

DOI: 10.11779/CJGE201610019

高压力作用下深部黏土冷却过程及其特征研究

王大雁¹, 马巍¹, 王永涛^{1, 2}, 温智¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 深部黏土的埋深决定着深部黏土在进行人工冻结期间所承受的地压力的大小, 而较大的地压力将会影响冻结壁形成时冻结温度的大小以及冻结壁的冷生构造, 从而影响冻结壁的强度与稳定性。本研究通过对高压力作用下的深部黏土在不同含水率状态下进行冷却过程试验, 分析了压力大小对不同饱和状态的深部黏土冷却曲线形式及初始结晶温度、冻结温度及过冷度的影响。结果表明: 深部土的冻结温度、初始结晶温度以及过冷度都与土体所承受的压力密切相关。不论是非饱和状态、饱和状态还是过饱和状态下的深部黏土, 其冻结温度都随土体所承受压力的增大而减小, 而初始结晶温度则随压力的增大呈起伏状变化。利用物质结晶理论, 进一步分析后认为冻结过程主要是自由孔隙水的相变过程; 而压力作用会通过改变土体中土颗粒对孔隙水分子的吸附作用, 改变土体中自由水的含量, 进而改变土体冻结过程中潜热释放量的大小, 最终影响土体冷生构造。

关键词: 深部黏土; 冻结过程; 高压力; 冻结温度; 过冷度

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)10-1889-06

作者简介: 王大雁(1971-), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事冻土力学与寒区工程研究方面的工作。E-mail: dywang@lzb.ac.cn。

Effects of high pressure on cooling process of clays in deep alluvium

WANG Da-yan¹, MA Wei¹, WANG Yong-tao^{1, 2}, WEN Zhi¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Considering that large earth pressure will influence the strength and the stability of frozen wall by means of changing soil frozen temperature and its cryo-structure, a series of cooling process tests on clays from the deep stratum with different water contents and applied pressures prior to freezing are performed to study their cooling process characteristics. The aim of the tested samples subjected to a certain pressure is to simulate the earth pressure of the freezing ground. In order to reduce the error of the testing system, the initial temperatures of the tested samples prior to being frozen are 5°C, and the ultimate temperatures after being frozen are -10°C. The results show that the frozen temperature, initial frozen temperature and super-cooling degree closely relate to the suffered applied pressure of the tested soils. No matter the soils are saturated the frozen temperature decreases with the increase of the applied pressure, while the initial frozen temperature shows a fluctuation with the change of the applied pressure. Applying the crystallization theory of materials, it is concluded that the freezing process of soils mainly relates to the phase-change process of void free water. The applied pressure will change the adsorption capacity of soil particles to water molecules to influence the amount of free water in soils, and further change their latent heat releasing during crystallization. As a result, the applied pressure in freezing process of soils influences their cryo-structure.

Key words: deep clay; freezing process; high pressure; frozen temperature; supercooling degree

0 引言

随着资源开发力度的加大, 矿井建设的条件越来越复杂, 国内煤矿已经进入 1200 m 深部并在向更深的深度发展, 矿井上覆表土层将超过六七百米, 矿井建设将面临高应力下岩石和超固结土以及更为复杂的水文地质条件。由于人工冻结技术在处理厚表土层、大型地下工程开挖和突发性事故等方面具有突出的优

点, 冻结法凿井成为立井掘进通过不稳定表土层比较有效的施工方法之一。它主要运用人工制冷的方法, 将地下工程周围松散的含水土层或破碎的含水岩层在

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671069); 国家自然科学基金项目(41630636); 冻土工程国家重点实验室基金项目(SKLFSE-ZT-31)

收稿日期: 2015-09-08

地下工程建设之前冻结成封闭的冻土结构物—冻结壁，用以抵抗岩土压力，隔绝冻结壁内、外地下水联系，然后在冻结壁的保护下进行地下工程建设^[1]。所以说，冻结壁的设计决定着人工冻结法施工的成败，而人工制冷所形成冻土的力学参数、强度特性、破坏准则等将是冻结壁稳定性设计的基础。

目前，就冻土的力学性质已进行了大量的研究，在国内，吴紫汪等学者就温度、压力、应变速率、冻土结构等因素对冻土强度与变形的影响程度以及冻土的应力-应变行为等做了深入研究，给出了单轴压缩时冻土的本构模型^[2-4]。在国外，通过对冻土组成各要素：土骨架、冰、未冻水、空气等在冻土受力直到破坏过程中所发挥作用的分析，认为冻结砂土的剪切强度主要由以下 4 个物理量的强度决定：①冻土中孔隙冰的强度；②由颗粒间的摩擦、颗粒间相互作用以及膨胀效应所组成的土的强度；③胶结冰抵抗膨胀的应力；④土与冰之间的胶结强度。并给出冻结砂土破坏时，各组成部分所占比例的破坏机理图^[5-7]。但是，由于上述研究所采用的冻土是在无载荷或者荷载较小条件下形成的，所以由此而获得的试验结果无法预测压力作用，尤其是高压力作用下形成冻土的力学特性^[8]。为此，李文平等首先就深部土本身的力学性质进行探讨，利用自行设计的高压 K_0 蠕变试验系统，对深部黏土进行 K_0 蠕变试验并对试后试样进行电镜扫描，获得同一黏土试样 K_0 蠕变稳定后的微观结构与固结压力的关系^[9]；在此基础上，模拟深部土的特殊工况，开展长时高压 K_0 固结及“恒轴压、卸围压”试验，获得长时高压固结重塑黏土的强度及变形特性与固结时间、固结应力等的关系^[10-11]，进一步揭示高压力作用下的深部土与地压力作用下的浅部土体力学性质的异同。同时，王大雁等考虑到深部人工冻土与浅部冻土在冻结方式、受载历史和应力路径等方面的不同^[12-13]，就深部人工冻土的力学性质进行了深入的研究，并利用 Duncan-Chang 双曲线模型分析了深部人工冻土的应力-应变行为^[14]。

但这些研究都是基于连续介质的假设，从分析冻土受力后的表现性状入手，利用试验得出的应力-应变关系，应用曲线拟合或弹性理论、塑性理论及其他理论来研究深部冻结壁的强度问题。在这些研究中，一般都忽略颗粒之间接触特性的所有细节，没有考虑土体由于深部地压的作用，在冻土形成过程中所发生的一系列物理性质的变化。譬如说，地压的增大，将导致深部土的冻结温度（即冰点）降低，冻结温度降低后，深部人工冻土体的含冰量和未冻水含量将与相同温度条件的浅表层冻土的含冰量和未冻水含量之间具有极大的差别，从而导致其力学性质完全不同于相

同温度的浅表层冻土的力学性质。另外，深部天然地层的应力环境将通过影响冻土形成过程中的水分迁移、冻胀变形而对冻土的微观结构产生影响，进而在一定程度上影响冻土的力学性状。所以说，如果要认识并揭示深部人工冻土力学性质的微观本质，还须就高压力作用下土体的冻结过程及冻结特点进行分析，在认识高地应力对冻结壁形成过程中微观结构影响的基础上，确立符合实际工况的冻结壁稳定性判定准则。为此，本研究将首先通过对不同压力作用下的深部黏土冷却过程的分析，获得压力大小对深部黏土冷却曲线形式及初始结晶温度、冻结温度及过冷度大小的影响规律，阐明冻结壁冷生构造形成的物理实质，为进一步认识深部冻结壁的形成过程并建立较为切实可行的力学模型奠定基础。

1 试验装置及试验过程

1.1 试验装置

考虑到目前所有冻结过程及冻结温度测试装置都只能进行无荷载作用下或者较低压力作用下（压力一般不大于 1 MPa）土的冻结试验，为此，本课题组在充分利用现有万能试验机操作方便、加载精确、力值大小可控等优点的前提下，自行研制了高压土冻结温度测试装置，如图 1 所示。本试验装置由 3 部分组成，冷却控温系统、加载系统、测量系统。冷却控温系统由控温箱与外部冷浴相接使控温箱空气温度降低而改变降温介质的温度，并利用紫铜较好的导热性能为土体提供一个非常稳定的低温环境，有助于捕捉到孔隙水发生相变时，释放的结晶潜热引起温度突变这一现象，从而获得土的冻结温度。加载系统由电子万能试验机通过上下压头施加，不仅保证了加载的准确性，

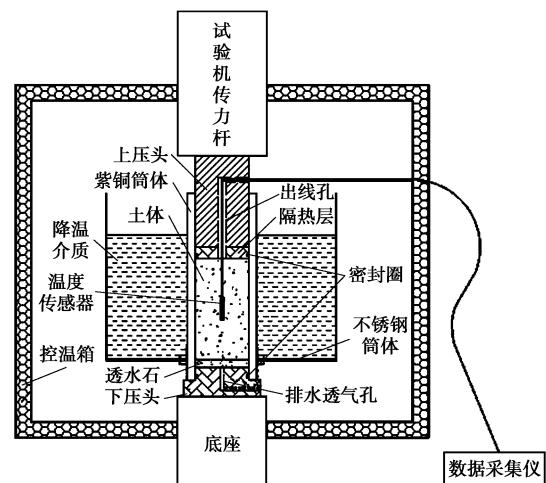


图 1 高压土冻结温度测试装置

Fig. 1 Schematic of frozen temperature apparatus for soils under high pressure

而且上压头下部设有一 2 cm 厚的尼龙隔热层, 此隔热层材质与下压头相同, 可以阻止土体通过上下压头与外界进行热交换, 从而保证土样温度均衡。测量系统由可承受高压力的高精度热敏电阻 (精度为 0.05°C) 和可进行高频数据采集的 DT 800 数采仪组成。

1.2 试验方案及过程

试验用土取自某在建矿井, 取土深度为 510~515 m, 为褐色膨胀黏土。其基本物理参数如表 1 所示。

表 1 土样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of soils

土名	密度	含水率	颗粒成分/mm			液限塑限	
			<0.005	0.005~0.075	0.075~0.25		
黏土	2.0	20	47.6%	42.3%	10.1%	46.7	20.7

考虑到含水率的不同对土冻结过程的影响, 本研究将首先通过抽气饱水试验测得密度为 2.0 g/cm³时, 试验土的饱和含水率, 然后, 确定非饱和状态和过饱和状态时本试验将选用的含水率大小。由于所测饱和含水率为 34%, 那么, 在这里选择 30% 为非饱和状态的含水率, 38% 则为过饱和状态。然后在这 3 种含水率状态下分别对试验土施加一定的压力 (0, 2, 4, 6, 8 和 10 MPa) 后进行冷却。详细试验过程如下:

首先按所要求的含水率将试验土均匀拌和, 在密封容器中静置 24 h 并保证含水率均匀后, 根据试验土的密度要求, 精确称取一定量的试验土, 装入试样模中, 试样模尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。然后, 插入温度探头并密封插孔后将试样置于试验机上, 同时, 调节冷浴温度, 使恒温箱与降温介质的温度都达到 5°C。当土样温度也达到 5°C 后, 以 10 N/S 的速度对试样进行加载, 待达到预设荷载后, 对试样进行大约半小时的保载, 然后迅速降低箱温至 -20°C 并保持恒定。此时, 降温介质的温度也随之下降, 并作用于试样, 使试样温度随着时间发展而逐渐降低。通过记录试样在这一过程中温度的变化而获得土体的冷却过程曲线。

2 试验结果与讨论

2.1 深部黏土的典型冷却过程曲线

图 2 是饱和深部黏土在无压力状态下典型的冷却过程曲线。从图 2 可以看出, 饱和土体在冷却过程中, 土体的温度变化将经历 3 个阶段: 显热释放阶段、潜热释放和热平衡阶段、二次显热释放并与外界温度达到一致的降温阶段。在第一次显热释放阶段, 土体温度直线降低, 当温度降低到理论冻结点 B 时, 土体温度虽然达到了理论冻结温度 T_f , 但土体中的孔隙水并未冻结, 而是继续冷却到冻结点之下 C 点, 即温度 T_{nf} 时, 孔隙水才开始冻结。通常, 把这一温度叫作初始

结晶温度 T_{nf} , 把这一现象叫作土中孔隙水的过冷现象。理论冻结温度 T_f 与初始结晶温度 T_{nf} 的差值称为过冷度。过冷度越大, 初始结晶温度就会越低。当孔隙水的温度达到初始结晶温度 T_{nf} 后, 结晶潜热开始释放, 当释放的结晶潜热大于土体散失到周围环境中的热量时, 土体温度会突然升高至 D 点, 如果释放的结晶潜热与散失到周围环境的热量相当, 土体温度将在一段时间内保持恒定 (DE), 即到达上述所提及的热平衡阶段。在冷却曲线上热平衡阶段所对应的温度就是土的冻结温度 T_f 。热平衡延续时间就是自由孔隙水结晶所用的时间。现有研究已表明, 土体孔隙水中所有的自由水将在这一阶段转化为孔隙冰^[7]。当自由的孔隙水完全冻结以后, 离土颗粒较远的结合水开始结晶, 虽然结合水的结晶也会释放结晶潜热, 但相对自由水结晶放出的潜热来说, 结合水的量决定了结合水结晶时释放的潜热较小, 无法改变土体温度继续降低的趋势。反映在冷却曲线上就是冷却曲线继续下降而进入二次显热释放阶段。

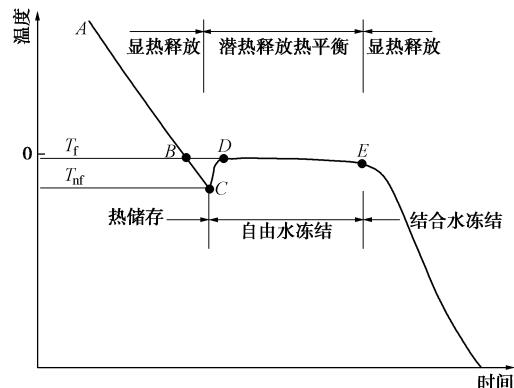


图 2 深部黏土的冷却过程曲线

Fig. 2 Typical cooling curves of clay

根据物质的结晶理论, 任何物质的结晶都要经历形核与长大两个过程^[16]。结晶时首先在液体中形成具有某一临界尺寸的晶核, 然后这些晶核不断凝聚孔隙水中的水分子继续长大。因此, 初始结晶温度也可叫做孔隙水的形核温度。在晶核形成之后, 晶核凝聚孔隙水中的水分子逐渐长大, 这就是晶核长大的过程。晶核的长大从宏观上来看, 是晶体界面向液相的逐步推移过程; 从微观上看, 则是水分子扩散到晶体表面上并逐个占据适当位置而与冰晶体稳定牢靠地结合起来的过程。根据结晶过程的热力学条件, 这将意味着晶体长大时体积自由能的降低应大于晶体表面能的增加。因此, 晶体长大必须在过冷液体中进行, 只不过它所需要的过冷度远比形核时小得多而已。由于自由孔隙水不受黏土颗粒的吸附, 所以很容易扩散到晶核表面与冰晶体结合, 并释放潜热。对于结合水, 尤其

是强结合水来说, 晶核的凝聚力很难克服土颗粒与水分子之间的吸附作用, 结合水只有在温度继续下降的过程中, 才能部分结晶。所以, 土的冻结过程主要是自由孔隙水的相变过程。

2.2 含水率大小对土体冷却过程的影响

图 3 是无压力作用下, 初始温度相同但含水率不同的土体在相同温度的冷浴中冷却的过程曲线。由图 3 可看出, 含水率的高低既不影响土体冻结之前的冷却速率, 也不影响土体冻结之后的冷却速率。但由于含水率的高低决定着黏土中自由孔隙水和结合水的相对比例, 从而改变了土体冷却过程中结晶潜热的释放量, 最终改变了土体的冻结过程。图 3 表明, 饱和和过饱和土体在冷却过程中出现了过冷现象, 而非饱和土体在冷却过程中直接进入热平衡阶段。这是因为, 在饱和和过饱和土体中, 土体孔隙中存在大量的自由水, 当土体中的孔隙水达到初始结晶温度后, 孔隙中的自由水很快凝聚成核, 并瞬时释放大量潜热, 使土体温度升高。对于不饱和土来说, 由于自由水含量相对较小, 其结晶过程中释放的潜热仅能补偿土体中孔隙水结晶而散失的热量, 所以, 对于非饱和土来说, 土体冷却过程中过冷现象的出现将取决于土体饱和度的高低, 饱和度越低, 过冷现象出现的概率越小。也就是说, 当土体温度达到孔隙水结晶点后, 孔隙水是否直接进入热平衡阶段, 并开始结晶的过程受土体饱和度高低的影响。这进一步说明, 土体的冻结, 主要以自由孔隙水的冻结为主, 结合水对土体整体冻结过程的影响不大。

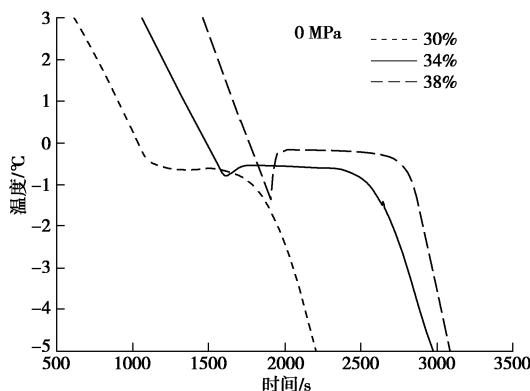


图 3 含水率对深部黏土冷却过程的影响

Fig. 3 Effect of water content on cooling process

2.3 压力对深部黏土冻结过程的影响

为了研究压力作用对土体冷却曲线特征的影响, 对已制备好的试样均分别施以 2 MPa 和 10 MPa 的压力后, 使其温度降低并监测土体温度的变化过程(图 4)。由此发现: 对压力作用下的土体来说, 其冷却曲线与无压作用下所获得冷却曲线的不同主要表现在潜

热释放阶段和热平衡阶段。从图 4 可以看出, 由于压力的施加, 饱和土体和非饱和土体冷却过程中过冷现象表现不明显, 热平衡持续时间相对也较短。而非饱和土却出现了过冷现象。这是因为, 较高压力的施加, 使土孔隙中弱结合水受土颗粒的束缚力减小, 从而转变为自由水。自由水在冷却过程中, 形核潜热释放引起土体温度瞬时升高, 但由于自由水量还是相对较少, 土体温度将直接进入显热释放阶段而不会进入热平衡阶段。所以说, 压力作用抑制了饱和和过饱和土体中孔隙水在结晶时潜热的释放量, 却增大了非饱和土体中自由孔隙水的相对含量而提高了冰晶晶核形成时潜热的释放量。

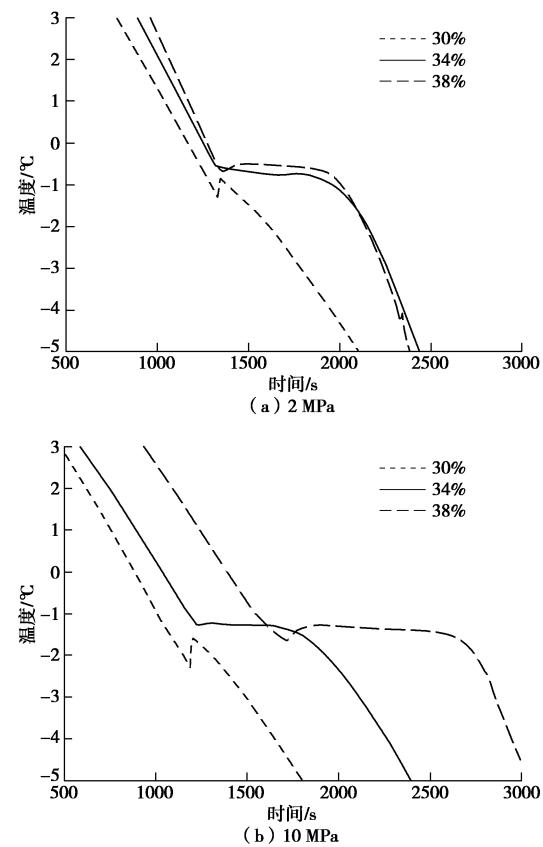


图 4 压力对深部黏土冷却过程的影响

Fig. 4 Effect of applied pressure on cooling process

2.4 压力对深部黏土初始结晶温度、冻结温度和过冷度的影响

连续冷却的时候, 冷却速度的高低影响相变时过冷度的大小。正是过冷度的大小影响组织形貌和结晶类型。现有结晶理论认为, 在具有较大的过冷度的情况下, 形核率的增加比晶核长大的速度更快从而可以获得更细晶粒。为了进一步认识并揭示深部冻结壁生成构造的特点, 将对非饱和、饱和以及过饱和状态下深部黏土的过冷度进行研究。图 5 是土体分别在非饱和、饱和和过饱和状态下初始结晶温度、冻结温度和过冷度随压力的变化过程。从图 5 可以看出, 无论

是饱和状态还是非饱和和过饱和状态, 深部黏土的冻结温度都将随着压力的增大而逐渐降低, 但初始结晶温度却随压力的变化波动较大, 从而使得土体在冷却过程中过冷度的大小受压力的变化也较为明显。

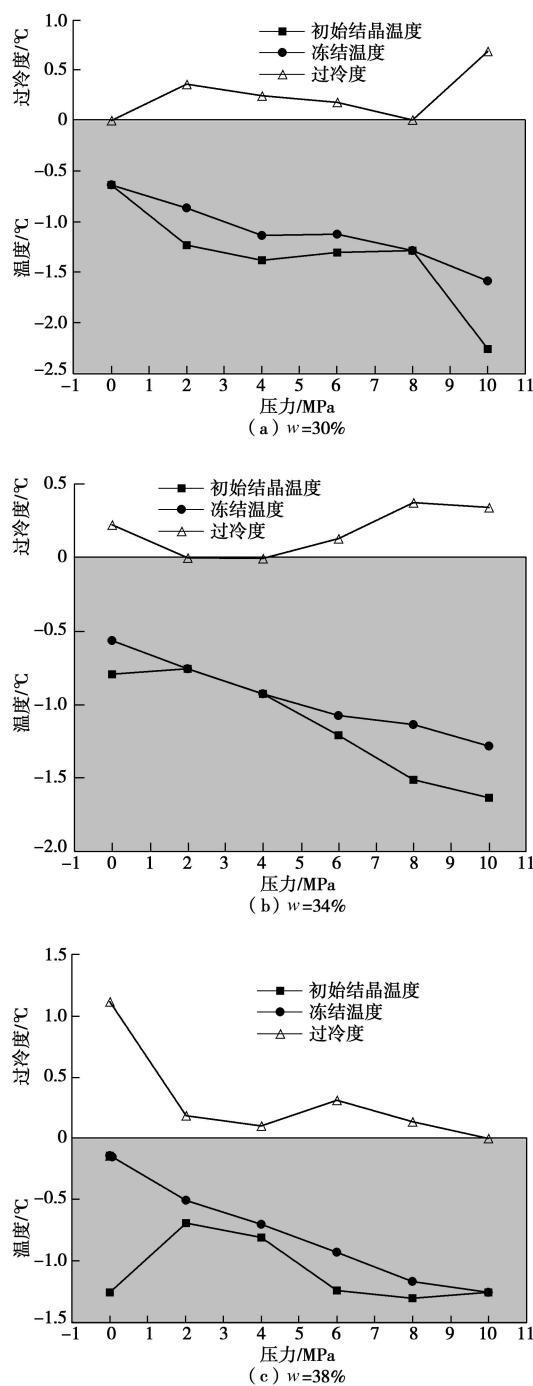


图5 压力对深部黏土初始结晶温度、冻结温度和过冷度的影响

Fig. 5 Effect of applied pressure on initial frozen temperature, frozen temperature and supercooling degree

就非饱和状态而言, 无压力条件下的初始结晶温度与冻结温度相同, 但随着压力的增大, 初始结晶温度和冻结温度都将降低, 且两者之差在 2 MPa 时达到最大后, 又逐渐缩小, 大约在 8 MPa 压力作用下, 初

始结晶温度与冻结温度达到一致, 之后又逐渐加大。这将意味着非饱和状态下土体的过冷度将随着压力的增大而呈现出由大变小又变大的变化趋势。就饱和和过饱和状态而言, 2~4 MPa 压力范围内深部黏土的过冷度较小, 当高于 4 MPa 以后, 饱和深部黏土的过冷度将随压力的增大而增大, 但过饱和深部黏土的过冷度将随压力的增大而增大后, 在 10 MPa 压力下接近于零。由于过冷度的大小将会影响冻土的冷生构造和结晶类型, 所以过冷度随压力的波动是导致深部土在压力作用下冻结时, 水分迁移与水分重新分布的原动力。

3 结 论

通过对高压力作用下的深部黏土在不同含水率状态下进行冷却过程试验, 利用试验获得的冷却过程曲线, 在分析压力大小对不同饱和状态的深部黏土冷却曲线形式及初始结晶温度、冻结温度及过冷度影响的基础上, 利用物质结晶理论, 探讨了压力作用影响土体冻结过程的实质, 并得出以下结论:

(1) 土体的冻结, 主要以自由孔隙水的冻结为主, 结合水对土体整体冻结过程的影响不大。

(2) 对于压力作用下的土体来说, 其冷却曲线与无压作用下所获得冷却曲线的不同主要表现在潜热释放阶段和热平衡阶段。压力作用抑制了饱和和过饱和土体中孔隙水在结晶时潜热的释放量, 却增大了非饱和土体中自由孔隙水的相对含量而提高了冰晶晶核形成时潜热的释放量。

(3) 无论是非饱和状态、饱和状态还是过饱和状态下的深部黏土, 其冻结温度都将随土体所承受压力的增大而减小, 而初始结晶温度和过冷度则随压力的增大呈起伏状变化, 这主要是由于压力的变化改变了深部土体中自由孔隙水的相对比例而引起自由孔隙水结晶时潜热释放量的大小所致。

参考文献:

- [1] 中国矿业学院. 特殊凿井[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985. (China Mining Institute. Special shaft sinking[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985. (in Chinese))
- [2] 吴紫汪, 马 巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. (WU Zi-wang, MA Wei. Strength and creep of frozen soil[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. (in Chinese))
- [3] 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.
- [4] 朱元林, 张家懿, 彭万巍, 等. 冻土的单轴压缩本构关系[J]. 冰川冻土, 1992, **14**(3): 210 - 216. (ZHU Yuan-lin, ZHANG Jia-yi, PENG Wan-wei, et al. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, **14**(3): 210 - 216. (in Chinese))
- [5] TING J M, MARTIN R T, LADD C C. Mechanisms of strength for frozen sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1983, **109**(10): 1286 - 1302.
- [6] LADANYI B, MOREL J F. Effect of internal confinement on compression strength of frozen sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(1): 8 - 18.
- [7] ANDERSLAND O B, LADANYI B. Frozen ground engineering[M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, ASCE, 2004: 106 - 136.
- [8] 王建军, 骆念海, 白振明. 开采引起的层间滑动与黄淮地区煤矿井筒破裂关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(7): 1072 - 1077. (WANG Jian-jun, LUO Nian-hai, BAI Zhen-ming. On the relation between interlayer glide caused by coal extraction and the shaft rupture occurring in coal mines in Huanghai area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(7): 1072 - 1077. (in Chinese))
- [9] 李文平, 张志勇, 孙如华, 等. 深部黏土高压 K_0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1185 - 1190. (LI Wen-ping, ZHANG Zhi-yong, SUN Ru-hua, et al. High pressure K_0 creep experiment and the anisotropy of microstructure of deep buried clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1185 - 1190. (in Chinese))
- [10] 陈国庆, 王衍森, 冷阳光, 等. 长时高压 K_0 固结黏土的卸载力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2014, **33**(1): 2996 - 3002. (CHEN Guo-qing, WANG Yan-sen, LENG Yang-guang, et al. Experimental study of mechanical properties of long-term K_0 consolidated clay under high stress during unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 2996 - 3002. (in Chinese))
- [11] 王衍森, 崔广心, 杨维好. 深部土的高压 K_0 固结试验研究展望[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊): 687 - 690. (WANG Yan-sen, CUI Guang-xin, YANG Wei-hao. Prospect of experimental studies of high-pressure consolidation tests of soils in thick alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S0): 687 - 690. (in Chinese))
- [12] 马巍, 吴紫汪, 常晓晓. 固结过程对冻土应力 - 应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 198 - 200. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 198 - 200. (in Chinese))
- [13] MA Wei, WU Zi-wang, ZHANG Li-xin, et al. Analyses of process on the Strength decrease in frozen soils under high confining pressure[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, **29**(1): 1 - 7.
- [14] MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, **34** (1): 11 - 17.
- [15] WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Analyses of behavior of stress-strain of frozen Lanzhou loess subjected to K_0 consolidation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **40**(1/2): 19 - 29.
- [16] 闵乃本. 晶体生长的物理基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社出版, 1982. (MIN Nai-ben. Crystal growth theory[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1982. (in Chinese))