doi：10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0023

Chen Shijie，Zhao Shuping，Ma Wei，*et al*. Studying frozen soil with CT technology：Present studies and prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology，2013，35(1)：193－200.［陈世杰，赵淑萍，马巍，等. 利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. 冰川冻土，2013，35(1)：193－200.］

利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望

陈世杰，赵淑萍*，马 巍，杜玉霞，邢莉莉

（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：介绍了 CT 扫描技术的特点，回顾了利用 CT 扫描试验进行冻土研究的历史和现状，包括研制与 CT 配套使用的用于冻土的辅助设备、利用 CT 数进行冻土内部结构变化分析、利用 CT 数定义损伤并进行损伤演化研究、利用 CT 图像进行细观结构分析等，总结了冻土研究领域的代表性成果. 最后，指出在现有的技术条件下利用 CT 扫描技术进行冻土研究所遇到的问题、以及可能的解决办法. 其中，着重介绍了高质量 CT 图像的获取、CT 数的变化与冻土试样感兴趣区域内的各组分变化的联系、冻土 CT 图像的数字化处理方向. 结果表明：CT 扫描技术是现阶段对冻土内部细观结构进行无损检测的最理想有效的技术之一，借助辅助设备及图像数字化处理，势必对冻土领域的研究发展起到更大作用.

关键词：CT 扫描技术；冻土研究；细观结构变化；损伤；CT 图像处理

中图分类号：TH878/P642.14 **文献标识码**：A

0 引言

冻土是由土颗粒、未冻水、冰和气体组成的复杂特殊土，在外部荷载或温度梯度作用下，其内部结构变化非常复杂，包含相变、物质迁移、裂纹产生等许多过程. 由于实验条件和技术水平的制约，目前仍然有许多问题没有得到很好解决. 近年来，CT 扫描技术广泛应用到岩土等领域，为冻土试验过程的无损 CT 实时监测和内部结构的定量描述提供了一种有效的手段.

1969 年英国的 Hounsfield 首先设计了电子计算机体层成像装置(Computed Tomography，简称 CT)，1972 年这一成果在放射学年会上公布，从此带来了医学图像上的革命. 1990 年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将这一成果应用到岩土领域，并配合专用加载设备，取得了系列研究成果. 比较有代表性的成果，例如：杨更社等[1]对岩石的初始损伤进行了研究，给出了用 CT 数表示的岩石损伤变量公式，并对单轴压缩作用下的砂岩的损伤扩展机理进行了研究；葛修润等[2]、任建喜等[3－4]对煤岩、裂隙岩体等研究对象在各种加卸载等情况下的单轴与三轴实验进行了 CT 扫描，跟踪了岩体内部细观损伤变化过程和扩展规律；杨更社等[5]、仵彦卿等[6]、丁卫华等[7]对岩石的裂纹演化、扩展进行了 CT 实时动态观测. 随后，多家单位引进 CT 扫描试验机，进行岩土细观扫描试验[8－11]，取得了一些成果，例如，王旭宏等[12]采用高精度显微 CT 试验系统，通过对 5 种岩石试件的显微 CT 扫描，以射线的衰减系数为目标，研究岩石颗粒密度分布规律. 2010 年冻土工程国家重点实验室又引进和开发了具有较高空间和密度分辨率的飞利浦高精度多能量三维 CT 机以及图像处理工作站. 总结 20 a 来 CT 扫描技术在岩土领域的应用研究成果时发现，在岩石、普通非冻土方面的研究成果较多，冻土方面的研究成果相对来说较少，一方面是因为要对冻土进行 CT 扫描，就需要研制特殊的辅助装置，既能精确控温、又能符合CT试验机的使用要求；另一方面，是因为冻

收稿日期：2012-09-29；修订日期：2012-11-12

基金项目：中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年基金项目(51Y251B91)；冻土工程国家重点实验室自主课题(Y252J81001)；国家自然科学基金项目(41023003；40971046)资助

作者简介：陈世杰(1984—)，男，甘肃高台人，工程师，2010 年在兰州交通大学获硕士学位，现主要从事冻土 CT 扫描试验和研究工作. E-mail：chsj53719@lzb.ac.cn

* 通讯作者：赵淑萍，E-mail：shuping@lzb.ac.cn

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

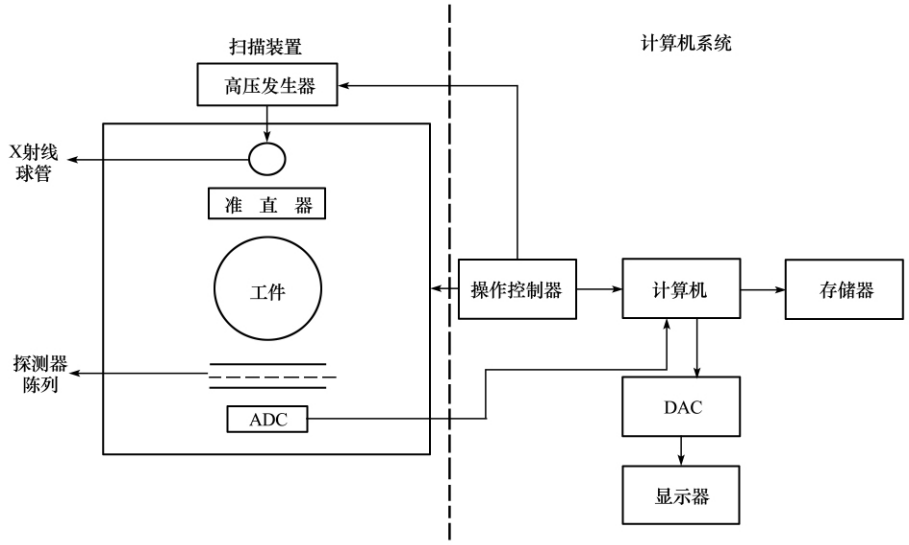

图 1 CT 基本结构及数据流程

Fig. 1 CT basic structure and its data flow

土本身更为复杂，如何利用 CT 试验结果来解释冻土内部发生的结构变化，还有很多技术问题认识不清楚，影响其发挥. 在这样的背景下，本文首先介绍了 CT 扫描试验的特点，然后总结了 CT 扫描技术在冻土研究领域的应用情况，包括已有的研究成果、仍存在的问题、及可能的解决方法，为 CT 扫描技术在冻土研究领域进一步发挥作用提供基础.

1 CT 扫描试验的特点

1.1 CT 机的原理

CT 机的基本原理是通过 X 射线管发出的 X 射线束，对所选层面从多个方向进行扫描，探测器接收、测定透过的 X 射线量，经模/数转换器转换成数字，转入计算机储存和计算，得到该层面各单位容积的 X 射线吸收值，经数/模转换器通过计算机反投影重建转成 CT 图像，最后经由显示器显示出来(图 1). 医学临床上将此图像再摄于胶片上. 因此，CT 图像是计算机计算出的图像.

1.2 CT 数的定义及作用

CT 数的定义为：

$$H = k(\mu_{rm} - \mu_{标})/\mu_{标} \tag{1}$$

式中：H 为某一像素点的 CT 数；μ_{rm} 为某物质的 X 射线吸收(或衰减)系数；$\mu_{标}$ 为标准物质的 X 射线吸收(或衰减)系数；k 为分度因子.

1969 年，英国的 Hounsfield 建立了医用 CT 机的标准方程，取 $k=1\,000$，并用水作为标准物质，即 $\mu_{标}=\mu_{w}$，然后得到下式：

$$H = 1000 \times (\mu_{rm} - \mu_{标})/\mu_{标} \tag{2}$$

此时，CT 数的单位名称为 HU(Hounsfield Unit)，因此，水的 CT 数为 0 HU，空气的 CT 数为 −1000 HU.

根据式(1)和式(2)，某点对 X 射线的吸收强弱可以用 CT 数来表示，CT 数大小在 CT 图像上由灰度表示. CT 图像的亮色表示被测物体的吸收系数较大的区域，暗色表示被测物体的吸收系数较小区域. CT 图像的本质是被测物体的某一扫描层面的 X 射线吸收系数的二维分布图.

被检测物质对 X 射线的吸收系数 μ_{rm} 可表示为：

$$\mu_{rm} = \mu_{m}\rho \tag{3}$$

式中：μ_{m} 为某物质的质量吸收系数；ρ 为某物质的密度.

将式(3)代入式(1)可得：

$$\rho = \frac{\mu_{标}(1+\frac{H}{k})}{\mu_{m}} \tag{4}$$

将式(3)代入式(2)可得：

$$\rho = \frac{\mu_{w}(1+\frac{H}{1000})}{\mu_{m}} \tag{5}$$

由式(4)和式(5)可以看出，密度与 X 射线质量吸收系数成反比，与 CT 数成正比. 因此，CT 图像可以表征为某一扫描层面的密度图，在已知被测物质的吸收(或衰减)系数 的情况下，用 CT 数值的变化就可以定量描述试验过程中被测物质的密度变化.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　CT扫描技术在冻土研究中的应用

2.1　用于冻土CT扫描试验的辅助设备

在医用CT机长足发展的同时，许多学者将医用CT扫描技术引入材料科学研究领域，观测试样内部的细观结构变化. Torrance等[13]通过CT扫描技术，对冻结过程中试样内部的结构变化、水分迁移及冰透镜的形成过程做了观测研究.

我国最早将医用CT机用于冻土试验的是原中国科学院兰州冰川冻土研究所. 1990年建立了用于冻土研究的工作站，该试验站是由美国的GE8800 CT机和自行研制的加载装置组成.

1998年原中国科学院兰州冰川冻土研究所购买了较为先进的德国西门子SOMATOM-PLUS螺旋CT机，并且研制了高压三轴CT试验加载装置，模拟岩土所处的自然环境条件，并对试验过程中的细观结构变化进行动态监测，为理论分析和工程实践奠定基础. 该试验系统由液压加载子系统、专用三轴试验仓、数据处理子系统组成. 在进行断面扫描时不需要暂停加载，不必卸载，因此可以获得不同应力阶段任意部位断面的实时CT图像，实现了真正意义上的实时动态扫描. 利用该试验系统，可进行土样、岩石等在单轴或三轴条件下的压缩破坏、周期载荷作用下的疲劳破坏、蠕变破坏等的实时CT扫描试验.

此后，刘增利等[14]、凌贤长等[15]学者做了一些冻土的CT扫描实验研究，其实验过程是在压力实验机上先进行力学实验，一定阶段后拿到CT机上扫描而后再进行分析研究. 2007年，郑剑锋等[16－17]、赵淑萍[18]、方丽莉等[19]改进了与CT机配套的三轴试验仪，其控温精度可达到±1 ℃，满足了冻土实验的控温要求. 该试验仪由原来的不可控温加载发展到现在的可控温三轴加载，从而可以在冻土力学实验的同时做CT扫描.

2010年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引进了分辨率更高、测量更准确的荷兰飞利浦Brilliance16多能量螺旋CT机. 与上一代的机器相比，它的空间分辨率达到0.208 mm，密度分辨率0.3%，实现了高精度多能量三维CT扫描，并且配置了具有DICOM标准的图像处理工作站，为纠正图像伪影、多相物质的分布测量奠定了技术基础.

2.2　冻土中的成果介绍

2.2.1　利用CT数来分析内部变化

通过测量CT图像感兴趣区域的CT数均值和方差，通过统计的方法来衡量试件特定部位细观结构变化及宏观密度变化效应. 吴紫汪等[20]通过对冻土单轴蠕变过程进行动态监测，利用CT图像和CT数值分析，将冻土的细观结构变化与其应力应变关系联系起来，对冻土变形特征进行探索性的分析. 蒲毅彬等[21]通过数学分析和实验回归推导出冻土CT实验的数学方程，将扫描得到的图像CT数与冻土相关参数联系在一起，为通过CT扫描定量分析冻土参数打下必要基础.

郑剑锋等[22－23]利用两种粉质黏土试样分别以不同冻结方式进行冻结，并对试样进行了无损CT扫描，通过冻结前后的实测CT数变化，得出轴向冻结方式对冻土试样内部含水量的变化影响要小于径向冻结方式. 赵淑萍等[24]利用改进后的三轴仪对不同温度条件下的冻结兰州黄土单轴压缩过程进行了CT动态扫描，得到了不同温度条件下试样CT数随应变发展关系曲线，并对其进行了讨论.

2.2.2　利用CT数来定义损伤

外部荷载作用下，冻土内部结构发生变化，其密度也发生变化，这导致断面的CT数发生变化. 根据文献[25]定义的损伤公式：

$$D=\frac{\Delta\rho}{\rho_0}=\frac{\rho_i-\rho_0}{\rho_0} \tag{6}$$

将式(4)代入式(6)可得：

$$D=\frac{\dfrac{\mu_{标}\left(1+\dfrac{H_i}{k}\right)}{\mu_{mi}}-\dfrac{\mu_{标}\left(1+\dfrac{H_0}{k}\right)}{\mu_{m0}}}{\dfrac{\mu_{标}\left(1+\dfrac{H_0}{k}\right)}{\mu_{m0}}} \tag{7}$$

假定在进行力学试验时，试样断面的组分不发生变化即$\mu_{m0}=\mu_{mi}$则：

$$D=-\frac{H_i-H_0}{k+H_0} \tag{8}$$

考虑到仪器的分辨率的影响则：

$$D=-\frac{1}{m_0^2}\left(\frac{H_i-H_0}{k+H_0}\right) \tag{9}$$

式中：m_0^2为CT机的空间分辨率；H_0为冻土试样初始CT数；H_i为i时刻损伤后的冻土试样CT数.

这里应该注意，CT数代表X射线穿过组织被吸收后的衰减值，当用CT数定义损伤时，首先要确定CT数的标度，即式(1)中的分度因子k和$\mu_{标}$的值. k值是根据CT试验机的情况、在CT扫描的时候设定的，是根据所采用的标准物质确定的. 当$k=1\,000$、$\mu_{标}=\mu_w$时，其单位为HU(Hounsfield

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Unit)，此时，水的 CT 数为 0，空气的 CT 数为 −1 000. 在工业 CT 中，常将 k 值设定为5 000，把铝(Al)(密度为 2.8 g·cm^{-3})作为标准件[26]，即 $\mu_{标}=\mu_{铝}$，此时，铝的 CT 数为 0，空气的 CT 数为 −5 000. 冻土工程国家重点实验室现用的医用 CT 机的 k 值为1 024，其 CT 数覆盖范围是 −1 024～3071，仍然使用水膜作为标准件，即 $\mu_{标}=\mu_{w}$. 因此，水的 CT 数为 0，空气的 CT 数为 −1 024.

此时，式(9)的形式将变为：

$$D=-\frac{1}{m_0^2}\left(\frac{H_i-H_0}{1024+H_0}\right) \tag{10}$$

正是由于这种 CT 数和密度的相关联系，刘增利等[27]在岩石细观损伤 CT 数损伤变量的基础上，采用冻土附加损伤概念，给出了计算冻土损伤的公式，即：

$$D=-\frac{1}{m_0^2}\left(\frac{H_i-H_0}{1000+H_0}\right) \tag{11}$$

丁卫华等[28]定义的密度损伤增量：

$$\Delta D=\frac{H_i-H_0}{1000+H_0} \tag{12}$$

式(11)就是与式(12)式对应的一种情况.

由此可见，用 CT 数定义冻土的损伤、并进行定量计算时，一定要说明 CT 数的标度，这样计算出来的损伤变量值才是正确的.

2.2.3 直接利用 CT 图像来分析的

试样受外部荷载或者温度梯度作用后，初始阶段试样内部结构变化较小，并且由于人眼分辨灰度能力的限制，一般从 CT 图像看不出变化. 随着荷载或温度梯度作用时间的延长，试样内部结构发生明显变化，包括新的细观裂纹产生、小孔隙的贯通形成大孔隙、水分迁移、冰水的相变等，在 CT 图像上表现为灰度重分布，经与初始状态 CT 图像相比较，可以分析试样内部结构的变化趋势. 因此，利用 CT 图像分析可以在无损状态下了解试样内部结构特点，再结合各个位置 CT 数的变化情况，可以分析研究试样内部结构演化过程.

马巍等[29]选用试样高为 150 mm、直径为 61.8 mm、含水量为 27%的兰州黄土，在 −5 ℃条件下进行三轴压缩蠕变试验，配合 CT 机扫描，通过扫描后各层面 CT 数统计方法，分析了冻土试样 CT 图像的全截面、中心区域和边缘区域的 CT 数分布特征，得到了冻土三轴蠕变过程中结构变化时的 CT 双峰曲线. 结果认为，冻土在蠕变过程中同时存在结构弱化和结构强化现象，在一定程度上围压的作用抑制了冻土试样的增生和扩展，加强了结构的强化作用，致使冻土在不稳定蠕变阶段和稳定蠕变阶段表现出结构强化占优势. 随着非弹性变形的进一步累积，如果结构强化仍然占优势，则变形具有衰减特征；如果弱化作用克服了围压效应占主导，则发展以破坏而告终的非衰减蠕变.

对 CT 图像的分析主要是通过固定某个感兴趣区或某条线段，对不同试验阶段该层面的 CT 数进行比较测量，进而分析试样内部结构的演变过程.

3 利用 CT 扫描技术进行冻土研究存在的问题及可能的解决方法

3.1 高质量 CT 图像的获取

高质量 CT 图像包括 3 方面的内容：1)高的可分辨性，包括高的空间分辨力和低噪声等；2)可靠性，包括 CT 数线性和伪影；3)扫描剂量. 对岩土进行 CT 扫描获取 CT 图像与医用 CT 扫描不同，这主要表现在以下两个方面：

(1) 标定问题. 岩土 CT 扫描的对象和人体有很大差异. 在医学上，由于成人体内的含水量约占本身体重的 65%左右，所以用标准水膜和空气校准后扫描人体所得到的 CT 数误差较小，并且水膜直径为 200 mm(以飞利浦 Brilliance 16 为例)与普通成人躯干直径相近，这使得与岩土扫描相比，人体扫描所得到的 CT 数更加精确. 另外，医用 CT 扫描条件是针对人体不同部位而设定的低剂量扫描方案，而在岩土 CT 扫描领域，许多试样是要配合专用加载设备而进行扫描，这就需要加大 CT 机的扫描剂量来获得高质量的 CT 图像.

(2) 岩土 CT 图像质量受很多因素的影响. 岩土实验中，由于岩土的成分、试样尺寸都与标准水膜差异较大，这就使得岩土扫描所得到的 CT 数具有一定的误差，具体表现为某一均匀试样的图像噪声，即图像中心的感兴趣区域的 CT 数标准偏差值较大.

针对上述问题，需要进行两方面的工作：

(1) 结合实际扫描试样的情况对扫描方案作出调整. 考虑到岩土试样的尺寸一般较小，校准水膜应选用直径较小的婴儿模. 另外，应根据专用加载设备及试样的情况，确定合适的、专用的大功率扫描方案.

(2) 根据 X 射线理论，单一元素对不同波长 X 射线的质量吸收系数为：

$$\mu_m \approx KZ^3\lambda^3 \tag{13}$$

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中：μ_m 为质量吸收系数；K 为常数；Z 为原子序数；λ 为 X 射线波长. 由于 CT 机的扫描电压，即 X 射线球管电压与 X 射线波长成反比，通过改变 CT 机的扫描电压，就可以改变 X 射线波长. 因此，即使对于同一个元素，当采用多个扫描电压来进行扫描时，会获得多个质量吸收系数，也就是说不同能级的 X 射线扫描同一种物质可以获得不同的 CT 数.

多能量 CT 机可以提供不同的扫描电压，利用这一特点，可以采用不同的扫描电压对冻土进行扫描，从而获取高质量的图像. 例如，利用 90 kV、120 kV、140 kV 3 种电压对水泥混凝土进行扫描(图 2)，结果表明，CT 图像中 120 kV 和 140 kV 扫描电压得到的图像比 90 kV 扫描电压所得到的图像边界清晰，内部裂隙能够清晰展现.

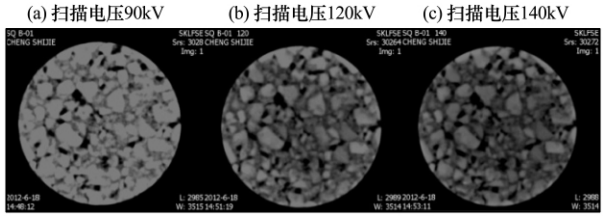

图 2　不同扫描电压条件下的 CT 图像

Fig. 2　CT images obtained under different scanning voltage conditions

140 kV 与 120 kV 扫描电压相比，得到的 CT 数的标准差较小如表 1 所示，针对该种试样，利用 140 kV 的扫描电压可获得较高质量的 CT 图像和离散性较小的 CT 数. 所以，利用多能量 CT 机扫描冻土过程当中，当需要观测土颗粒的情况时，可以设定一个适合土颗粒的扫描电压，进行扫描；如果需要观测冰的情况，则针对冰设定一个合适的扫描电压，进行扫描.

表 1　不同扫描电压条件下的 CT 均值与标准差的比较

Table 1　Mean values and standard deviations of CT under different scanning voltage conditions

扫描电压/kV	测量区域面积/mm²	CT 均值	标准差
90	7815.6	2651.9	488.6
120	7815.6	2271.2	500.3
140	7815.6	2070.9	485.4

此外，CT 图像质量还受扫描管电流、扫描层厚、重建矩阵等的影响. 因此，要获得高质量的 CT 图像和 CT 数，必须根据实际试样选择合适的扫描参数，例如，对于尺寸较大的试样选择较大的管电流等.

3.2　用 CT 数进行分析时所遇到的问题

对于单一物质(如金属材料)，根据标准的质量吸收系数表，可以直接将 CT 数分布图转换为密度分布图.

令 $a=\frac{\mu_{标}}{k}$，$b=\mu_{标}$，式(4)可以变为：

$$\mu_{rm}=\rho\mu_m=aH+b \tag{14}$$

美国 ASTM E1935-97(2008)标准中介绍了一种标定和测量材料密度的方法，选择 2 种以上材料的试件，每种材料的 μ_m 可由相关手册查到，ρ 由称重法测出，在某一能级条件下对试件进行扫描，这样就可以建立 CT 数和 X 射线吸收系数 μ_{rm} 之间的关系，获得式(14)中的 a、b 值. 对试样的某一断层进行扫描测得 CT 数分布，便可根据式(14)得到 μ_{rm} 分布，然后进一步计算得到试样该断层区域的密度分布.

如果将冻土试样看成一个整体，利用试样的平均密度以及试样各层 CT 数的平均值，利用 2 组以上的试验结果，可以得到整体密度和 CT 数之间的关系，以及式(14)中的 a、b 值，从而，可以将冻土某一层面的 CT 数分布转换为密度分布. CT 图像可以表征为冻土某一扫描层面的密度图，但这仍然是宏观尺度的，无法表征冻土内部的结构变化.

事实上，冻土是由土颗粒、未冻水、冰和气体组成的非单一物质. 冻土中的土颗粒、水、冰、气体的质量以及总质量分别用 m_s、m_w、m_i、m_g、m 表示，则冻土试样整体的质量吸收系数符合以下关系：

$$\mu_m=\frac{m_s}{m}\mu_s+\frac{m_w}{m}\mu_w+\frac{m_i}{m}\mu_i+\frac{m_g}{m}\mu_g \tag{15}$$

式中：μ_s 为土颗粒质量吸收系数；μ_w 为水质量吸收系数；μ_i 为冰质量吸收系数；μ_g 为气体的质量吸收系数.

将式(15)代入式(14)式可以得到：

$$\rho\left(\frac{m_s}{m}\mu_s+\frac{m_w}{m}\mu_w+\frac{m_i}{m}\mu_i+\frac{m_g}{m}\mu_g\right)=aH+b \tag{16}$$

$$\frac{v_s}{v}\rho_s\mu_s+\frac{v_w}{v}\rho_w\mu_w+\frac{v_i}{v}\rho_i\mu_i+\frac{v_g}{v}\rho_g\mu_g=aH+b \tag{17}$$

式中：v_s 为土颗粒的总体积；v_w 为水的总体积；v_i 为冰的总体积；v_g 为气体的总体积；v 为试样的总体积.

对于单一物质，只要 CT 扫描条件不变，其质

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量吸收系数就不变，因此，CT 数和密度之间存在定量关系式(14). 对于冻土，情况就比较复杂了，当试样整体密度不变时，土颗粒、水、冰、气体的质量组分可能发生变化. 另外，由于各组分之间的相互影响，各组分的质量吸收系数和单组分物质的质量吸收系数还有差异. 因此，由式(17)和式(16)可知，从细观尺度来考虑时，冻土 CT 数和密度之间并不存在定量关系.

可能的解决方法是：首先，通过实验得到土颗粒、水、冰、气体各个单组分的质量吸收系数；然后，对已知各组分含量的冻土试样进行 CT 扫描，通过统计分析的方法得到多组分物质的质量吸收系数；最后得到冻土 CT 数与密度之间的统计关系. 这种解决方法工作量很大，且需要设计合理的实验. 因此，怎样将图像 CT 数的变化与冻土试样感兴趣区域内的各组分变化紧密联系起来，并在此基础上反映出冻土内部的结构变化及物质迁移变化仍然是冻土 CT 研究中的最大障碍.

3.3 CT 图像的应用问题

随着电子信息技术的不断发展，数字图像处理技术也逐渐发展成一门独立学科，应用到不同学科领域. 由于 CT 机本身的设计，导致 CT 图像质量受到多种因素(如噪声、射线束硬化、重定位、分辨率等)的制约，这就需要数字图像处理技术对 CT 图像进行处理. CT 图像的数字化处理主要针对以下 3 个方面：

(1) 减少系统误差方面，这主要包括对 CT 图像的噪声控制、CT 图像的均匀性、CT 数线性、定位精度等控制.

(2) CT 图像质量控制方面，主要包括两个方面：一方面是 CT 伪影的消除，例如射线束引起的伪影、探测器通道差异引起的环状伪影、散射伪影、部分容积效应等；另一方面是试验过程当中产生的数据畸变，包括对试样尺寸、试样边缘外围装置等的修正.

(3) 增强 CT 图像获得某种有用信息，削弱或抑制一些无用信息，例如：利用图像平滑处理、图像锐化处理、图像的点运算等的图像增强技术来提高 CT 图像的最佳显示效果.

在此基础上，可以运用计算机对图像信息进行分析处理从而获得所需的研究信息. 目前，用得较多的方法是，有用信息的提取及图像三维重建. 采用密集的断面扫描，获得试件各部位的 CT 数，并且设定 CT 数阈值，大于此值的 CT 数不予考虑，小于阈值的区域划出其边界，由此形成一幅新的关于该试件的二维图像，以若干平面图组合、或单独绘制一个新的立体三维图像，反映信息在空间的分布状况. 例如，有学者采用 CT 图像来进行裂纹的提取以及三维重建，动态 CT 图像三维重采样可以生动、直观地显示各部位裂纹的空间位置和裂纹萌生、扩展、贯通演化过程. 在医学领域，Bay 等[30]根据数字图像三维重建，通过对人体骨骼受力前后 CT 数变化，重建了骨骼受力变化的位移场和变形场，分析了骨骼各部位变形细节，试图为人造骨骼材料选择提供依据. Wang 等[31]利用 CT 技术对材料损伤进行了量化研究，利用 CT 图像和虚拟分割技术获取全断面图像重建了三维含损混凝土结构，揭示了量化损伤参数和其在力学建模中的应用，并在沥青混合料中进行了验证. 范留明等[32]根据人眼的视觉特点，结合计算机数字图像颜色模式和图像格式，采用灰度级－彩色变换方法，对灰度 CT 图像进行伪色彩增强，显著提高了 CT 图像的分辨率. 对于冻土，利用图像处理方法，可以从 CT 图像中提取试件变形破坏的有关信息，如等效裂纹宽度、试件横向变形等，从而分析其细观裂纹演化机制，建立裂纹演化模型；也可以在土体冻胀过程中，提取土体密度变化、冰晶形成等有用信息，并进行图像三维重建.

4 结语

自 1990 年建立国内最早的岩土 CT 试验工作站，到 2010 年新一代高速 CT 试验机及相关辅助设备的引进与研制，中国科学院冻土工程国家重点实验室利用 CT 扫描技术开展了许多岩土试验研究工作，已取得了多方面的研究成果. 本文概括的介绍了 CT 扫描技术在冻土研究领域的发展历史及主要研究成果，说明将 CT 扫描技术应用到冻土领域是研究冻土内部细观结构演化的一种有效手段，通过配套实验设备及后期的图像数字化处理，势必对冻土领域的研究发展起到更大作用.

参考文献(References)：

[1] Yang Gengshe, Xie Dingyi, Zhang Changqing, *et al*. Application of CT technique in the damage detection of rock materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, **13**(4): 24－29. [杨更社，谢定义，张长庆，等. CT 技术在岩石损伤检测中的应用研究[J]. 实验力学，1998，**13**(4)：24－29.]

[2] Ge Xiurun, Ren Jianxi, Pu Yibing, *et al*. Damage Mechanics of Rock and Soil and Macro-Meso Test Research [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1－381. [葛修润，任建喜，蒲毅

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

彬，等. 岩土损伤力学宏细观试验研究[M]. 北京：科学出版社，2004：1－381.]

[3] Ren Jianxi, Ge Xiurun, Pu Yibin, *et al*. Real-time CT test on the meso-damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(6): 99－104. [任建喜，葛修润，蒲毅彬，等. 岩石单轴细观损伤演化特性的 CT 实时分析[J]. 土木工程学报，2000，**33**(6)：99－104.]

[4] Ren Jianxi, Ge Xiurun. Real-time CT test of jointed granite in its whole unloading meso-damage process[J]. Progress in Natural Science, 2003, **13**(3): 275－280. [任建喜，葛修润. 裂隙花岗岩卸载损伤破坏全过程 CT 实时试验[J]. 自然科学进展，2003，**13**(3)：275－280.]

[5] Yang Gengshe, Xie Dingyi, Zhang Changqing, *et al*. The discussion about damage constitutive relation of rock under uniaxial stress identified by CT [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, **18**(2): 29－34. [杨更社，谢定义，张长庆，等. 岩石单轴受力 CT 识别损伤本构关系的探讨[J]. 岩土力学，1997，**18**(2)：29－34.]

[6] Wu Yanqing, Ding Weihua, Pu Yibin, *et al*. Real-time observation of rock density damage increments under compression conditions by *X*-ray CT scan[J]. Progress in Natural Science, 2000, **10**(9): 830－835. [仵彦卿，丁卫华，蒲毅彬，等. 压缩条件下岩石密度损伤增量的 CT 动态观测[J]. 自然科学进展，2000，**10**(9)：830－835.]

[7] Ding Weihua, Wu Yanqing, Pu Yibin, *et al*. *X*-ray CT approach on rock-interior crack evolution under low strain rate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1793－1797. [丁卫华，仵彦卿，蒲毅彬，等. 低应变率下岩石内部裂纹演化的 X 射线 CT 方法[J]. 岩石力学与工程学报，2003，**22**(11)：1793－1797.]

[8] Yin Xiaotao, Dang Faning, Ding Weihua, *et al*. Morphologic measurement of crack in CT images of rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 539－544. [尹小涛，党发宁，丁卫华，等. 岩土 CT 图像中裂纹的形态学测量[J]. 岩石力学与工程学报，2006，**25**(3)：539－544.

[9] Ding Weihua, Wu Yanqing, Pu Yibin, *et al*. Measurement of crack width in rock interior based on *X*-ray CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(9): 1421－1425. [丁卫华，仵彦卿，蒲毅彬，等. 基于 X 射线 CT 的岩石内部裂纹宽度测量[J]. 岩石力学与工程学报，2003，**22**(9)：1421－1425.]

[10] Jiang Yunzhong, Wang Yunliang, Wang Shiji. 3-D reconstruction for CT images of expansive soil based on MATLAB [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, **33**(3): 144－148. [蒋运忠，王云亮，汪时机. 在 MATLAB 环境下实现膨胀土 CT 图像的三维重建[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2011，**33**(3)：144－148.]

[11] Wang Shiji, Chen Zhenghan, Li Xian, *et al*. Pore-damage evolution and mechanical properties of remolded soil by CT-triaxial test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(7): 150－154. [汪时机，陈正汉，李贤，等. 土体孔洞损伤结构演化及其力学特性的 CT-三轴试验研究[J]. 农业工程学报，2012，**28**(7)：150－154.]

[12] Wang Xuhong, Feng Zengchao, Liu Zhonghua. Study on distribution laws of rock density [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28** (Suppl. 2): 3484－3489. [王旭宏，冯增朝，刘中华. 岩石密度分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2009，**28**(增 2)：3484－3489.]

[13] Torrance J K, Elliot T, Martin R, *et al*. *X*-ray computed tomography of frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, **53**(1): 75－82.

[14] Liu Zengli, Zhang Xiaopeng, Li Hongsheng. A damage constitutive model for frozen soils under uniaxial compression based on CT dynamic distinguishing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 542－546. [刘增利，张小鹏，李洪升. 基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型[J]. 岩土力学，2005，**26**(4)：542－546.]

[15] Ling Xianzhang, Xu Xueyan, Qiu Mingguo, *et al*. Study on CT scanning of Harbin frozen silty clay before and after dynamic triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1244－1249. [凌贤长，徐学燕，邱明国，等. 冻结哈尔滨粉质粘土动三轴试验 CT 检测研究[J]. 岩石力学与工程学报，2003，**22**(8)：1244－1249.]

[16] Zheng Jianfeng, Zhao Shuping, Ma Wei, *et al*. Application of CT testing technology in evaluating the uniformity of soil samples [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, **45**(2): 20－25. [郑剑锋，赵淑萍，马巍，等. CT 检测技术在土样初始损伤研究中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2009，**45**(2)：20－25.]

[17] Zheng Jianfeng, Ma Wei, Zhao Shuping, *et al*. Study of meso-damage changes of frozen Lanzhou loess under triaxial compression based on CT real-time monitoring[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(4): 839－845. [郑剑锋，马巍，赵淑萍，等. 三轴压缩条件下基于 CT 实时监测的冻结兰州黄土细观损伤变化研究[J]. 冰川冻土，2011，**33**(4)：839－845.]

[18] Zhao Shuping. Theoretical Analysis for Coupled Problem of Temperature, Moisture and Stress Fields in Frozen Soil [D]. PhD Thesis, Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2008: 1－109. [赵淑萍. 冻土的水热力耦合的理论分析[D]. 博士论文，兰州：中国科学院寒区旱区环境与工程研究所，2008：1－109.]

[19] Fang Lili, Qi Jilin, Ma Wei. Freeze-thaw induced changes in soil structure and its relationship with variations in strength [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(2): 435－440. [方丽莉，齐吉琳，马巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J]. 冰川冻土，2012，**34**(2)：435－440.]

[20] Wu Ziwang, Ma Wei, Pu Yibin, *et al*. Monitoring the change of structures in frozen soil in uniaxial creep process by CT[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(4): 306－311. [吴紫汪，马巍，蒲毅彬，等. 冻土单轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测[J]. 冰川冻土，1996，**18**(4)：306－311.]

[21] Pu Yibin, Wu Ziwang, Ma Wei, *et al*. CT mathematical equation of CT experiment on frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(Suppl.): 135－139. [蒲毅彬，吴紫汪，马巍，等. 冻土 CT 实验的数学方程[J]. 冰川冻土，1995，**17**(增)：135－139.]

[22] Zheng Jianfeng, Zhao Shuping, Ma Wei, *et al*. Study of the effect of freezing on frozen soil specimen preparation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(1): 130－138. [郑剑锋，赵淑萍，马巍，等. 冻结方式对冻土试样制备

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 130－138.]

[23] Zheng Jianfeng. Study on the Meso-Structure Changes of Frozen Soil under Force[D]. PhD Thesis, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2009: 1－133. [郑剑锋. 冻土受力作用下细观结构变化研究[D]. 博士论文, 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009: 1－103.]

[24] Zhao Shuping, Ma Wei, Zheng Jianfeng, *et al*. CT real-time monitoring on frozen Lanzhou loess at different temperatures and under uniaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Suppl. 2): 92－97. [赵淑萍, 马巍, 郑剑锋, 等. 不同温度条件下冻结兰州黄土单轴试验的CT实时动态监测[J]. 岩土力学, 2010, 31(增2): 92－97.]

[25] Yang Gengshe, Zhang Changqing. Rock Damage and its Detecting[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998: 1－150. [杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998: 1－150.]

[26] Wang Jue, Huang Suhong, Cai Yufang. Research on measuring ICT material density[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 203－205. [王珏, 黄苏红, 蔡玉芳. 工业CT材料密度测量方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(2): 203－205.]

[27] Liu Zengli, Li Hongsheng, Zhu Yuanlin, *et al*. A distinguish model for initial and additional micro-damages on frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 676－680. [刘增利, 李洪升, 朱元林, 等. 冻土初始与附加细观损伤的CT识别模型[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 676－680.]

[28] Ding Weihua, Wu Yanqing, Pu Yibin, *et al*. New progress in real-time detecting of geotechnical experiment by use of X-ray computed tomography [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(3): 218－222. [丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. CT技术应用于岩石实验动态观测的新进展[J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 218－222.]

[29] Ma Wei, Wu Ziwang, Pu Yibin, *et al*. Monitoring the change of structures in frozen soil in triaxial creep process by CT [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(1): 52－57. [马巍, 吴紫汪, 蒲毅彬, 等. 冻土三轴蠕变过程中结构变化的CT动态监测[J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 52－57.]

[30] Bay B K, Smith T S, Fyhrie D P, *et al*. Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography [J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(3): 217－226.

[31] Wang L B, Frost J D, Voyiadjis G Z, *et al*. Quantification of damage parameters using X-ray tomography images [J]. Mechanics of Materials, 2003, 35(8): 777－790.

[32] Fan Liuming, Li Ning, Ding Weihua. Application of pseudo color enhancement method to geotechnical CT image analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2257－2261. [范留明, 李宁, 丁卫华. 数字图像伪彩色增强方法在岩土CT图像分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2257－2261.]

Studying Frozen Soil with CT Technology: Present Studies and Prospects

CHEN Shi-jie, ZHAO Shu-ping, MA Wei, DU Yu-xia, XING Li-li

(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: In this paper, the characteristics of CT technology are introduced, and the history and current situation of using CT technology on frozen soil study are reviewed, including auxiliary equipment specially designed for frozen soil testing, using CT number to analyze frozen soil internal structure change, using CT number to define and explore damage evolution, and using CT images to observe soil mesostructure. In addition, representative achievements in frozen soil study in relation to CT technology are also summarized in this paper. Finally, problems, possible solutions and challenges in frozen soil study by using CT are pointed out. It is emphatically introduced how to obtain higher quality CT images and how to process digital CT images of frozen soil. The relations between CT number and each component of frozen soil specimens are also discussed. It is found that CT technology is one of the most ideal and effective technologies for studying frozen soil mesostructure as a non-destructive manner. CT technology will play more significant role in the study of frozen soil by means of auxiliary equipment and digital images processing.

Key words: CT technology; frozen soil; damage; mesostructure change; CT image processing

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net