

# 粒度组成对红黏土干缩裂隙影响

何岱洵, 张家明, 陈茂, 龙郢铠

(昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650500)

**摘要:**为了探讨粒度组成对红黏土干缩裂隙发育的影响,从而给红黏土地区的工程建设及减灾防灾提供理论依据。通过室内干燥试验,研究了粒度组成对昆明呈贡红黏土饱和泥浆样的水分蒸发、干缩裂隙的形成和演化、表面干缩裂隙结构形态的影响。结果表明:(1)蒸发曲线分为4个阶段,常速率阶段是最重要阶段;(2)常速率阶段历时随粒径减小而增长,随粒径分布范围变大而减短;(3)蒸发速率与粒径、粒径分布范围的关系不明显;(4)干缩裂隙形成与演化过程分为5个阶段,受粒度组成影响最显著的是裂隙形成阶段;(5)粒度组成影响裂隙形成阶段历时、不同等级裂隙先后衍生关系、开裂曲线的分段性、裂隙网络结构和土块分布;(6)天然粒组样的干缩裂隙产生向上卷曲现象;(7)粒径分布范围越大,分布非均匀性越强,表面裂隙率越大,而粒径的影响不明显;(8)表面裂隙的分形维数随粒径减小而减小。综上,粒径分布范围和分布非均匀性显著影响红黏土的水分蒸发过程,干缩裂隙的形成和演化,表面干缩裂隙结构形态。

**关键词:**工程地质学;干缩裂隙;室内干燥试验;红黏土;粒度组成

**中图分类号:**X4;TU446

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)05-0185-07

## Influence of Particle Size Composition on Desiccation Cracks of Red Clay

HE Daixun, ZHANG Jiaming, CHEN Mao, LONG Yunkai

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The effects of particle size composition on the development of desiccation cracks in red clay were studied. This study can provide a theoretical basis for engineering construction and disaster prevention in red clay areas. Through laboratory drying tests on saturated mud samples, the effects of particle size composition on the water evaporation, the formation and evolution of desiccation cracks, and the surface desiccation cracks structure morphology of red clay were investigated. The results show that: (1) the evaporation curves can be divided into four stages, and the constant rate stage is the most essential stage of the evaporation curves; (2) the decrease of particle size reduces the constant stage duration; (3) the increased spread of particle size distribution also reduces the duration of the constant rate stage; (4) there is no obvious relationship between evaporation rate and particle size, particle size distribution; (5) the formation and evolution of drying shrinkage cracks can be divided into five stages, and the most significant stage is the stage of desiccation crack formation; (6) particle size composition affects the duration of desiccation crack formation, derivative relationship of different grade desiccation cracks, segmentation of cracking curve, fracture network structure and soil block distribution; desiccation crack of natural grain specimens produces upward curl phenomenon; (7) particle size composition affects segmentation of cracking curve as well; the larger the particle size distribution spread, the stronger distribution non-uniformity of the desiccation cracks of red clay is, and the more significant surface crack rate is, the more significant no effect on the particle size is; (8) particle size composition affects the surface desiccation crack structure morphology and clod distribution on the surface of specimens; the decrease of particle size reduces the fractal dimension of surface cracks. Therefore, it can be concluded that particle size distribution and distribution non-uniformity deeply affect the

收稿日期:2021-07-09

修回日期:2021-08-15

资助项目:国家自然科学基金青年项目“强降雨条件下植被发育斜坡非饱和带土体大孔隙流试验研究”(41807258)

第一作者:何岱洵(1999—),男,广东茂名,本科,主要从事红黏土干缩裂隙研究。E-mail:201811003445@stu.kust.edu.cn

通信作者:张家明(1984—),男,云南泸西人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事工程地质及地质灾害防治研究。E-mail:zhangjiaming@kust.edu.cn

process of water evaporation, formation and evolution of desiccation cracks, and the surface desiccation crack structure morphology of red clay. These research results can provide reference for reducing the disasters and taking precautions against the calamities to help the construction of the red clay soil area.

**Keywords:**engineering geology; desiccation crack; laboratory desiccation tests; red clay; particle size composition

红黏土是热带、亚热带重要的特殊土,是母岩经历炎热多雨气候作用后形成的风化产物,因富含游离氧化铁等胶结物,表观上呈红色<sup>[1]</sup>。红黏土广泛分布于我国广西、湖南以及云贵地区<sup>[2]</sup>,有极强水敏性<sup>[3]</sup>,对干燥比较敏感<sup>[4]</sup>,失水易导致其干缩开裂。红黏土干缩裂隙十分发育,在水利、土木以及岩土等领域诱发大量灾害。湖南郴宁高速公路红黏土路堤干缩开裂,导致其强度和稳定性降低<sup>[5]</sup>。贵州人工开挖形成的边坡红黏土裂隙普遍发育,易引发塌陷<sup>[6]</sup>。贵州安顺老海子水库因红黏土防渗衬砌旱季干缩开裂,导致湿季水库蓄水初期大量渗漏<sup>[7]</sup>。2010—2013 年,昆明连续 4 年大旱,红黏土失水后干缩裂隙显著发育,导致了多起高压输电线铁塔基础不均匀沉降<sup>[8]</sup>。由于红黏土路堑边坡干缩开裂,云南武倘寻高速公路施工期间边坡稳定性降低,受到强降雨后经常失稳。

黏性土干缩裂隙影响因素研究不仅是土体干缩开裂机理研究的核心内容,而且还是干缩裂隙调控机理研究的重要内容。到目前为止,已经报道了关于土样厚度<sup>[9]</sup>、干湿循环次数<sup>[9]</sup>、土质成分<sup>[9]</sup>、温度<sup>[10-11]</sup>和聚丙烯纤维<sup>[9]</sup>对黏性土干缩裂隙的形成演化及表面几何形态影响的研究成果。红黏土干缩裂隙影响因

素研究主要集中于干湿循环次数<sup>[12-14]</sup>,对影响黏性土龟裂的普适性环境要素,如粒度组成的影响还十分缺乏<sup>[11]</sup>,有待深入开展试验研究。

气象监测数据分析表明,云南地区的干旱化趋势将持续加重,干旱事件的发生频次将继续增加,影响范围逐渐扩大,灾害程度增强<sup>[15-17]</sup>。据此预测,云南地区红黏土干缩裂隙及其诱发的灾害将会更加普遍、突出。因此,为了探讨粒度组成对云南红黏土干缩裂隙发育特征的影响,本文以昆明呈贡地区红黏土为研究对象,制备初始饱和泥浆样,进行室内干燥试验,分析粒度组成对红黏土水分蒸发,干缩裂隙的形成和演化,表面干缩裂隙结构形态的影响。试验结果对深入理解红黏土干缩开裂机理及红黏土地区工程防灾减灾有重要指导意义。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验材料是昆明呈贡地区二叠系下统栖霞组、茅口组灰岩上覆红黏土,取样点深度 1.7 m,无植被根系,避免了根系和先期自然干缩开裂的影响。其基本物理性质见表 1,黏粒( $<5\ \mu\text{m}$ )的 XRD 测试结果见表 2。

表 1 红黏土的基本物理性质

液限 $w_L/\%$	塑性 指数 $I_p$	颗粒成分及其他参数								
		10~2 mm	2~0.075 mm	0.075~0.005 mm	$<0.005$ mm	$D_{60}/$ mm	$D_{30}/$ mm	$D_{10}/$ mm	$C_u$	$C_c$
66	26	0.57%	6.74%	42.76%	49.93%	0.0076	0.0021	0.0007	10.57	0.85

注: $D_{60}$ 为限定粒径, $D_{30}$ 为颗粒重量百分含量小于 30%的粒径, $D_{10}$ 为有效粒径, $C_u$ 为非均匀系数, $C_c$ 为曲率系数。

表 2 红黏土黏粒( $<5\ \mu\text{m}$ )的矿物成分

矿物名称	绿泥石	褐铁矿	伊利石	三水铝石	高岭石	钾长石	石英	锐钛矿
含量/%	20~30	20~25	10~20	5~10	5~10	1~5	1~5	1~5

注:由国土资源部昆明矿产资源监督检测中心完成测试,仪器为 X 射线衍射仪。

### 1.2 试验方法

试验步骤如下:(1) 将取回的土样在室内风干、碾碎;(2) 用土工筛将土样筛分成 3 个粒组: $1\ \text{mm}<d<2\ \text{mm}$ , $0.5\ \text{mm}<d<1\ \text{mm}$ , $d<0.5\ \text{mm}$ ;(3) 针对每个粒组,称取一定量的红黏土倒入不锈钢桶内,加入适量蒸馏水,用木棍、大功率电动搅拌器等工具充分搅拌成泥浆,并先后用保鲜膜、湿抹布密封钢桶,静置于暗室 24 h;(4) 将泥浆充分搅拌均匀,然后

向内长 $\times$ 内宽 $\times$ 深为  $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$  的正方形有机玻璃容器中倒入 675 g 泥浆,在木桌子上均匀地手工振动玻璃容器,制备成厚度为 10 mm 的均质泥浆样。按此步骤制备 4 组试样  $C_1, S_1, S_2, S_3$ , 每组 3 个平行样,其中  $C_1$  为未经筛分的天然粒组样( $d<10\ \text{mm}$ ), $S_1, S_2, S_3$  定义为集中粒组样,粒径分别为  $1\ \text{mm}<d<2\ \text{mm}$ , $0.5\ \text{mm}<d<1\ \text{mm}$ , $d<0.5\ \text{mm}$ ,并先后用保鲜膜、湿抹布密封玻璃容器,静置于

暗室 24 h; 4 组试样的初始质量含水率近似相等, 平均值为  $102.28 \pm 1.32\%$ ; (5) 用控温烘箱进行  $50^\circ\text{C}$  恒温干燥试验, 干燥过程中定时称重试样和对试样表面进行拍照, 时间间隔是 1 h。图 1 所示为自制的称重和拍照不锈钢装置。在暗室内拍照, 获得相同光亮度、放大倍数、分辨率和表面积 of 图像。如果试样的质量在两个小时之内无变化, 即认为干燥过程完成<sup>[18]</sup>; (6) 干燥试验完成后, 在试样中间区域选择 15~20 个土块, 用游标卡尺测量土块厚度; (7) 最后将整个试样  $105^\circ\text{C}$  烘干, 测量试样的干土质量; (8) 基于试样的干土质量, 初始质量和干燥过程中的质量, 计算试样的质量含水率和蒸发速率。每组 3 个平行样的试验结果近似相等, 因此取每组试样的平均值和标准差进行分析。

1.3 图像处理

使用南京大学施斌教授团队设计的颗粒及裂隙图像识别与分析系统(PCAS)<sup>[11]</sup>对采集到的图像进行处理分析, 以试样 C1 的末期图像为例对图像处理基本流程进行阐述和说明。(1) 裁剪中间区域: 由于受到器壁的影响, 边壁周围的裂隙相比中间区域而言杂乱破碎程度更加明显, 为降低边壁对图像处理结果产生的影响、提升图像处理精准度, 选择图像居中位置  $700 \times 700$  像素的区域进行研究, 真实尺寸  $160.7 \text{ mm} \times$

$160.7 \text{ mm}$ , 即分辨率为  $4.36/\text{像素}$ ; (2) 灰度图像: 对彩色图像进行灰度处理后获得的图像; (3) 图像二值化: 设定相应的阈值, 将灰度图像转变为黑白图像, 黑色部分为裂隙, 白色部分为块区; (4) 消除杂点: 由于受到试样杂质和图像噪点等因素的影响<sup>[19]</sup>, 图像经二值化处理后块区中出现一些相对独立的小黑点, 这并不属于裂隙; 由于裂隙往往会贯穿整个试样土层, 这导致玻璃容器底部会存在一定的漏光现象, 进而在裂隙中出现相对独立的白色区域, 这并不属于块区。所以要借助于相应的软件将这些杂点去除掉; (5) 通过经除杂处理的二值化图像获取裂隙、块区的统计参数(图 2)。

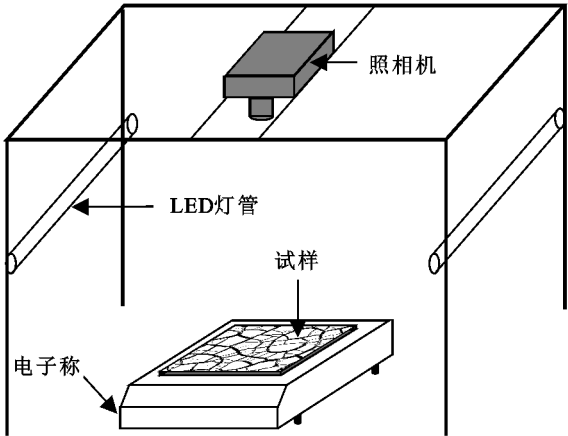


图 1 干缩裂隙试验装置

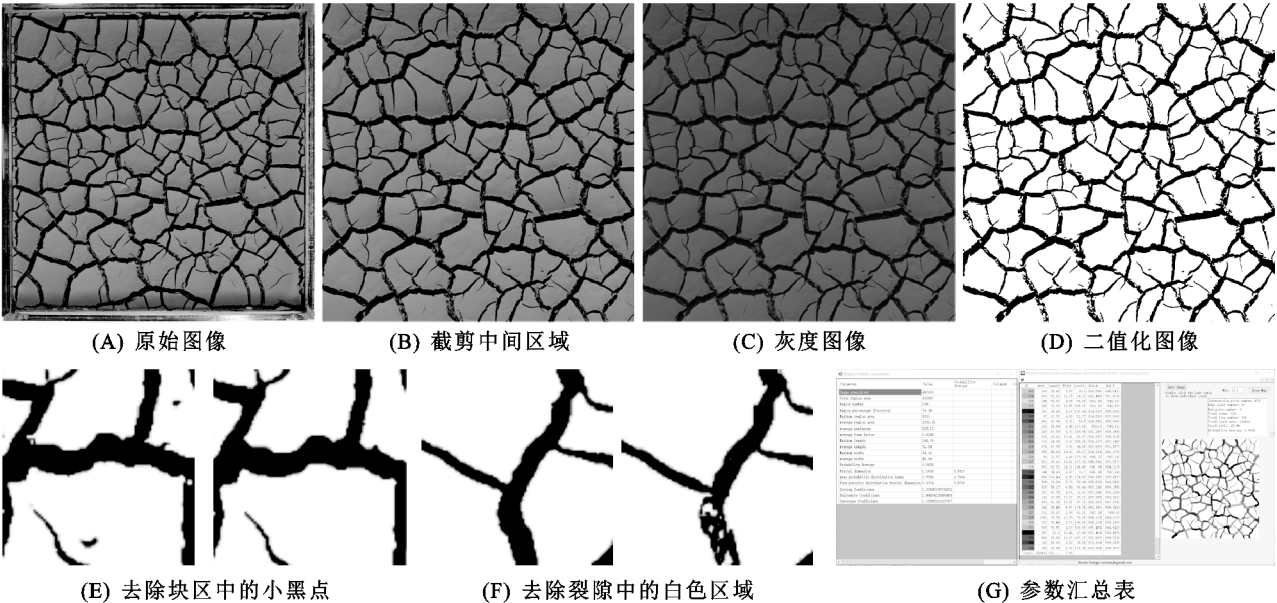


图 2 图像处理流程

1.4 测量指标

本研究测量指标: (1) 初始开裂时间  $T_{ic}$  (表面裂隙刚出现的时刻), 裂隙条数稳定时间  $T_{ni}$ , 裂隙长度稳定时间  $T_L$ , 表面裂隙率稳定时间  $T_{RSC}$ , 干燥完成时间  $T_F$ 。因图像误差以及处理误差, 试样末期图像

处理所得的表面裂隙率均存在微小波动, 故以最后时刻图像的表面裂隙率为基准, 表面裂隙率差值刚好小于  $0.1\%$  时所对应的时刻为  $T_{RSC}$ 。(2) 不同时刻试样的含水率  $w$  及蒸发速率  $R_e$  (单位时间中的失水质量,  $\text{g/h}$ ), 试样的初始含水率  $w_{ini}$ , 初始临界含水率

$w_{IC}$  ( $T_{IC}$  对应的含水率) 以及最终含水率  $w_{TF}$  ( $T_F$  对应的含水率)。(3) 裂隙交点数  $N_n$  和裂隙条数  $N_l$ , 裂隙节点包括端点与交点, 其中交点指的是 3 条及多于 3 条裂隙的交叉点, 两个相邻的节点之间为 1 条裂隙<sup>[19]</sup>。(4) 裂隙总长度  $L$ , 裂隙平均长度  $L_a$ , 裂隙平均宽度  $W$ 。(5) 土块数  $N_a$ , 土块平均面积  $S_{av}$ , 土块最大面积  $S_{max}$ 。(6) 表面裂隙率  $R_{sc}$ , 平均干缩厚度  $H_{TF}$ , 表面裂隙率是裂隙总面积与试样初始总面积的比值, 平均干缩厚度是  $T_F$  对应时刻多个土块厚度的平均值。(7) 表面裂隙的分形维数  $D$ , 软件采用盒维法计算得出<sup>[18]</sup>。

需要说明的是, 与面积、长度有关的参数都是通过软件 PCAS 统计黑色像素点的个数、白色像素点的个数来确定的, 也可以基于图像分辨率计算实际物理面积或长度。

## 2 结果与分析

### 2.1 红黏土的水分蒸发过程

蒸发速率  $R_e$  与干燥时间的关系称为蒸发曲线, 含水率  $w$  与干燥时间的关系称为干燥曲线<sup>[18]</sup>。4 组红黏土样的蒸发曲线形状总体相似, 根据蒸发速率

$R_e$  随干燥时间的变化趋势, 可分为 4 个阶段: 增速率阶段 (I), 常速率阶段 (II), 减速率阶段 (III) 和稳定阶段 (IV)。Ritchie<sup>[20]</sup>、Ritchie 和 Burnett<sup>[21]</sup> 将土体水分蒸发过程划分为 2 个阶段: 常速率阶段和减速率阶段。Idso 等<sup>[22]</sup>、唐朝生等<sup>[23]</sup> 将蒸发曲线进一步细化为 3 个阶段: 常速率阶段 (初期恒定阶段)、减速率阶段 (衰减阶段)、残余阶段 (消滞阶段或滞缓阶段)。本研究的划分方案与 3 个阶段的划分方案相比, 增加了增速率阶段 (I)。无论是在自然条件下, 还是室内干燥试验模拟环境中, 土体温度都是缓慢升高, 蒸发速率随之缓慢增加。因此, 增速率阶段是存在的, 将蒸发曲线细化为 4 个阶段更贴切自然环境 (图 3)。

常速率阶段历时最长, 是蒸发曲线的重要组成部分。4 组试样的蒸发曲线在各阶段历时和蒸发速率方面略有不同, 比如  $C_1, S_1, S_2, S_3$  常速率阶段历时分别为 17 h, 18 h, 19 h, 21 h, 说明常速率阶段历时随粒径减小而增长, 随粒径分布范围变大而减短。 $C_1$  和  $S_1$  的最大蒸发速率为 14 g/h,  $S_2$  和  $S_3$  的最大蒸发速率为 15 g/h,  $C_1, S_1, S_2, S_3$  常速率阶段的平均蒸发速率依次为 12.33 g/h, 11.68 g/h, 12.20 g/h, 11.96 g/h, 说明蒸发速率与粒径、粒径分布范围的关系不明显。

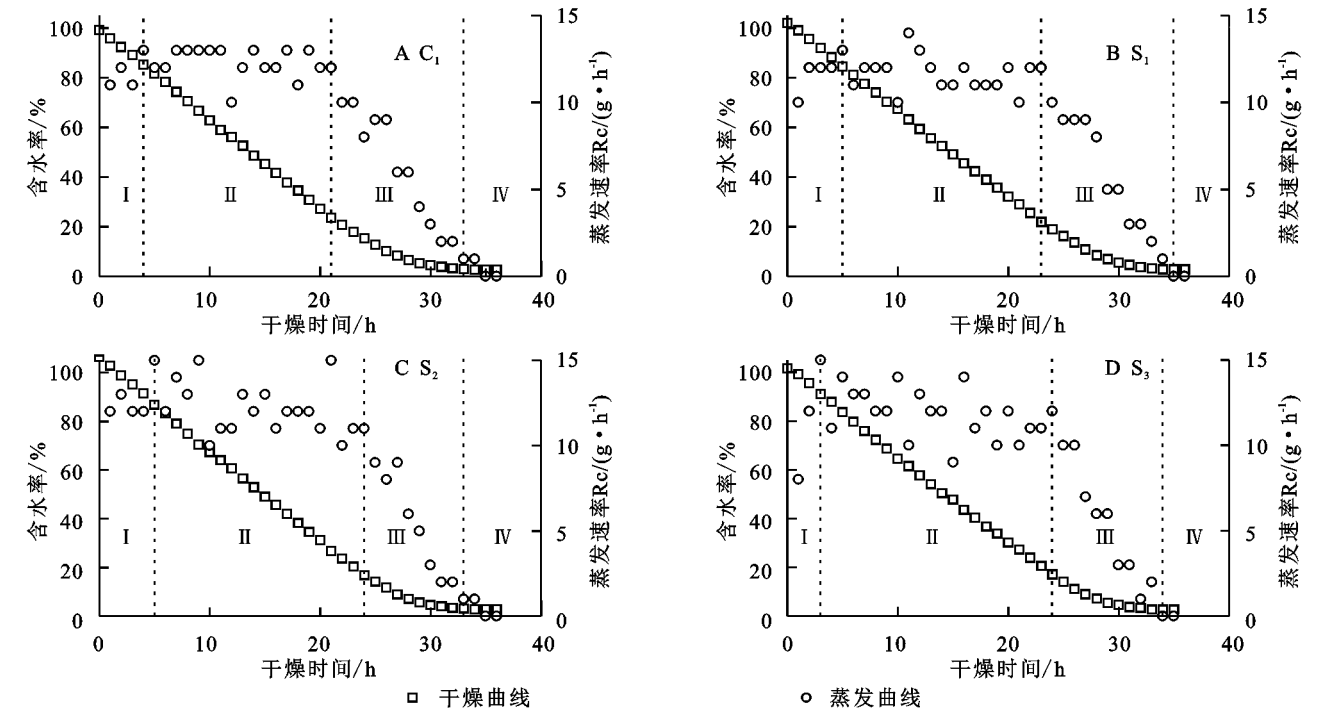


图 3 红黏土的水分蒸发曲线和干燥曲线

基于蒸发曲线和干燥曲线计算发现,  $C_1, S_1, S_2, S_3$  在常速率阶段的蒸发份额分别为 61.65%, 62.58%, 70.03%, 74.03%, 这是因为常速率阶段历时逐渐增长, 这也说明常速率阶段是蒸发曲线的重要组成部分。4 组试样的干燥曲线形状总体相似, 即在干燥初期, 试样含水率与干燥时间几乎呈直线关系, 随后干燥曲线

趋于平缓, 最后干燥曲线几乎水平。由表 3 看出, 4 组试样的干燥完成时间  $T_F$  和最终含水率  $w_{TF}$  差异不大,  $T_F$  介于 35~36 h,  $w_{TF}$  介于 2.66%~2.75%。

### 2.2 红黏土干缩裂隙的形成和演化过程

为了合理描述红黏土裂隙的形成和演化过程, 根据红黏土干缩裂隙形成和发展的特点, 将裂隙的形成

与演化分成 5 个阶段,各个阶段分别由初始开裂时间  $T_{IC}$ 、裂隙条数稳定时间  $T_{NI}$ 、裂隙长度稳定时间  $T_L$ 、表面裂隙率稳定时间  $T_{RSC}$ (表 3)进行划分。

第 1 阶段,裂隙孕育阶段;即干燥起时— $T_{IC}$ 。试样含水量逐渐下降,质量不断减小。土体从表面到内部失水收缩,土颗粒进行非均匀运动,相互聚拢、分离。第 2 阶段,裂隙形成阶段;即  $T_{IC}$ — $T_{NI}$ 。土样表面逐渐出现孤立的裂隙,裂隙沿着端点延长、弯曲,最终与相邻裂隙近似垂直相交并把土体分割成一块块较大的初始块区,最初形成的裂隙为主裂隙,主裂隙相交形成的裂隙网络为初始裂隙网络。子裂隙从主裂隙中近似垂直衍生,并与相邻裂隙相交将土块进一步分割成次级块区,更次一级的子裂隙也会从子裂隙中衍生,并将土体分割成更次一级块区,直至裂隙不再衍生。第 3 阶段,裂隙条数稳

定阶段;即  $T_{NI}$ — $T_L$ 。裂隙不再衍生次级裂隙,数量保持稳定。裂隙继续延伸、宽度继续增大。第 4 阶段,裂隙长度稳定阶段;即  $T_L$ — $T_{RSC}$ 。裂隙长度保持稳定,裂隙网络已基本定型,裂隙宽度仍继续增大。第 5 阶段:表面裂隙率稳定阶段,即  $T_{RSC}$ — $T_F$ 。表面裂隙率不再增大,裂隙网络结构以及土块分布已固定,土体含水量继续减小直至稳定,最终蒸发速率为零。如表 3 和图 4 所示,4 组试样干缩裂隙形成演化过程差异最显著的是裂隙形成阶段。其中  $S_1$  与  $S_3$  的形成过程类似, $S_2$  与  $S_1$ , $S_3$  略有不同, $S_1$ , $S_3$  的裂隙形成阶段历时介于 8.0~8.5 h, $S_2$  的裂隙形成阶段历时为 6.5 h,比  $S_1$ , $S_3$  短。此外, $S_1$  和  $S_3$  的主裂隙、子裂隙、次子裂隙、更次子裂隙的先后衍生现象比  $S_2$  显著。因此, $S_1$ , $S_3$  的主裂隙及裂隙等级比  $S_2$  明显。

表 3 出现裂隙和裂隙稳定时的时间及对对应含水率的平均值和标准差

试样组	温度/℃	$T_{IC}/h$	$T_{NI}/h$	$T_L/h$	$T_{RSC}/h$	$T_F/h$	$w_{IC}/\%$	$w_{TF}/\%$
$C_1$	50	$12.5\pm0.29$	$18.0\pm0.14$	$19.0\pm0.22$	$31.0\pm0.74$	$36.0\pm0.22$	$54.28\pm0.32$	$2.66\pm0.12$
$S_1$	50	$13.0\pm0.14$	$21.0\pm0.73$	$23.0\pm0.57$	$32.0\pm0.73$	$36.0\pm0.14$	$55.69\pm0.14$	$2.69\pm0.07$
$S_2$	50	$13.5\pm0.29$	$20.0\pm0.22$	$22.0\pm0.36$	$32.5\pm0.36$	$36.0\pm0.57$	$54.74\pm0.27$	$2.75\pm0.13$
$S_3$	50	$12.5\pm0.22$	$21.0\pm0.22$	$21.0\pm0.36$	$32.0\pm0.14$	$35.0\pm0.22$	$55.82\pm0.25$	$2.69\pm0.09$

注:裂隙出现和稳定的时间仅供参考,因为试验中无法观察到准确时刻。

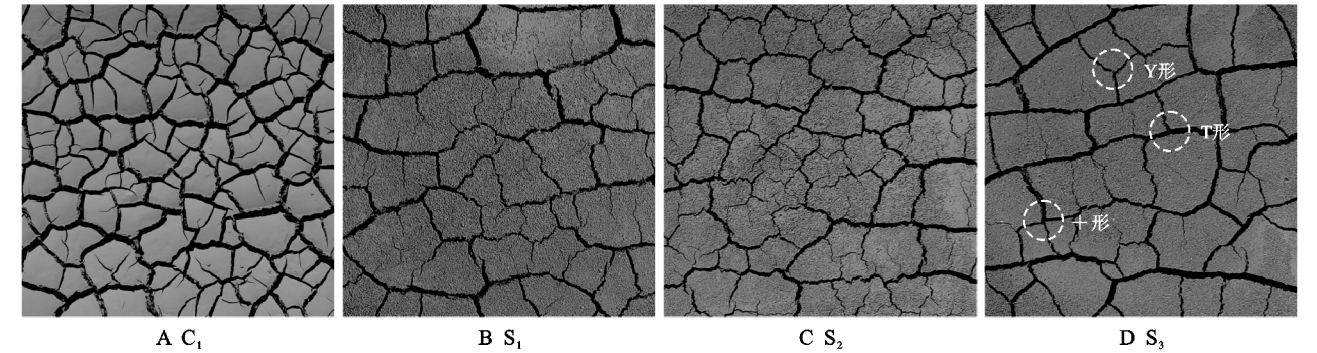


图 4 不同粒度组成红黏土的典型干缩裂隙

天然粒组样  $C_1$  的干缩裂隙形成过程与集中粒组样  $S_1$ , $S_2$ , $S_3$  的差异更明显, $C_1$  的裂隙形成期仅 5.5 h,裂隙形成有集中爆发的现象。由图 5 看出, $C_1$  在 1 h 内就形成很多短小、孤立的主裂隙,2 h 内主裂隙快速衍生出很多子裂隙,而  $S_1$  在 4 h 内仅形成 6 条长大主裂隙,3 h 内主裂隙衍生出一些子裂隙,但数目不及  $C_1$ 。因此, $C_1$  的主裂隙、裂隙衍生现象及裂隙等级都没有集中粒组样明显。 $C_1$  的另一个显著特征是干缩裂隙向上卷曲,产生“煎饼效应”<sup>[24]</sup>,这种现象在野外也很常见。这是因为表层土体首先发生水分蒸发、土颗粒相互靠拢和体积收缩,一旦竖向裂隙形成,土体内部水分同时向土体表面和裂隙壁面传输、蒸发,在这种双重水分传输机制作用下,裂隙壁面形成“上大下小”的非均匀张拉应力场<sup>[24]</sup>。此外, $C_1$  的粒径分布范围广,非均匀性强,泥浆在沉浆过程中发生粒度

分异,造成粒度在竖向上不均匀。非均匀的张拉应力场和粒度分布都将有利于干缩裂隙向上卷曲。

表面裂隙率  $R_{sc}$  与含水率  $w$  的关系称为开裂曲线<sup>[10]</sup>。由图 6 看出,集中粒组样  $S_1$ , $S_2$ , $S_3$  的开裂曲线相近,可分为 3 个阶段,在初始阶段, $R_{sc}$  随含水率减小而缓慢线性增加,随后  $R_{sc}$  快速增加,最后  $R_{sc}$  逐渐趋于稳定,试验完成后, $S_1$ , $S_2$ , $S_3$  的表面裂隙率分别为 12.9%,12.9%,12.6%。说明粒径对表面裂隙率的影响不明显。天然粒组样  $C_1$  的开裂曲线明显不同于集中粒组样,可分为 2 个阶段,即随含水率减小, $C_1$  的  $R_{sc}$  首先快速线性增大,然后缓慢线性增加并趋于稳定,试验完成后的  $R_{sc}$  为 25.6%,是集中粒组样的 2 倍。说明粒径分布范围越大,分布非均匀性越强,则土体的表面裂隙率越大。

2.3 红黏土表面干缩裂隙结构形态

2.3.1 裂隙网络结构 干缩裂隙的相交形式有“T”

形、“Y”形和“十”形,以前两者居多。由表 4 看出, $S_1$  的裂隙参数与  $S_3$  相当, $S_2$  的裂隙交点数、裂隙条数、裂隙总长度比  $S_1, S_3$  大,但裂隙平均长度、裂隙平均宽度比  $S_1, S_3$  小。 $C_1$  的裂隙交点数、裂隙条数、裂隙总长度、裂隙平均宽度和表面裂隙率比  $S_1, S_2, S_3$  大,裂隙平

均长度比  $S_1, S_3$  小。从微观上看,上述裂隙参数的差异与土体的非均质性有关,其中粒度组成的不均匀性是土体不均匀性的重要方面,非均质性对裂隙发育过程和裂隙网络的几何形态特征均有重要影响<sup>[24]</sup>,不均匀性还是导致土体龟裂的重要因素之一<sup>[11]</sup>。

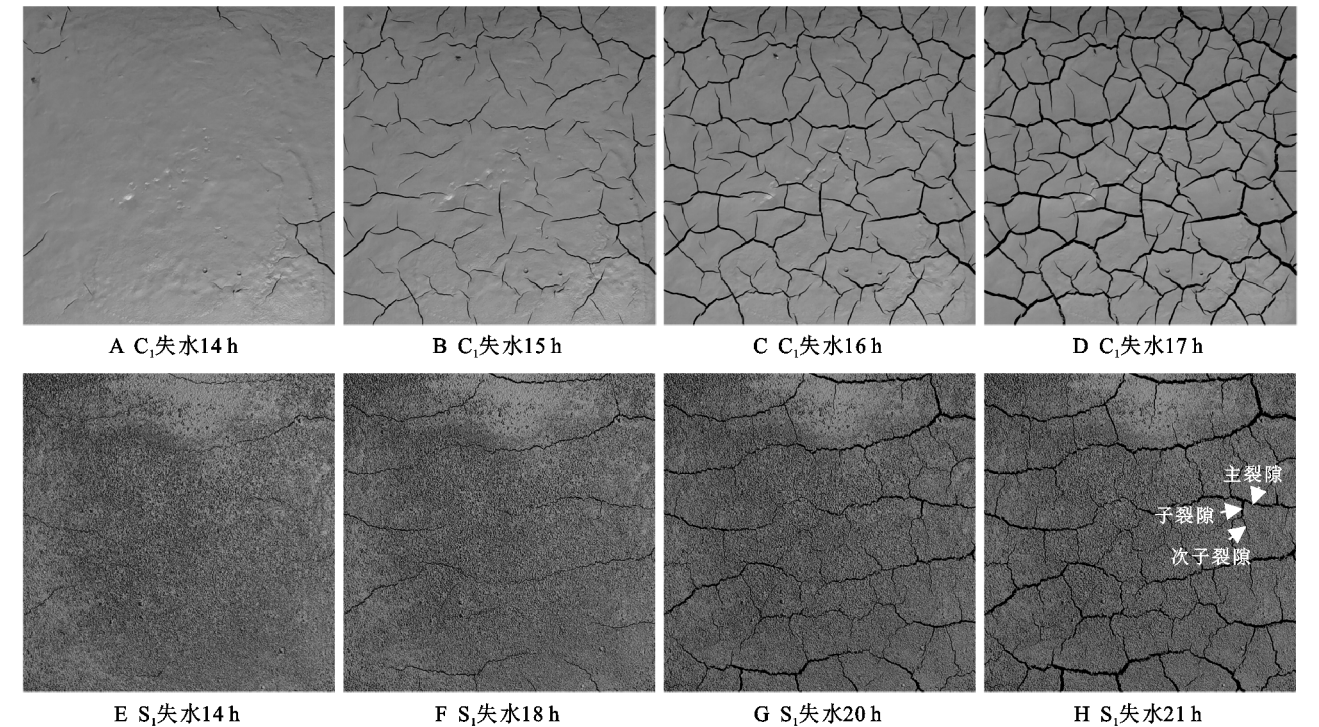


图 5  $C_1$  和  $S_1$  的干缩裂隙形成过程

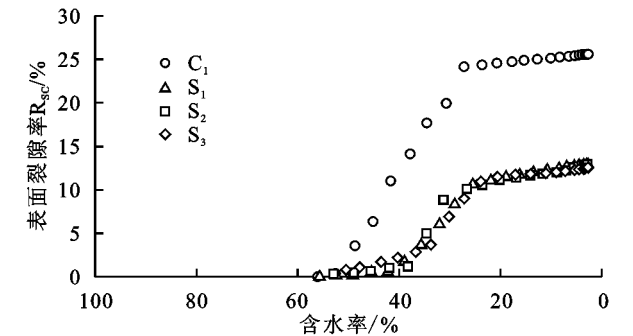


图 6 试样的开裂曲线

若选用表面裂隙率来评价土体干缩开裂程度,表面裂隙率越大,开裂程度越强烈。天然粒组样  $C_1$  的  $R_{sc}$  是集中粒组样的 2 倍,说明粒度分布范围和粒度分布非均匀性越大,红黏土开裂程度将会越高。 $S_3, S_2, S_1$  的表面裂隙分形维数  $D$  依次增大,说明裂隙边

壁逐渐折曲成锯齿状,边壁越来越粗糙,这是由于土粒粒径逐渐增大造成的。 $C_1$  的  $D$  值介于集中粒组样之间。

2.3.2 土块分布 土块形状有三边形、四边形和多边形,裂隙条数  $N_1$  与裂隙交点数  $N_n$  之比在 1.822~1.970,表明以四边形土块居多<sup>[18]</sup>。 $S_1, S_3$  的土块相关参数比较接近, $S_1, S_3$  的土块数比  $S_2$  少,土块平均面积、土块最大面积比  $S_2$  大。 $C_1$  的土块数、土块平均面积、土块最大面积是集中粒组样的 2.38~3.52 倍、0.22~0.36 倍、0.21~0.29 倍。 $S_1, S_2, S_3$  的平均干缩厚度逐渐减小,说明红黏土颗粒粒径越小,竖向干缩量越大。 $C_1$  的平均干缩厚度为 7.45 mm,比  $S_1, S_2, S_3$  都小,说明粒径分布范围越大,分布非均匀性越强,则红黏土竖向干缩量越大(表 5)。

表 4 干缩裂隙的相关参数的平均值和标准差

试样组	温度/℃	$N_n$	$N_1$	$L$	$L_a$	$W$	$R_{sc}/\%$	$D$
$C_1$	50	165±16.87	325±19.82	14689.56±633.19	45.2±2.89	7.89±0.62	25.6±0.88	1.060±0.05
$S_1$	50	85±7.87	157±19.87	9039.79±519.99	57.6±3.73	5.89±0.32	12.9±0.85	1.129±0.03
$S_2$	50	135±10.42	246±20.83	10990.06±542.98	44.7±2.10	4.83±0.43	12.9±0.33	1.107±0.03
$S_3$	50	60±3.74	112±8.83	7947.25±506.14	71.0±4.54	7.27±0.32	12.6±0.75	0.997±0.02

注:表中长度参数均以像素为量纲。

表 5 土块的相关参数的平均值和标准差

试样组	温度/℃	$N_a$	$S_{av}$	$S_{max}$	$H_{TF}/mm$
C <sub>1</sub>	50	155±16.27	2349.72±241.06	8321±395.37	7.45±0.06
S <sub>1</sub>	50	44±4.55	9698.99±734.28	39210±1585.97	8.03±0.05
S <sub>2</sub>	50	65±2.94	6564.35±732.15	28644±1854.53	7.88±0.04
S <sub>3</sub>	50	41±2.16	10445.10±643.12	30660±1248.30	7.64±0.02

注:表中土块面积以像素为量纲。

3 结 论

(1) 不同粒组试样的蒸发曲线、干燥曲线总体相似,蒸发曲线可分为 4 个阶段,其中常速率阶段是重要组成部分;不同试样的蒸发曲线在各阶段历时和蒸发速率方面略有差异;常速率阶段历时随粒径减小而增长,随粒径分布范围变大而减短,蒸发速率与粒径、粒径分布范围的关系不明显。

(2) 不同粒组试样的干缩裂隙形成演化过程可分为 5 个阶段,其中差异最显著的是裂隙形成阶段;集中粒组样在裂隙形成阶段历时、不同等级裂隙先后衍生关系方面存在差异;天然粒组样的干缩裂隙在短时间内爆发形成,主裂隙、裂隙衍生现象、裂隙等级没有集中粒组样明显,干缩裂隙向上卷曲;集中粒组样的开裂曲线分为 3 段,天然粒组样则分为 2 段。

(3) 天然粒组样的裂隙交点数、裂隙条数、裂隙总长度、裂隙平均宽度、表面裂隙率、土块数比集中粒组样大,裂隙平均长度、土块平均面积、土块最大面积比集中粒组样小;粒径分布范围越大,分布非均匀性越强,表面裂隙率越大,竖向干缩量越大;粒径减小,裂隙的分形维数减小,竖向干缩量增大。

(4) 粒径分布范围和分布非均匀性显著影响红黏土的水分蒸发过程,干缩裂隙的形成和演化,表面干缩裂隙结构形态,而粒径的影响不显著。

参考文献:

[1] Gidigasu M D. Laterite soil engineering: pedogenesis and engineering principles[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

[2] 余培厚, 曲永新, 唐大雄. 第二届全国红土工程地质研讨会[C]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1991.

[3] Angelo B D, Bruand A, Qin J, et al. Origin of the high sensitivity of Chinese red clay soils to drought: Significance of the clay characteristics[J]. Geoderma, 2014, 223: 46-53.

[4] 谈云志, 胡焱, 邓永锋, 等. 偏高岭土协同石灰抑制红黏土收缩的行为与机制[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4213-4219.

[5] 陈爱军, 张家生. 基于线弹性力学的非饱和红黏土裂缝开展分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3): 198-204.

[6] 张连英, 黄宏辉, 郑甲佳. 贵州高速公路红黏土边坡稳定分析[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2014, 31(3): 105-110.

[7] 彭宏艳. 红黏土在岩溶悬托型水库中的防渗作用[J]. 中国岩溶, 1996, 15(4): 18-23.

[8] 吴让新, 段尚琪, 张寅晨, 等. 昆明地区连续干旱红黏土地质对铁塔稳定性影响的研究及措施[J]. 云南科技管理, 2015, 28(5): 65-68.

[9] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1186-1193.

[10] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 743-749.

[11] 施斌, 唐朝生, 王宝军, 等. 粘性土在不同温度下龟裂的发展及其机理讨论[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 192-198.

[12] 陈开圣. 干湿循环下红黏土裂隙演化规律及对抗剪强度影响[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 89-95.

[13] 陈开圣. 干湿循环下红黏土边坡裂隙演变规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(5): 52-61.

[14] 熊俊豪, 刘宝臣, 刘磊, 等. 基于摄影法的红黏土裂隙试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 381-387.

[15] 王美丽, 高学杰, 石英, 等. RegCM4 模式对云南及周边地区干旱化趋势的预估[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 706-713.

[16] 金燕, 况雪源, 晏红明, 等. 近 55 年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J]. 气象, 2018, 44(9): 1169-1178.

[17] 徐海亮. 六十年来全国与西南地区气象干旱及气候环境变化: 以云南为例[J]. 昆明学院学报, 2020, 42(2): 24-35.

[18] 唐朝生, 崔玉军, Tang A M, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2181-2187.

[19] Liu C, Tang C S, Shi B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers & Geosciences, 2013, 57: 77-80.

[20] Richie J T. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: I. micrometeorological influences[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(1): 51-55.

[21] Richie J T, Burnett E. Dry land evaporative flux in a subhumid climate: II. plant influences[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(1): 56-61.

[22] Idso R J, Reginato R D, Jackson R D, et al. The three stages of drying of a field soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(5): 831-837.

[23] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 875-881.

[24] 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.