有多重分形特征的结论。刘清秉等<sup>[13]</sup>从不同层次对3种不同砂土颗粒形状开展了研究, 认为整体轮廓系数、棱角度及球形度3个参数可用来表征不同砂粒形状特征。以往研究成果表明, 冻融作用在一定程度上会改变砂土颗粒的表面形态<sup>[14-15]</sup>, 本文通过观察、研究经过不同次数冻融作用的砂土颗粒, 总结出砂土颗粒表面形态在冻融作用下发生的

收稿日期: 2019-02-16; 修订日期: 2020-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771078); 国家自然科学基金委员会(NSFC)与俄罗斯基础研究基金会(RFBR)合作交流项目(42011530083); Russian Foundation for Basic Research- RFBR(20-55-53006); 雅砻江流域水电开发有限公司科学技术项目(LHKA-G201906)资助

作者简介: 恽晴飞(1995-), 男, 江苏无锡人, 2017年在兰州大学获学士学位, 现为兰州大学在读硕士研究生, 从事工程物探方面的研究。E-mail: yunqf13@lzu.edu.cn

通信作者: 张泽, 副研究员, 从事寒区工程与环境研究。E-mail: zhangze@lzb.ac.cn.

规律性变化,为以后第四纪冷生古气候环境的研究提供理论依据,同时也为砂土在季节性冻土地区的实际工程应用提供理论支撑。本文在前人研究的基础上,综合考虑,采用长径比,磨圆度这两个在研究颗粒形态时最具有代表性的微观特征参数,对颗粒表面形态进行研究分析。

1 试验方法

1.1 试验材料及样品制备

本文以砂土为研究对象,样品取自于青藏高原214国道花石峡冻土观测站以及玛多县附近。在进行试验时,选取2组不同粒径的砂粒组进行对比。其中,细砂组颗粒粒径均小于0.5 mm,粗砂组颗粒粒径均小于2 mm,分别进行2、4、6、8、10、50、100次冻融循环试验,完整试验方案如下图1。

其中,Cn表示冻融循环次数。为了方便对砂土颗粒进行冻融作用前后的对比,我们对未经冻融试验的原状砂土颗粒进行粒度成分测试,得到细砂与粗砂各粒组体积分布情况如下表1。同时,使用电子台式显微镜对未经冻融的砂土颗粒进行扫描,观察发现其矿物成分主要为石英和长石。同时使用电子台式显微镜对其粒度尺寸进行了扫描,将得到的结果汇总整理,得到砂土颗粒的形态初始参数如表2所示。

将经过风干、过筛后的试验用土用蒸馏水充分搅拌密封,静置一昼夜后,选取高20 mm,底面内

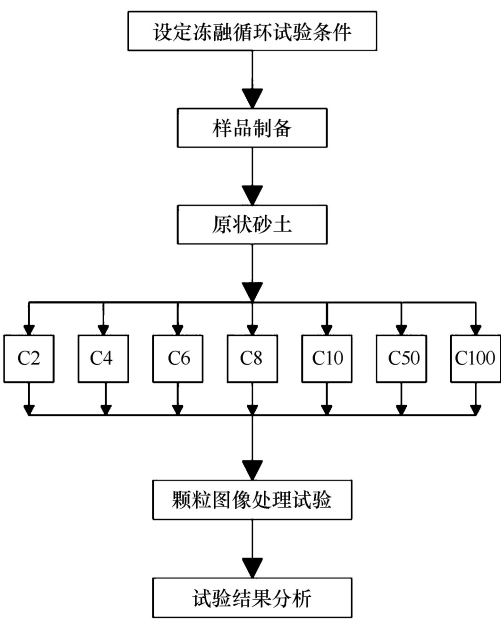


图1 试验方案设计流程图

Fig. 1 The test plan flow chart

径为61.8 mm的环刀,放置在干净玻璃片上。将静置过一昼夜的砂均匀倒进环刀内。为了保证砂土在环刀内均匀分布且为了减少颗粒间的空隙,在倒砂的同时,用小锤子轻轻敲击环刀外壁,直至砂漫过环刀顶端并去掉多余的砂土。随后,在真空箱中对样品进行抽真空饱和,并用保鲜膜和宽胶带将饱和样品(细砂含水量为4.3%,密度为1.89 g·cm<sup>-3</sup>;粗砂含水量为3.6%,密度为2.00 g·cm<sup>-3</sup>)密封,以此来避免冻融试验过程中的水分散失。

表1 细砂与粗砂各粒组体积分布情况

Table 1 Volume distributions of the fine sand and coarse sand

粒径/mm	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.2	0.2~0.1	0.1~0.05	0.05~0.02	0.02~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	0.002~0.001	<0.001
细砂体积百分比/%	0	0	13.37	12.76	46.02	17.71	3.24	2.20	1.07	0.91	0.96	1.76
粗砂体积百分比/%	0	2.28	27.23	13.85	38.97	12.64	1.52	1.12	0.49	0.44	0.52	0.94

表2 细砂与粗砂颗粒的形态初始参数

Table 2 The initial form parameters of the fine sand and coarse sand

砂	D <sub>10</sub> /μm	D <sub>50</sub> /μm	D <sub>90</sub> /μm	平均圆度	长径比平均值	体积平均粒径/μm	颗数平均粒径/μm
细砂	95.38	211.6	346.79	0.811	1.44	219.34	33.89
粗砂	105.79	200.12	406.70	0.726	1.56	215.33	40.01

1.2 冻融循环试验

本文采用冻融循环试验箱对砂土进行冻融循环试验。冻融循环试验箱如图2所示,其内径长为

81 cm,宽为76 cm,深为90 cm。该冻融循环试验箱采用风冷机组,不用冷却塔,噪音较小,控温精度可达±0.1℃。

试验时将试样冻结温度设定为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 融化温度设定 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻结方式为多向冻融。冻融循环的次数设定为2、4、6、8、10、50、100次, 在进行试验前, 先对单个样品进行冻融试验, 确定样品的完全冻结和融化时间均为2 h, 冻融循环试验示意图如下图3。



图2 冻融循环试验仓

Fig. 2 Photo showing the freezing-thawing cycle testing chamber

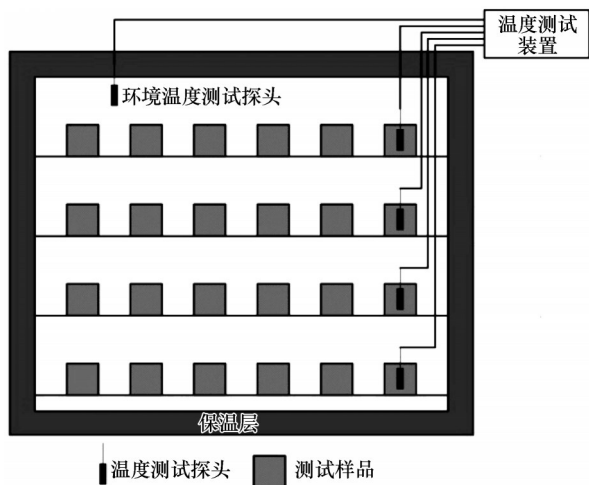


图3 冻融循环试验装置示意图

Fig. 3 The schematic diagram of freezing-thawing cycles test device

### 1.3 颗粒图像处理试验

颗粒图像处理仪器(图4)的工作原理为: 将现代电子技术与显微镜方法相结合, 用摄像机拍摄显微镜放大的颗粒图像, 图像信号进入计算机内存后, 计算机自动的对颗粒的形貌特征和粒度进行分析和计算, 最后输出测试报告。仪器的测试范围为 $0.5 \sim 3\,000\text{ }\mu\text{m}$ , 测试得出的结果重复性误差小于

3%, 精确度较高, 输出结果比较准确。由于试验所用的两组砂样粒径均处于仪器的有效测试范围之内, 所以采用该仪器测试得出的结果精确、有效。



图4 PIP 9.1 型颗粒图像处理仪

Fig. 4 PIP 9.1 particle image processor

## 2 参数介绍

### 2.1 长径比

长径比<sup>[16]</sup>在颗粒测试中一般定义为, 经过颗粒内部的最长径, 和与它相垂直的最长径之比(图5)。图中 $L_{\max}$  为与该颗粒外表面两条平行切线所垂直的最长内径,  $D_{\max}$  为该颗粒内部与 $L_{\max}$  相垂直的内径的最大值。本文将长径比 $R$ 定义为 $L_{\max}$  与 $D_{\max}$  的比值。研究砂土颗粒在冻融循环过程中长径比的变化, 可以比较明显地反映出颗粒的破碎情况, 因此在研究砂土颗粒在冻融循环过程中形态的变化时, 引入长径比的概念很有必要<sup>[17]</sup>。

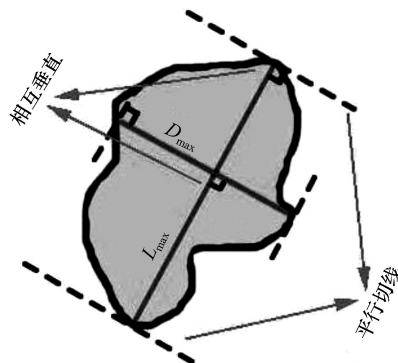


图5 颗粒长径比定义图示

Fig. 5 Definition of particle aspect ratio

由于典型颗粒的长径比并不能代表整体颗粒的长径比变化, 所以本文长径比数据采用由 PIP9.1 型颗粒图像处理仪(图4)对砂土颗粒扫描得到的平



均长径比。颗粒图像处理仪通过自带的光学显微镜首先将待测的微小颗粒放大,并成像在 CCD 摄像机的光敏面上;摄像机将光学图像转换成数字图片信息,然后传输并存储在计算机系统里。计算机对接收到的数字化了的显微图像信息进行二值化处理,识别颗粒的轮廓。然后按照一定的等效模式(本文选择的为等面积圆),计算各个颗粒的粒径、圆度、长径比等物理参数。图像仪能自动计算一幅图像内(即图像仪的一个视场)所有的颗粒的长径比、圆度,将其平均并统计,形成最终的报告。

$$R = \frac{L_{\max}}{D_{\max}} \quad (1)$$

式中:  $R$  为长径比;  $L_{\max}$  为颗粒内部最长径;  $D_{\max}$  为与最长径相垂直的最长短径;当  $R$  为 1 时表明颗粒内所有内径相等。

## 2.2 磨圆度

磨圆度即颗粒在运动,搬运过程中经过冲刷,滚动,撞击,棱角被磨圆的程度。在冻融循环过程中,磨圆度的变化是能直观体现出砂土颗粒之间相互作用的一项重要微观参数,具有重要的研究意义<sup>[16]</sup>。本文磨圆度的定义为:颗粒各隅角(拐点)平均曲率半径和颗粒最大内切圆半径的比值<sup>[17-18]</sup>[式(2)],以此来反映每个棱角的尖锐程度,其定义图示如图 6,颗粒最大内切圆半径为  $R$ 。由于直接通过人工计算颗粒磨圆度复杂且具有很强的主观性,不同研究者测量结果或不同的颗粒标准之间难以相互对比,以及现今利用电镜扫描颗粒已经有相当高的准确性。本文直接使用 PIP9.1 型颗粒图像处理仪对砂土颗粒扫描得到的平均磨圆度,颗粒图像处理仪对平均圆度的具体计算原理,见 2.1 节所述。

$$R_w = \frac{\sum r_i / n}{R} \quad (2)$$

式中:  $R_w$  为颗粒的磨圆度;  $r_i$  为颗粒轮廓曲率半径小于或等于最大内切圆半径  $R$  的拐点处内切圆半径;  $n$  为隅角(拐点)数目;  $R$  为颗粒最大内切圆半径。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 磨圆度分析

分别对这 2 组不同粒径的砂粒进行试验对比,并绘制 2 组砂土颗粒磨圆度随冻融循环次数增加的变化曲线如下图 7~8 所示。结合磨圆度变化曲线与砂土的典型颗粒图形,共同探究冻融循环作用下,砂土颗粒之间相互作用和破坏的具体机制。

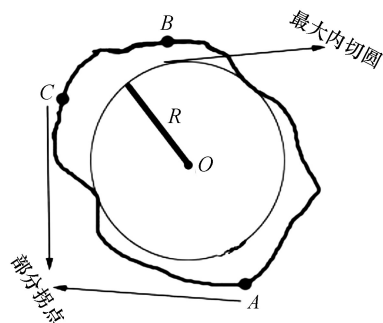


图 6 颗粒磨圆度定义图示

Fig. 6 Definition of particle roundness

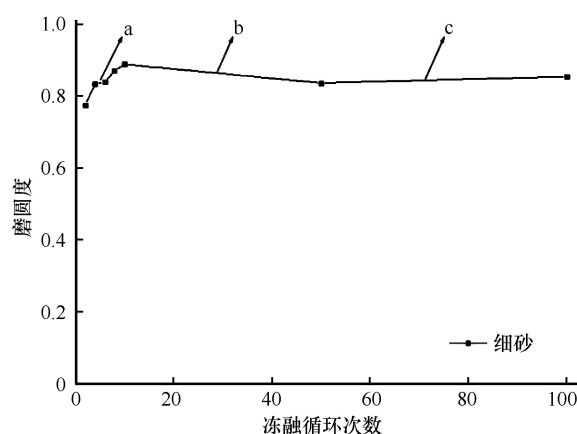


图 7 细砂磨圆度随冻融循环次数增加的变化曲线

Fig. 7 The variable psephicity of fine sand changing with freezing-thawing cycles

图 7 曲线为细砂磨圆度随冻融循环次数增加时的变化曲线,横轴为冻融循环次数,纵轴为磨圆度。由图 7 可知:(1)细砂颗粒在 2、4、6、8、10 次冻融作用后,磨圆度有不断增大的趋势,当冻融循环次数为 10 次时,颗粒磨圆度达到最大值(见图 7 折线 a 段);(2)细砂颗粒在 10 次冻融作用后,随着冻融循环次数的增加,磨圆度逐渐减小(见图 7 折线 b 段);(3)细砂颗粒在 50 次冻融作用后,磨圆度基本不再随冻融循环次数的增加而变化,逐渐趋向于稳定(见图 7 折线 c 段)。

图 8 曲线为粗砂磨圆度随冻融循环次数增加时的变化曲线,横轴为冻融循环次数,纵轴为磨圆度。由图 8 可知:(1)粗砂颗粒在 2、4、6 次冻融作用后,磨圆度有不断增大的趋势,当冻融循环次数为 6 次时,颗粒磨圆度达到最大值(见图 8 折线 a 段);(2)粗砂颗粒在 6 次冻融作用后,随着冻融循环次数的增加,磨圆度呈陡崖式减小(见图 8 折线 b 段),并在 10 次冻融作用后达到最小值;(3)粗砂颗粒在 10 次冻融作用后,随着冻融循环次数的增加,

磨圆度缓慢增加(见图8折线c段);(4)粗砂颗粒在50次冻融作用后,磨圆度基本不再随冻融循环次数的增加而变化,逐渐趋向于稳定(见图8折线d段)。

为了使论证更有说服力,选取颗粒在不同冻融次数时的典型颗粒图形进行辅助分析,选取典型颗粒图形时的原则为:使用扫描电镜对冻融作用后的细砂和粗砂拍摄得到其颗粒显微图像(图9~10),显微镜的物镜倍数为4倍,每个小正方形边长为 $264.60\text{ }\mu\text{m}$ 。为了与绘制得出的“磨圆度、长径比随冻融循环次数增加的变化曲线”进行验证对比,在颗粒显微图像(图9~10)中选择长径比、磨圆度与颗粒图像处理仪计算得出的平均长径比与平均磨圆度一致的颗粒作为典型颗粒来进行分析,以此保证典型颗粒具有代表性和说服力。

图9~10均为使用电子显微镜拍摄到的颗粒整体图像的一部分。由于在制作用于观察砂粒的载玻片时,存在着非常大的人为因素影响,很难保证每个载玻片上砂粒数量一致。因此下图可能存在

颗粒过于密集或稀疏的问题,并且由于图像中颗粒有限,直接利用颗粒粒径分析颗粒破碎情况不具有统计学原理,因此不对图9~10进行具体的分析,而是在图像中选择能够代表冻融循环中颗粒主要形态变化的典型颗粒来分析、辅助证明。

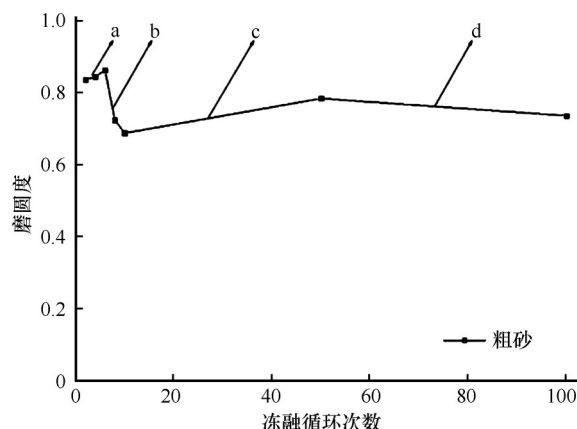


图8 粗砂磨圆度随冻融循环次数增加的变化曲线  
Fig. 8 The variable psephicity of coarse sand changing with freezing-thawing cycles

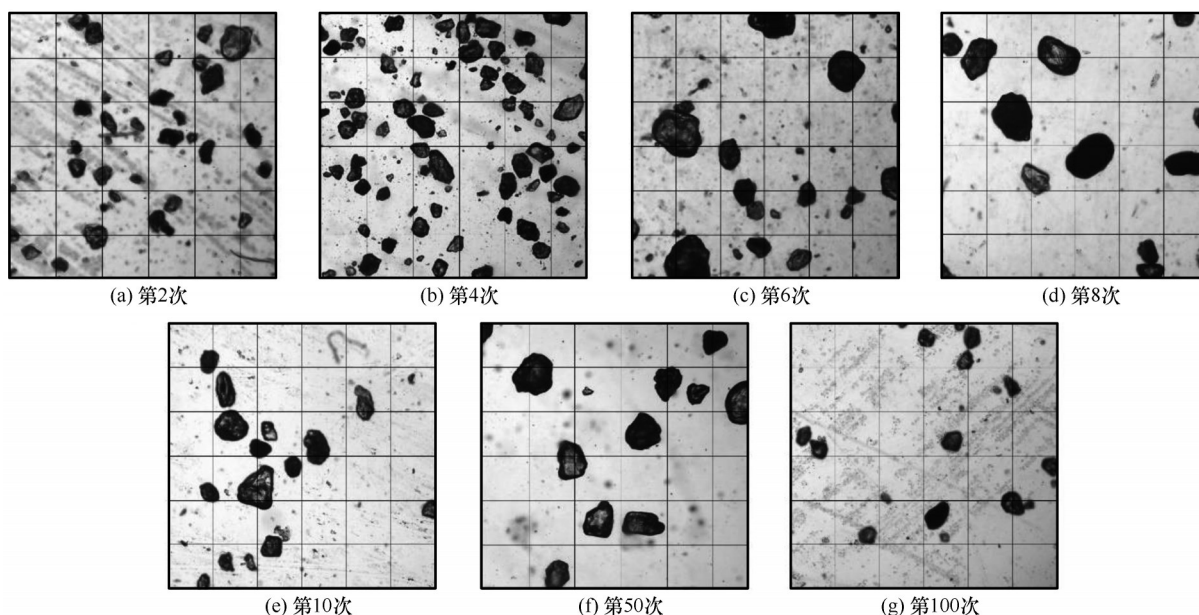


图9 冻融循环后细砂在四倍物镜下的图像

Fig. 9 Typical grain pattern of coarse sand under quadruple objective

图11为细砂在2、4、6、8、10、50、100次冻融循环后,通过颗粒图像处理仪选择的典型颗粒图形。图12为粗砂在2、4、6、8、10、50、100次冻融循环后,通过颗粒图像处理仪选择的典型颗粒图形。结合砂土颗粒磨圆度随冻融循环次数增加的变化曲线(图7~8),更直观地体现出了砂土颗粒在冻融循环作用下发生的相互作用和破坏。

由图11(a)可以看出,经过二次冻融循环作用的细砂颗粒,颗粒形态表现为尖角外形,磨圆度较低,还保留有明显的凸出,整体形状比较不规则,棱角比较明显;图11(b)为细砂颗粒经过4次冻融循环后的典型颗粒图像,颗粒右侧呈现出贝壳状断口。虽然颗粒形状仍比较不规则,但棱角基本消失,颗粒边缘比较平滑;图11(c)为细砂颗粒经过6

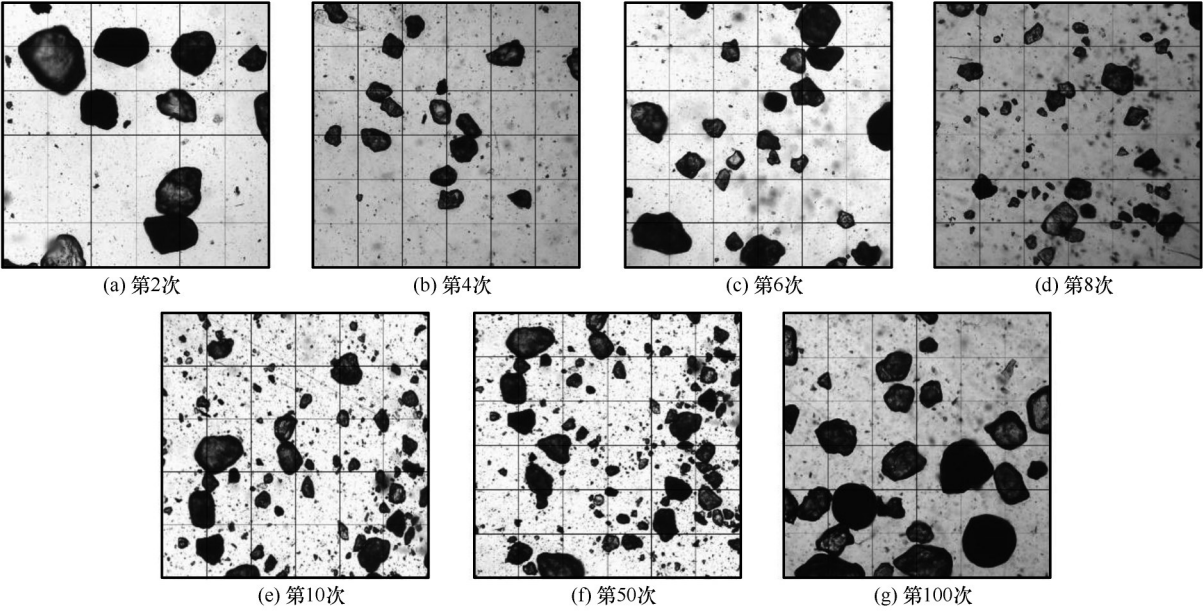


图 10 冻融循环后粗砂在四倍物镜下的图像

Fig. 10 Typical grain patterns of coarse sand under quadruple objective after 2 (a), 4 (b), 6 (c), 8 (d), 10 (e), 50 (f) and 100 (g) freezing-thawing cycles

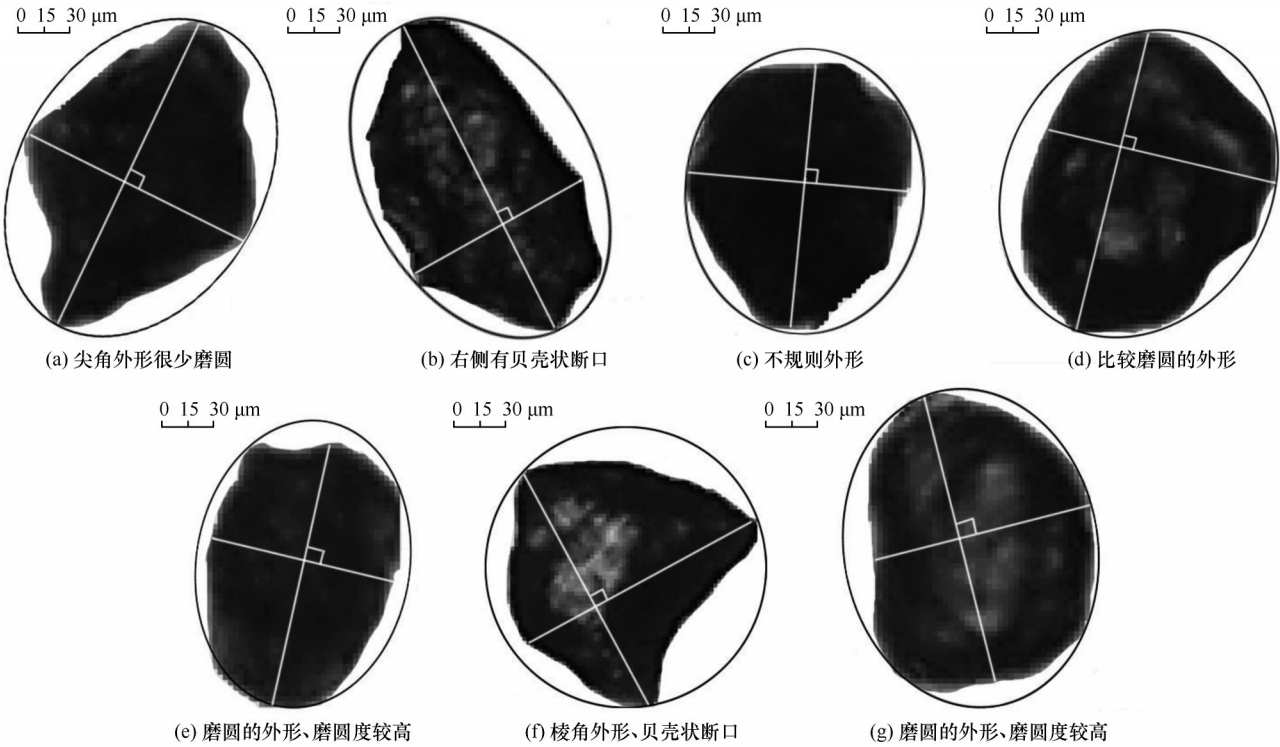


图 11 细砂典型颗粒图形

Fig. 11 Typical grain morphology of fine sand

次冻融循环后的典型颗粒图像，经过6次冻融循环后颗粒外形虽然仍然呈不规则状，但凸出基本消失；图 11(d)为细砂颗粒经过8次冻融循环后的典型颗粒图像，颗粒外形比较磨圆，凹坑逐渐减少，但仍然存在；图 11(e)为细砂颗粒经过10次冻融循

环后的典型颗粒图像，颗粒呈现出磨圆外形，基本无凹坑和凸出，整体呈比较规则的椭圆形，磨圆度较高；图 11(f)为细砂颗粒经过50次冻融循环后的典型颗粒图像，颗粒呈棱角状外形，并且一侧有贝壳状断口。较为圆滑的一面，推测为破碎前颗粒的



表面。具有贝壳状断口的一面, 推测为破裂面; 图 11(g) 为细砂颗粒经过 100 次冻融循环后的典型颗粒图像, 颗粒表现为磨圆外形, 呈比较规则椭圆状, 无明显凹坑与凸出, 磨圆度较高<sup>[2]</sup>。

图 12(a) 为经过 2 次冻融循环的粗砂典型颗粒图像, 该颗粒外形呈不规则状, 棱脊似锋刃, 磨圆度较低; 图 12(b) 为经过 4 次冻融循环的粗砂典型颗粒, 相比于图 12(a), 棱角逐渐被磨平, 但仍呈棱角外形, 磨圆度稍有增大; 图 12(c) 为经过 6 次冻融循环的粗砂典型颗粒, 该颗粒棱角基本消失, 呈磨圆外形, 磨圆度整体较高; 图 12(d) 与图 12(e) 分别

为经过 8 次和 10 次冻融循环的粗砂典型颗粒, 相比图 12(c), 这两种颗粒表现为: 一侧外形较磨圆, 应为颗粒破碎前原表面, 另一侧呈贝壳状断面, 应为颗粒破裂后的破裂面, 表明在冻融循环的过程中, 颗粒发生了破裂, 从而使磨圆度降低; 图 12(f) 为经过 50 次冻融循环的粗砂典型颗粒, 发生过破裂的颗粒在冻融循环的作用下, 颗粒间相互摩擦, 再一次变得比较光滑, 磨圆度增大; 图 12(g) 为经过 100 次冻融循环的粗砂典型颗粒, 与图 12(f) 相比, 变化不大。表明颗粒在经过 50 次冻融循环后, 磨圆度基本趋于稳定。

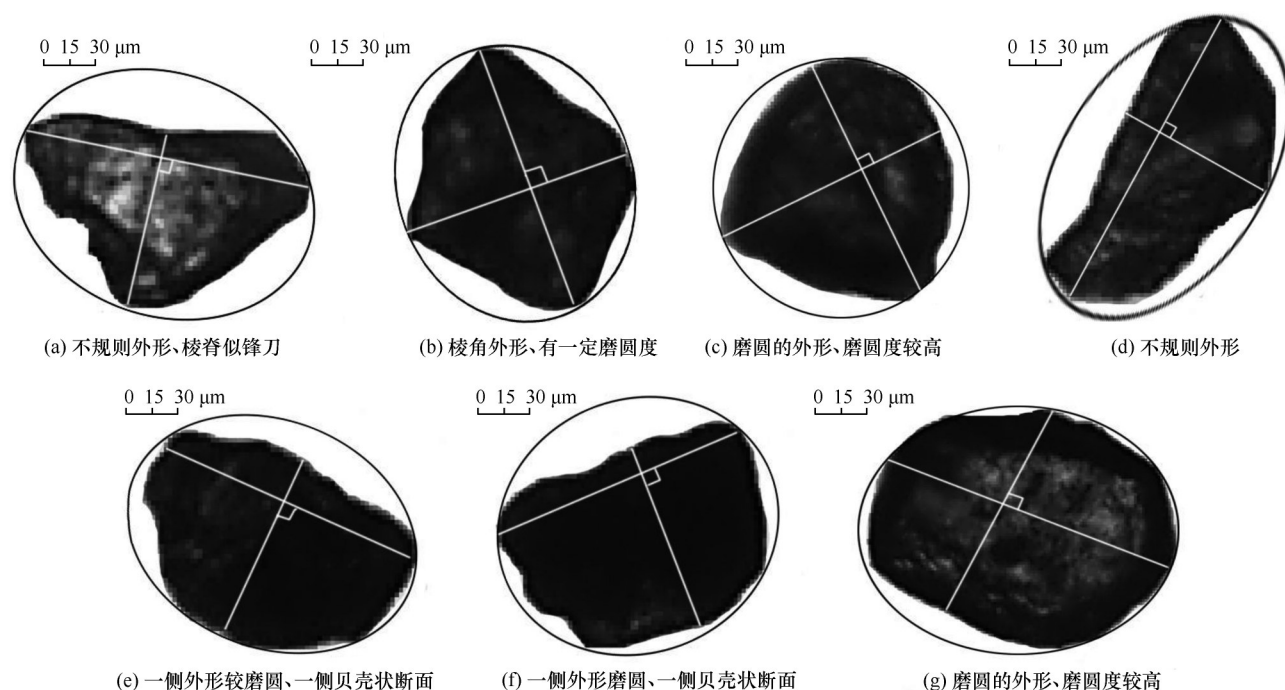


图 12 粗砂典型颗粒图形

Fig. 12 Typical grain pattern of coarse sand

综合分析典型颗粒图像与颗粒磨圆度随冻融循环次数增加的变化曲线: 细砂和粗砂磨圆度随冻融循环次数增加的变化曲线, 有相似之处。如在 2、4、6 次冻融作用后, 细砂和粗砂磨圆度都呈上升趋势。而颗粒磨圆度增大的主要原因是: 冻融作用在破坏土体原有结构并重新形成了新的、复杂程度较低的孔隙结构时, 土体孔隙中水分在液-固-液不断地转化, 消磨着孔隙中部分不平整的内壁, 使其内壁的粗糙程度降低<sup>[19-20]</sup>。这种孔隙内壁粗糙度降低的现象, 对于砂土颗粒来说, 就是磨圆度增大的过程。因此, 砂土颗粒(细颗粒与粗颗粒)在 2、4、6 次冻融循环过程中, 颗粒之间相互作用主要以摩擦为主。第 8 次和第 10 次冻融循环, 粗砂磨圆度变化

呈现出了与细砂不同的变化, 细砂磨圆度继续呈上升的趋势, 而粗砂磨圆度则呈下降趋势。粗砂磨圆度的这种变化符合我们以往的认知, 即: 在冻融作用下, 土样中粒径较大的颗粒首先发生破碎<sup>[21]</sup>, 从而导致磨圆度的降低。10 次冻融循环之后, 粗砂和细砂的磨圆度都保持局部波动, 整体稳定的规律。综上不难总结出, 砂土颗粒在冻融作用下, 先发生的是颗粒之间的相互摩擦, 磨圆度增大。之后粗砂首先破碎(第 8 次冻融循环), 磨圆度降低, 而细砂在 10 次冻融循环之后磨圆度才稍稍降低, 基本趋于稳定, 表明细砂颗粒在冻融作用下主要以磨圆为主, 颗粒破碎发生的很少。整个冻融循环的过程, 就是一种砂粒不停破碎, 磨圆的动态平衡的过程。

当冻融循环次数足够多时,磨圆度基本稳定,保持不变。

### 3.2 长径比分析

长径比为经过颗粒内部的最长径,和与它相垂直的最长径之比。冻融循环后,长径比的变化,可以看出砂土颗粒形状的变化,从侧面可以反映出冻融循环对颗粒的破坏和颗粒间相互作用的程度。本文使用颗粒图像处理仪对砂土颗粒扫描处理,计算出了两组砂土颗粒的平均长径比,其中图13为细砂长径比随冻融循环次数增加的变化曲线图,图14为粗砂长径比随冻融循环次数增加的变化曲线图。

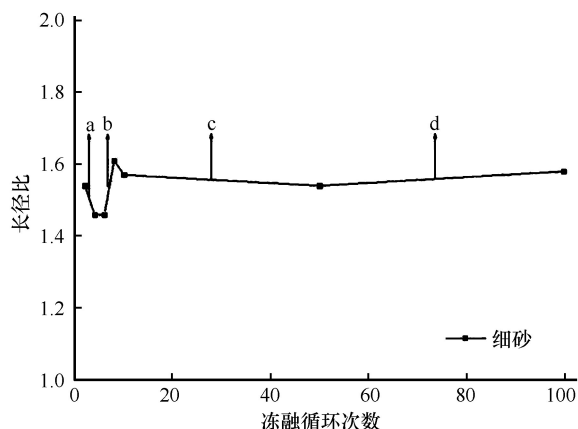


图13 细砂长径比随冻融循环次数增加的变化曲线

Fig. 13 The variable aspect ratio of fine sand with freezing-thawing cycles

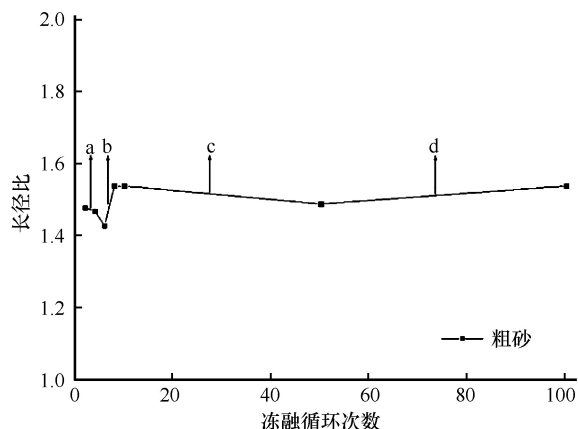


图14 粗砂长径比随冻融循环次数增加的变化曲线

Fig. 14 The variable aspect ratio of Coarse sand with freezing-thawing cycles

通过对图13~14的分析,细砂与粗砂在冻融循环过程中有着相似的变化规律。由图可知:(1)砂土颗粒长径比随着冻融循环次数增加,其整体变化为先减小,后增大,最后趋于稳定;(2)砂土颗粒

在前几次冻融循环过程中,长径比先减小,表明颗粒的长径和短径差距由大变小(见图13~14的折线a段),对应磨圆度变化则为颗粒由不规则状逐渐转变为磨圆状(见图7~8的折线a段);(3)砂土颗粒经过初始的长径比下降后,在第8次冻融循环后,长径比有上升的趋势(见图13~14的折线b段),对应颗粒的形态变化为颗粒在相互作用下发生破碎,磨圆度下降[见图11~12的(d)、(e)子图]<sup>[22]</sup>;(4)砂土颗粒在经过多次冻融循环后,最后长径比趋于稳定(见图13~14的折线c、d段)。

### 3.3 砂土颗粒在冻融作用下的逻辑图示模型

在冻融过程中,砂土颗粒相互之间必然会发生碰撞和摩擦,其相互之间的作用主要可以分为两种:相互挤压和相互摩擦<sup>[23-25]</sup>。根据上文对砂土颗粒形态变化规律的总结归纳,笔者得出了砂土颗粒在冻融作用下相互接触、碰撞的逻辑图示模型(图15~16)。图15为颗粒相互挤压,最终导致颗粒发生破碎的逻辑图示模型。在冻融作用下,土样中粒径较大的颗粒首先发生破碎,当冻融循环次数足够多时,土样的颗粒组成达到了一个平衡状态,各粒组含量均趋于稳定<sup>[21]</sup>。砂土中部分大颗粒由于粒径较大,相互之间已经处于紧密接触的状态[图15(a)],不容易发生相对滑动。在冻融作用产生的巨大应力作用下<sup>[16]</sup>,颗粒表面逐渐出现裂纹[图15(b)],随着冻融循环次数的增加,裂纹逐渐发展为破裂面[图15(c)],最终颗粒发生破裂[图15(d)]。

图16为颗粒相互摩擦,最终导致颗粒磨圆度增大的逻辑图示模型。冻融循环作用破坏了土体内部原有的结构,并重新形成了新的、复杂程度较低的孔隙结构<sup>[19]</sup>。在这一过程中,土体孔隙中的水分在液-固-液间不断地转化,使得小颗粒内部出现一定程度的“抱团”现象。这一动态的过程,消磨了孔隙中部分不平整的内壁,使其内壁的粗糙程度降低<sup>[20]</sup>。这种孔隙内壁粗糙度降低的现象,对于砂土颗粒来说,就是磨圆度增大的过程。具体来讲,砂土中的小颗粒由于粒径较小,接触不紧密,有移动的空间,在应力作用下,会由原本的松散状态变为紧密接触[由图16(a)变为图16(b)],即上文所提及的“抱团”现象。随着冻融次数的增加,土体孔隙中的水分仍在液-固-液间不断地转化<sup>[26-28]</sup>,颗粒在这一过程中发生了一定程度的相对位移[图16(b)]箭头表示颗粒位移的方向],这种位移使砂土中的小颗粒接触面发生多次摩擦,最终使颗粒接触面变得磨圆[图16(d)]。



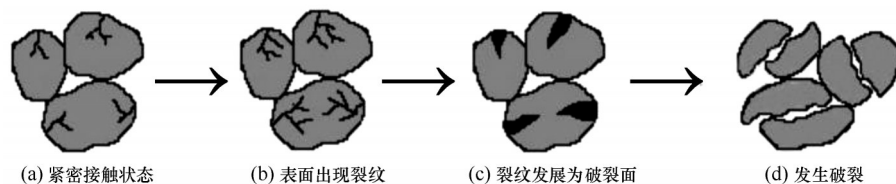


图 15 砂土颗粒相互挤压逻辑图示模型

Fig. 15 Logical graphical model of sand particle extrusion

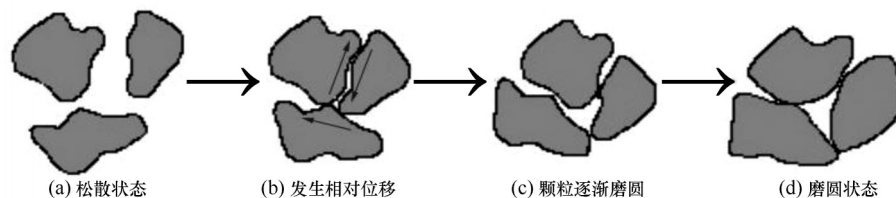


图 16 砂土颗粒相互摩擦逻辑图示模型

Fig. 16 Logical graphical model of sand particle friction

#### 4 结论

经过研究, 本文最终得到如下结论:

(1) 砂土颗粒在冻融循环过程中, 长径比先减小, 后增加, 最后趋于稳定, 长径比的变化与磨圆度的变化共轭。

(2) 砂土颗粒在冻融循环过程中, 颗粒之间先发生相互之间的摩擦作用, 之后颗粒间的巨大应力才使颗粒发生破裂, 并且粗砂颗粒破碎所需要的冻融循环次数明显要小于细砂颗粒, 随着冻融循环次数的增加, 逐渐趋于稳定。宏观上表现为整体磨圆度先增大后减小, 最后趋于稳定。

(3) 综合细砂与粗砂在不同次数冻融循环作用下颗粒的磨圆与破碎情况, 粒径较大的颗粒需要更少的冻融次数就能发生破碎, 而粒径较小的颗粒则在冻融作用下主要以相互之间摩擦, 提高整体磨圆度为主。

#### 参考文献(References):

- [1] Krinsley D H, Doornkamp J C. Atlas of quartz sand surface textures [M]. Cambridgeshire: Cambridge University Press, 2011: 44 - 61.
- [2] Xie Youyu. Surface structure characteristics of quartz sand in China[M]. Beijing: Ocean Press, 1984, 19(8): 4 - 6. [谢又予. 中国石英砂表面结构特征图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1984, 19(8): 4 - 6.]
- [3] He Ruixia, Jin Huijun, Jiang Guanli, Progress of the study on the periglacial in the Ordos Area, Inner Mongolia Autonomous Region, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1 - 10. [何瑞霞, 金会军, 蒋观利. 内蒙古鄂尔多斯地区古冰缘遗迹科学考察进展[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1 - 10.]
- [4] Cho G C, Dodds J, Santamarina J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed

sands[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2006, 132(5): 591 - 602.

- [5] Li Jieli, Liu Hanwen. Establishment and analysis of the volumetric deformation model of sandstone pores under the effect of freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1173 - 1180. [李林杰, 刘汉文. 冻融循环作用下砂岩孔隙体积变形模型的建立与分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1173 - 1180.]
- [6] Dowdeswell J A. Scanning electron micrographs of quartz sand grains from cold environments examined using Fourier shape analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 1982, 52(4): 1315 - 1323.
- [7] Ye Wanjun, Li Changqing, Dong Xihao. Study on damage identification of loess microstructure and macro mechanical response under freezing and thawing conditions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 546 - 555. [叶万军, 李长清, 董西好. 冻融环境下黄土微结构损伤识别与宏观力学响应规律研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 546 - 555.]
- [8] Tu Xinbin, Wang Sijing. Particle shape descriptor in digital image analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 659 - 662. [涂新斌, 王思敬. 图像分析的颗粒形状参数描述[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 659 - 662.]
- [9] Altuhaifi F, O' sullivan C, Cavarretta I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 139(8): 1290 - 1307.
- [10] Mora C F, Kwan A K H. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing[J]. Cement and concrete research, 2000, 30(3): 351 - 358.
- [11] Yang J, Luo X D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 84: 196 - 213.
- [12] Rausch J, Grobety B, Vonlanthen P. Eifel maars: quantitative shape characterization of juvenile ash particles (Eifel Volcanic Field, Germany) [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2015, 291: 86 - 100.
- [13] Liu Qingbing, Xiang Wei, Cui Deshan. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand [J].

- Rock and Soil Mechanics, 2011(Suppl 1): 190 – 197. [刘清秉, 项伟, 崔德山. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011(增刊1): 190 – 197.]
- [14] Qi Jilin, Zhang Jianming, Zhu Yuanlin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003 (Suppl 2): 2690 – 2694. [齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(增刊2): 2690 – 2694.]
- [15] Chen Xin, Zhang Ze, Li Dongqing. Study on the pore features of freezing-thawing loess based on different fractal models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2). [陈鑫, 张泽, 李东庆. 基于不同分形的冻融黄土孔隙特征研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2).]
- [16] Salokhe V M, Pathak B K. Effect of aspect ratio on soil reactions on flat tines in dry sand [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(3): 179 – 188.
- [17] Wang Wenjun, Xu Yuanjie, Li Haiteng. Calculation of the grinding roundness of limestone particles based on binary image processing [J]. China Water Transport: second half, 2016, 16(8): 330 – 332. [王雯珺, 徐远杰, 李海腾. 基于二值图像处理的灰岩颗粒磨圆度计算[J]. 中国水运: 下半月, 2016, 16(8): 330 – 332.]
- [18] Waddell H. Volume, Shape and roundness of rock particles [J]. Journal of Geology, 1932(40): 443 – 451.
- [19] Zhang Ze, Zhou Hong, Qin Qi, et al. Experimental study on porosity characteristics of loess under freezing-thawing cycle [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(3): 839 – 847. [张泽, 周泓, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土的孔隙特征试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(3): 839 – 847.]
- [20] Zhang Ying, Bing Hui. Experimental study of the effect of freezing-thawing cycles on porosity characters of silty clay by using mercury intrusion porosimetry [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 169 – 174. [张英, 郅慧. 基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 169 – 174.]
- [21] Zheng Yun, Ma Wei, Bing Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1282 – 1287. [郑郢, 马巍, 郅慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282 – 1287.]
- [22] Zhu J, Liang Y, Zhou Y. The effect of the particle aspect ratio on the pressure at the bottom of sandpiles [J]. Powder technology, 2013, 234: 37 – 45.
- [23] Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 121 – 125. [温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 121 – 125.]
- [24] Bhushan B. Introduction to tribology [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 57 – 64.
- [25] Popov V L. Contact mechanics and friction physical principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 72 – 73.
- [26] Li Yan, Jin Zhenkui, Jin Ting, et al. Geological significance of magmatic gravel roundness [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014(2): 189 – 197. [李燕, 金振奎, 金婷, 等. 岩浆岩砾石磨圆度地质意义的研究[J]. 沉积学报, 2014(2): 189 – 197.]
- [27] Xiao Donghui, Fen Wenjie, Zhang Ze, et al. Research on the relationship between permeability and construction feature of loess under the freeze-thaw cycles [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 43 – 49. [肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环作用下黄土渗透性与其结构特征关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 43 – 49.]
- [28] Xie Youyu. Sedimentary geomorphologic analysis [M]. Beijing: Ocean Press, 2000: 23 – 24. [谢又予. 沉积地貌分析[M]. 北京: 海洋出版社, 2000: 23 – 24.]

## Experimental study on morphometric changes of sand particles under freezing-thawing cycles

YUN Qingfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Ze<sup>2,3,4</sup>, MING Jiao<sup>2</sup>, FU Xiangyu<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Chenglin<sup>2</sup>, Andrey MELNIKOV<sup>5</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. School of Civil Engineering & Institute of Cold Regions Engineering, Science and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 4. Northeast-China Observatory and Research-Station of Permafrost Geo-Environment, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 5. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk 117997, Russia)

**Abstract:** The surface morphology of quartz particles in the soil is not only the information carrier of the sedimentary environment and transport mechanism from the sediment source area, but also directly affects the macroscopic physical property of the sand, which is of great significance to mechanics and practical engineering. Scanning electron microscope was used in this paper and two quantitative indexes, aspect ratio and pseplicity, were used to observe two groups of sand particles subjected to different freezing-thawing cycles. It is hoped that by observing and studying the sand particles under different freeze-thaw cycles, the variation of the surface morphology of sand particles due to freezing-thawing have been summarized, which will provide theoretical basis for future studying the historical changes and paleoclimate environment in glacialized and frozen soil areas. It also provides theoretical support for the practical engineering application in seasonal frozen soil areas. It is shown that during the freezing-thawing, the pseplicity of sand particles first increases, then decreases and finally tends to be stable due to the interaction among the particles. The aspect ratio first decreases, then increases, and finally stabilizes. The aspect ratio conjugates with the curve of pseplicity. At the same time, during the freezing-thawing cycles, the frictional action among the particles occurs first, and then the great stress among the particles causes the particles to break down. The number of freezing-thawing cycles required for the crushing of coarse sand particles is obviously less than that of fine sand particles. With the increase of freezing-thawing cycles, the dynamic equilibrium of damage-grinding tends to be stable.

**Key words:** freezing-thawing cycle; sand; particle morphology; roundness; aspect ratio

(责任编辑: 温智; 编辑: 庞瑜, 周成林)