

DOI: 10.11779/CJGE201902005

# 石英砂掺量对膨润土-砂混合物泥浆样干缩开裂的控制机制

张虎元<sup>1</sup>, 谭煜<sup>2</sup>, 何东进<sup>2</sup>, 张国超<sup>2</sup>

(1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 高放废物地质处置工程中, 膨润土-砂混合物作为缓冲回填材料的干缩开裂特征对工程屏障的安全性有重要影响。以混合型缓冲回填材料为研究对象, 分别制备掺砂率为0%~50%膨润土-砂的浆状试样, 通过室内恒温干燥试验, 研究混合物的干缩开裂特征。结果表明: 当掺砂率小于30%时, 混合物的收缩曲线与径向应变曲线均基本重合, 石英砂悬浮在膨润土中, 混合物的干缩开裂特性由膨润土决定; 当掺砂率大于30%时, 混合物中石英砂逐渐相互接触, 增加了颗粒间的摩擦力且有大孔隙形成, 进而能够抑制混合物的干缩开裂。石英砂颗粒的相互接触显著提高了混合物进气值, 略微提高了缩限, 限制了混合物的干燥收缩。大孔隙的形成导致毛细水作用力的降低; 颗粒间摩擦力的增加, 增强了混合物抵抗断裂的能力, 进而抑制了混合物干燥裂隙的发展。最终确定了抑制膨润土-砂混合物干缩开裂的最低掺砂率为30%。

**关键词:** 缓冲回填材料; 膨润土-砂混合物; 掺砂率; 土收缩特征曲线; 缩限; 进气点; 干燥开裂

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)02-0277-09

**作者简介:** 张虎元(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事与废弃物处置有关的环境岩土工程方面的教学与研究工作。

E-mail: zhanghuyuan@lzu.edu.cn.

## Influence mechanism of quartz sand content on drying shrinkage and crack of paste-like bentonite-sand mixtures as buffer/backfill materials

ZHANG Hu-yuan<sup>1</sup>, TAN Yu<sup>2</sup>, HE Dong-jin<sup>2</sup>, ZHANG Guo-chao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China (Lanzhou University), Ministry of Education, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The shrinkage and crack characteristics of bentonite-sand mixtures as buffer/backfill materials play an important role in the security of high-level radioactive waste (HLW) geological disposal. In this investigation, the paste-like bentonite-sand mixtures with sand ratios of 0% to 50% in dry mass are prepared and subjected to indoor thermostatic drying in order to study their volumetric shrinkage and desiccated crack behaviors. The tests results indicate that when the sand ratio is less than 30%, the soil shrinkage characteristic curves (SSCC) and radial shrinkage strain curves are almost identical, respectively, indicating that the shrinkage and crack characteristics of the mixtures are dominated by bentonite because sand particles are suspended in bentonite powders without interaction. When the sand ratio is larger than 30%, the sand particles gradually contact to increase friction, and larger pores are formed by sand mixing, a phenomenon which restrains the shrinkage and crack development of the paste-like mixtures. The amount of air entry remarkably increases, and the shrinkage limit slightly increases because of the increased contact of sand particles, indicating the restraint of shrinkage of bentonite. Larger pores weaken the capillary force, and a higher fraction reinforces the cap ability of the mixtures to resist fractures, a phenomenon which directly restrains the extension of drying cracks. The minimum sand ratio to restrain shrinkage and desiccated crack propagations of the paste-like bentonite-sand mixtures is 30%.

**Key words:** buffer/backfill material; bentonite-sand mixture; sand ratio; soil shrinkage characteristic curve; shrinkage limit; air entry; desiccated crack

## 0 引言

中国高放废物处置工程中, 深地质处置法是最可

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672261); 中央高校基本科研业务费专项项目(lzujbky-2016-k15, lzujbky-2017-ct02)  
收稿日期: 2017-12-12

行的处置方法,高庙子(GMZ)膨润土是建造缓冲屏障的最优材料<sup>[1]</sup>。以压实膨润土为主要材料的缓冲屏障,在建造过程中如果遇到环境湿度变低,就可能干燥失水<sup>[2]</sup>;即使在处置库运行过程中,靠近处置库密封容器一侧的缓冲屏障也会由于辐射热量而干燥失水<sup>[3]</sup>。膨润土缓冲屏障在干燥失水过程中将不可避免地产生收缩开裂现象。收缩会扩大缓冲屏障与围岩、密封容器之间的间隙,开裂会产生力学缺陷、水力缺陷,这都严重破坏了缓冲屏障的基本功能,甚至会导致屏障失效。

缓冲回填材料的收缩开裂问题引起了足够的关注。唐朝生等<sup>[3]</sup>研究了糊状和压实的COx泥岩缓冲回填材料的体积收缩变形特征;Uday等<sup>[4]</sup>用图像处理技术,研究了不同温湿度环境条件下膨润土的开裂特征;Sanden等<sup>[2]</sup>通过室内试验展示了压实膨润土块在不同湿度下的破坏过程;Dixon等<sup>[5]</sup>对缓冲屏障进行了长达2.5 a和6.5 a的现场试验。但以上研究只关注缓冲回填材料的水分分布、干密度分布、渗透系数分布、应力分布、裂纹扩展等特征,对限制缓冲回填材料干缩开裂的研究较少。土体收缩的影响因素方面,Tay等<sup>[6]</sup>和Birle等<sup>[7]</sup>的研究均表明初始含水率对土体收缩性影响较强,初始压实作用对收缩性的影响不显著。但是制备缓冲回填材料的初始条件需综合考虑压实、膨胀、渗透等多方面因素,很难通过控制初始条件来抑制其收缩性。

前人研究发现,石英砂的掺入能够在一定程度上降低黏土的收缩能力<sup>[8]</sup>。石英砂颗粒被认为是不可膨胀的,如果向膨润土中掺入石英砂,砂将在收缩过程中起到骨架支撑作用,进而限制土体的干缩开裂。Emiroglu等<sup>[9]</sup>证明了砂的掺入能够降低黏土的收缩性,抑制干燥裂隙的发展;Prakasha等<sup>[10]</sup>用三轴试验分析了砂限制黏土开裂的机理。同时,在石英砂掺量小于50%时,GMZ膨润土-砂混合物能够满足缓冲回填材料对渗透性<sup>[11-12]</sup>、强度特性<sup>[13]</sup>、膨胀特性<sup>[14-15]</sup>、热传导特性<sup>[16]</sup>的要求。因此,向GMZ膨润土中掺入石英砂应该能够起到抑制土体干缩开裂的效果。目前,石英砂对膨润土-砂混合物干缩开裂的控制机制仍有待研究,确定抑制GMZ膨润土-砂混合物干缩开裂的石英砂掺量的范围则有助于缩小后期压实膨润土砌块的研究范围。

为此,本文以浆状膨润土-砂混合物为研究对象,在0%~50%范围内设置不同的掺砂率,开展室内恒温干燥试验,研究不同掺砂率的混合物在失水过程中的干缩开裂特征,揭示石英砂对混合物干缩开裂的控制机制。相关研究成果对中国缓冲回填材料的优化具有重要的指导意义。

## 1 试验材料与方法

本文选用掺砂率为0%~50%的浆状膨润土-砂混合物进行室内恒温干燥试验。将浆状混合物置于25±1℃室内进行自由干燥,测试干燥过程中试样的含水率、体积和直径,获取试样的收缩曲线和径向收缩应变曲线。同时,拍照记录试样的开裂情况,分析掺砂率对干燥开裂过程的影响。

### 1.1 试验材料

试验所采用的膨润土产自内蒙古兴和县高庙子乡,简称“GMZ膨润土”,相对密度为2.70,以小于0.005 mm的黏粒为主,颗粒级配曲线见图1,风干含水率约为9%。石英砂骨料产自中国石英砂岩六大储藏地之一的甘肃永登县,相对密度为2.65,粒径以0.2~2.0 mm为主,硅石含量大于99%。不同掺砂率的混合物塑限<sup>[17]</sup>见图2。

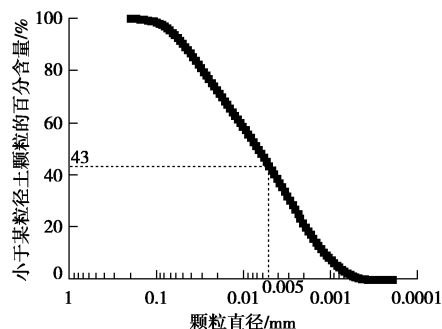


图1 膨润土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of bentonite

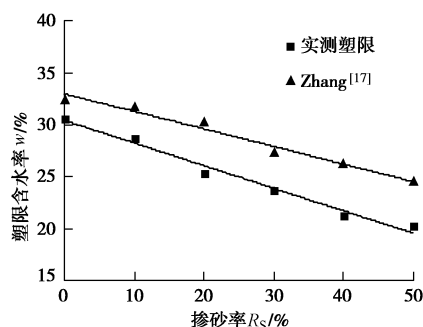


图2 膨润土-砂混合物塑限

Fig. 2 Plastic limits of bentonite-sand mixtures

本文使用的试验材料为膨润土-砂混合物,它是由石英砂颗粒和膨润土颗粒组成的两相固态混合体系,黏土颗粒与石英砂颗粒的粒径相差约2个数量级,属于典型的缺乏中间粒径的“混合土”<sup>[13]</sup>。混合土的颗粒密度是一个重要的物理参数。本文基于体积平均的原理,推导出混合土平均颗粒密度的计算公式(2),该方法与Komine<sup>[18]</sup>计算三相混合物颗粒密度的公式相吻合。

混合物的掺砂率为  $R_S$ , 即

$$R_S = m_{\text{sand}} / m_{\text{s,mix}} \times 100\% \quad (1)$$

混合物的平均颗粒密度:

$$\rho_{\text{s,mix}} = \frac{100\rho_{\text{s,sand}}\rho_{\text{s,ben}}}{(\rho_{\text{s,ben}} - \rho_{\text{s,sand}})R_S + 100\rho_{\text{s,sand}}} \quad (2)$$

式中,  $m_{\text{sand}}$ ,  $m_{\text{s,mix}}$  分别为石英砂, 混合物的干质量,  $\rho_{\text{s,sand}}$ ,  $\rho_{\text{s,ben}}$  分别为石英砂、膨润土的颗粒密度。

1.2 试样制备

为了研究膨润土-砂混合物的自由收缩, 本文选用初始饱和的浆状膨润土-砂试样。试样初始含水率均高于五倍塑限, 尽可能地避免团聚体的形成。采用浆状样品能够扩大干缩开裂效应, 使石英砂对混合物干缩开裂的抑制现象更加明显。

配置试样时, 先将干膨润土与砂按照设定质量比混合, 然后将固体混合物加入设定质量的水中, 让固液均匀混合。将混合好的浆状混合物放置密闭容器中静置 1 d, 使其均匀湿化。最后将混合物装入聚苯乙烯 (PS) 盘中待用。装样前需在 PS 盘内部均匀涂布适量凡士林以减少试样与盘壁的摩擦, 并记录 PS 盘的质量。将混合物均匀挤入 PS 盘中, 通过拍打、振动等方式尽量避免气泡的形成, 最后用小刀将试样顶部刮平, 记录其总质量。试样初始参数见表 1。

表 1 试验设计

Table 1 Test design

试样 编号	掺砂率 /%	颗粒密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	含水 率/%	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	直径 /cm	高度 /cm
S0	0	2.700	150	0.488	8.35	1.34
S1	10	2.695	144	0.505		
S2	20	2.690	134	0.534		
S3	30	2.685	126	0.562		
S4	40	2.680	116	0.594		
S5	50	2.675	105	0.643		

1.3 试验方法

测定试样干燥过程中的含水率、体积、直径及裂隙发展情况, 研究膨润土-砂混合物的干缩开裂特性。本试验含水率采用称重计算的方法, 根据试样质量、初始含水率计算试样含水率, 以减小对试样的扰动; 试样体积测量采用平行样品基于阿基米德原理的液体石蜡法<sup>[19]</sup>; 试样直径采用同一样品用游标卡尺测 4 次取平均值的方法, 每次测量直径间隔约 45°, 避免试样不呈规则圆形带来的测量误差; 裂隙发展情况采用同一试样连续拍照记录的方法。获得实测收缩曲线后, 用模型进行拟合拟合, 并用模型对曲线进一步分析, 求得试样缩限。最后用试样的收缩应变曲线类比缩限试验 (SL237—026—1999)<sup>[20]</sup>求得其缩限, 与模型分析方法对比, 相互验证。

1.4 收缩曲线及模型

一般来说, 重塑糊状土的干燥收缩过程可以分为 3 个阶段: ①比例收缩 (Groenevelt 等<sup>[21]</sup>), ②残余收缩, ③零收缩。比例收缩阶段, 随着水分的散失, 土体体积开始减少, 减少量等于散失水分的体积, 故收缩曲线斜率为 1。残余收缩阶段, 随着水分的进一步蒸发, 空气进入团聚体间孔隙中, 水分散失速率将大于土体体积收缩速率, 收缩曲线开始偏离 1:1 线。表明土体收缩开始受到限制, 颗粒相互接触顶压从而使得其体积减小量降低, 比例收缩阶段与残余收缩阶段的分界点为进气点, 对应的质量含水率为进气值。零收缩阶段, 土体达到最密实的状态, 土体体积不再随着水分的散失而减少<sup>[22-23]</sup>。残余收缩阶段与零收缩阶段的分界点对应的质量含水率称为缩限 (为了方便表述, 本文将进气点、缩限对应的体积含水比分别标注为进气值和缩限)。土体具体收缩过程见示意图 3。

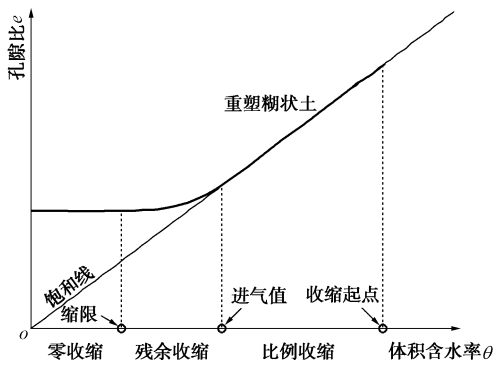


图 3 土体收缩曲线示意图

Fig. 3 Schematic presentation of SSCCs

通过试验获得的收缩曲线由一系列离散的点组成, 不利于收缩曲线的定量分析。因此, 许多学者提出了相应的数学模型来描述收缩曲线。Groenevelt 等<sup>[24-25]</sup>提出了在荷载作用下土体收缩曲线的模型, 在荷载为零时, 其表达式为

$$e = \xi + k_3 \left[ \exp \left( -\frac{k_0}{\theta^n} \right) - \exp \left( -\frac{k_0}{\varepsilon^n} \right) \right] \quad (3)$$

式中  $\theta$  为体积含水率;  $e$  为  $\theta$  含水率对应的孔隙比,  $\xi$  为试样初始孔隙比;  $k_3$  为与进气值和残余阶段收缩范围有关的参数;  $k_0$  为与残余阶段孔隙比范围有关的参数;  $n$  为与饱和状态有关的参数<sup>[26]</sup>。Groenevelt 等<sup>[24]</sup>给出了各参数的详细定义。

已知干燥结束时的孔隙比  $e_0$  时, 式 (3) 可以整理成只有两个参数  $k_0$  和  $n$  的模型:

$$e = e_0 + (\xi - e_0) \exp[k_0(\xi^{-n} - \theta^{-n})] \quad (4)$$

本文称为 Gro 模型。该模型与 Cornelis 等<sup>[26]</sup>重新整理和修正以后的公式完全等价。

对于试样的缩限, Groenevelt 等<sup>[21, 25]</sup>研究表明, Gro 模型的二阶导数靠近干燥端的极值为残余收缩与零收缩的分界点, 即该点对应的质量含水率为缩限。同时, 缩限是指土体体积不再减小时的质量含水率, 则在土体收缩应变曲线中, 应变不再增加时的质量含水率也表示缩限<sup>[3, 20]</sup>。

对于试样的进气点, 根据收缩曲线特征, 比例收缩阶段土体体积减少量等于水分体积减少量, 浆状试样初始饱和度接近 100%, 土体饱和度随着体积含水比的减小近似呈水平直线; 零收缩阶段, 土体体积不再随水分变化而变化, 饱和度随着体积含水比的减小近似呈直线降低。两直线的交点为比例收缩与残余收缩的分界点, 即为进气点。

2 试验结果

2.1 收缩曲线

本文通过对干燥过程中的平行样品进行体积、质量的测量, 得到了不同掺砂率条件下膨润土-砂混合物的收缩曲线, 见图 4。在干燥初始阶段, 实测 SSCC 略高于 1:1 线 (饱和线), 说明制样时未能完全消除浆液中的气泡, 试样初始饱和度低于 100%。随着含水率的降低, 曲线基本呈直线下降, 并逐渐靠近饱和线, 不具有结构收缩阶段<sup>[22]</sup>, 试样直接进入比例收缩阶段。此阶段土体减小体积基本等于失去水分体积, 不同掺砂率的膨润土-砂混合物试样收缩曲线重合, 并且有趋于饱和的趋势。取体积含水比为 0~2 的局部收缩曲线放大, 见图 4。由图 4 可知, 掺砂率为 0%~30% 时, 试样的收缩曲线基本重合; 当掺砂率进一步升高时, 曲线略微升高, 具有较高的缩限和最终孔隙比。

结果表明, 在膨润土-砂混合物中, 当掺砂率小于 30%, 石英砂的掺入对混合物的收缩性影响较小; 当掺砂率高于 30% 时, 浆状膨润土-砂混合物的收缩特性受到一定程度上的抑制。

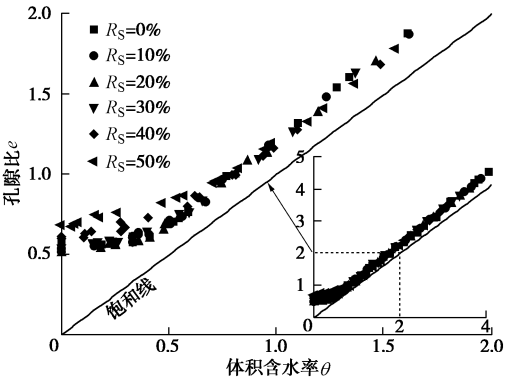


图 4 实测收缩曲线  
Fig. 4 Measured SSCCs

2.2 缩限

(1) Gro 模型拟合法

将不同掺砂率的膨润土浆实测 SSCC 用 Gro 模型进行拟合, 用  $R^2$  表示 Gro 模型拟合效果, 见图 5。在试样初始不完全饱和的情况下, 模型拟合程度绝大部分大于 95%, 证明 Gro 模型能够很好地描述混合物的收缩过程。对拟合曲线进行求导, 并计算 Gro 模型二阶导数的极值点所对应的质量含水率, 即混合物缩限, 结果见图 5。图 5 中混合物的体积含水率比可以换算成质量含水率:

$$\theta = \frac{w_m}{100} \times \frac{\rho_{s, \text{mix}}}{\rho_w} \quad (5)$$

式中,  $\theta$  为体积含水率,  $w_m$  为膨润土-砂混合物的质

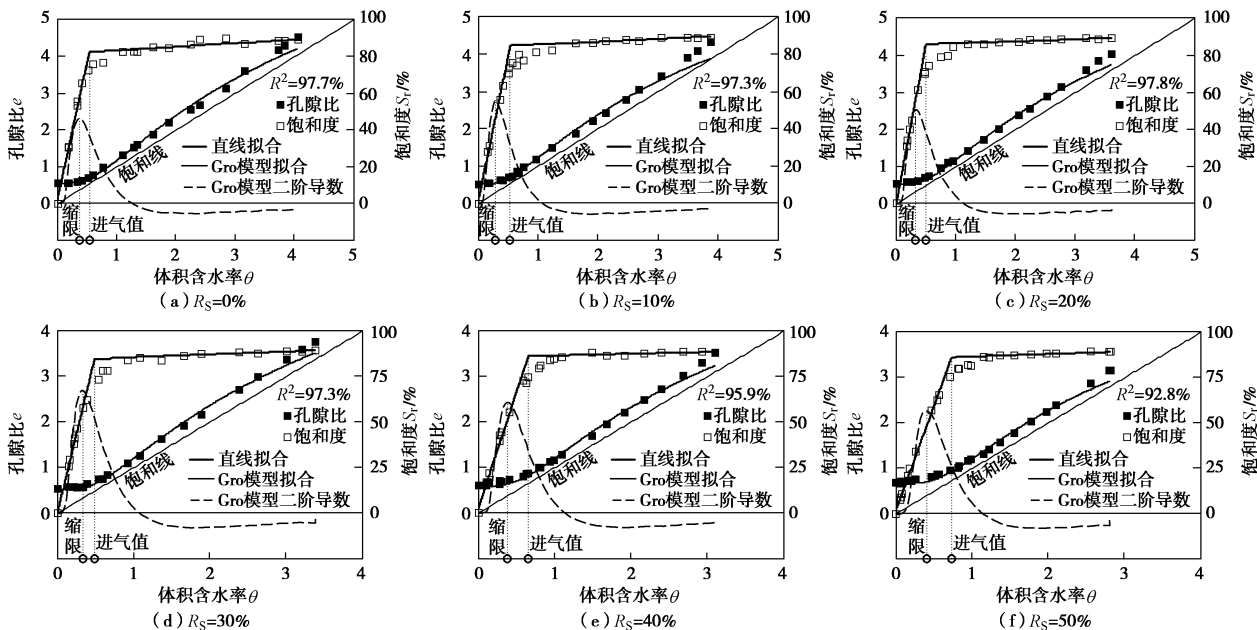


图 5 收缩曲线拟合及曲线分界点

Fig. 5 Fitted SSCCs and demarcation points

量含水率,  $\rho_{s, \text{mix}}$  和  $\rho_w$  分别为混合物平均颗粒密度和水的密度。

## (2) 径向收缩应变曲线法

本文在测定收缩曲线的同时, 测定特定样品在干燥过程中的直径变化。因为浆状样品在收缩过程中产生明显的翘曲现象, 使得样品垂向应变测量不准确, 所以本文只研究试样径向收缩规律。因为试样的初始含水率不同, 所以均取干燥过程中含水率约 100% 处的试样直径为初始直径  $d_0$ , 使得不同初始含水率的试样具有可比性。试样在不同含水率条件下的径向收缩应变计算表达式为

$$\varepsilon = \frac{d_0 - d}{d_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $d$  为试样干燥过程中某时刻的直径。

将不同掺砂率的浆状膨润土-砂混合物试样的径向收缩应变随质量含水率的变化绘制于图 6。

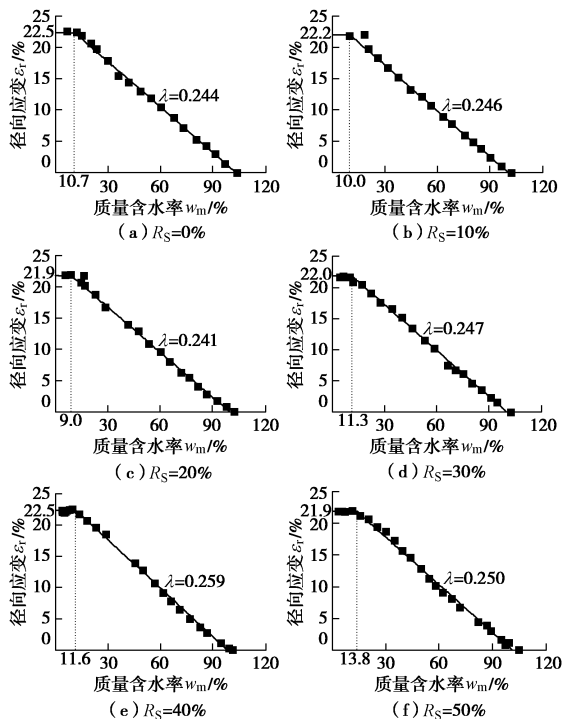


图 6 径向收缩应变曲线

Fig. 6 Curves of radial shrinkage strain

由图 6 可以看出可知, 不同掺砂率条件下, 试样的径向收缩规律基本相同。表明当掺砂率小于 50% 时, 石英砂的掺入对浆状膨润土-砂混合物的径向收缩应变影响较小。根据标准<sup>[20]</sup>中击实黏质土缩限的测试方法, 浆状膨润土-砂混合物的径向收缩应变与击实黏质土有着相似的规律: 在干燥初期, 试样径向收缩应变随着含水率的降低呈直线增加, 最终径向收缩应变趋于稳定, 直线段斜率为径向收缩系数  $\lambda$ 。将初始斜直线与最终水平线均延长相交, 交点对应的含水率为试样缩限。需要说明的是, 由于浆状试样在干燥过程中存在明显开裂和翘曲现象, 使得直径测量的精度受到

一定的影响。同时欠压实的浆状试样在收缩过程中, 受重力等因素的影响, 收缩以轴向收缩为主<sup>[3]</sup>, 因此石英砂的掺入对混合物径向收缩的抑制作用不明显。

## 2.3 进气点

将实测收缩曲线上每一实测点对应的饱和度计算出来, 同样绘制于图 5 中。比例收缩阶段试样近饱和, 饱和度随着体积含水比的减小呈近水平直线; 零收缩阶段, 试样体积不再变化, 饱和度随着体积含水比的降低线性降低。分别用直线拟合两阶段, 两直线交点认为是比例收缩与残余收缩的分界点, 即进气点, 见图 5。

## 2.4 开裂现象

膨润土-砂混合物在干燥失水过程中, 整体表现为体积收缩; 局部由于失水速率不同, 导致内部应力分布不均匀, 当表面拉荷载大于材料强度时, 混合物将产生干燥裂隙。干燥结束时试样照片见图 7 (图中 PS 盘外径均为 8.59 cm)。由图可知, 在掺砂率低于 30% 时, 裂隙垂向完全贯通整个试样, 径向甚至将试样切割成两部分; 随着掺砂率的增加, 当掺砂率大于 30% 时, 裂隙发展深度逐渐减小, 裂隙未能贯穿试样; 当掺砂率达到 50% 时, 裂隙表面只发育肉眼可见的微小裂隙, 试样整体较完整。可见, 随着掺砂率的增加, 混合物裂隙垂向和径向的发展均受到抑制。当掺砂率大于 30% 时, 未见贯穿试样的裂隙形成, 石英砂能够有效抑制干燥裂隙的扩展, 降低裂隙对试样的破坏。

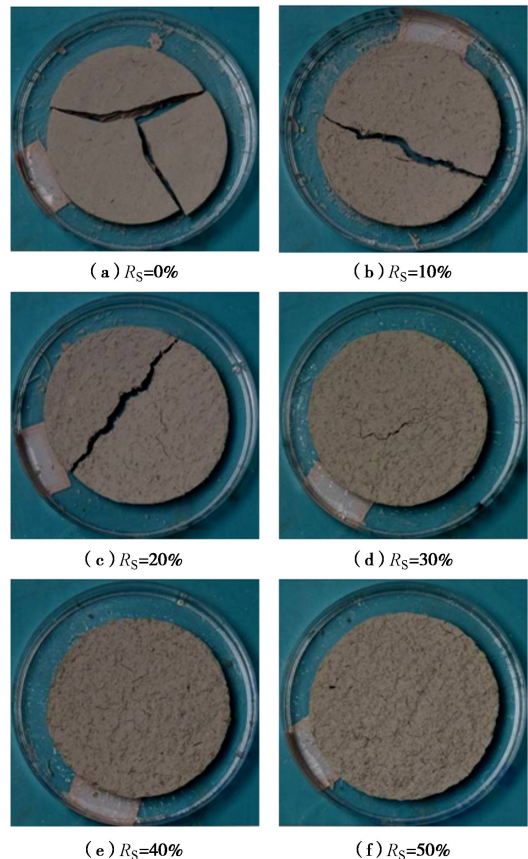


图 7 干燥结束时试样裂隙发展

Fig. 7 Cracks of specimens at the end of desiccation

### 3 分析与讨论

#### 3.1 混合物收缩特征

从混合物的收缩曲线可以定性看出, 当掺砂率小于 30% 时, 浆状膨润土-砂混合物的收缩曲线基本重合; 只有当掺砂率大于 30% 时, 浆状膨润土-砂混合物的收缩曲线才明显上移, 具有较高的最终孔隙比, 收缩性受到抑制。本文通过收缩曲线三阶段两个界限点(进气点和缩限)对膨润土-砂混合物的收缩特性进行定量分析。需要引起注意的是, 在膨润土-砂混合物中, 石英砂基本不含水, 可以认为混合物中的水均赋存在膨润土中, 则膨润土的实际含水率与混合物的含水率存在一定的偏差。为此, 本文将混合物中膨润土的含水率称为有效含水率  $w_b$ , 修正表达式为

$$w_b = \frac{100}{100 - R_s} w_m, \quad (7)$$

式中,  $w_m$  为膨润土-砂混合物的质量含水率,  $R_s$  为掺砂率。

将试验求得的膨润土-砂混合物的进气值、缩限换算成有效含水率, 分别称为有效进气值和有效缩限, 见图 8。由图 8 可知, 有效进气值随着掺砂率的升高而逐渐升高, 当掺砂率大于 30% 时, 升高速率明显加快。说明, 石英砂的掺入能够在一定程度上抑制膨润土-砂混合物的收缩。

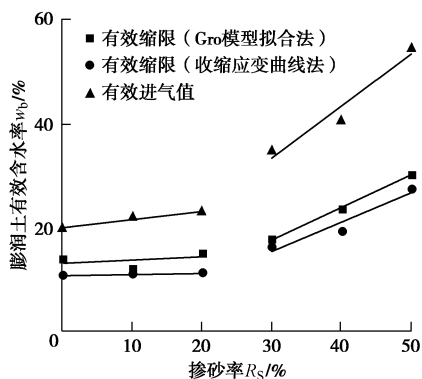


图 8 收缩曲线界限点

Fig. 8 Demarcation points of SSCCs

用应变曲线求得的混合物缩限明显低于 Gro 模型求得的缩限。因为浆状试样收缩过程中产生了翘曲现象, 使得测定的最终收缩应变较实际值偏大, 进而导致了求得的缩限偏低。两种方法求得的缩限趋势相近, 证明用 Gro 模型二阶导数干燥端最值求土体缩限是可行的。当掺砂率小于 30% 时, 混合物有效缩限接近; 当掺砂率大于 30% 时, 混合物有效缩限明显增加。该结果同样说明了当掺砂率大于 30% 时, 石英砂的掺入能够有效抑制膨润土-砂混合物的收缩。

#### 3.2 石英砂对膨润土-砂混合物干燥收缩的控制机制

试验结果表明, 30% 是控制膨润土-砂混合物收缩特性的一个界限掺砂率。同时, 国内对 GMZ 膨润土-砂混合物的大量研究表明, 混合物的黏聚力、内摩擦角<sup>[13]</sup>、热传导系数<sup>[16]</sup>和膨胀力<sup>[14-15]</sup>均在掺砂率为 30% 时产生明显变化。可以推断, 当掺砂率增加到 30% 时, 膨润土-砂混合物中砂颗粒、膨润土颗粒及孔隙的相对密度达到临界值, 各部分相对密度的变化能够改变混合物的基本性质。如砂颗粒相对密度的增加能够增强混合物的热传导特性<sup>[16]</sup>。除了砂颗粒的相对密度之外, 砂颗粒与膨润土的接触形式也随着掺砂率的变化而变化。当掺砂率很高时, 砂颗粒处于准接触状态, 膨润土仅以压实黏土膜的形式存在于砂颗粒的接触点处; 当掺砂率很低时, 砂颗粒基本不接触, “悬浮”在膨润土中。膨润土-砂接触形式的转变是改变混合物黏聚力和内摩擦角的重要原因<sup>[13]</sup>。

石英砂颗粒粒径比膨润土颗粒大 2 个数量级, 基本不吸水, 具有较低的表面能, 不具有收缩性, 是膨润土中的刚性夹杂体。石英砂掺量增加, 将会加快干燥过程中刚性颗粒的相互接触, 抑制试样体积减小, 进而限制膨润土-砂混合物的收缩性。石英砂掺量越大, 相互接触的石英砂颗粒越多, 对混合物收缩的抑制作用越明显。

膨润土-砂混合物的电镜照片(图 9)<sup>[13]</sup>为上述观点提供了佐证: 当掺砂率小于 30% 时, 石英砂颗粒相互之间基本不接触, “悬浮”在膨润土中, 此时混合物的基本特性仍然由膨润土控制; 当掺砂率大于 30% 时, 石英砂颗粒之间相互接触增多, 进而改变了膨润土-砂混合物的一些基本特性。

因此浆状膨润土-砂混合物的收缩过程可以描述为: 收缩初期, 片状蒙脱石之间充满水, 固体颗粒相互不接触, 随着含水率的降低, 混合物体积减小量等于水分散失量, 处于比例收缩阶段。含水率进一步降低, 固体颗粒逐渐相互靠近, 相互顶压, 混合物体积减小开始受到颗粒相互接触的限制, 此时混合物体积减小量开始小于水分散失量, 混合物进入残余收缩阶段, 对应的含水率为进气值。随着含水率继续降低, 大部分颗粒开始相互顶压而不能再继续靠近, 此时混合物整体体积开始不再减小, 混合物进入零收缩阶段, 对应含水率为缩限。

当掺量小于 30%, 石英砂“悬浮”在膨润土颗粒中, 基本不相互接触, 混合物的收缩性主要由膨润土控制, 故石英砂的掺入对混合物收缩的抑制作用不明显。随着掺砂率的进一步增加, 试样在干燥收缩过程中有更多的砂颗粒能够相互接触, 进而限制混合物体

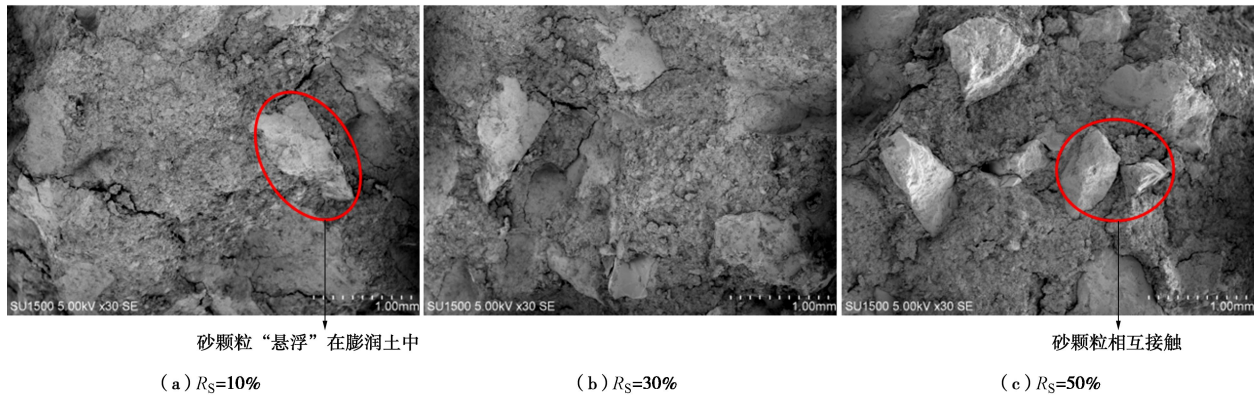


图9 膨润土-砂混合物 SEM 照片

Fig. 9 SEM photos of bentonite-sand mixtures

积变化, 表现为混合物的收缩性受到抑制。同时, 部分石英砂颗粒相互接触, 进而限制混合物的体积收缩, 使空气进入浆状混合物中, 从而达到进气点; 而大部分颗粒相互接触进而限制试样体积进一步减小时, 试样才能达到缩限。因此, 进气点对掺砂率更加敏感, 故图8中有效进气值随着石英砂掺入的增大速率明显大于有效缩限的增加速率。

### 3.3 石英砂对膨润土-砂混合物干燥开裂的控制机制

在土体结构中, 可将孔隙看做微裂隙, 长度为 $2A$ , 作用在裂隙表面的均布拉荷载与 $A^{0.5}$ 成正比<sup>[27-28]</sup>。石英砂的掺入, 会与膨润土集合体间形成大孔隙, 孔径甚至大于集合体间孔隙<sup>[29]</sup>, 大孔隙将会降低混合物的毛细水张力, 进而降低裂隙表面的拉荷载。尽管黏土颗粒之间的力学作用方式十分复杂, 除了毛细水作用力外, 化学力、离子静电引力等作用力均对土体开裂起到一定的作用。但是, 土体饱和期间发育的裂隙主要受毛细水作用力的控制, 而土体绝大部分裂隙(超过80%)都是在饱和阶段发育完成的<sup>[30]</sup>。因此, 掺入的石英砂导致混合物中大孔隙地增加, 进而导致地毛细水作用力的降低, 是膨润土-砂混合物干燥裂隙发展受到抑制的原因之一。

除了应力以外, 土体的抗拉强度也是控制裂隙扩展的另一个原因。Wang等<sup>[31]</sup>用黏土-砂混合物制备II类断裂试样, 开展剪切试验, 从断裂力学的角度证明了混合物的断裂韧度 $K_{IIc}$ 随着掺砂率的增加呈现先增加后逐渐降低的趋势。因此, 在一定的掺砂率范围内, 石英砂的掺入能够提高颗粒之间的摩擦力<sup>[10]</sup>, 增强了混合物抵抗断裂的能力, 进而限制膨润土-砂混合物干燥裂隙的发展。

当掺砂率小于30%时, 石英砂颗粒“悬浮”在膨润土中, 因此混合物的孔径大小和颗粒之间的摩擦力主要由膨润土控制, 石英砂的掺入对混合物干燥开裂的抑制作用不明显。当掺砂率大于30%时, 砂颗粒相

互靠近, 粒径更大且呈刚性的砂颗粒与膨润土团聚体之间, 甚至砂颗粒与砂颗粒之间, 更容易形成大孔隙, 进而能够降低混合物的毛细水作用力, 同时提高了颗粒之间的摩擦力, 增强了混合物抵抗断裂的能力, 从而显著抑制混合物干燥裂隙的扩展。

## 4 结 论

前人研究表明, 掺砂率小于50%时, 膨润土-砂混合物能够满足缓冲回填材料对渗透性、膨胀性等功能的要求。在此前提下, 配置掺砂率为0%~50%的浆状膨润土-砂混合物, 开展室内恒温干燥试验, 获取干燥收缩曲线和应变曲线, 通过缩限、进气值和裂隙发展定量反映混合物的干缩开裂特征, 最终确定限制膨润土-砂混合物干缩开裂的最低掺砂率为30%, 并揭示石英砂对混合物干缩开裂的控制机理。

(1) 当掺砂率小于30%时, 膨润土-砂混合物的收缩曲线基本重合, 径向收缩应变规律相近, 裂隙扩展程度相似。此时, 混合物的干缩开裂特性主要由填充在砂颗粒之间的膨润土的物理状态决定, 石英砂对混合物的干缩开裂影响较小。当掺砂率为30%~50%时, 混合物收缩曲线在进入残余收缩阶段后略有升高, 最终孔隙比明显增大, 干燥裂隙明显减小, 混合物的干缩开裂受到明显抑制。

(2) 石英砂的掺入, 增加了干燥收缩过程中相互接触的砂颗粒的比例, 进而抑制了膨润土-砂混合物的收缩性。当掺砂率大于30%时, 混合物的有效缩限和有效进气值均明显增加, 石英砂对混合物干燥收缩的有抑制作用。

(3) 石英砂的掺入, 增加了膨润土-砂混合物内部的大孔隙和颗粒之间的摩擦力, 分别导致毛细水作用力的降低和抵抗断裂能力的增加, 从而抑制混合物干燥裂隙的发展。当掺砂率大于30%时, 混合物干燥裂隙明显减小, 石英砂对混合物干燥裂隙的抑制效果

明显。

此外,土体干燥裂隙发展过程中的力学行为十分复杂,引入相关力学理念进行定量分析及相关力学参数的准确测定十分有必要。

#### 参考文献:

- [1] WANG J, SU R, CHEN W M, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 649 - 658.
- [2] SANDEN T, NILSSON U, ANDERSSON L. Investigation of parameters influencing bentonite block quality[R]. Swedish: Svensk Kulling Boskap, 2016: 16 - 22.
- [3] 唐朝生, 施 斌, 崔玉军. 高放废物地质处置库中缓冲回填材料的收缩特征[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1192 - 1200. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Shrinkage characteristics of buffer-backfilling materials in high-level radioactive waste geological disposal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1192 - 1200. (in Chinese))
- [4] UDAY K V, SINGH D N. Investigation on cracking characteristics of fine-grained soils under varied environmental conditions[J]. Drying Technology, 2013, **31**(11): 1255 - 1266.
- [5] DIXON D, CHANDLER N, GRAHAM J, et al. Two large-scale sealing tests conducted at Atomic Energy of Canada's underground research laboratory: the buffer-container experiment and the isothermal test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(3): 503 - 518.
- [6] TAY Y Y, STEWART D I, COUSENS T W. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners[J]. Engineering Geology, 2001, **60**(1): 263 - 274.
- [7] BIRLE E, HEYER D, VOGT N. Influence of the initial water content and dry density on the soil-water retention curve and the shrinkage behavior of a compacted clay[J]. Acta Geotechnica, 2008, **3**(3): 191 - 200.
- [8] SRIDHARAN A, PRAKASH K. Shrinkage limit of soil mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, **23**(1): 3 - 8.
- [9] EMIROĞLU M, YALAMA A, ERDOĞDU Y. Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios[J]. Applied Clay Science, 2015, **115**: 221 - 229.
- [10] PRAKASH K S, CHANDRASEKARAN V S. Behavior of marine sand-clay mixtures under static and cyclic triaxial shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(2): 213 - 222.
- [11] ZHOU L, ZHANG H Y, YAN M, et al. Laboratory determination of migration of Eu (III) in compacted bentonite-sand mixtures as buffer/backfill material for high-level waste disposal[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, **82**: 139 - 144.
- [12] 叶为民, 潘 虹, 王 琼, 等. 自由膨胀条件下高压实砂-膨润土混合物非饱和渗透特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 869 - 874. (YE Wei-min, PAN Hong, WANG Qiong, et al. Unsaturated permeability of highly compacted sand-bentonite mixtures under unconfined conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 869 - 874. (in Chinese))
- [13] 张虎元, 刘吉胜, 崔素丽, 等. 石英砂掺量对混合型缓冲回填材料抗剪强度的控制机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12): 2533 - 2542. (ZHANG Hu-yuan, LIU Ji-sheng, CUI Su-li, et al. Controlling mechanism of quartz sand content on shear strength of bentonite-sand mixtures as buffer/backfill material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(12): 2533 - 2542. (in Chinese))
- [14] 孙发鑫, 陈正汉, 秦 冰, 等. 高庙子膨润土-砂混合料的三向膨胀力特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 200 - 207. (SUN Fa-xin, CHEN Zheng-han, QIN Bing, et al. Characteristics of three-dimensional swelling pressure of Gaomiaozi bentonite-sand mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(1): 200 - 207. (in Chinese))
- [15] CUI S L, ZHANG H Y, ZHANG M. Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite-sand mixtures as a buffer/backfill material in China[J]. Engineering Geology, 2012, **141**: 65 - 73.
- [16] 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))
- [17] ZHANG H Y, CUI S L, ZHANG M, et al. Swelling behaviors of GMZ bentonite-sand mixtures inundated in NaCl-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, **242**: 115 - 123.
- [18] KOMINE H. Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008,

- 134(4): 497 - 508.
- [19] 刘平, 张虎元, 严耿升, 等. 土建筑遗址表部土体收缩特征曲线测定[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(4): 842 - 849. (LIU Ping, ZHANG Hu-yuan, YAN Geng-sheng, et al. Determination of soil shrinkage characteristic curve of surface soil on ancient earthen architectures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **29**(4): 842 - 849. (in Chinese))
- [20] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [21] GROENEVELT P H, GRANT C D. Analysis of soil shrinkage data[J]. Soil and Tillage Research, 2004, **79**(1): 71 - 77.
- [22] CORNELIS W M, CORLUY J, MEDINA H, et al. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve[J]. Geoderma, 2006, **137**(1): 179 - 191.
- [23] 唐朝生, 崔玉军, ANH M, 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, ANH M, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1271 - 1279. (in Chinese))
- [24] GROENEVELT P H, BOLT G H. Water retention in soil[J]. Soil Science, 1972, **113**(4): 238 - 245.
- [25] GROENEVELT P H, GRANT C D. Re-evaluation of the structural properties of some British swelling soils[J]. European Journal of Soil Science, 2001, **52**(3): 469 - 477.
- [26] CORNELIS W M, CORLUY J, MEDINA H, et al. A simplified parametric model to describe the magnitude and geometry of soil shrinkage[J]. European Journal of Soil Science, 2006, **57**(2): 258 - 268.
- [27] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(2): 263 - 277.
- [28] 郑少河, 金剑亮, 姚海林, 等. 地表蒸发条件下的膨胀土初始开裂分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(12): 2229 - 2233. (ZHENG Shao-he, JIN Jianliang, YAO Hai-lin, et al. Analysis of initial cracking behavior of expansive soil due to evaporation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2229 - 2233. (in Chinese))
- [29] PRIKRYL R, WEISHAUPTOVA Z. Hierarchical porosity of bentonite-based buffer and its modification due to increased temperature and hydration[J]. Applied Clay Science, 2010, **47**(1): 163 - 170.
- [30] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1415 - 1423. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Soil desiccation cracking behavior and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1415 - 1423. (in Chinese))
- [31] WANG J J, HUANG S Y, HU J F. Mode II fracture toughness of a clay mixed with sand[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, **165**: 19 - 23.