

DOI: 10.11779/CJGE202202020

# 高庙子膨润土热膨胀特性试验研究

曹胜飞<sup>1,2</sup>, 刘月妙<sup>1,2</sup>, 谢敬礼<sup>1,2</sup>, 闫安<sup>1,2</sup>, 高玉峰<sup>1,2</sup>, 佟强<sup>1,2</sup>

(1. 国家原子能机构高放废物地质处理创新中心, 北京 100029; 2. 核工业北京地质研究院中核高放废物地质处置评价技术重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 采用 DIL806 热膨胀仪, 通过室内试验系统研究了不同影响因素对高庙子压实膨润土样品热膨胀性能的影响, 获得了膨润土样品热膨胀系数随干密度、升温速率、含水率和环境气氛等条件的变化规律。试验结果表明: 膨润土样品的热膨胀系数随着干密度的增大而增大; 样品热膨胀系数随初始含水率的升高而降低; 高含水率的膨润土样品, 其热膨胀系数随升温速率的升高而增大, 含水率为 0 的试验样品其热膨胀系数随升温速率的升高略有下降; 对于同一干密度和含水率的试验样品, 空气氛围环境下样品的热膨胀系数要高于氩气氛围环境下的热膨胀系数。研究成果对分析膨润土的热膨胀性能, 评价高放废物处置缓冲材料的长期稳定性具有一定的参考依据。

**关键词:** 高庙子膨润土; 热膨胀系数; 干密度; 含水率; 升温速率; 气氛环境

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)02-0377-07

**作者简介:** 曹胜飞(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高放废物地质处置缓冲材料研究工作。E-mail: csf831016@163.com。

## Experimental study on thermal expansion properties of GMZ bentonite

CAO Sheng-fei<sup>1,2</sup>, LIU Yue-miao<sup>1,2</sup>, XIE Jing-li<sup>1,2</sup>, YAN An<sup>1,2</sup>, GAO Yu-feng<sup>1,2</sup>, TONG Qiang<sup>1,2</sup>

(1. CAEA Innovation Center on Geologic Disposal of High Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China; 2. CNNC Key

Laboratory on Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Laboratory tests are conducted on the compacted Gaomiaozi (GMZ) bentonite by using the DIL 806 thermal dilatometer. The influences of different factors on the thermal expansion properties of the bentonite are systematically analyzed. The thermal expansion coefficient of the bentonite is obtained with the dry density, the heating rate, the water content and the atmosphere environment. The experimental results show that the coefficient of thermal expansion increases with the dry density of the bentonite. The coefficient of thermal expansion decreases with the increase of the initial water content. The coefficient of thermal expansion increases with the increase of the heating rate for the samples with high water content, and the coefficient of thermal expansion decreases with the increase of the heating rate for the drying bentonite. Under the same dry density and water content of the samples, the coefficient of thermal expansion is higher in the air environment than that in the Ar gas environment. The research results have certain reference for analyzing the thermal expansion properties of the bentonite and evaluating the long-term stability of buffer materials for high-level radioactive waste disposal.

**Key words:** GMZ bentonite; coefficient of thermal expansion; dry density; water content; heating rate; atmosphere environment

## 0 引言

高放射性废物(简称高放废物)是一种放射性强、毒性大、核素半衰期长并且发热的特殊废物,需要把它们与人类生存环境长期、可靠地永久隔离,使其在进入生物圈之前衰变到人类可接受的水平。高放废物的安全处置是关系到核工业可持续发展和保护环境、保护公众健康的重大问题。目前世界上公认的安全可靠、技术可行的方法为深地质处置方法。高放废物深地质处置采用多重屏障体系,缓冲材料是填充在废物

罐和地质体之间的最后一道人工屏障,起着工程屏障、水力学屏障、核素阻滞屏障、传导和散失放射性废物衰变热等重要作用<sup>[1]</sup>。国内外大量的研究工作表明,膨润土是较理想的缓冲材料的基材。经过综合对比研究,内蒙古高庙子膨润土矿床被确定为中国高放废物地质处置库缓冲回填材料供给基地的首选矿床<sup>[2]</sup>。

**基金项目:** 国家国防科技工业局项目(地下实验室条件下缓冲材料原位试验安装技术研究)

**收稿日期:** 2021-05-26

在处置库近场环境下, 高放废物释热将引起缓冲材料中温度的升高、应力的变化, 以及矿物成分和性能的改变等。膨润土在高放废物释放的衰变热所引起的热效应作用下将不可避免的产生热膨胀现象, 热膨胀系数是计算热应力的关键参数, 对整个处置库工程设计、缓冲材料设计和安全评价起到重要的作用。因此, 研究膨润土在温度作用下的变形特性具有重要的理论意义和工程价值, 急需开展热膨胀特性试验, 获取不同条件下的高庙子膨润土热膨胀系数。

大量文献研究表明, 热膨胀系数的测试在诸多工程材料中均已大量应用, 如在金属材料、混凝土、岩石、陶瓷和沥青等多种材料中均有相关报道。操龙飞等<sup>[3]</sup>采用高温热膨胀仪对 3 种不同化学成分的钢种进行了热膨胀测量, 得到了线性热膨胀和瞬时线膨胀系数随温度的变化曲线。姚武等<sup>[4]</sup>研究了配合比设计参数对混凝土热膨胀系数的影响, 试验结果表明, 混凝土热膨胀系数随水灰质量比的增大而降低。陈薇等<sup>[5]</sup>开展了高温对 C80 高性能混凝土的线膨胀系数、热膨胀率和微分线膨胀系数的影响, 分析了热膨胀性能变化规律机理, 结果表明, 随着温度升高, 混凝土线膨胀系数和热膨胀率总体呈上升趋势。刘海涛等<sup>[6]</sup>利用自主研发的岩石膨胀系数测试仪对含层理砂岩进行了热膨胀系数试验, 研究了岩石轴向和径向热膨胀系数的变化规律, 结果表明, 随着温度变化, 轴向热膨胀系数与径向热膨胀系数表现出明显的各向异性。马占国等<sup>[7]</sup>通过试验对砂岩热膨胀系数在升温过程和保温过程中的变化规律进行了系统的研究。赵洪宝等<sup>[8]</sup>以石灰岩为对象, 对其在高温下的热膨胀特性进行了试验研究, 结果表明, 高温作用下产生的热膨胀量与时间的关系曲线可以分为 4 个阶段, 热膨胀量的大小与试验温度有关联且为非线性关系。瑞典 SKB 测试了地下试验室不同钻孔中岩石样品在 20℃~80℃的热膨胀系数, 结果表明, 岩石的热膨胀系数几乎呈线性变化, 且与样品的含水率、密度和矿物成分有相关性<sup>[9]</sup>。

国内外学者对高庙子膨润土的其他工程性质如力学性能、渗透性能、导热性能、化学性能等均进行了大量研究。陈皓等<sup>[10]</sup>研究了高庙子膨润土在高温高压下的强度特性; 刘俊新等<sup>[11]</sup>研究了高温及碱性条件对高庙子钠基膨润土膨胀力的影响; 叶为民等<sup>[12]</sup>研究了高压实高庙子膨润土的热传导性能; 谢敬礼等<sup>[13]</sup>研究了北山花岗岩岩屑与高庙子膨润土混合材料的导热性能; 谈云志等<sup>[14]</sup>研究了膨润土受热作用后的水-力性能。但对高庙子膨润土的热膨胀系数测试研究却鲜有报道。目前, 测试热膨胀系数的试验方法主要归纳为 3 种, 分别为顶杆法、示差法和非接触法。非接触法是指试样与位移测量装置不接触, 是一种直接测量的

方法。本文就是采用阴影光的非接触法对不同干密度、不同含水率的高庙子压实膨润土试样进行热膨胀系数测试, 获得热膨胀系数变化规律, 为高放废物地质处置库和工程屏障的长期性能评价提供科学依据。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

本次试验测试采用的膨润土取自内蒙古兴和县的高庙子膨润土矿床主矿区 24 勘探线钻孔 ZK2401 周围 100 m 以内, 采用露天剥离开采的方式获取。天然钠基膨润土矿石在经过去渣、晾晒和筛分后, 采用摆式磨粉机加工成 200 目的膨润土粉末, 并经充分搅拌均匀后装袋备用, 其矿物成分见表 1。

表 1 高庙子钠基膨润土 X 射线衍射法矿物成分

Table 1 Mineral compositions of GMZ-Na-bentonite (%)

土样 编号	蒙脱石	石英	长石	方英石	斜发 沸石	云母
GMZ24	47.7	26.3	16.6	0.9	7.3	1.2

目前, 高放废物地质处置库缓冲材料的设计参数尚未确定, 同时缓冲材料在高放废物地质处置库环境中受到辐射热和地下水入渗等作用影响, 将经历非饱和和到饱和的不同阶段, 因此需研究不同干密度和不同含水率条件下膨润土的热膨胀性能, 为处置库工程屏障设计提供参考依据。

本次试验采用喷雾法, 将天然含水率的膨润土粉末配制成不同含水率的试验样品。计算制样所需的膨润土和加入水的质量, 配制目标含水率分别为 5%, 9%, 13%和 15%的膨润土原料, 装入密封袋, 并密封静置 48 h 以上, 保证样品均匀湿化。压制样品前, 取每个样品袋内的样品均进行含水率的测试。同时为了测试干燥状态下膨润土的热膨胀特性, 特意将天然含水率的膨润土烘干至含水率为 0 用于试验。

对于每一含水率的土样, 按照设计干密度, 称取一定量的膨润土粉末, 利用小型压力试验机和不锈钢压实模具, 将其压制直径 15 mm, 高度 5.5 mm 的不同干密度的圆柱形样品。

### 1.2 试验仪器及方法

试验采用 DIL806 光学热膨胀仪 (如图 1 所示), 可测样品长度为 0.3~30 mm, 可测样品高度最大 10 mm, 位移变化最大 29 mm, 位移分辨率为 50 nm, 温度分辨率为 0.1℃, 最高温度可达 900℃。

该设备采用阴影光的非接触式测量方法, 通过测量电荷耦合器件 (CCD) 探测器上样品的阴影来测量一个方向上样品的绝对尺寸的变化情况。该设备最大的优点就是测量时不与样品进行接触, 不对样品施加

任何负载, 其在本质上是一个绝对的测量, 不受随温度变化的系统热膨胀的影响, 测量值就是实际变化值。在升温过程中, 只有样品经历温度的变化, 光源和检测器与温度相隔离, 因此不需要对设备在使用过程中进行校准。



图 1 DIL806 光学热膨胀仪照片

Fig. 1 Photo of thermal dilatometer

图 2 是膨润土样品热膨胀测试原理示意图, 高强度的 GaN LED 发出平面光, 通过一个扩散单元和准直透镜, 产生高度均匀的、短波平面光。该光的一部分被样品阻挡。有阴影的光束通过远心光学系统进行精细处理, 并由高分辨率的 CCD 探测器记录。数字边缘检测自动确定阴影的宽度, 进而测定样品的尺寸。

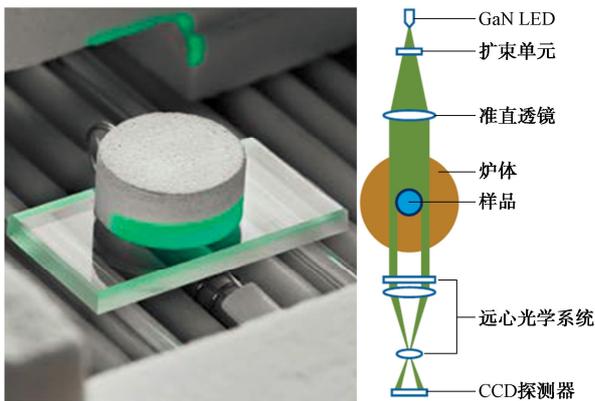


图 2 样品测试原理示意图

Fig. 2 Sketch of testing principle

设备采用板型炉设计形式, 提高了试验中温度均匀性和相应时间。试验样品放置于宽平面加热元件的中心位置, 加热元件的尺寸远大于样品尺寸, 防止在横向方向上的温度梯度。加热腔体顶盖也有一个类似的加热元件, 位于试验样品的正上方, 实现全方位快速加热, 可以最大限度地减少垂直温度梯度。同时在试验加热腔体内设置两个温度传感器, 可以同时监测并显示腔体温度和试验样品处的温度, 试验测试数据更加准确。

该试验仪器设置有气体循环系统, 可以外接惰性气体, 在试验过程中, 启动气体循环系统, 调节进气压力和流量等参数, 可以将试验腔体内气氛环境快速调节至无氧环境并维持无氧条件, 用于测试不同气氛环境下试验样品的热膨胀性能。

### 1.3 试验方案

在空气氛围和氩气(无氧环境)氛围下, 以 1~10°C/min 的升温速率将不同含水率和干密度的压实膨润土试样从室温加载至指定的试验温度 90°C, 测定随温度升高试样尺寸的变化值, 从而获得试样随温度升高的线膨胀率和指定温度范围的平均线膨胀系数。不同试验样品的测试方案如表 2 所示。

表 2 试验样品测试方案

Table 2 Test schemes of samples

序号	试样干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	升温速率 / (°C·min <sup>-1</sup> )	气氛环境
1	1.5~1.9	0, 5.6, 9.34, 13.31	5	氩气
2	1.5~1.8	0, 5.6, 9.34, 13.31, 15.17	5	氩气
3	1.5~1.7	0, 9.34, 13.31	1, 5, 10	氩气
4	1.5~1.7	0, 9.34, 13.31	5	氩气 空气

## 2 试验结果分析

### 2.1 膨润土干密度影响分析

根据试验设计, 称取一定质量的不同含水率膨润土样品, 采用单轴静力压制方法将其压制干密度为 1.5~1.9 g/cm<sup>3</sup> 的试验样品。在氩气氛围下, 设置升温速率为 5°C/min, 测试样品从室温至 90°C 加热环境下的平均热膨胀系数。

样品热膨胀系数随干密度的变化曲线如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 对于干密度为 1.5~1.9 g/cm<sup>3</sup> 的试验样品, 其平均热膨胀系数随样品干密度的增大而增大。同时可以看出, 对于高含水率的试验样品, 其热膨胀系数为负值, 表明样品在 90°C 环境下实际处于收缩状态, 但整体趋势也是随干密度增大而增大。这是因为膨润土样品的压实密度越高, 颗粒排列越紧密, 试验样品的孔隙比减小, 单位体积内膨润土颗粒由于受热产生的热膨胀量也越大, 因此膨润土样品的热膨胀系数将随着干密度的增大而增大。

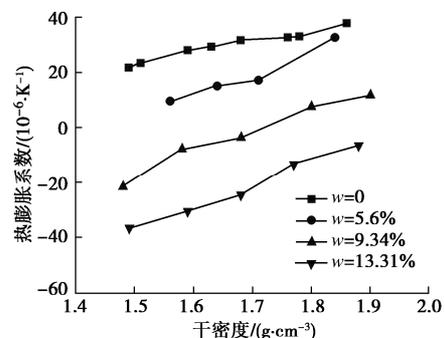


图 3 热膨胀系数随样品干密度变化曲线

Fig. 3 Relationship between coefficient of thermal expansion and dry density of samples

### 2.2 膨润土含水率影响分析

膨润土在处置库环境下由于受到地下水的渗流作

用,将会由非饱和状态逐渐达到饱和状态,因此有必要研究不同含水率状态下膨润土样品的热膨胀系数,为全过程的数值模拟研究提供更加精准的数据支撑。为此,针对不同的干密度范围,压制了不同含水率的膨润土样品,在氩气氛围下,设置升温速率为 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,测试样品热膨胀系数随含水率的变化关系。

膨润土样品的热膨胀系数随含水率的变化曲线如图4所示,从图4中可以看出,对于不同的干密度样品,其热膨胀系数均随着含水率的增大而减小。这主要是因为非饱和的膨润土样品在加热作用下由于失水而产生收缩现象,含水率的增加对土体的收缩有一定的促进作用<sup>[10]</sup>,即含水率越大,失水收缩越严重。因此,针对同一干密度条件的试验样品,在膨润土颗粒受热膨胀和失水收缩的双重作用下,其整体表现为热膨胀系数随含水率的增加而呈现减少的趋势。

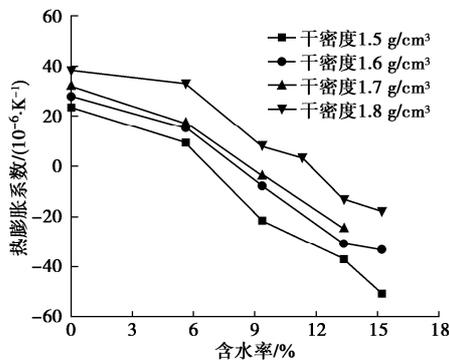


图4 热膨胀系数随样品含水率变化曲线

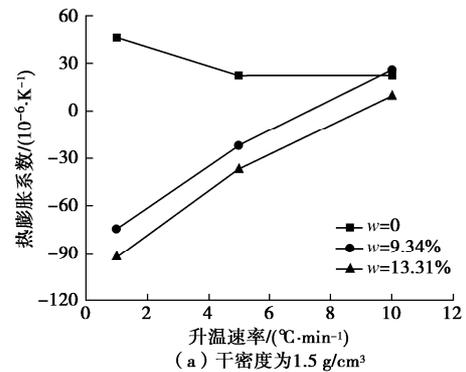
Fig. 4 Relationship between coefficient of thermal expansion and water content of samples

### 2.3 升温速率影响分析

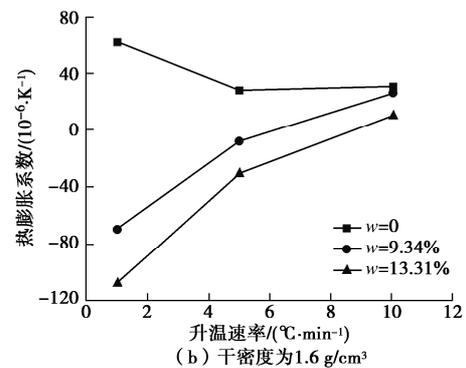
在处置库建造和关闭后,废物罐将在上万年的时间里长期处于释热状态,由于高放废物的衰变热不断递减,产生的烘干效应也随之衰减,因此有必要研究不同升温速率条件下膨润土样品的热膨胀系数,用于评价不同阶段缓冲材料的热膨胀特性。针对干密度为 $1.5\sim 1.7\text{ g}/\text{cm}^3$ ,含水率为0, 9.34%和13.31%的试验样品,在氩气氛围下,分别设置1, 5,  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的不同升温速率,测试样品从室温至 $90^{\circ}\text{C}$ 加热环境下的平均热膨胀系数。

膨润土样品热膨胀系数随升温速率的变化曲线如图5所示,从图中可以看出,不同的升温速率对不同含水率的膨润土样品影响具有显著的差别。对于含水率为0的试验样品,在 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下的热膨胀系数最大,而5,  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下差别较小。这是因为膨润土在含水率为0时,其热传导系数较小,在 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率下,达到预设的 $90^{\circ}\text{C}$ 环境时所需的时间较长,试验历时约60 min,试验样品内部颗粒得以充分受热而产生热膨胀,导致样品整体的热膨

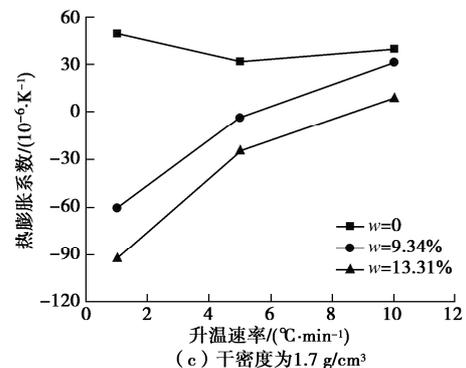
胀量明显增大。而正是由于样品较小的热传导系数,在有限的加热时间内,5,  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率下对其内部颗粒的影响相对较小,表现出的热膨胀系数变化也无明显差别。但是对于具有一定含水率的膨润土样品,不同的升温速率对其热膨胀系数的影响表现为热膨胀系数随升温速率的提高而增大。这是由于在不同的升温速率下,膨润土失水收缩量差别较大引起的,如前文所述,膨润土样品的热膨胀量变化主要是受固体颗粒的热膨胀量和失水收缩量双重作用的影响。热膨胀试验结束后,对样品进行了含水率测试,试验后样品的残余含水率随升温速率的变化关系如图6所示,从图6中可以看出,升温速率越大,在试验中失水也越少,最终导致试验样品的热膨胀系数增大。同时不同的干密度样品对应的残余含水率也印证了压实试样的初始状态对体积收缩有重要的影响,即干密度的增加对土体的收缩有一定的抑制作用<sup>[15]</sup>。



(a) 干密度为 $1.5\text{ g}/\text{cm}^3$



(b) 干密度为 $1.6\text{ g}/\text{cm}^3$



(c) 干密度为 $1.7\text{ g}/\text{cm}^3$

图5 热膨胀系数随升温速率变化曲线

Fig. 5 Relationship between coefficient of thermal expansion and heating rate

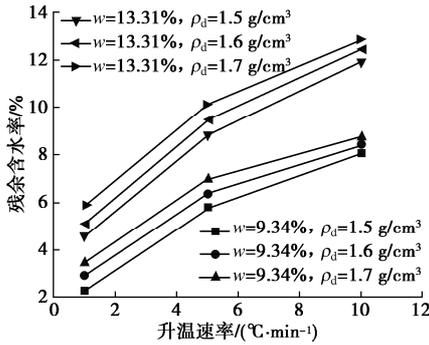


图 6 残余含水率随升温速率变化曲线

Fig. 6 Relationship between residual water content and heating rate

### 2.4 气氛环境影响分析

处置库在关闭后, 由于废物罐的腐蚀和其他物质氧化过程的消耗, 近场环境中的氧气浓度会逐渐降低, 最终达到一个无氧状态, 因此需研究不同气氛环境对膨润土热膨胀系数的影响情况。本次测试即在空气氛围和高纯氩气下的无氧氛围两种气氛条件下测试膨润土的热膨胀系数。

压制了不同含水率和不同干密度的试验样品, 在升温速率为 5°C/min 的条件下, 测试了空气环境和氩气环境下的膨润土样品的热膨胀系数。在不同气氛环境下试验样品的热膨胀系数变化趋势如图 7 所示, 从图 7 中可以看出, 对于同一干密度和含水率的试验样品, 在空气氛围下测出的热膨胀系数均比在氩气氛围环境下测出的热膨胀系数较高。这主要还是由于样品失水收缩引起的, 为了维持氩气的无氧测试环境, 热膨胀仪在试验中一直处于抽真空和补充氩气的状态下。在试验中温度不断升高, 试样水分蒸发, 抽真空过程中水蒸气也将会被抽出, 因此可能会加速膨润土样品水分的流失。

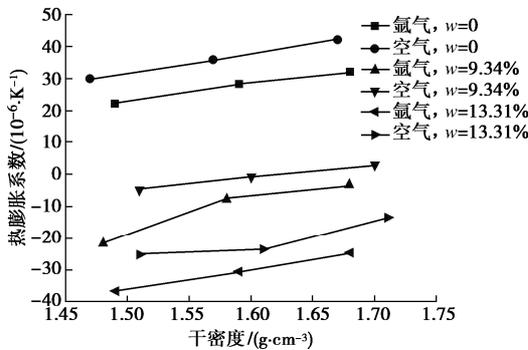


图 7 热膨胀系数随气氛环境变化曲线

Fig. 7 Relationship between coefficient of thermal expansion and heating atmosphere

从图 8 的试验后样品残余含水率变化曲线可以看

出, 同一条件下, 空气环境下试验样品的残余含水率比氩气环境下的要高。因此, 在受热膨胀和失水收缩双重影响下, 表现出空气氛围环境下的热膨胀系数较氩气氛围环境下的高。但是, 对于含水率为 0 的试验样品, 在未有失水收缩的影响下, 膨润土样品的热膨胀系数仍然表现出同样的现象, 可能是因为膨润土中某些矿物成分的膨胀行为受气氛影响有关, 这还有待后续开展试验继续进行分析。

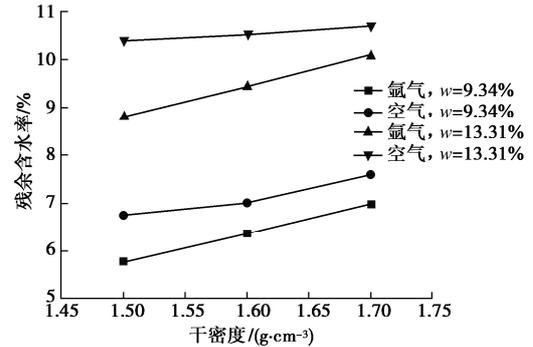
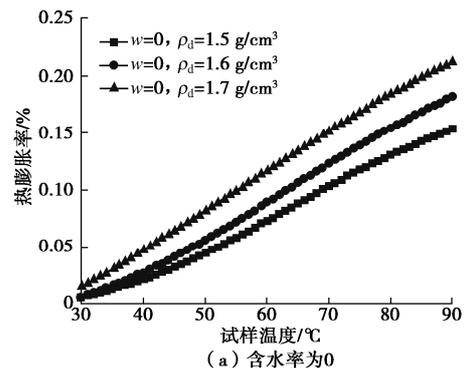


图 8 残余含水率随干密度变化曲线 (不同气氛环境)

Fig. 8 Relationship between residual water content and dry density of samples (at different heating atmospheres)

### 2.5 热膨胀率变化

在非饱和状态下, 膨润土作为一种由固、液和气三相组成的多孔介质材料, 其热膨胀特征在很大程度上取决于试验样品初始含水率的变化情况。在热膨胀试验测试时, 典型的膨润土样品热膨胀率随温度的变化曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出, 对于含水率为 0 的膨润土样品, 其热膨胀率随温度几乎呈线性增大趋势, 且干密度越大的样品其热膨胀率也越高。对于具有一定含水率的膨润土样品, 其热膨胀率变化在低温阶段呈缓慢上升趋势, 在高温阶段由于水分烘干作用明显加强, 试验样品失水收缩效应显著, 膨润土样品的热膨胀率随温度的升高而降低, 并且温度越高下降趋势也越明显。同时从图 9 (b), (c) 也可以看出, 膨润土样品的初始含水率越高, 样品的失水收缩量也越严重。



(a) 含水率为 0

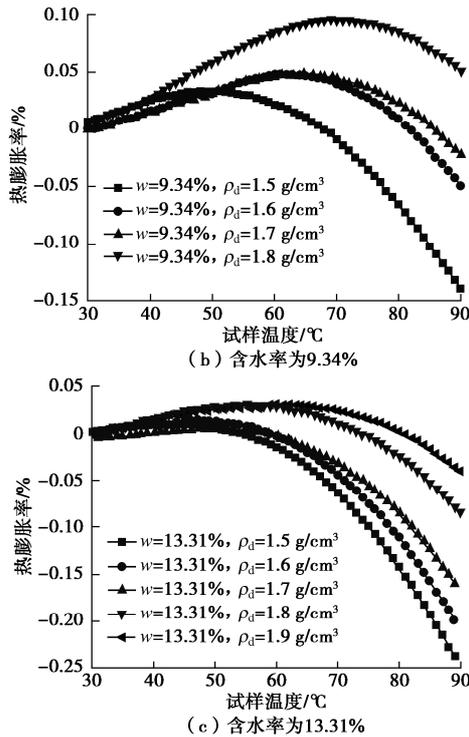


图9 热膨胀率随试样温度变化曲线

Fig. 9 Relationship between thermal expansion rate and temperature

### 3 结 论

本文通过开展缓冲材料热膨胀特性试验,研究了不同干密度、不同含水率的压实高庙子膨润土样品在不同升温速率和不同气氛环境下的热膨胀系数,得到以下4点结论。

(1) 膨润土样品的密度越高,颗粒排列越紧密,试验样品的孔隙比减小,单位体积内膨润土颗粒由于受热产生的热膨胀量也越大,因此膨润土样品的热膨胀系数将随着干密度的增大而增大。

(2) 对于不同的干密度样品,在膨润土颗粒受热膨胀和失水收缩的双重作用下,其整体表现为热膨胀系数随含水率的增加而呈现减少的趋势。

(3) 对于具有一定含水率的膨润土样品,不同的升温速率对其热膨胀系数的影响表现为热膨胀系数随升温速率的提高而增大。但是含水率为0的试验样品,由于其较小的导热系数,较小的升温速率产生的热膨胀系数反而更大。

(4) 对于同一干密度和含水率的试验样品,气氛环境的改变有可能导致其热膨胀系数发生变化,在空气氛围下测出的热膨胀系数均比在氩气氛围环境下测出的热膨胀系数较高。

#### 参考文献:

[1] 王 驹, 陈伟明, 苏 锐, 等. 高放废物地质处置及其若干

关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801 - 812. (WANG Ju, CHEN Wei-ming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 801 - 812. (in Chinese))

[2] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬. 高放废物地质处置库缓冲/回填材料性能测定[J]. 辐射防护, 1998, 18(4): 290 - 295. (LIU Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen. A study on buffer/backfill materials for hlw geological repository[J]. Radialization Protection, 1998, 18(4): 290 - 295. (in Chinese))

[3] 操龙飞, 徐 光, 邓 鹏, 等. 钢的热膨胀特性研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(5): 639 - 643. (CAO Long-fei, XU Guang, DENG Peng, et al. Study on thermal expansion properties of steels[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(5): 639 - 643. (in Chinese))

[4] 姚 武, 郑 欣. 配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 77 - 81, 87. (YAO Wu, ZHENG Xin. Effect of mix proportion on coefficient of thermal expansion of concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(1): 77 - 81, 87. (in Chinese))

[5] 陈 薇, 杜红秀. 高温对 C80 高性能混凝土热膨胀性能及其微结构的影响[J]. 中国科技论文, 2017, 12(13): 1477 - 1481. (CHEN Wei, DU Hong-xiu. Effect of high temperature on thermal expansion and microstructure of C80 high performance concrete[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(13): 1477 - 1481. (in Chinese))

[6] 刘海涛, 周 辉, 胡大伟, 等. 含层理砂岩热膨胀系数的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2841 - 2846. (LIU Hai-tao, ZHOU Hui, HU Da-wei, et al. Experiment study of thermal expansion coefficient of sandstone with beddings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2841 - 2846. (in Chinese))

[7] 马占国, 唐芙蓉, 戚福周, 等. 高温砂岩热膨胀系数变化规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 121 - 126. (MA Zhan-guo, TANG Fu-rong, QI Fu-zhou, et al. Experimental study on thermal expansion coefficient changing rule of sandstone under high temperature[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 121 - 126. (in Chinese))

[8] 赵洪宝, 谌伦建. 石灰岩热膨胀特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1725 - 1730. (ZHAO Hong-bao, CHEN Lun-jian. Experimental study of thermal expansion property

- of limestone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(6): 1725 - 1730. (in Chinese))
- [9] AKESSON U. Extensometer Measurement of the Coefficient of Thermal Expansion of Rock[R]. Stockholm: Swedish National Testing and Research Institute, 2004.
- [10] 陈 皓, 吕海波, 陈正汉. 高庙子膨润土在高温高压下的强度特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(增刊 1): 28 - 33. (CHEN Hao, LÜ Hai-bo, CHEN Zheng-han. Strength properties of GMZ bentonite under high temperatures and pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(S1): 28 - 33. (in Chinese))
- [11] 刘俊新, 唐 伟, 李军润, 等. 高温及碱性条件对高庙子钠基膨润土膨胀力的影响[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(8): 2160 - 2172, 2184. (LIU Jun-xin, TANG Wei, LI Jun-run, et al. An experimental research on swelling pressure of GMZ Na-bentonite submitted to the strong alkali-heat environment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(8): 2160 - 2172, 2184. (in Chinese))
- [12] 叶为民, 王 琼, 潘 虹, 等. 高压实高庙子膨润土的热传导性能[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(6): 821 - 826. (YE Wei-min, WANG Qiong, PAN Hong, et al. Thermal conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(6): 821 - 826. (in Chinese))
- [13] 谢敬礼, 马利科, 高玉峰, 等. 北山花岗岩岩屑-膨润土混合材料导热性能研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(8): 2823 - 2828, 2843. (XIE Jing-li, MA Li-ke, GAO Yu-feng, et al. Thermal conductivity of mixtures of Beishan bentonite and crushed granite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(8): 2823 - 2828, 2843. (in Chinese))
- [14] 谈云志, 李 辉, 王培荣, 等. 膨润土受热作用后的水-力性能研究[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(2): 489 - 496. (TAN Yun-zhi, LI Hui, WANG Pei-rong, et al. Hydro-mechanical performances of bentonite respond to heat-treated history[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(2): 489 - 496. (in Chinese))
- [15] 唐朝生, 崔玉军, TANG A H, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(8): 1271 - 1279. (TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG A M, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(8): 1271 - 1279. (in Chinese))

## 勘 误

本刊 2021 年 (第 43 卷) 第 12 期第 2283 页“横观各向同性非饱和土的增量非线性本构模型及参数变化规律研究”(作者: 郭 楠, 陈正汉, 杨校辉, 郭剑峰)一文中,“基金项目: 国家自然科学基金项目(11672330); 甘肃省青年科技基金计划项目(20JR10RA200, 20JR5RA434); 甘肃省高校创新基金项目”有误, 应为“基金项目: 国家自然科学基金项目(11672330, 52168051); 甘肃省青年科技基金计划项目(20JR10RA200, 20JR5RA434); 甘肃省高校创新基金项目(2020A-031)”, 特此更正。

(本刊编辑部)