

人工冻结尾矿力学特性单轴压缩试验研究

魏作安^{1,2}, 杨永浩^{1,2}, 徐佳俊^{1,2}, 陈宇龙³

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400030; 3. 东京大学 土木工程系, 日本 东京 113-8656)

摘 要: 尾矿的冻结会影响尾矿坝的稳定性. 通过室内单轴压缩试验, 研究了经人工冻结四类尾矿的力学特性及其4个影响因素. 研究结果显示, 冻结尾矿单轴压缩破坏形式有三种, 即斜面剪切破坏、径向拉伸破坏和复合式破坏. 冻结尾矿单轴压缩全应力-应变曲线可分4个阶段: 初始应变软化阶段、线性应变硬化阶段、非线性应变硬化阶段和非线性应变软化阶段. 在4个影响因素中, 冻结尾矿的单轴抗压强度与平均粒径呈对数关系, 与干密度呈指数关系, 与含水率呈线性递增关系, 与加载速率呈二次抛物线增长关系. 而冻结尾矿的变形模量与平均粒径呈自然对数关系, 与干密度亦呈指数函数关系, 与含水率则呈二次抛物线关系, 与加载速率呈指数函数增长关系.

关 键 词: 尾矿; 单轴压缩; 力学性质; 变形特征; 冻结尾矿

中图分类号: TU 445

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0123-05

Experimental Study on the Mechanical Properties of Frozen Tailings by Uniaxial Compression Tests

WEI Zuo-an^{1,2}, YANG Yong-hao^{1,2}, XU Jia-jun^{1,2}, CHEN Yu-long³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan. Corresponding author: WEI Zuo-an, E-mail: weiza@cqu.edu.cn)

Abstract: The frozen of tailings can affect the stability of the tailing dam. The uniaxial compression tests were carried out to study the mechanical characteristics of artificial frozen tailing and its four influence factors. There are three types of failure modes for frozen tailing specimen, i. e. shear failure in oblique section, tensile failure in radial direction and composite failure mode. The stress-strain curve of the frozen tailings samples can be divided into four stages: the axial compressive tests as initial stain softening stage, linear strain hardening stage, nonlinear strain hardening stage and softening stage. In the four factors, the uniaxial compressive strength is logarithmically related to the average particle size, exponentially related to the dry density, linearly related to the moisture and parabolically related to the loading rate. The deformation modulus of frozen tailings is logarithmically related to the average particle size, exponentially related to the dry density and loading rate, and parabolically related to the water content.

Key words: tailings; uniaxial compression; mechanical property; deformation characteristics; frozen tailings

在寒冷地区, 当气温低于零度及以下时, 地表以下一定范围内的土层会形成冻土. 在冻土中除了固体土颗粒外, 还有固体状的冰和一定数量的未冻结水以及气体存在. 由于固液气之间的相互

作用, 使得冻土表现出的力学性质更复杂, 冻土的测试比常规土更难.

国内外一些科研人员对冻土进行了专门研究, 取得了许多成果. 国外, 早在 90 年代初,

Wijeweera 等^[1]通过试验研究了冻结黏土中细砂的含量对其强度的影响. Christ 等^[2]研究发现温度和含水量对冻结粉土的抗压强度和抗拉强度有较大的影响. 国内,文献[3]总结了我国冻土方面的研究现状及其发展前景. 文献[4]研究了饱和和冻结黏土的单轴抗压强度与温度、应变率、破坏时间和干密度之间的关系. 刘增利等^[5]对冻黏土进行了单轴压缩试验,获得了冻结黏土的载荷-位移曲线,并对试样的破坏特征进行了分析. 文献[6]通过压缩试验,研究了砂土在-6℃冻结后的力学行为特性等.

尾矿是矿石经过选矿甄别后排出的固体废弃物,属于人造砂土^[7]. 我国每年有数十亿吨尾矿被排放到尾矿库内堆存起来^[8]. 至 2009 年底,我国有 1.2 万余座尾矿库^[9]. 根据尾矿库的地域分布情况,有 91.4% 的尾矿库在冬季存在不同程度的冻结结冰现象. 经现场勘察揭示^[10],冬季高寒地区尾矿坝除了表层会冻结外,还有深层的冰冻层存在,这些固体冻结层对尾矿坝的稳定性有较大的影响,轻则会影响尾矿坝的渗流场,降低坝体的稳定性,重则会导致尾矿坝变形破坏. 然而,有关冻结尾矿的力学特性及影响因素方面的研究与成果,目前还较少见报道.

因此,针对冻结条件下尾矿的力学特性开展研究很有必要. 研究成果不仅可以提高寒冷地区尾矿库的安全管理水平,而且可以丰富尾矿的力学基础知识.

1 人工冻结尾矿室内试验

1.1 试验材料与试验方案

试验用尾矿样取自凉山矿业股份有限公司下属的拉拉铜厂选厂排放的尾矿. 按照颗粒级配不同,尾矿分为①砂性尾矿(尾砾砂、尾粗砂、尾中砂、尾细砂、尾粉砂),②粉性尾矿(尾粉土),③黏性尾矿(尾粉质黏土、尾黏土). 为了使试验成果有代表性,将现场采取的全尾矿进行人为分级处理,获得了颗粒级配不同的 4 组尾矿样,即尾中砂(4#)、尾细砂(3#)、尾粉砂(2#)和尾粉质黏土(1#). 4 组配置样和全尾矿(5#)的主要物理性质指标见表 1,颗粒分布曲线如图 1 所示.

在参考相关冻土力学特性研究方面的文献基础上,针对冻结尾矿力学特性及其影响因素的研究,本文采用单轴压缩试验,设置了 4 组试验方案,分别考虑了尾矿的平均粒径、干密度、含水率和加载速率等因素对其抗压强度和变形模量的影

表 1 试验尾矿样的主要物理性质指标
Table 1 The main physical property indicators of tailings

试样编号	尾矿类别	d_{50} μm	不均匀 系数 C_u	曲率系 数 C_c	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数
1#	尾粉质黏土	31.97	7.35	1.29	14.5	25.8	11.3
2#	尾粉砂	83.58	3.52	1.26	—	—	—
3#	尾细砂	168.92	3.65	1.14	—	—	—
4#	尾中砂	310.50	3.38	1.40	—	—	—
5#	尾粉砂	107.9	8.99	1.22	—	—	—

响. 具体的试验方案见表 2. 在加载速率方面,将其换算成应变速率,则其范围为 $0.8 \times 10^{-3} \sim 3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. 在研究干密度、含水率和加载速率的影响时,采用了全尾矿样(5#)进行试验;在考虑平均粒径的影响方面,分别采用了四种配置的尾矿样(1#、2#、3#、4#)进行试验.

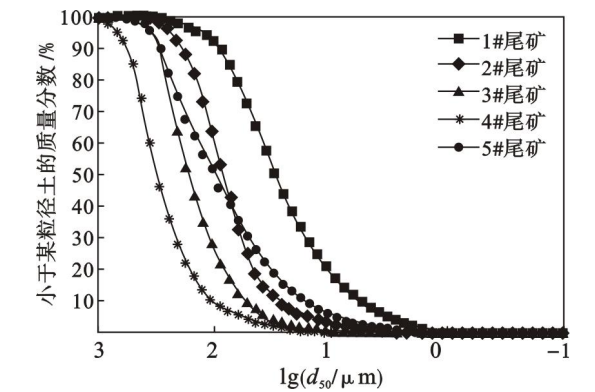


图 1 尾矿的颗粒分布
Fig. 1 Particle size distribution of tailings

表 2 试验方案
Table 2 The experimental schemes

试验 方案	平均粒径 d_{50} μm	干密度 ρ_d $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	含水率 ω /%	加载速率 v $\text{mm} \cdot \text{min}$
1 组	31.97, 83.58, 168.92, 310.50 (1#, 2#, 3#, 4#)	1.58	15	20
2 组	102.25 (5#)	1.48, 1.58, 1.64, 1.71	15	20
3 组	102.25 (5#)	1.58	5, 10, 15, 20	20
4 组	102.25 (5#)	1.58	15	5, 10, 15, 20

1.2 试样的制备与试验过程

由于尾矿冻结后呈固体状态,因此,这次冻结尾矿的力学特性试验基本按照岩石力学试验的要求进行. 试样为圆柱形,直径为 50 mm,高度为 100 mm. 试样制备时,先将尾矿样按照设定的含水率进行混合,为了尽可能保证尾矿样中含水比较均匀,将配置好的尾矿样装入塑料袋中进行密

封,放置一昼夜;然后,分层装入圆筒状试样模具中,并进行压密,通过称试样的质量来控制其干密度.试样制成后再用保鲜膜包好(见图2),放入设定温度为 -16°C (设备最低温度)的冷藏箱中冷冻24 h,然后取出进行相关试验.

这次冻结尾矿的单轴压缩试验是在重庆大学国家重点实验室内的岛津AG-I25 kN电子精密材料机上进行的.设定加载参数后,安放好试样,整个压缩过程均由计算机自动控制,实时自动采集试验数据.由于试件端部与压力机接触部位存在温差,为了防止试验过程中试件端部接触面处融化,在两者接触面上放置了隔热的塑料薄片;另外,控制试验时间,使试验在尽可能短的时间内完成.

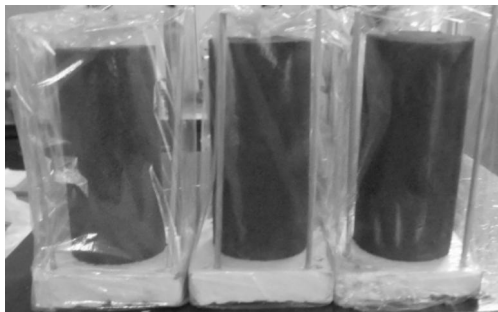


图2 人工冻结尾矿试样
Fig. 2 Samples of frozen tailing

2 试验结果与分析

2.1 冻结尾矿单轴压缩下的破坏形式

通过试验观察到冻结尾矿试件单轴压缩下的破坏形式大致可分为3种,见图3.

1) 斜面剪切破坏,如图3a和3b所示.在加载过程中,先是试样局部出现裂隙,之后裂隙不断扩展,相互贯通形成裂缝,最后形成一个贯穿整个试样的剪切斜面.有的是形成两个相互交叉的剪切面,当尾矿的平均粒径较大,或者试样含水率较高时,易发生此类形式的破坏.

2) 径向拉伸破坏,如图3c和3d所示.在轴向压应力作用下,在试样中产生径向拉应力,当拉应力超过冻结尾矿抗拉极限时,试件沿轴向产生贯穿型裂缝,发生劈裂破坏.试验发现,当尾矿的平均粒径较小,或者试样含水率较小,或者加载速率较小时,易发生此类破坏.

3) 复合式破坏,如图3e和3f所示.试样在中部出现局部鼓胀,且产生斜向交叉裂纹而破坏;有的试样侧面出现片状折断破坏,其余部分伴随有剪切破坏.当尾矿干密度较低或者加载速率较

大时,易发生此类破坏.

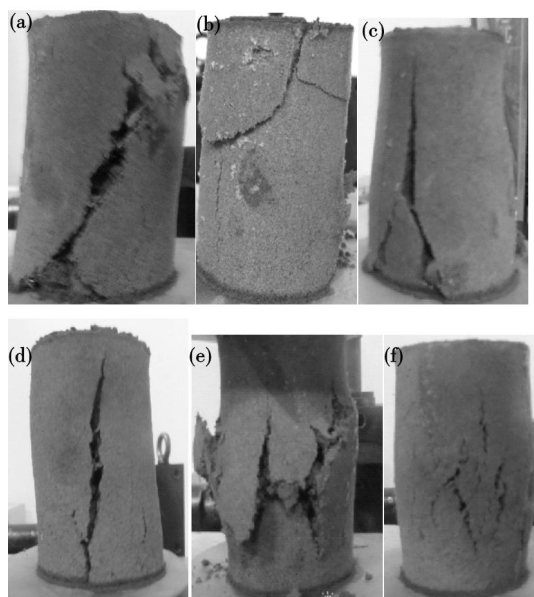


图3 冻结尾矿试样的破坏类型
Fig. 3 The damage types of frozen tailing samples
(a),(b)—斜面剪切破坏;
(c),(d)—径向拉伸破坏;(e),(f)—复合式破坏.

2.2 冻结尾矿单轴压缩变形特性

冻结尾矿试件在单轴压缩试验中的全应力-应变曲线如图4所示.由图中 $\sigma-\varepsilon$ 曲线可看出,冻结尾矿的变形分为4个阶段.

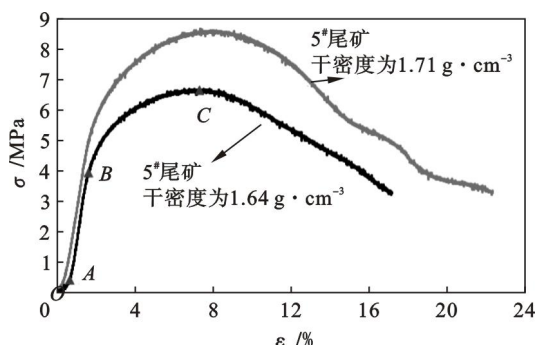


图4 应力-应变曲线
Fig. 4 The stress-strain curves

1) 初始应变软化阶段(OA):这个阶段很短,应力值很小,应变速率较大,OA线段开始与横坐标轴夹角很小,几乎呈近似水平,类似蠕变.分析其原因,是试样与压力机的压力板及隔热薄片之间存在温差,造成试样端部出现微量的融化,在应力很小的情况下出现较大的变形.不过,随着压力的加大, $\sigma-\varepsilon$ 曲线从A点开始向上弯曲.

2) 线性应变硬化阶段(AB):在压力作用下,应力与应变呈线性增加关系,其 $\sigma-\varepsilon$ 曲线近似直线.

3) 非线性应变硬化阶段(BC):随着应力的

增加应变继续增加, $\sigma - \varepsilon$ 曲线呈弯曲状, 切线变形模量越来越小, 最终应力达到极限值. 此阶段试件开始出现斜向和纵向的微裂纹, 随着应力的增加, 裂纹也越来越多.

4) 非线性应变软化阶段(C 点以后): 应力超过试件的峰值强度后, 试样进入应变软化阶段, 随着应变的增加, 应力逐渐减少. 在此阶段, 试件中的裂隙开始贯通与汇聚, 形成大的裂纹, 试样开始出现局部的破碎并伴有滑脱, 最终达到破坏.

2.3 冻结尾矿抗压强度和变形模量的变化规律

冻结尾矿的抗压强度主要由尾矿颗粒和冰的强度以及冰与尾矿颗粒胶结后形成的黏结力和内摩擦力决定. 对试件的单轴压缩试验数据进行处理, 得到不同因素下冻结尾矿的单轴抗压强度和变形模量的变化规律(图 5 和图 6). 下面就 4 个影响因素与单轴抗压强度和变形模量的关系进行分析(由于冻结尾矿是否存在弹性的问题, 以及考虑与《土力学》中的名词一致性, 所以, 本文选用了“变形模量”, 而没有选“弹性模量”).

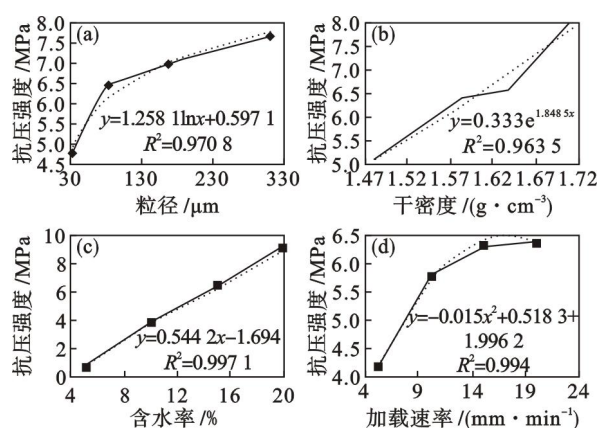


图 5 冻结尾矿单轴抗压强度的变化规律

Fig. 5 The changing rule of the uniaxial compressive strength of frozen tailing samples

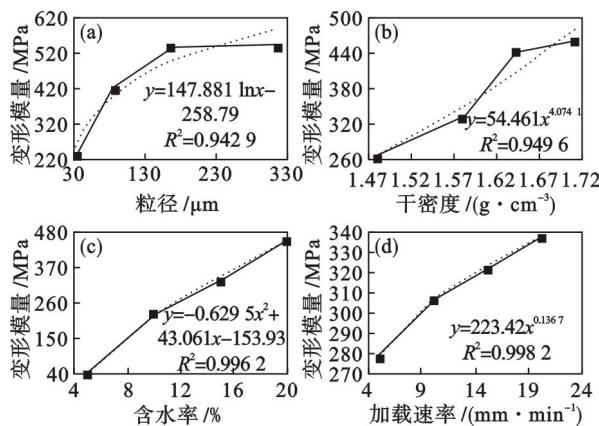


图 6 冻结尾矿变形模量的变化规律

Fig. 6 The changing rule of deformation modulus of frozen tailing samples

2.3.1 尾矿粒径对抗压强度和变形模量的影响

从图 5a 和图 6a 可以看出, 冻结尾矿的单轴抗压强度与平均粒径呈自然对数的递增关系; 而变形模量与平均粒径同样呈自然对数的递增关系. 随着颗粒粒径的增大, 其比表面积就会相应减小, 颗粒之间的摩擦咬合力就会增加, 从而提高尾矿的抗压强度和变形模量.

2.3.2 尾矿干密度对抗压强度和变形模量的影响

从图 5b 和图 6b 中可以看出, 随着尾矿样的干密度增加, 冻结尾矿的单轴抗压强度和变形模量均逐渐增大, 且呈指数关系. 这是由于随着干密度的增加, 孔隙率减小, 尾矿颗粒之间的接触更加充分, 颗粒之间的摩擦力和咬合力增强, 提高了试样的抗压强度和变形模量.

2.3.3 尾矿含水率对抗压强度和变形模量的影响

从图 5c 和图 6c 可以看出, 随着尾矿样的含水率增加, 冻结尾矿的单轴抗压强度与含水率呈线性递增关系. 而变形模量与含水率呈二次抛物线的递增关系. 随着含水率的增加, 孔隙中结冰量会越多, 这些结冰体将尾矿颗粒胶结得更紧密, 从而提高了颗粒之间的黏结力.

2.3.4 加载速率对冻结尾矿的抗压强度和变形模量的影响

从图 5d 可以看出, 冻结尾矿的单轴抗压强度与加载速率呈二次抛物线关系. 开始, 冻结尾矿的单轴抗压强度随加载速率的增加而呈线性增加, 之后, 随着加载速率的增大, 冻结尾矿的单轴抗压强度则慢慢趋于平稳. 冻结尾矿的变形模量与加载速率呈指数函数关系(图 6d), 即冻结尾矿的变形模量随着加载速率的增加而增加.

3 结 论

1) 冻结尾矿单轴压缩破坏形式可归纳为 3 种, 即斜面剪切破坏、径向拉伸破坏和复合式破坏.

2) 冻结尾矿单轴压缩全应力 - 应变曲线可分为 4 个阶段: 初始应变软化阶段、线性应变硬化阶段、非线性应变硬化阶段、非线性应变软化阶段.

3) 在 4 个影响因素中, 冻结尾矿的单轴抗压强度与平均粒径呈自然对数关系, 与干密度呈自然指数关系, 与含水率呈线性关系, 与加载速率呈

(下转第 142 页)