

文章编号:1673-9469(2024)04-0036-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.005

## 不同类型生物胶复合黏土蒸发开裂规律研究

胡梦园<sup>1</sup>, 张晨阳<sup>1</sup>, 薛建<sup>2</sup>, 胡国长<sup>3</sup>, 马柯<sup>1</sup>, 宋泽卓<sup>1\*</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省地质矿产调查研究所, 江苏 南京 210018;  
3. 江苏省山水生态环境建设工程有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 为研究黏土蒸发开裂规律, 对素土试样; 黄原胶、瓜尔胶及二者 1:1 调和的混合胶复合黏土试样进行蒸发开裂试验, 探究不同类型生物胶复合黏土试样含水率及蒸发速率随时间的变化情况, 以及试样裂隙率和裂隙发育形态随含水率变化的特征情况。结合扫描电镜试验对复合黏土试样的微观结构及作用机理进一步分析。结果表明, 土体试样蒸发过程经历表面自由水、内部自由水、弱结合水的散失, 蒸发速率逐渐减小。蒸发过程中, 裂隙的产生减少水分迁移路径, 同时空气进入试样内部, 使得试样渗透系数减小, 二者相互作用使得蒸发速率动态平衡。当土体颗粒间作用力平衡时, 裂隙不再发育, 蒸发速率逐渐降低。生物胶的掺入使得试样抗开裂能力增强, 裂隙发育减弱。

**关键词:** 黏土; 蒸发开裂; 微观结构; 黄原胶; 瓜尔胶

**中图分类号:** TU42

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Cracking by Evaporation of Clay Modified by Different Types of Biological Glue

HU Mengyuan<sup>1</sup>, ZHANG Chenyang<sup>1</sup>, XUE Jian<sup>2</sup>, HU Guochang<sup>3</sup>, MA Ke<sup>1</sup>, SONG Zezhuo<sup>1\*</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Institute of Geology and Mineral Resources Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China;

3. Jiangsu Shanshui Ecological Environment Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000, China)

**Abstract:** To study the law of clay evaporation cracking, the evaporation cracking tests of plain soil samples; xanthan gum, guar gum and their 1:1 mixed gum composite clay samples were carried out to explore the changes of water content and evaporation rate of different types of biological glue composite clay samples with time, and the characteristics of the fracture rate and fracture development morphology of the sample with the change of water content. The microstructure and mechanism of the composite clay samples were further analyzed by scanning electron microscopy. The results show that the evaporation process of soil sample experienced the loss of surface free water, internal free water and weak bound water, while the evaporation rate gradually decreased. During the process of evaporation, the formation of cracks reduces the water migration path, and the entry of air reduces the permeability coefficient of the sample, and the interaction between them makes the evaporation rate dynamic equilibrium. When the force between soil particles is balanced, the cracks no longer develop and the evaporation rate gradually decreases. The anti-cracking ability of the sample was enhanced and the crack development was weakened by the incorporation of biological glue.

**Key words:** clay; evaporation cracking; microstructure; Xanthan gum; Guar gum

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科研项目(2023KY15); 江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX22\_0177); 国家自然科学基金资助项目(41877212)

作者简介: 胡梦园(1998-), 女, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事土体加固研究。

\* 通信作者: 宋泽卓(1995-), 男, 河南焦作人, 博士, 助理研究员, 从事环境地质工程方面的研究。

自然界中存在大量的土质边坡,其坡表的土体由于蒸发作用,使得其内部水分散失并形成大量的裂隙。这些裂隙的产生会进一步增加坡表土体的表面积,使得水分散失进一步加剧,裂隙宽度及裂隙深度增大<sup>[1-2]</sup>。同时,这些裂隙的存在会使得土体稳定性减弱,土体在遭受自然风及雨水的侵蚀破坏时,其更易产生剥离、冲蚀等破坏,对环境造成危害<sup>[3-4]</sup>。由于全球气候的影响,极端天气事件频发,所造成的土体开裂问题加剧,引起专家学者的关注,并对土体开裂的形成机理及影响土体开裂的因素进行了大量的研究。目前,学界普遍认为土体开裂是由于土体中的水分在蒸发过程产生吸力,这一吸力诱导土体内部颗粒之间形成张拉应力,当这部分张拉应力超过土体的抗拉强度时,土体颗粒分离,宏观表现为裂隙的产生<sup>[5-6]</sup>。目前认为主要有两个方面影响裂隙的发育,其中一方面为土体性质的影响,包括土体压实状态方面,干密度越高,干燥裂纹发展越慢,表面裂纹比和总裂纹长度越小<sup>[7]</sup>;土体厚度方面,厚度较大的试样裂隙发育单一,裂隙宽大而边界效应明显<sup>[8]</sup>;细观结构方面,随着含水量的增加,土壤微观结构由团聚体结构向分散结构过渡,导致孔隙大小分布由双峰型向单峰型转变<sup>[9]</sup>。另一方面为外部因素,包括环境湿度与温度方面,环境湿度越高,初期裂隙发展越慢,发育持续时间越长,后期裂隙特征统计参数反而越大,环境温度越高,初期裂隙发展越快,但裂隙回缩稳定速度也越快,后期裂隙特征统计参数反而越小<sup>[10]</sup>;界面粗糙度方面,界面粗糙度越大,龟裂发育速度越快,龟裂发育程度越高<sup>[11]</sup>。

为减少工程实践中的土体开裂,通常采用物理、化学、生物等方法对土体材料进行改良,使其具有更好的抗开裂特性<sup>[12-13]</sup>。生物胶作为一种新型加固材料,因其具有稳定且优良的效果,可以显著提高复合土体的性质,性价比高的同时满足生态环保的绿色理念,已被专家学者研究并开始在土体改良领域应用<sup>[14-15]</sup>。Haspina 等<sup>[16]</sup>研究发现添加少量生物胶可以增加土体 pH 值,降低最大干密度,提高最优含水率,降低比重,提高塑性指数。Kwon 等<sup>[17]</sup>通过研究黄原胶与红黏土之间的微观结构演化,发现二者之间形成的离子键可以显著提升胶结能力,并使土体颗粒中形成致密的基质。Yu 等<sup>[18]</sup>通过对生物胶改良高岭石进行 X 射线衍射,发现生物胶在土体颗粒间形成桥接,有效提升

改良土体抵抗外力的能力。综上所述,生物胶复合土体的性质具有显著的提升。因此,本文选用混合后具有“增效协同作用”的黄原胶及瓜尔胶,分别采用黄原胶、瓜尔胶以及二者 1:1 调和后形成的混合胶对黏土进行改良,通过蒸发开裂试验,研究不同类型生物胶复合黏土开裂规律,并结合扫描电镜对复合黏土的机理进行分析研究,为生物胶改良土体方面研究提供参考。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验选取的黏土取自南京市江宁区,将所取得的黏土以 110 ℃ 烘干 8 h 后粉碎,并过 2 mm 筛,其土颗粒粒径曲线如图 1 所示。取样所得黏土的基本物理参数如表 1 所示。

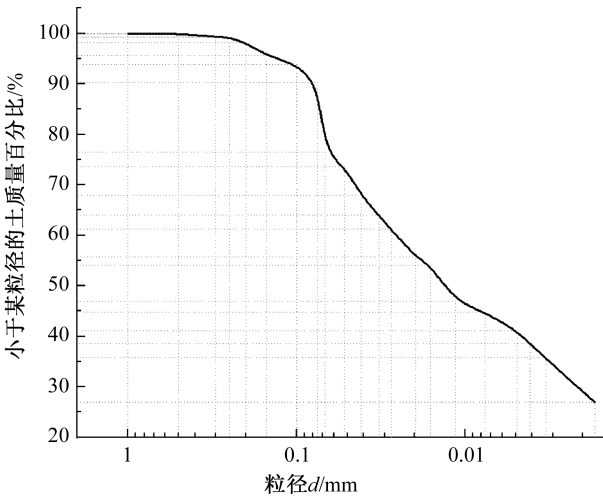


图 1 试验土样颗粒粒径分布曲线  
Fig. 1 Particle size distribution curve of test soil sample

| 表 1 试验用土的物理性质                             |               |         |       |                   |                                 |  |
|-------------------------------------------|---------------|---------|-------|-------------------|---------------------------------|--|
| Tab. 1 Physical properties of tested soil |               |         |       |                   |                                 |  |
| 液限                                        | 塑限            | 塑性指     | 比重    | 最优含水率             | 最大干密度                           |  |
| $\omega_L/\%$                             | $\omega_p/\%$ | 数 $I_p$ | $G_s$ | $\omega_{opt}/\%$ | $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$ |  |
| 38.41                                     | 21.12         | 17.29   | 2.70  | 18.94             | 1.70                            |  |

试验所用的生物胶分别为黄原胶及瓜尔胶,二者均为浅黄色至白色的粉末颗粒,稍带臭味。两种生物胶的分子中含有亲水基团,可以形成分子作用力较强的氢键,因此具有较强的粘结作用,其中,黄原胶的相对分子质量为  $2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ ,黏度为  $2\,000\text{ MPa} \cdot \text{s}$ ,瓜尔胶的相对分子量为  $2.5 \times 10^5 \sim 6.5 \times 10^5$ ,黏度为  $4\,000\text{ MPa} \cdot \text{s}$ 。二者的分子结构式如图 2 所示。学界对于黄原胶与瓜尔胶进行混合后的混合胶进行了研究,发现其具有“增效

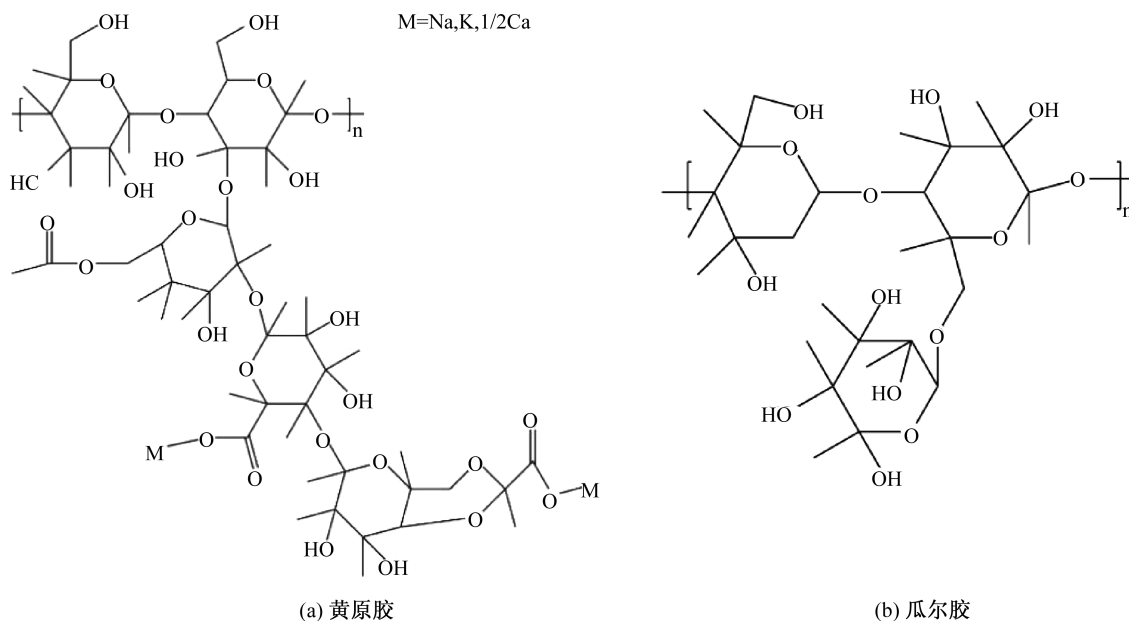


图 2 生物胶分子结构式

Fig. 2 Molecular structural formula of biological glue

协同作用”,可以通过改变生物胶的构象,从而大幅度提升生物胶的粘结特性,使其拥有更优良的胶结效果<sup>[19-20]</sup>。

## 1.2 试验方法

使用黄原胶、瓜尔胶以及二者 1:1 进行混合后的混合胶对土体材料进行改良,以研究复合黏土开裂规律。选取烘干并过 2 mm 筛后的土样 500 g,掺加含量为 0%、0.1%、0.2%、0.3% 及 0.4% 的生物胶,拌和均匀后制备为含水率 50% 的试样。将试样置于底面边长 20 cm,高 4 cm 的长方体容器中,振荡排出试样中的空气。将试样置于恒温恒湿的环境中进行养护,并定时进行称量。采用自制称量拍摄装置进行数据记录与图像采集,采集装置如图 3 所示。

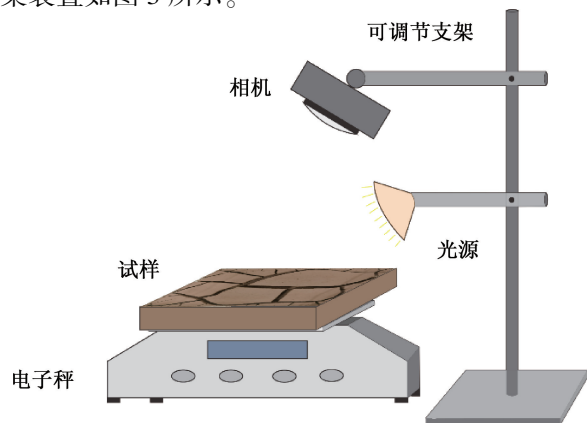


图 3 自制采集装置

Fig. 3 Self-made acquisition device

根据不同时刻的称量数据计算该时刻的含水率  $\omega_t$  及试样的蒸发速率  $R_e$ :

$$\omega_t = \frac{m_w - (m_0 - m_t)}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_e = \frac{m_t - m_{t-1}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中,  $m_w$  为试样制备时水的质量, g;  $m_s$  为试样制备时土的质量, g;  $m_0$  为试样制备完成时的质量, g;  $m_t$  为  $t$  时刻称量的试样质量, g;  $m_{t-1}$  为  $t$  时刻前一次称量的试样质量, g;  $\Delta t$  为两次称量间隔的时间, min。

计算并绘制不同生物胶种类及含量复合黏土试样的含水率及蒸发速率曲线,以及试样裂隙发育与含水率的关系曲线,分析生物胶复合黏土的开裂规律。

## 2 试验结果分析

### 2.1 素土试样裂隙发育与含水率的关系

土体开裂的普遍原因是土体中水分蒸发,导致试样含水率下降,土体颗粒间吸力无法有效维持土体颗粒位置的稳定,土体颗粒产生位移从而导致宏观视角下的土体开裂。自然环境中的阳光照射、空气湿度、风力等级等因素对土体蒸发有较大影响,土体自身性质中的矿物成分、渗透系数、土层深度等因素同样影响试样的蒸发程度。从含水率与蒸发速率的角度联合试样开裂程度,可以

了解黏土开裂过程,从而探究其开裂规律。

使用南京大学唐朝生教授团队开发的 CIAS 系统对裂隙图像进行定量分析。对不同时期拍摄的试样开裂图像进行灰度化、二值化、裂隙识别等操作后,获取其裂隙分布图。绘制素土试样的含水率随时间变化曲线,并选取裂隙发育过程较为明显的裂隙分布图标注于图上,如图4所示。

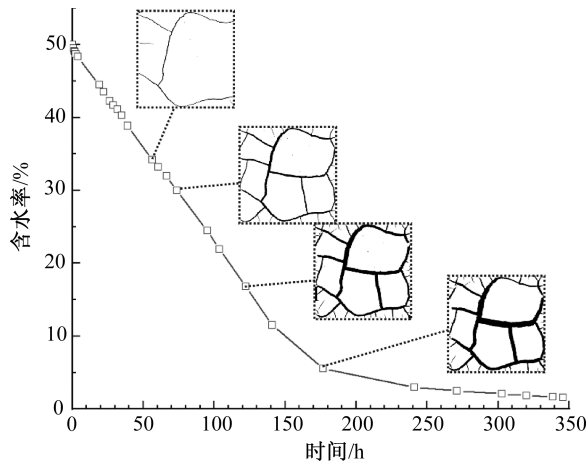


图4 素土含水率及开裂变化过程

Fig. 4 Variation process of moisture content and cracking of plain soil

由图4可知,随着时间的增长,试样含水率不断下降,当蒸发进行到150 h后试样含水率下降程度减缓,250 h后含水率变化较小。观察裂隙发育分布可知,随着含水率的减小,裂隙逐渐发育,在含水率为35%时,仅有少数裂隙,且裂隙宽度较小,彼此相互沟通,部分裂隙贯通试样两端。此裂隙产生后,试样含水率有较小程度的改变,斜率变大。当含水率为30%时,裂隙明显发育,主要表现为宽度增长,且在部分部位发育出次级裂隙,各裂

隙相互沟通呈网状。此时试样含水率曲线斜率进一步增大。当含水率为15%时,试样仅有少数细小裂隙产生,未出现长度和宽度较大的裂隙发育,裂隙宽度进一步增大。试样含水率曲线斜率较之前进一步增大,随后斜率开始减小。当含水率为5%时,试样裂隙未发生较大变化,部分裂隙宽度进一步增大,试样含水率曲线斜率逐渐平缓。

由此可知,试样裂隙的产生可以促进水分的蒸发,使得试样内水分散失加剧,水分的散失使得试样裂隙进一步发育。当试样含水率低于某一程度,试样蒸发减缓,含水率变化曲线斜率降低,试样裂隙发育程度降低,直至不再发生变化。

## 2.2 黄原胶复合黏土试样裂隙发育规律

对不同类型生物胶的含水率及蒸发速率进行计算统计,得出其随时间变化的趋势图,分析随着生物胶含量的提升对土体试样含水率及蒸发速率的影响。图5为黄原胶复合黏土的蒸发特征曲线。由图可知,素土试样与黄原胶复合黏土试样的含水率及蒸发速率随时间的变化曲线大体相似,黄原胶复合黏土的含水率均高于素土试样。在0~150 h时,复合黏土试样的蒸发速率整体上低于素土试样,二者含水率差距逐渐增大。150 h后素土试样蒸发速率大幅度下降,复合黏土试样仍保持相对稳定,二者含水率差距逐渐减小。250 h后各组试样蒸发速率均接近于0,含水率较为接近。

当黄原胶含量较高时,试样裂隙发育不明显,故选用含量为0.1%的黄原胶复合黏土试样的开裂特性进行分析。选取裂隙发育特征明显的时刻,计算该时刻试样的裂隙率 $E$ 。

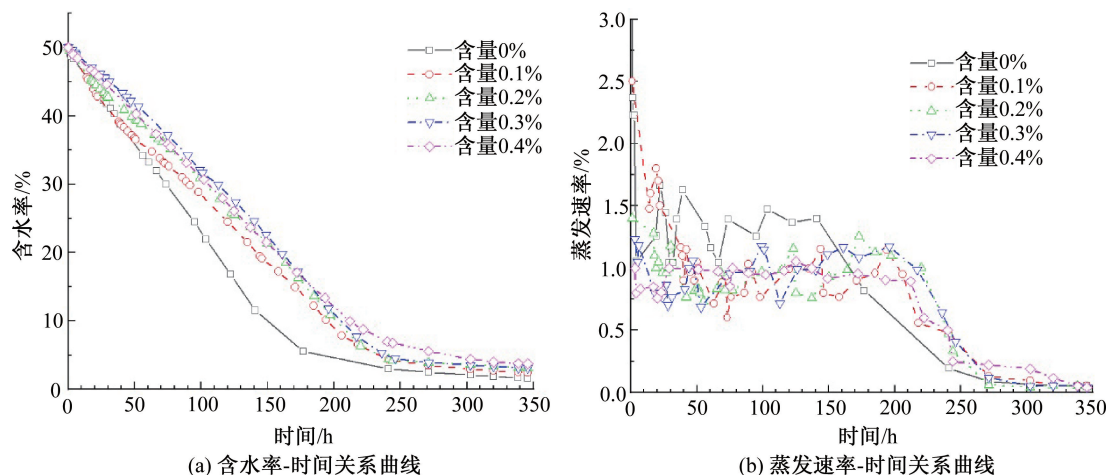


图5 黄原胶复合黏土蒸发特征曲线

Fig. 5 Evaporation characteristic curve of Xanthan gum composite clay

$$E = \frac{S_F}{S_T} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $E$  为试样裂隙率, %;  $S_F$  为裂隙面积, 像素;  $S_T$  为试样总面积, 像素。

绘制其裂隙率与含水率关系曲线, 将裂隙分布图标注于对应位置, 如图 6 所示。

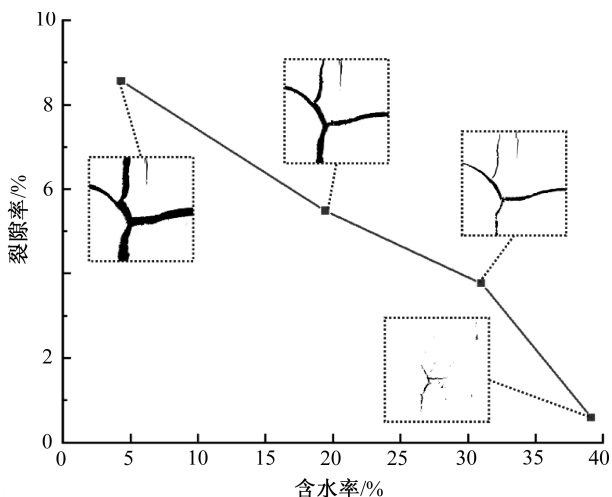


图 6 黄原胶复合黏土试样裂隙特征图

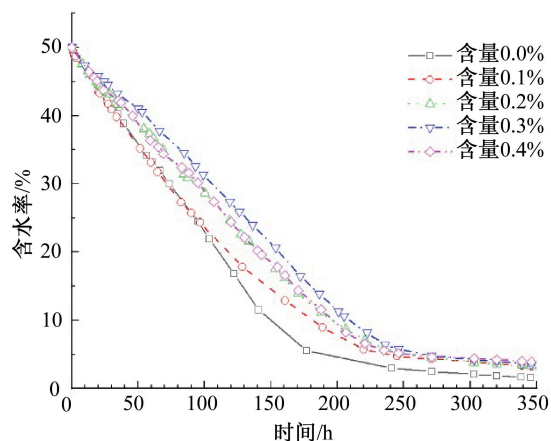
Fig. 6 Fracture characteristics of Xanthan gum composite clay sample

由图 6 可知, 随着试样含水率的降低, 试样裂隙率逐渐增大。当含水率从 40% 降至 30% 时, 试样裂隙率增长较快, 裂隙逐渐延伸, 且裂隙宽度略有增长。当含水率降至 20%, 试样裂隙率增长变缓, 未出现新发育裂隙, 裂隙宽度进一步增长。当含水率降至 5% 时, 试样裂隙率增长速率相似, 此时试样裂隙率的增长同样体现在裂隙宽度的增加。

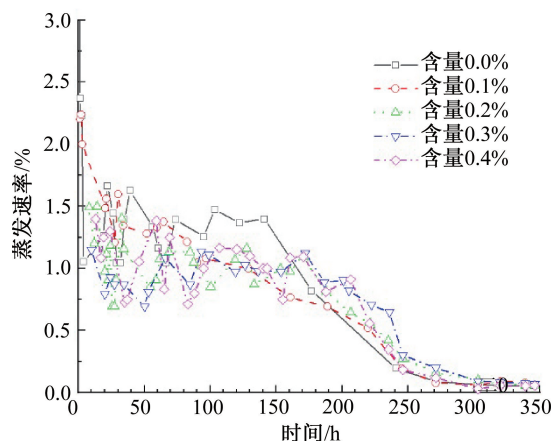
### 2.3 瓜尔胶复合黏土试样裂隙发育规律

瓜尔胶复合黏土试样蒸发特征曲线如图 7 所示。不同含量的复合黏土含水率在 0~200 h 时差别较大, 整体上符合随着瓜尔胶含量的增长, 试样含水率增大的趋势。瓜尔胶复合黏土蒸发速率在 170 h 时开始下降, 即相较于黄原胶复合黏土试样相对提前。

含量为 0.1% 的瓜尔胶复合黏土试样的裂隙特征如图 8 所示。由图可知, 在含水率从 40% 降至 25% 时, 试样裂隙率呈逐渐增大趋势, 未出现明显新裂隙发育, 试样裂隙率的增长主要由试样裂隙宽度的增长引起。含水率从 25% 降至 5% 的过程中, 试样裂隙未发生明显发育, 即此时试样中水分蒸发对试样裂隙率不产生明显影响。对比图 7



(a) 含水率-时间关系曲线



(b) 蒸发速率-时间关系曲线

图 7 瓜尔胶复合黏土蒸发特征曲线

Fig. 7 Evaporation characteristic curve of Guar gum composite clay sample

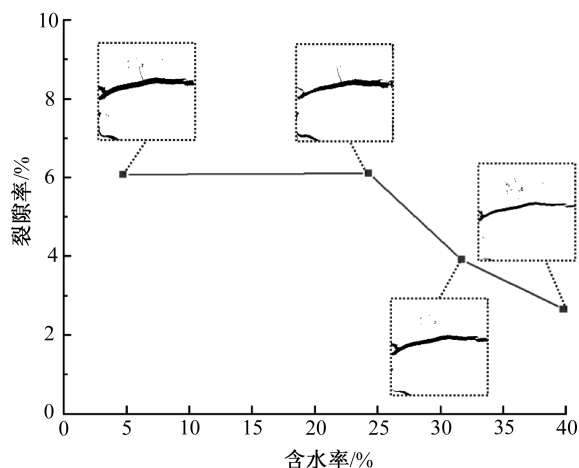


图 8 瓜尔胶复合黏土试样裂隙特征图

Fig. 8 Fracture characteristics of Guar gum composite clay sample

可知, 试样裂隙率不产生进一步发育后, 试样的蒸发速率开始下降。在相同含量下, 相较于黄原胶复合黏土试样, 瓜尔胶复合黏土试样的裂隙发育

程度较低。

对比瓜尔胶复合黏土试样与黄原胶复合黏土试样可知,在相同含量下,瓜尔胶复合黏土试样在蒸发稳定后的裂隙率低于黄原胶复合黏土试样。而瓜尔胶复合黏土试样在含水率为40%时的裂隙率达到2.66%,即对于瓜尔胶复合黏土试样而言,其在含水率较高时即出现较多裂隙,其对于复合黏土试样的改良效果更多体现在试样蒸发结束后的总裂隙率较小。

#### 2.4 混合胶复合黏土试样裂隙发育规律

混合胶复合黏土试样蒸发特征曲线如图9所示。混合胶复合黏土试样在不同含量下的含水率变化曲线及蒸发速率变化曲线均基本相似。其蒸发速率在200 h后逐渐降低,最终达到稳定。

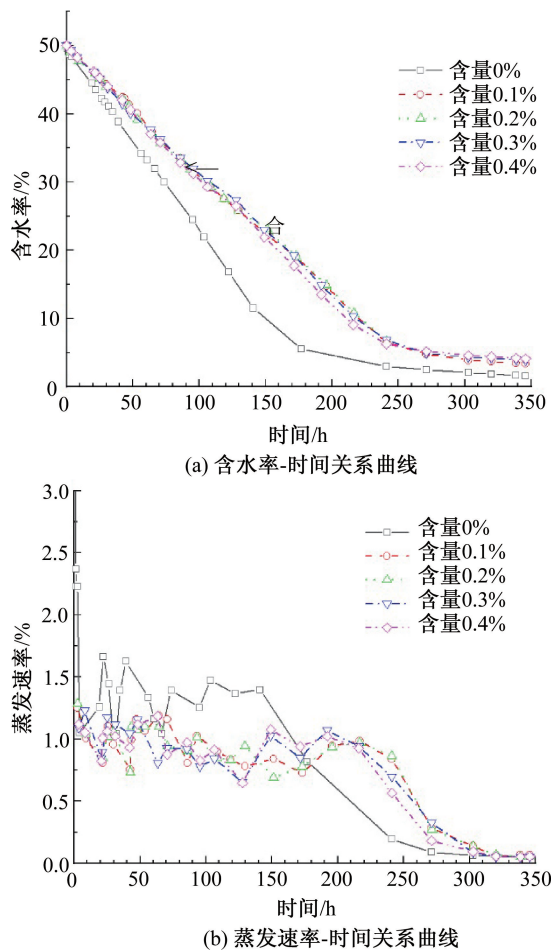


图9 混合胶复合黏土蒸发特征曲线

Fig. 9 Evaporation characteristic curve of composite mixed glue clay

含量为0.1%的混合胶复合黏土试样的裂隙特征如图10所示。由图可知,在含水率从40%降至30%时,试样裂隙率逐渐增大,体现为出现新的裂隙发育,且裂隙宽度略有增加。含水率从30%

降至25%的过程中,试样裂隙进一步发育,且宽度均有所增加,裂隙率增长较快,但当含水率低于25%后,未出现新裂隙发育,裂隙率的提升体现为已有裂隙宽度的增加。

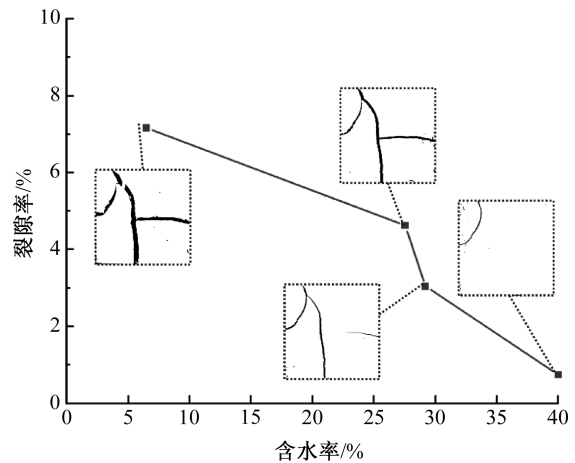


图10 混合胶复合黏土试样裂隙特征图

Fig. 10 Fracture characteristics of composite mixed glue clay sample

对比单一生物胶复合黏土试样与混合胶复合黏土试样可知,在相同含量下,瓜尔胶复合黏土试样在蒸发稳定后的裂隙率低于混合胶复合黏土试样和黄原胶复合黏土试样。混合胶复合黏土试样在含水率为40%时的裂隙率略高于黄原胶复合黏土试样,在含水率为5%时的裂隙率明显低于黄原胶复合黏土试样。即混合胶在抵抗试样开裂性能方面的能力优于黄原胶,而生物胶复合黏土试样的裂隙发育程度明显低于素土试样。

### 3 试验机理分析

结合三种不同类型生物胶开裂过程可知,当试样含水率较高时,试样孔隙中存在大量的自由水。这部分自由水在土体颗粒表面形成了水化膜,其阻碍了颗粒之间的直接接触,为土壤干燥过程中的收缩提供空间。这部分水分直接接触空气,其蒸发速率较大,即各试样在初始时期的含水率均明显大于其他时刻。随着土体中水分的蒸发,土体表面自由水散失,土体下层水分在毛细作用下从下向上迁移补偿试样表层蒸发,试样孔隙半径逐渐减小,形成张拉应力场,其机理示意图如图11所示。此时试样中水分需经过迁移到达表面后散失,试样的蒸发速率略有减少。

随着蒸发的不断进行,此时试样中水分逐渐变为以弱结合水形式为主作用于土体颗粒间,且

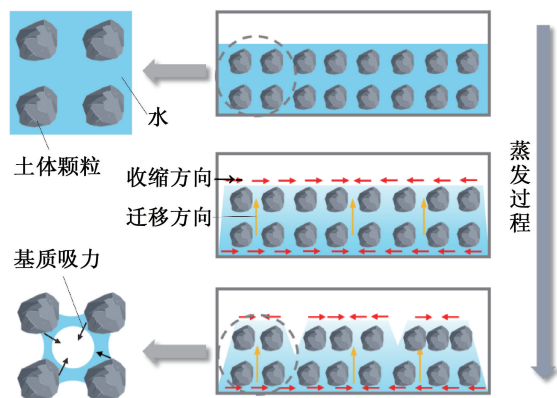


图 11 试样开裂过程示意图

Fig. 11 Diagram of specimen cracking process

由于基质吸力作用,当土体内部某一点的张拉应力超过试样抗剪强度后,该处变化发生拉裂破坏,形成“V”字形裂隙。裂隙的产生使得试样与空气的接触面积增大,试样内部水分得以从裂隙处散失,减少了水分的迁移路径,同时使得大量空气存在于试样中,影响试样渗透系数,进而延长了水分在试样中迁移所用时间。二者共同作用,使得试样蒸发速率产生波动,但维持在一定程度。随着裂隙的发育程度降低,蒸发速率减缓。当蒸发进行到一定程度,试样含水率几乎不发生变化,此时试样中水分转变为以强结合水形式为主作用于土体颗粒间,此时的水分与土体颗粒相互作用力较大,联结密切,难以散失,因而蒸发速率接近于零,裂隙发育停止。

对于生物胶强化黏土试样,各试样的含水率变化曲线、蒸发速率变化曲线及裂隙特征曲线虽然存在部分差异,其整体变化趋势大致相同。以瓜尔胶为例,其扫描电镜图及作用机理如图 12 所示。如图所示,生物胶主要通过三种作用方式对土体进行改良以减小其开裂破坏的影响,通过包裹作用,使距离相近的土体颗粒相互联结,形成团聚体,各团聚体内部的生物胶黏膜提供相互作用力,分担其内部产生的基质吸力,进而减小裂隙的产生;通过桥接作用,使距离较远土体颗粒相联结,当相联结的土体颗粒产生位移时,生物胶桥接产生的弹性膜受力,对土体颗粒的位移产生阻力,进而减小裂隙的发展;通过填充作用,使土体颗粒内部孔隙被充填,改变水分迁移路径,延长试样蒸发所需要的时间,同时,封闭部分水分与生物胶填充所形成的空腔之中,提升试样含水率的同时,减少水分迁移对试样开裂所产生的影响。

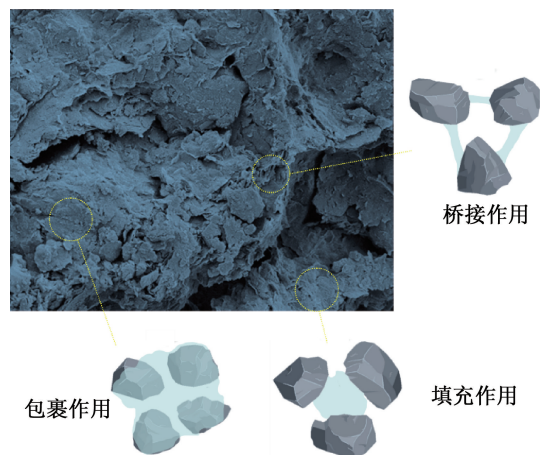


图 12 生物胶作用机理示意图

Fig. 12 Mechanism diagram of improved clay by biological glue

生物胶与土体试样混合后,由于其填充孔隙、联结土体颗粒,减少并延长了水分的迁移路径,从而阻碍了试样内部水分对表面蒸发水分的补偿,从而减缓了蒸发速率。试样表面的张拉应力场减弱,土体颗粒间相互作用力增强,使得试样的完整程度提升,抗拉强度增强,从而使得试样的土体结构更加稳定,抵抗开裂的性能提升。体现在试样裂隙的条数明显减少,裂隙宽度降低,随着蒸发的进行,较少产生新增裂隙,裂隙率减小。

#### 4 结论

本文使用黄原胶、瓜尔胶及二者 1:1 调和的混合胶对黏土进行复合,通过掺加不同含量的生物胶,分析复合黏土试样的含水率-时间关系曲线、蒸发速率-时间关系曲线以及裂隙率-含水率特征曲线,结合试样开裂过程及裂隙形态,研究其蒸发开裂方面的特性,得出以下结论:

1) 土体试样蒸发过程中,试样表面水分首先散失,蒸发速率较高,随后试样内部水分经过迁移后散失,蒸发速率略有降低并维持在一定程度。随着自由水的减少,蒸发速率降低,试样内部水分以弱结合水为主。当含水率几乎为零时,试样内部水分以强结合水为主,较难通过蒸发而散失。

2) 试样蒸发的过程中,水分减少,土体颗粒间产生张拉应力,形成“V”字形裂隙。裂隙的产生减小了试样内部水分的迁移路径;空气的增加使得试样渗透系数减小。二者相互作用使得试样开裂初期的蒸发速率处于动态平衡的状态。

3) 随着蒸发的进行,当土体颗粒间作用力大于水分散失产生的张拉应力时,裂隙不再发育,试

样蒸发速率开始逐渐减小,进而使得试样中水分逐渐维持稳定。

4)生物胶的掺加使得试样间孔隙减小,土体颗粒间联结增强。使得土体试样中水分迁移路径减少并延长,试样裂隙条数及宽度减小,且随着试样蒸发较少产生新增裂隙。

#### 参考文献:

- [1] LOZADA C, CAICEDO B, THOREL L. Effects of cracks and desiccation on the bearing capacity of soil deposits [J]. *Géotechnique Letters*, 2015, 5(3): 112-117.
- [2] 李生林,施斌,杜延军. 中国膨胀土工程地质研究[J]. *自然杂志*, 1997(02): 82-86.
- [3] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007(07): 1065-1073.
- [4] 冷挺,唐朝生,徐丹,等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(01): 112-128.
- [5] TANG C, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils [J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3-4): 204-217.
- [6] 徐其良,唐朝生,刘昌黎,等. 土体干缩裂隙发育过程及断裂力学机制研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(02): 223-236.
- [7] TIAN B G, QING C, TANG C S, et al. Effects of compaction state on desiccation cracking behaviour of a clayey soil subjected to wetting-drying cycles [J]. *Engineering Geology*, 2022, 302: 106650.
- [8] 骆赵刚,汪时机,张继伟,等. 膨胀土裂隙发育的厚度效应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(10): 1922-1930.
- [9] CHENG Q, TANG C, ZENG H, et al. Effects of micro-structure on desiccation cracking of a compacted soil [J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105418.
- [10] 刘观仕,陈永贵,曾宪云,等. 环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(02): 260-268.
- [11] 曾浩,唐朝生,刘昌黎,等. 控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(03): 544-553.
- [12] 张雪云. 岩土工程中边坡加固施工技术[J]. *中国住宅设施*, 2023(02): 172-174.
- [13] PATIL U, SHELTON A, AQUINO E. Bioengineering solution to prevent rainfall-induced slope failures in tropical soil [J]. *Land*, 2021, 10(3): 299.
- [14] MUHAMMAD H, ZHIHONG N, MUBASHIR A, et al. Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: Macro-micro-study [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(3): 91.
- [15] CHEN H, NIU Z, XU X, et al. Effect and mechanism of Xanthan gum treated dispersive soil [J]. *Journal of Progress in Civil Engineering* ISSN, 2322: 0856.
- [16] HASPINA S, RAIHAN M T, NORINAH R A, et al. Performance of soil stabilized with biopolymer materials-Xanthan gum and Guar gum [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2022, 128: 103276.
- [17] KWON Y M, CHANG I, CHO G C. Xanthan biopolymer-based soil treatment effect on kaolinite clay fabric and structure using XRD analysis. [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 11666.
- [18] YU Z W, JIN Y, FENG Y D, et al. Mechanical behavior and strengthening mechanism of red clay solidified by Xanthan gum biopolymer [J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(6): 1948-1963.
- [19] WANG F, WANG Y, SUN Z. Conformational role of Xanthan gum in its interaction with Guar gum [J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(9): 3289-3294.
- [20] TAKEMASA M, NISHINARI K. Solution structure of molecular associations investigated using NMR for polysaccharides: Xanthan/Galactomannan mixtures [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2016, 120(12): 3027-3037.
- [21] 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(08): 1415-1423.

(责任编辑 周雪梅)