

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.013

# 围压与含水率对冻结砂土破坏应变能密度影响特性研究

杜海民, 马 巍, 张淑娟, 周志伟

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 基于一系列不同围压、不同含水率条件下的冻结砂土的三轴压缩试验, 在一个宽泛的含水率范围内, 研究了围压与含水率对冻结砂土破坏应变能密度的影响特性。试验结果表明: 含水率为 30.6% 的冻土试样容易发生塑性破坏, 其他含水率的冻土试样容易发生脆性破坏。围压对破坏应变能密度的影响可以分为低围压阶段、中围压阶段、高围压阶段, 并且含水率对临界围压有重要影响。含水率对破坏应变能密度的影响也可以分为两种类型: 当围压较低时 (50 kPa), 随着含水率的增大, 破坏应变能密度有一个初始增加的阶段, 在含水率约为 30.6% 时破坏应变能密度达到最大值 600 kPa, 之后随着含水率的继续增大, 破坏应变能密度转而减小, 达到 60 kPa 后含水率的进一步增大不再影响破坏应变能密度, 即此时冻土的破坏应变能密度接近于冰的破坏应变能密度; 当围压较高时 (大于等于 500 kPa), 与低围压阶段相比, 破坏应变能密度没有初始增加的阶段。

**关 键 词:** 高含冰量冻土; 破坏应变能密度; 三轴压缩; 围压; 含水率

中图分类号: TU 441+.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-1943-08

## Effects of confining pressure and water content on failure strain energy density for frozen silty sands

DU Hai-min, MA Wei, ZHANG Shu-juan, ZHOU Zhi-wei

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** Effects of confining pressure and water content on failure strain energy density of frozen silty sand are investigated in a comprehensive experimental program of triaxial compressive test under the condition of various confining pressures and a wide range of water content. The results show that when the water content is about 30.6%, the frozen soil is prone to plastic failure, while brittle failure occurs at other water contents. The influence of confining pressure on failure strain energy density can be divided into low confining pressures phase, medium confining pressures phase and high confining phase. And water content has an important effect on the boundary confining pressure. Two types of the effect of water content on failure strain energy density are observed. When confining pressure is low (50 kPa), failure strain energy density begins to increase with increasing the water content, and reaches a maximum (600 kPa) at water content of 30.6%. Then, as the water content continues to increase, the damage energy density decreases. When the water content reaches 60 kPa, the further increase of the water content no longer affects the damage energy density, i.e., the damage energy density of the frozen soil is close to that of the ice. When the confining pressure is high ( $\geq 500$  kPa), there is no initial increase in the failure strain energy density compared to the low confining pressure stage.

**Keywords:** ice-rich frozen soil; failure strain energy density; triaxial compression; confining pressure; water content

收稿日期: 2015-09-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2012CB026106); 国家自然科学基金 (No.41571064, No.41630636); 冻土工程国家重点实验室自主课题 (No. SKLFSE-ZT-07); 冻土工程国家重点实验室开放基金 (No. SKLFSE201605)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2012CB026106), the National Natural Science Foundation (41571064, 41630636), the Independent Program for State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (SKLFSE-ZT-07) and the Open Project Program of the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (SKLFSE201605).

第一作者简介: 杜海民, 男, 1987 年生, 博士生, 主要从事冻土力学方面的研究与学习。E-mail: duhaimin@lzb.ac.cn

通讯作者: 马巍, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 主要从事冻土力学方面的科研工作。E-mail: mawei@lzb.ac.cn

## 1 引言

破坏应力(强度)或破坏应变经常作为衡量冻土承载能力的指标,因此,如果两种情况下的破坏应力或破坏应变是相同的,就认为这两种情况下冻土的承载能力是相同的。当冻土发生脆性破坏时,极值应力作为破坏应力,其对应的应变称为破坏应变。当冻土发生塑性破坏时,应变达到30%极值应力仍然没有出现,此时将20%的应变作为破坏应变,其对应的应力作为破坏应力。

关于冻土的强度特性已有大量试验和理论研究,Chamberlain等<sup>[1]</sup>对饱和砂土和粉土进行了三轴压缩试验,发现围压对强度有重要影响,并且其影响可以分为低围压、中围压、高围压3个阶段(随着围压的增大,强度在低围压阶段增大,在中围压阶段减小,在高围压阶段有小幅增加),Xu等<sup>[2]</sup>关于冻结砂土也得到了类似的试验结果。一些研究者只发现了前两个阶段<sup>[3-5]</sup>,并且Baker等<sup>[3]</sup>还发现在低围压阶段,随着围压的增大,强度线性增大。Singh等<sup>[6]</sup>与Arenson等<sup>[7]</sup>分别研究了围压对冰和冻土的强度特性的影响,他们只发现了第1阶段。然而一些研究者提出围压对冻土强度影响很小<sup>[8-10]</sup>。Arenson等<sup>[11]</sup>还注意到随着体积含冰量的增大,围压对冻土强度的影响程度减小,牛亚强等<sup>[12]</sup>也发现冻土强度随围压的变化趋势要受到初始含水率范围的影响。一些试验结果表明,当含水率从饱和含水率逐渐增加时,冻土强度减小<sup>[13-14]</sup>。Shusherina等<sup>[13]</sup>与Tsytoich等<sup>[15]</sup>发现随着含水率的进一步增大,冻土的强度会逐渐趋于冰的强度。Arenson等<sup>[11]</sup>研究了体积含冰量对冻土强度的影响,得到了类似的结论。然而,Sayles等<sup>[16]</sup>发现,冻结粉土的单轴抗压强度随着体积含冰量的增加先减小后增大(30.0%~60.0%)。马小杰等<sup>[17]</sup>与赖远明等<sup>[18]</sup>得到含水率对强度的影响趋势受温度影响很大。

关于围压对冻土破坏应变影响的研究相对较少,吴紫汪等<sup>[19]</sup>在冻结砂土上实施了三轴压缩试验,发现随着围压的增大,破坏应变线性增加,但徐洪宇等<sup>[20]</sup>观察到冰的破坏应变不依赖于围压。陈锦等<sup>[21]</sup>研究得到冻结含盐粉土的破坏应变随着含水率的增大,先增加到一个最大值,然后减小,并且要受到含盐种类的影响。Zhu等<sup>[22]</sup>注意到随着含水率的进一步增加,冻土的破坏应变最终会趋于冰的破坏应变。

虽然关于冻土的破坏特性已有大量研究,但这些研究都是局限于强度或破坏应变其中一个,而并

未把两者综合起来考虑。因此,笔者提出了将破坏应变能密度作为衡量冻土承载能力大小的一个指标。破坏应变能密度是应力-应变曲线从起始点到破坏点的积分值,因此,关于应力-应变曲线它包括了比强度或破坏应变更多的信息,从做功的角度来衡量承载能力的大小。当两种情况下的强度和破坏应变相同时,破坏应变能密度不一定相同,此时,更大的破坏应变能密度会有更大的承载能力。通过一系列冻结砂土的三轴压缩试验,本文研究了围压与含水率对冻土破坏应变能密度的影响特性。

## 2 试验介绍

### 2.1 试样制备

试验用土为青藏高原的粉质砂土,其粒径分布情况见表1。根据冻土试样不同的含水率,采用两种不同的制样方法。

表1 土颗粒粒径分布  
Table 1 Particle composition of silty sand

粒径(mm)范围	百分比/%
2.000~0.500	1.85
0.500~0.250	8.03
0.250~0.075	47.44
0.075~0.005	36.57
<0.005	6.11

(1)当冻土试样的含水率在16.7%~18.8%之间时,用早期的饱和冻土试样的制备方法制备<sup>[5]</sup>。

(2)当试样的含水率超过18.8%时,首先将干土和蒸馏水混合来获得试样目标含水率的泥浆,然后将泥浆放在恒温箱在1.0℃条件下恒温至少12h;其次,将泥浆分层装入带有可分裂塑料衬砌的铁质模具的19个标准孔中,塑料衬砌的内径为61.8mm,高度为175mm,如图1所示。铁质模具放在一个保温箱中,并且通过其底部循环的低温酒精给模具降温,而保温箱旁边的冷浴给酒精降温。在制样过程中有3个问题需要注意:①冷浴在制样前一天打开;②在每加一层泥浆后适当地搅动是必要的;③当加入孔中的泥浆大部分冻结之后再加入下一层泥浆。这些做法是为了加快加入泥浆的冻结,防止泥浆冻结过程中的分层,尽量保证试样的均匀性。为了将冻土的破坏应变能密度和冰破坏应变能密度作对比,用类似(2)的方法制备了一批冰样。最后,将在模具中冻结超过48h的试样取出,在冷库中在-8.0~-6.0℃温度条件下,用机床将试样加工成直径为61.8mm,高度为125.0mm的标准试样。测量试样的大小和质量,并且给试样套上橡胶膜,两端

固定环氧树脂样头。

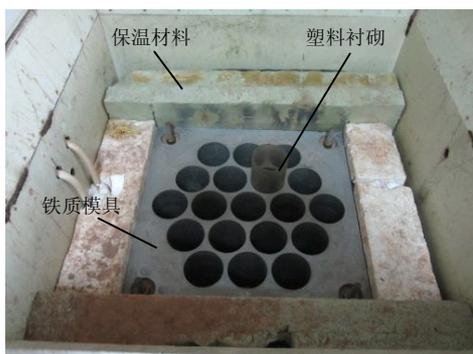


图 1 制样设备  
Fig.1 Sample preparation equipment

### 2.2 试验条件

试验前将试样在试验要求温度下在恒温箱中恒温至少 24 h，然后将所有试样在恒定温度，应变率，围压条件下，在冻土三轴试验机上进行三轴压缩试验。当轴向应变达到 21%时，试验停止。数据通过电脑程序自动采集，所有试验均在冻土工程国家重点实验室完成。试样的含水率变化范围为 16.7%~冰，其相应的干密度如表 2 所示。试验的剪切速率为 1.25 mm/min，温度为-5.0 °C，围压范围为 0.05~4.00 MPa。

表 2 试样含水率及相应的干密度  
Table 2 Water content and corresponding dry density of samples

含水率/%	干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	含水率/%	干密度/(g/cm <sup>3</sup> )
16.7	1.82	103.0	0.66
18.8	1.73	256.0	0.31
30.6	1.39	480.0	0.18
41.5	1.21	冰	0.00
63.0	0.94		

### 3 破坏应变能密度特性分析

随着轴向应变的增加，试样的横截面积会有所变化，因此，对试样的横截面积做一些修正是必要的。假设试样在压缩过程中始终为标准的圆柱体，并且体变为 0，从而试样的横截面积为

$$A_0 h_0 = A(x)(h_0 - x) \quad (1)$$

式中： $A_0$ 为试样的初始横截面积； $A(x)$ 为试样的轴向变形为  $x$  时的横截面积； $h_0$ 为试样的初始高度。由式 (1) 可以得

$$A(x) = \frac{A_0}{1 - \frac{x}{h_0}} \quad (2)$$

根据轴向应变的定义有

$$\varepsilon = \frac{x}{h_0} \quad (3)$$

将式 (3) 带入式 (2) 得

$$A(\varepsilon) = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (4)$$

图 2 中的  $a$  曲线代表未修正横截面积的应力-应变曲线， $b$  曲线代表用式 (4) 修正横截面积后得到的应力-应变曲线。图 2 表明，在 1% 的轴向应变范围内，曲线  $a$  与曲线  $b$  基本重合。然而，当轴向应变大于 1% 之后，随着应变的继续增大，两者的差距逐渐扩大。这说明当破坏应变小于 1% 时，未修正横截面积的强度值与修正面积后的强度值基本是相等的，但当破坏应变大于 1% 之后，随着破坏应变的增大，两者的强度值差距逐渐增大。从图 2 中可以看到，曲线  $a$  属于应变硬化类型，曲线  $b$  属于应变软化型，这说明式 (4) 可以影响应力-应变曲线的类型。在本文中，试样的横截面积均用式 (4) 进行了修正。

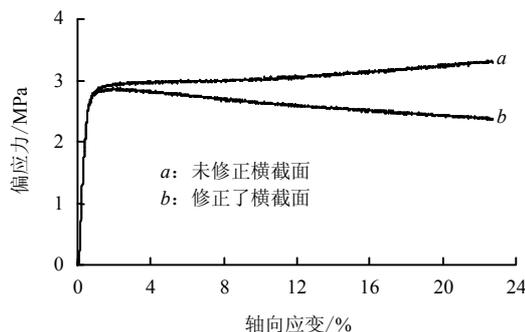


图 2 不同横截面积修正条件下应力-应变曲线  
Fig.2 Stress-strain curves under different correction conditions of cross-sectional area

### 3.1 应力-应变曲线特性分析

图 3 为一些典型的应力-应变曲线，其中图 3(a)~图 3(c)代表在相同含水率、不同围压条件下的应力-应变曲线，图 3(d)代表在围压为 0.05 MPa，不同含水率条件下的应力-应变曲线。

图 3 表明，在不同的含水率范围，有 4 种应力-应变曲线类型。当含水率在 16.7%~18.8% 时，应力-应变曲线如图 3(a) 所示。从图可以看出，随着应变的增大，应力增大，然后出现一转折点，该转折点处所对应的应变与相同条件下冰的破坏应变基本相同，说明在这一点处冻土试样内部冰约束破坏。过了转折点之后，应力继续增大，但增加的速率明显小于初始阶段，直至达到一个最大值之后转而减小或塑性破坏。在这个含水率范围内，随着围压的增

大, 冻土的塑性增强。当含水率为 41.5% 时, 应力-应变曲线类型如图 3(b) 所示。随着应变的增大, 应力增大到一最大值之后转而减小。在这个含水率范围内, 围压的增大使得冻土的脆性增强。当含水率大于等于 63% 之后, 应力-应变曲线如图 3(c) 所示。

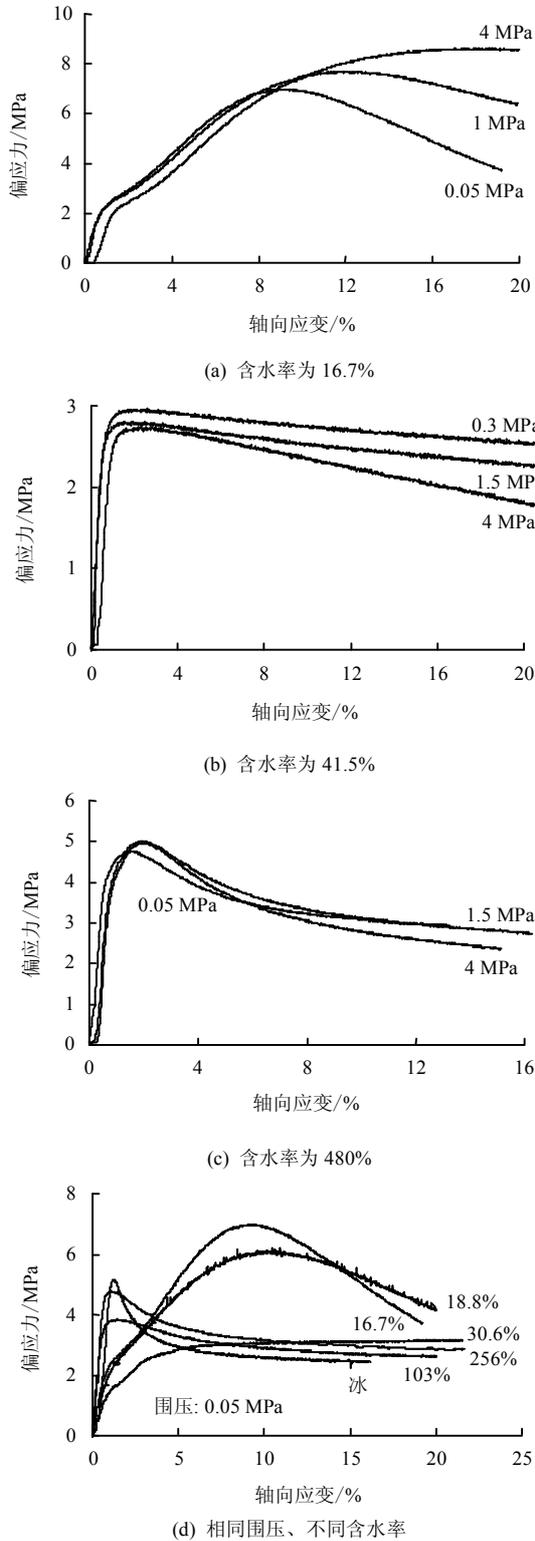


图 3 不同试验条件下典型的应力-应变曲线  
Fig.3 Typical stress-strain curves under different testing conditions

对于该类型应力-应变曲线, 最终随着应变的继续增大, 应力逐渐趋于一残余值, 围压的增大使得达到残余应力时的应变值增大。当含水率为 30.6% 时, 容易发生塑性破坏, 其他含水率条件下容易发生脆性破坏, 并且随着含水率的增大, 冻土的塑性先增加, 然后减小, 如图 3(d) 所示。

### 3.2 压缩荷载作用下破坏应变能密度计算公式推导

固体在外力作用下变形, 引起力作用点沿力作用方向位移, 外力因此而做功; 另一方面, 弹性固体因变形而具备了做功的能力, 表明储存了应变能, 而超过弹性范围, 塑性变形将耗散一部分能量, 应变能不能全部再转变为功。若动能和其他能量忽略不计, 则可由功能原理可知, 固体的应变能在数值上等于外力所做的功<sup>[23]</sup>。应变能密度表示的是单位体积固体所储存的应变能, 而破坏应变能密度指的是固体破坏前的应变能密度, 它的物理意义表征的是固体在破坏时对能量的吸收能力。基于 3 个假设 (试样在变形过程中试样始终为标准的圆柱体、试样体变为 0、试样内应力分布是均匀的), 三轴压缩条件下破坏应变能密度计算公式推导过程如下:

试样的横截面积公式为

$$A(x) = \pi r^2 \tag{5}$$

式中:  $r$  为当轴向变形为  $x$  时试样的半径。

将式 (5) 带入式 (1) 得

$$h_0 - x = \frac{A_0 h_0}{\pi r^2} \tag{6}$$

将式 (4) 带入式 (5) 得

$$r^2 = \frac{A_0}{\pi(1 - \varepsilon)} \tag{7}$$

在试样变形过程中偏应力所做的功为

$$W_{ds}(x) = \int_0^x (\sigma_1 - \sigma_3) A(x) dx \tag{8}$$

式中:  $\sigma_1$  为轴向应力;  $\sigma_3$  为围压。

将式 (3) 和式 (4) 带入式 (8) 得

$$W_{ds}(\varepsilon) = A_0 h_0 \int_0^\varepsilon \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 - \varepsilon} d\varepsilon \tag{9}$$

围压在试样变形过程中所做的总功为

① 轴向围压在试样变形过程中所做的功为

$$W_{acf}(x) = \int_0^x \sigma_3 A(x) dx \tag{10}$$

将式 (3)、(4) 带入式 (10) 得

$$W_{\text{acf}}(\varepsilon) = h_0 \int_0^\varepsilon \sigma_3 \frac{A_0}{1-\varepsilon} d\varepsilon = \sigma_3 A_0 h_0 \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) \quad (11)$$

② 径向围压在试样变形过程中所做的功为

$$W_{\text{rcf}}(r) = -\int_{r_0}^r \sigma_3 \pi(2r)(h_0 - x) dr \quad (12)$$

将式 (6) 带入式 (12) 得

$$W_{\text{rcf}}(r) = -2\sigma_3 A_0 h_0 \int_{r_0}^r \frac{1}{r} dr = \sigma_3 A_0 h_0 \ln\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (13)$$

式中： $r_0$  为试样的初始半径。

在试样变形过程中，围压对试样所作的总功为

$$W_{\text{cf}}(\varepsilon) = W_{\text{acf}}(\varepsilon) + W_{\text{rcf}}(r) = \sigma_3 A_0 h_0 \ln\left[\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \frac{1}{1-\varepsilon}\right] \quad (14)$$

将式 (7) 带入式 (14) 得

$$W_{\text{cf}}(\varepsilon) = \sigma_3 A_0 h_0 \ln\left[\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \frac{1}{1-\varepsilon}\right] = \sigma_3 A_0 h_0 \ln \frac{\pi r_0^2}{A_0} = 0 \quad (15)$$

根据应变能密度的定义，其计算公式为

$$\nu_\varepsilon = \frac{W_{\text{ds}}(\varepsilon) + W_{\text{cf}}(\varepsilon)}{V_0} = \int_0^\varepsilon \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1-\varepsilon} d\varepsilon \quad (16)$$

式中： $V_0 = A_0 h_0$  为试样的初始体积。

根据破坏应变能密度的定义，其计算公式为

$$\nu_{\varepsilon_f} = \int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1-\varepsilon} d\varepsilon \quad (17)$$

式中： $\varepsilon_f$  为破坏应变。

根据式 (17)，把应力-应变曲线处理成如图 4 所示的曲线，则该曲线沿横坐标从 0 到破坏应变的积分值即为破坏应变能密度。

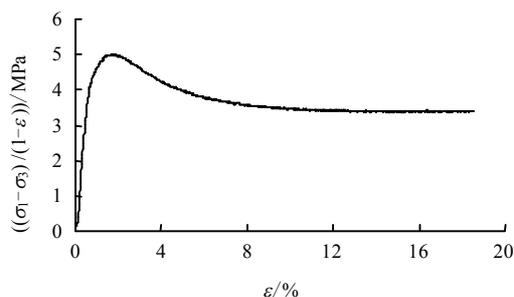
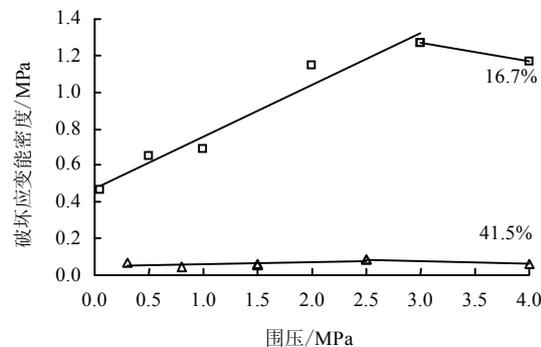


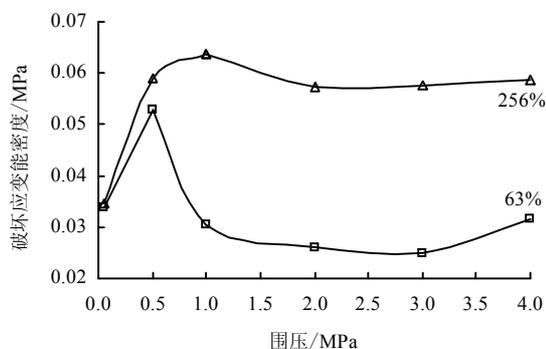
图 4 应力纵坐标处理后的应力-应变曲线  
Fig.4 Stress-strain curve after processing stress vertical ordinate

### 3.3 围压对破坏应变能密度的影响特性

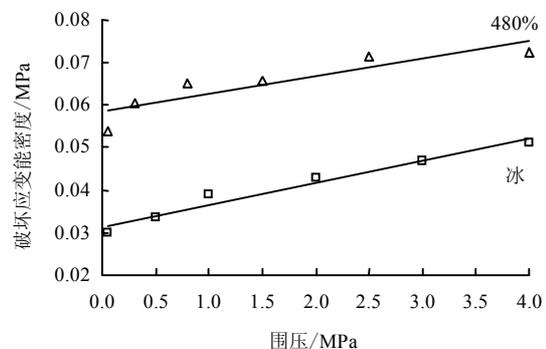
围压对破坏应变能密度特性的影响如图 5 所示，其中包括了冰的破坏应变能密度随围压的变化关系图，如图 5(c)所示。



(a) 含水率：16.7%和 41.5%



(b) 含水率：63%和 256%



(c) 含水率：480%和冰

图 5 破坏应变能密度-围压

Fig.5 Relationships between failure strain energy density and confining pressure

根据图 5，在不同的含水率区间，破坏应变能密度随围压的变化有不同的变化特性。当含水率在 16.7%~41.5% 的范围内时，随着围压的增大，破坏应变能密度增大，达到一最大值之后转而减小，如图 5(a)所示，其破坏应变能密度最大值所对的围压定义为临界围压。当含水率在 63%~256% 范围内时，在围压增加的后期，破坏应变能密度有一个略微上升的趋势，如图 5(b)所示。然而，当含水率大于等于 480% 之后，随着围压的增大，破坏应变能

密度一直在线性增加，如图 5(c)所示。从图 5 中可以看到，类似于围压对强度的影响特点，其对破坏应变能密度的影响也可以分为低围压、中围压、高围压 3 个阶段，含水率的增大使得临界围压先减小后增大。

在初始阶段，围压的增大使得试样内部的原始裂缝和孔隙变小，有效应力增加，这个过程是有利于试样破坏前对能量的吸收。因此，随着围压的增大，破坏应变能密度增大。但围压的进一步增大使得孔隙冰产生压融，颗粒破碎，微观裂缝增大，这个过程不利于试样破坏前对能量的吸收，因此，随着围压的增大，破坏应变能密度减小。

图 6 为与图 5(b)相对应的强度随围压的变化图，从中可以看到，当含水率为 63%时，强度基本稳定在 3.5 MPa 左右，而当含水率为 256%时，强度基本稳定在 4.8 MPa 左右，即在这两个含水率条件下，围压基本不影响强度。而破坏应变能密度在这个围压范围内，随着围压的增大，有一个明显先增大后减小，再略微上升的过程。

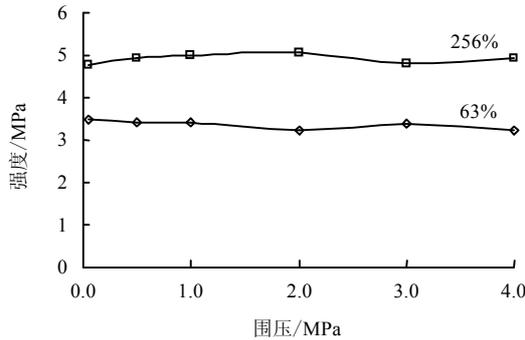


图 6 不同含水率条件下三轴抗压强度-围压

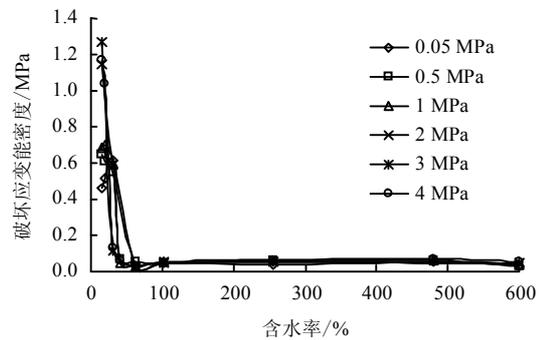
Fig.6 Relationships between triaxial compressive strength and confining pressure under different water contents

### 3.4 含水率对破坏应变能密度的影响特性

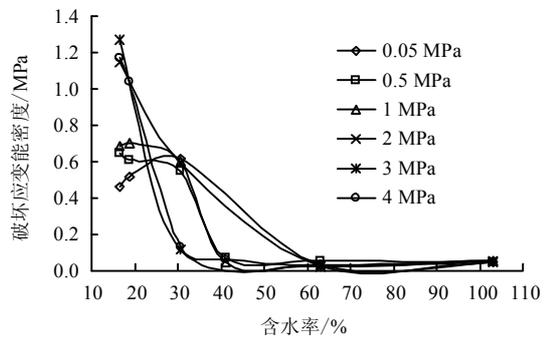
图 7 为随着含水率的变化破坏应变能密度的变化关系图，其中为了将冻土的破坏应变能密度和冰的破坏应变能密度作对比，假设冰的含水率为 600%。

图 7(a)表明根据不同的围压范围，含水率对破坏应变能密度的影响可以分为两种类型。当围压为 0.05 MPa 时，随着含水率的增加，破坏应变能密度先增加到一最大值（大约 0.6 MPa），然后转而减小到一值（大约 0.06 MPa），并且从图 7(b)中可以看到，破坏应变能密最大值所对的含水率基本为 30.6%。当围压较高时（0.5 MPa~4.0 MPa），破坏应变能密度没有初始增加的阶段，这说明围压的增

大抑制了破坏应变能密度的增加。从图 7(b)中还可以看出，随着围压的增大，含水率对破坏应变能密度的影响程度整体上增大。超过一个含水率阈值之后，破坏应变能密度基本不依赖于含水率的变化而是等于冰的破坏应变能密度（大约 0.06 MPa）。对于围压为 0.05 MPa、2 MPa，该含水率阈值为 63%；对于围压为 0.5 MPa，1 MPa，该含水率阈值为 41.5%；对于围压为 3 MPa，4 MPa，该含水率阈值为 30.6%，这表明围压的增大使得该含水率阈值减小。在小于等于 41.5%的含水率范围内，围压对破坏应变能密度的影响程度是最大的。



(a) 含水率：16.7%~600%（冰）



(b) 含水率：16.7%~103%

图 7 破坏应变能密度-含水率

Fig.7 Relationships between failure strain energy density and water content

初始阶段含水率的增大使得土颗粒之间的胶结能力增强，该过程有利于破坏前能量的吸收。因此，破坏应变能密度有一个增加的阶段。然而，随着含水率的进一步增大，冻土的脆性增强，这不利于破坏前能量的吸收。因此，破坏应变能密度减小，关于应力-应变曲线特性的分析可以证实这种解释。最终，当试样内部的土颗粒完全被冰所分离时，冻土的破坏应变能密度特性基本接近于冰的特性。从图 7(b)中可以看到，该临界含水率基本为 63%，此时的破坏应变能密度基本为 0.06 MPa。然而，当围压较大时（0.5 MPa~4.0 MPa），随着含水率的增大，

压融更容易发生, 因此, 破坏应变能密度没有初始增加的阶段。

图 8 为与图 7(a)相对应的强度随含水率的变化关系图, 从中可以看到, 随着含水率的增加, 强度急剧减小, 在含水率约为 30.6%时强度达到一个最小值 3 MPa, 而后随着含水率的进一步增大, 强度逐渐增加, 最后直至趋于冰的强度。与含水率对破坏应变能密度的影响特性相比, 随着含水率的增大, 强度没有初始增加的阶段, 并且在强度达到最小值之后, 随着含水率的进一步增加, 强度仍然有一个明显增加的过程。因此, 当含水率超过 63%之后, 破坏应变能密度的变化形式更加单一。

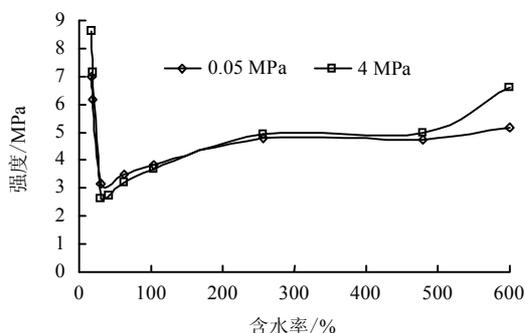


图 8 不同围压条件下三轴抗压强度-含水率  
Fig.8 Relationships between triaxial compressive strength and water content under different confining pressures

## 4 讨论

在破坏应变能的计算过程中, 由于用的是饱和砂土, 并且温度较低, 围压较小, 因此, 试样变形过程中产生的体变较小, 从而忽略了体变能对破坏应变能密度的影响。对比破坏应变能密度特性与强度特性可以看到, 虽然计算破坏应变能密度时的破坏点与强度的破坏点是一致的, 但其两者的变化趋势与对影响因素的敏感性可能完全不同, 因为前者由强度、破坏应变以及应力-应变曲线的凹凸性共同决定, 从做功的角度阐述了试样的破坏过程, 所以采用强度作为承载力指标与采用破坏应变能密度作为承载力指标所得到的计算参数可能会有所不同。一般将破坏应变视为塑性指标, 即破坏应变越大, 说明冻土的塑性越好, 但这个指标考虑的方面或许过于单一, 而破坏应变能密度考虑了应力-应变曲线的具体形态, 也许可以更加全面地衡量冻土的塑性大小。

## 5 结论

(1) 含水率为 30.6%的冻土试样容易发生塑性

破坏, 其他含水率的冻土试样容易发生脆性破坏。

(2) 类似于围压对强度的影响, 随着围压的增加, 围压对破坏应变能密度的影响也可以分为 3 个阶段; 即低围压阶段破坏应变能密度增大、中围压阶段破坏应变能密度减小、高围压阶段破坏应变能密度略微上升, 而含水率对临界围压有重要影响。

(3) 含水率对破坏应变能密度的影响可以分为两种情况: 当围压较低时 (0.05 MPa), 初始阶段含水率的增大使得破坏应变能密度有一个略微增加的趋势, 在 30.6%达到最大值 0.6 MPa, 之后随着含水率的继续增大, 破坏应变能密度减小到 0.06 MPa, 而后含水率的改变对破坏应变能密度影响很小; 当围压较大时 (大于等于 0.5 MPa), 与低围压条件下不同的是破坏应变能密度没有初始增加的阶段。

## 参考文献

- [1] CHAMBERLAIN E, GROVES C, PERHAM R. The mechanical behavior of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions[J]. *Geotechnique*, 1972, 22(3): 469—483.
- [2] XU Xiang-tian, LAI Yuan-ming, DONG Yuan-hong, et al. Laboratory investigation on strength and deformation characteristics of ice-saturated frozen sandy soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 69(1): 98—104.
- [3] BAKER T H W, JONES S J, PARAMESWARAN V R. Confined and unconfined compression tests on frozen sands[C]//4th Canadian Permafrost Conf. Canada: Nation Research Council of Canada, 1982: 387—392.
- [4] 马巍, 吴紫汪, 盛煜. 围压对冻土强度特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 7—11.  
MA Wei, WU Zi-wang, SHENG Yu. Effect of confining pressure on strength behaviour of frozen soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 7—11.
- [5] 马巍, 吴紫汪, 常晓小, 等. 高围压下冻结砂土的强度特性[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(3): 268—272.  
MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao, et al. Strength characteristics of frozen sandy soil under high confining pressure[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(3): 268—272.
- [6] SINGH S K, JORDAAN I J. Triaxial tests on crushed ice[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1996, 24(2): 153—165.
- [7] ARENSEN L U, ALMASI N, SPRINGMAN S M.

- Shearing response of ice-rich rock glacier material[C]//Eighth International Conference on Permafrost. Zurich, Switzerland: AA Balkema, 2003: 39—44.
- [8] JESSBERGER H L. A state-of-the-art report. Ground freezing: Mechanical properties, processes and design[J]. **Engineering Geology**, 1981, 18(1): 5—30.
- [9] LAI Yuan-ming, YANG Yu-gui, CHANG Xiao-xiao, et al. Strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen silt in generalized plastic mechanics[J]. **International Journal of Plasticity**, 2010, 26(10): 1461—1484.
- [10] 李清泽. 高温高含冰量冻土损伤统计本构模型及随机模拟研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2011.
- LI Qing-ze. Study on damage statistical constitutive model and stochastic simulation for warm ice-rich frozen silt[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [11] ARENSON L U, JOHANSEN M M, SPRINGMAN S M. Effects of volumetric ice content and strain rate on shear strength under triaxial conditions for frozen soil samples[J]. **Permafrost and Periglacial Processes**, 2004, 15(3): 261—271.
- [12] 牛亚强, 赖远明, 王旭, 等. 初始含水率对冻结粉质黏土变形和强度的影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 499—506.
- NIU Ya-qiang, LAI Yuan-ming, WANG Xu, et al. Research on influences of initial water content on deformation and strength behaviors of frozen silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 499—506.
- [13] SHUSHERINA E P, BOBKOV Y P. Effect of moisture content on frozen ground strength[R]. Ottawa: Canada Institute for Scientific and Technical Information, 1969.
- [14] BAKER T H W. Compressive strength of some frozen soils[D]. Kingston, Ontario: Dept. of Civil Engineering, Queen's University, 1976.
- [15] TSYTOVICH N A, SUMGIN M I. Principles of mechanics of frozen ground[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Lab, 1959.
- [16] SAYLES F H, CARBEE D L. Strength of frozen silt as a function of ice content and dry unit weight[J]. **Engineering Geology**, 1981, 18(1): 55—66.
- [17] 马小杰, 张建明, 常小晓, 等. 高温-高含冰量冻结黏土强度试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2498—2502.
- MA Xiao-jie, ZHANG Jian-ming, CHANG Xiao-xiao, et al. Experimental research on strength of warm and ice-rich frozen clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2498—2502.
- [18] 赖远明, 张耀, 张淑娟, 等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3665—3670.
- LAI Yuan-ming, ZHANG Yao, ZHANG Shu-juan, et al. Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3665—3670.
- [19] 吴紫汪, 马巍, 张长庆, 等. 冻结砂土的强度特性[J]. 冰川冻土, 1994, 16(1): 15—20.
- WU Zi-wang, MA Wei, ZHANG Chang-qing, et al. Strength characteristics of frozen sandy soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1994, 16(1): 15—20.
- [20] 徐洪宇, 赖远明, 喻文兵, 等. 人造多晶冰三轴压缩强度特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1120—1126.
- XU Hong-yu, LAI Yuan-ming, YU Wen-bing, et al. Experimental research on triaxial strength of polycrystalline ice[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2011, 33(5): 1120—1126.
- [21] 陈锦, 李东庆, 邴慧, 等. 含水量对冻结含盐粉土单轴抗压强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 441—446.
- CHEN Jin, LI Dong-qing, BING Hui, et al. An experimental study of influence of water content on uniaxial compression strength of frozen salty silt[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2012, 34(2): 441—446.
- [22] ZHU Yuan-lin, CARBEE D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 1984, 9(1): 3—15.
- [23] 刘鸿文. 材料力学 II[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- LIU Hong-wen. Material mechanics II[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.