

## 基于孔隙面积比的麦秸秆防腐分析及秸秆对粉土抗剪强度的影响

彭丽云, 李朝成, 刘铭杰, 崔长泽

## Wheat straw anticorrosion analysis based on pore area ratio and the effect of straw on the shear strength of silty soil

PENG Liyun, LI Zhaocheng, LIU Mingjie, and CUI Changze

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202005050>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响

Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas

胡卸文, 侯羿腾, 王严, 杨瀛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 106-112

#### 基于应力修正的土体抗剪强度影响因素分析

An analysis of the factors affecting shear strength parameters of soils based on stress correction

龚琰, 朱建群, 陈浩锋 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 95-95

#### 基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

#### 生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究

Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme

董辉, 程子华, 刘禹岐, 朱宪明 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 84-94

#### 泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究

Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding

程强, 郭喜峰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 126-133

#### 节理分布位置对岩体剪切破裂特征影响试验研究

An experimental study of the influence of discontinuous structural planes at different locations on the shear fracture characteristics of rock mass

郭朋瑜, 吉锋, 何双, 胡如刚, 梁德爽, 易林立, 蒋彦如 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 81-81



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202005050

# 基于孔隙面积比的麦秸秆防腐分析及秸秆对粉土抗剪强度的影响

彭丽云, 李朝成, 刘铭杰, 崔长泽  
(北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 粉土性能不良, 需改良后才能在高速公路路基中使用; 麦秸秆环保可再生, 掺入粉土会起到加筋作用, 但自身易被水腐蚀, 需防腐后才能使用。本文从孔隙面积比出发, 分析聚乙烯醇对秸秆的防腐机理和防腐效果, 通过抗拉强度试验分析防腐对秸秆抗拉强度的影响; 通过直剪试验分析秸秆对粉土抗剪强度的影响。结果表明: 聚乙烯醇通过自身防腐性能的发 挥、填充麦秸秆孔隙减小吸水通路、在秸秆表面形成保护膜阻隔水分进入来实现防腐, 孔隙面积比越小防腐效果越好; 试验范围内, 麦秸秆的防腐最佳浸泡时间为 4 d, 防腐剂最佳溶液浓度为 10%, 此时秸秆孔隙面积比最小, 且防腐耗时最短, 或经济最优。麦秸秆长度对孔隙面积比的影响主要在 4 d 内, 与最终孔隙面积比关系不大。防腐麦秸秆抗拉强度提高。秸秆加筋土的黏聚力随秸秆掺量、麦秸秆长度的增加先增大后减小, 最优掺量范围为 0.4% ~ 0.6%, 最优秸秆长度为 15 mm; 内摩擦角随着秸秆掺量的增加略有增加, 但增幅很小, 不同长度下无明显规律。

**关键词:** 麦秸秆; 孔隙面积比; 二值法; 防腐机理; 防腐效果; 抗剪强度

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0171-10

## Wheat straw anticorrosion analysis based on pore area ratio and the effect of straw on the shear strength of silty soil

PENG Liyun, LI Zhaocheng, LIU Mingjie, CUI Changze  
(School of Civil and Traffic Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Silty soil is of poor performance and is needed to improve before it can be used in highway subgrades. Wheat straw is environmentally friendly and renewable. When mixed with silty soil, wheat straw can play a reinforcing role, but it is easily corroded by water and can be used after corrosion protection. Based on the pore area ratio, this paper analyzes the anticorrosion mechanism and anticorrosion effect of polyvinyl alcohol on straw, the effect of anticorrosion on the tensile strength through the tensile strength test and the effect of straw on the shear strength of silty soil through the direct shear test. The results show that polyvinyl alcohol exerts its own anti-corrosion performance, fills the straw pores to reduce water absorption channels, and forms a protective film on the straw surface to block water from entering to achieve anti-corrosion. The smaller the pore area ratio, the better the anti-corrosion effect. The best soaking time for straw preservative is 4 days, and the best solution concentration for preservatives is 10%. At this time, the straw pore area ratio is the smallest, and the time for preserving is the shortest or economically optimal. The effect of the length of wheat straw on the pore area ratio is mainly within 4 days, and is not related to the final pore area ratio. The tensile strength of the anticorrosive wheat straw is

收稿日期: 2020-05-29; 修订日期: 2020-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41772291); 北京建筑大学教改项目资助(Y1827)

第一作者: 彭丽云(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要从事特殊岩土体加固和处理等教学和研究工作。E-mail: pengliyun@bucea.edu.cn

increased. The cohesion of straw reinforced soil increases first and then decreases with the increase of straw content and wheat straw length. The optimal content range from 0.4% to 0.6%, and the optimal straw length is 15 mm. The internal friction angle increases slightly with the increasing straw content, but the increase is very small, and there is no obvious pattern under different lengths.

**Keywords:** wheat straw; pore area ratio; binary method; anticorrosion mechanism; antiseptic effect; shear strength

粉土具有结构性差、稳定性差、压缩性高、力学强度低、在地震载荷作用下易发生液化等特点<sup>[1]</sup>, 用其填筑的路基极易发生坡面冲蚀、渗透破坏和过大变形等病害, 粉土路基也常在车辆动荷载的作用及自身物理力学状态的改变下产生病害<sup>[2]</sup>。因此用粉土填筑路基时, 多用石灰<sup>[3]</sup>、水泥<sup>[4-5]</sup>等无机结合料进行改良, 以达到路基填料所要求的强度和变形。

但石灰、水泥有一定腐蚀性, 在改良的同时对地下水循环和生长在路基边坡上的植物成活有影响。因此在高度重视环保的今天, 人工合成纤维因具有环保、高强度、耐酸和不吸水等特性, 纤维的掺入可以提高土体的力学性质<sup>[6]</sup>。常见有聚丙烯、玻璃丝、聚酯纤维等, 掺入土中可提高土体黏聚力、内摩擦角<sup>[7]</sup>、残余剪切强度<sup>[8]</sup>和无侧限抗压强度<sup>[9]</sup>, 可提高土体抗拉能力和抗裂性<sup>[10]</sup>, 降低试样表面裂隙率<sup>[11]</sup>, 增强土体的自愈能力<sup>[12]</sup>。相比人工合成纤维, 农业副产品的麦秸秆为天然纤维, 环保可再生且具有一定的力学性能; 掺入土中会起到改善级配、提高土体强度<sup>[13]</sup>、降低压缩性<sup>[14]</sup>, 加筋率也会影响加筋后土体的抗剪强度<sup>[15]</sup>、开裂特性<sup>[16]</sup>, 其中抗剪强度是各种工程建设的重要参数<sup>[17]</sup>; 对加筋土进行微观结构分析可以定量评价加筋效果<sup>[18]</sup>。我国麦秸秆年产量 7 亿吨, 但利用率仅为 40%, 多被就地焚烧, 既污染环境又浪费资源, 将其应用到土中的将会产生良好的环保效益和经济效益。

人们很早就修建道路、民房时使用秸秆, 建成了大量掺加秸秆的生土建筑<sup>[19]</sup>。在新石器时代, 很多人民便已经将黄土作为材料对墙壁进行建造, 还会搭配一些木资源和草泥<sup>[20]</sup>。后来, 人们开始使用泥砖、埥泥等技术, 泥浆、埥泥营建都是将生土材料加水、加干草拌合成可塑的泥状, 然后进行建造, 二者都利用了到了土壤的可塑性和黏结性。土壤是一种天然的具有一定强度的材料, 泥砖、埥泥塑造的墙体干燥后会具有一定的强度<sup>[21]</sup>, 且工程耐久性较好, 经过几百年, 仍有大量石窟、寺庙以及民房保存着良好

的结构。对于黏性较差的黄土, 除夯实外, 将麦秸秆碎片或麦糠撒在里面也能增强其力学性能和使用寿命<sup>[22]</sup>。可见, 植物纤维拌和在材料中起增强材料连接, 防裂、提高强度的作用。植物纤维在生土材料中充当抗拉材料, 本身具有一定的韧度, 是理想的天然抗拉材料。当泥砖或草泥失水收缩时, 可以有效地抵消拉应力, 避免开裂<sup>[23]</sup>。粉土透水性较强, 相比秸秆在黏土砖中的应用, 秸秆掺入粉土中会受到水的影响。但粉土路基填筑时广泛采用黏土包边、路基路面排水等多种措施减少了水对路基的影响, 再加上对秸秆的防腐处理, 进一步阻隔了水的影响, 从源头上阻断了秸秆腐蚀的来源, 因此秸秆在粉土中的应用也会具有较长期的耐久性。

聚乙烯醇是一种环保的固体有机化合物, 工程中常与水混合用作防腐剂。用聚乙烯醇溶液浸泡秸秆, 可从化学角度防止水腐蚀秸秆, 可以填充到秸秆孔隙中, 可以在秸秆表面形成保护膜, 阻断秸秆和水的接触, 起到防腐作用<sup>[24]</sup>。但聚乙烯醇对麦秸秆孔隙填充的微观结构研究较少, 致使对防腐效果评价不足, 容易产生溶液浪费或者达不到预定防腐效果的问题, 影响秸秆加筋土的使用效果。

本文通过拍摄得到麦秸秆浸泡聚乙烯醇溶液后的横断面图, 以孔隙面积比作为定量评价指标, 分析聚乙烯醇对麦秸秆孔隙的填充情况, 结合秸秆防腐前后的抗拉强度变化, 对防腐效果进行评价。同时分析多种因素对秸秆孔隙面积比的影响, 确定最佳防腐剂溶液浓度和秸秆在防腐剂溶液中的最佳浸泡天数, 并通过实验验证麦秸秆在土中的加筋效果, 研究结果将为麦秸秆在土中的应用提供理论指导和技术支撑。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

(1) 粉土: 取自北京京南某高速公路沿线, 为冲积粉土, 其颗粒粒径组成如表 1 所示。粉土粉粒含量高达 92.88%, 黏粒极度缺乏、级配不良。液限 16.7%, 塑

限 20.3%, 击实试验得到最优含水率 14.6%、最大干密度  $1.74 \text{ g/cm}^3$ 。根据《公路土工试验规程》(JTJ E40-2007)可判定为低液限粉土。土体级配均匀,黏聚力低,水稳定差,需改良后才能作为路基填料。

表 1 颗粒粒径组成

Table 1 Particle size composition

粒径/mm	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	≤0.005
含量/%	1.74	1.86	1.21	2.12	92.88	0.19

(2) 麦秸秆: 取自河北石家庄地区, 秸秆断面如图 1, 表层( $\text{SiO}_2$  和栓质细胞)组织致密, 细胞外覆盖薄蜡质层; 中内层(木质素、纤维素和半纤维素)组织疏松、分子颗粒大、整体呈孔隙构造。致密的表层不易被腐蚀, 而疏松的中内层有利于溶液的湿润、扩散和渗透, 在潮湿环境下易受到软腐菌、霉菌等微生物的侵蚀, 致使麦秸秆结构破坏、腐烂并丧失强度, 需经过防腐处理才能将其长久地应用到粉土中。

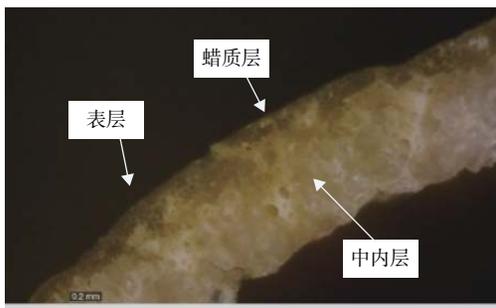


图 1 麦秸秆孔隙构造微观图(225倍)

Fig. 1 Micrograph of wheat straw pore structure (225 times)

(3) 聚乙烯醇溶液: 聚乙烯醇是一种白色、无味、呈片状、絮状或粉末状、对环境污染小的固体有机化合物, 其分子主链含  $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-$  基团, 分子链中含大量的羟基, 排列比较规整, 具有较强的阻隔性; 侧基为强极性基团, 分子间作用力大, 热稳定性强; 含有大量氢键, 分子间作用力强, 有较强的化学稳定性<sup>[25]</sup>。因此, 自身具有较好的抵抗外界腐蚀的能力。聚乙烯醇溶于水会形成有一定胶黏特性的溶液, 其线性分子能沿流动方向取向, 可减少流动中的摩阻力, 使其能够充分进入浸泡在其中的麦秸秆中的孔隙中。此外, 聚乙烯醇具有较强的成膜性, 形成的膜具有优良的机械性能<sup>[26]</sup> 以及气体阻隔性、防静电性、热封性、力学性能、耐油性及耐化学药品性和对于环境的友好性<sup>[27]</sup>, 膜的拉伸强度随聚合度、醇解度升高而增强。因此, 本研究中选用聚乙烯醇溶液作为麦秸秆的防腐剂, 常用浓度为 4%~12%。

## 1.2 试验方法与设计

### 1.2.1 不同条件下的麦秸秆孔隙面积比测定

麦秸秆孔隙面积比, 即麦秸秆断面中的孔隙面积和断面总面积的比值, 用以下方法测定: 用显微镜对麦秸秆横断面进行拍摄得到图 2(a), 量测得到麦秸秆总面积  $S_1$ ; 利用二值化方法处理图 2(a) 中的图像得到图 2(b); 利用 Imagej 软件将图 2(b) 中的非孔隙轮廓保留成封闭曲线并加以显示得到图 2(c), 对所有封闭曲线面积求和, 即为麦秸秆断面中非孔隙面积  $S_2$ 。孔隙面积  $S_3=S_1-S_2$ , 孔隙面积比  $\gamma=S_3/S_1$ 。

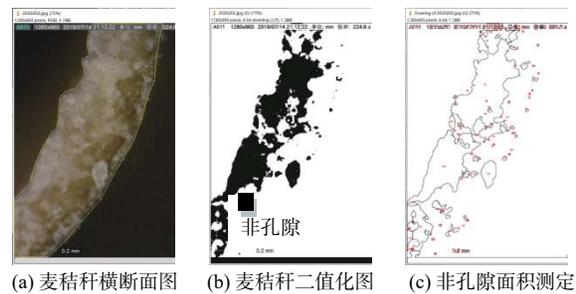


图 2 麦秸秆孔隙面积比二值化分析图

Fig. 2 Binary analysis of wheat straw pore area ratio

孔隙面积比反映了麦秸秆中孔隙的多少, 麦秸秆浸泡在聚乙烯醇溶液中, 秸秆中易吸水的孔隙会逐渐被沿流动方向取向的聚乙烯醇线性分子填充, 孔隙填充越多, 孔隙面积比越小, 秸秆吸水能力越弱, 水对秸秆的腐蚀作用越小。孔隙面积比越小说明秸秆中填充的防腐剂数量越多, 秸秆越不容易受到腐蚀。同时, 秸秆中防腐剂数量越多, 聚乙烯醇与秸秆接触的部分就越多, 成膜作用发挥的区域也越大, 对水的阻隔作用增强, 进一步阻碍微生物等对麦秸秆的腐蚀。因此, 可采用孔隙面积比来间接评价防腐效果。

麦秸秆孔隙面积比与麦秸秆长度  $l$ 、聚乙烯醇溶液浓度  $c$ 、秸秆在防腐溶液中的浸泡时间  $t$  有关, 试验方案见表 2, 分析上述因素对秸秆孔隙面积比的影响规律, 确定出最佳防腐剂溶液浓度、最佳防腐浸泡时间和最佳长度。

麦秸秆所处环境条件对孔隙面积比也有影响, 选取某特定长度的麦秸秆各 35 根, 分别放置在常温常压、浸水、最佳防腐剂溶液中浸泡最佳天数风干后再浸水, 在 1~7 d 时各取 5 根测定秸秆孔隙面积比并取均值, 以此来评价麦秸秆防腐效果。

### 1.2.2 麦秸秆抗拉强度测试

抗拉强度是评价材料力学性能的重要指标, 不同环境条件下, 麦秸秆的抗拉强度不同。对长度为 60 mm

表 2 基于材料和时间因素的麦秸秆孔隙面积比测定

Table 2 Wheat straw pore area ratio determination based on material and time factors

麦秸秆长度 $l$ /mm	浸泡麦秸秆质量 $m$ /g	取用麦秸秆根数 $n$	防腐剂溶液浓度 $c$ /%	溶液体积 $v$ /mL	浸泡时间 $t$ /d
20	10	5	4,6,8,10,12	900	1,2,3,4,5,6,7
10,15,20,30	10	5	试验测得的最佳浓度	900	1,2,3,4,5,6,7

说明:为减小误差,对浸泡聚乙烯醇溶液中的麦秸秆,在规定浸泡天数后每次均取出5根,在40℃的温度下烘干10h去除少量水分的影响后,对5根分别进行孔隙面积比测定并取均值,以下秸秆孔隙面积比的测定也采用了同样的方法。

的秸秆,各取35根放置在常温常压、浸水、最佳聚乙烯醇溶液浸泡最佳天数风干后再浸水,分别在1~7d内在上述3种环境中各取5根,用电子万能材料试验机以拉伸速率6mm/min测试其抗拉强度并取均值。以此来分析环境因素对麦秸秆抗拉强度的影响,进而说明防腐对秸秆力学性能的影响。

万能材料试验机两端各有25mm长的夹具,需要将麦秸秆插入夹具中进行拉伸试验,60mm的麦秸秆,实际受拉段的长度为10mm。选取10mm长秸秆是因为实际工程中秸秆与土体要作为均一材料来考虑,较长的秸秆掺入后土体的均匀性较差。

### 1.2.3 秸秆加筋粉土抗剪强度测定

为了验证麦秸秆对粉土的加筋效果,分别将长10,15,20,30mm、在最佳聚乙烯醇溶液浓度中防腐处理最佳天数后的麦秸秆,烘干后以0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的掺量掺入最优含水率14.6%粉土中,制成压实度 $K=0.95$ 、直径6.18cm、高2cm的圆柱试样,利用按照剪切速率0.8mm/min、竖向压力分别为50,100,200,400kPa进行直剪实验测定加筋土的抗剪强度指标,评价加筋效果。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 防腐天数对麦秸秆孔隙面积比的影响

相同麦秸秆长度和聚乙烯醇溶液下,选取单根秸秆1,3,7d下的二值化图(图3)。可以看出,随浸泡时间的增长,麦秸秆阴影部分面积逐渐增大,非阴影部分面积减少,说明秸秆中的孔隙逐渐被稳定的、具有防腐效果的聚乙烯醇所填充。此外,孔隙越少,秸秆中内层被水湿润、扩散和渗透的区域就越小,从而降低了秸秆被软腐菌、霉菌等微生物的侵蚀,秸秆因此而具备了一定的防腐能力。

图4给出了麦秸秆孔隙面积比和浸泡天数关系曲线,可见,相同长度麦秸秆的孔隙面积比随浸泡时间的增长而减小。其中浸泡0~1d时,孔隙面积比减小速率最快;1~4d时的减小速率逐渐变缓,4d后的减小速率接近于0。说明浸泡4d之后,进一步浸泡,对

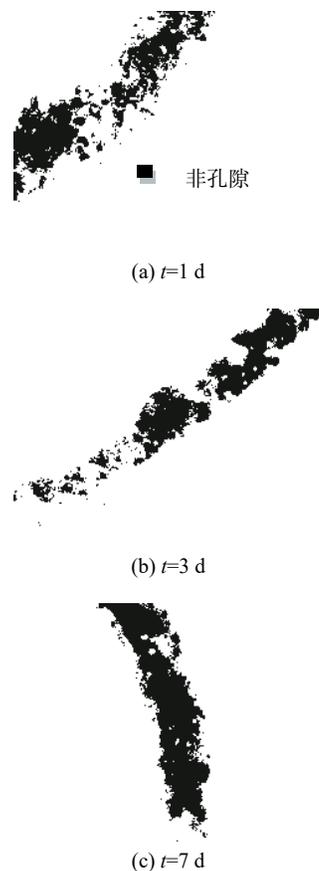


图3 麦秸秆浸泡不同天数后的二值化图  
( $l=10$  mm,  $c=10\%$ , 225倍)

Fig. 3 Binary image of wheat straw after soaking for different days ( $l=10$  mm,  $c=10\%$ , 225 times)

秸秆面积孔隙比并不能起到持续降低的作用,4d可确定为秸秆最佳防腐浸泡时间。

### 2.2 溶液浓度对麦秸秆孔隙面积比的影响

不同聚乙烯醇溶液浓度下,相同长度麦秸秆孔隙面积比和浸泡时间关系曲线如图5所示。可以看出,随着麦秸秆浸泡时间的增长,各浓度下的孔隙面积比均减小,4d后孔隙面积比减小速率均达到稳定。相同浸泡天数下,随聚乙烯醇溶液浓度的增加,秸秆孔隙面积比减小;在浓度从4%增长到10%的过程中,孔隙面积比减小不明显;而10%与12%溶液浓度下,秸秆4d后的孔隙面积比相差不大,说明当浓度大

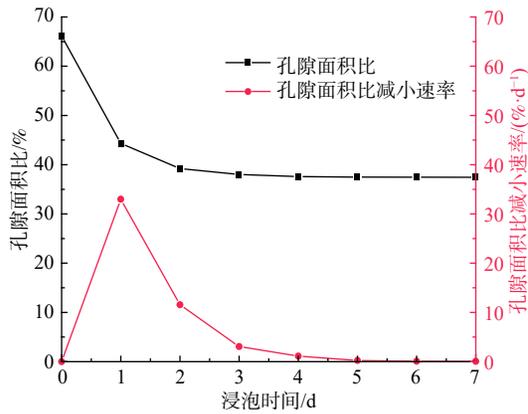


图 4 麦秸秆孔隙面积比随浸泡时间变化曲线 (l=10 mm, c=10%)

Fig. 4 Pore area ratio variation of wheat straw with soaking time (l=10 mm, c=10%)

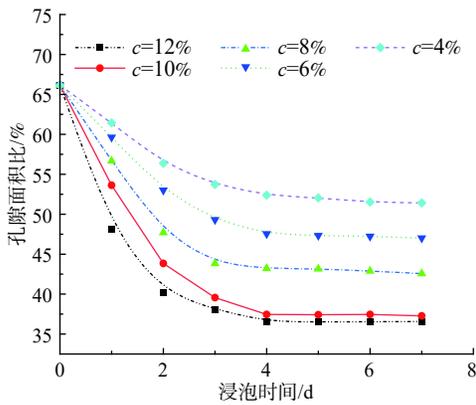


图 5 不同浓度下麦秸秆孔隙面积比与浸泡时间关系 (l=20 mm)

Fig. 5 Relationships between the pore area ratio and the soaking time at different concentrations (l=20 mm)

于 10% 后, 进一步增加防腐溶液浓度对麦秸秆孔隙面积比的减小作用不大。聚乙烯醇溶液存在最佳浓度 10%, 此时秸秆吸收防腐剂的效能最优。

不同浓度下孔隙面积-浸泡时间关系曲线呈现出相似的规律, 将图 5 中的数据在  $t/y-t$  坐标系中重新绘制得到图 6, 曲线符合线性关系:

$$t/y = a + bt \quad (1)$$

变化式(1)形式就得到相同长度、不同浓度下, 秸秆孔隙面积比随时间变化规律:

$$y = \frac{t}{a + bt} \quad (2)$$

式中:  $y$ ——孔隙面积比;

$t$ ——浸泡时间;

$a, b$ ——曲线在  $t/y-t$  坐标系中的截距和斜率。

各浓度下的曲线参数如表 3 所示。

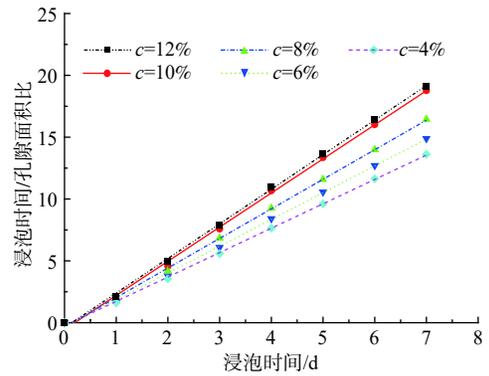


图 6 浸泡时间/孔隙面积比和浸泡时间关系

Fig. 6 Relationship between soaking time/pore area ratio and soaking time

表 3 不同浓度下公式(1)拟合后的参数值

Table 3 Parameter values at different concentrations

浓度参数	4%	6%	8%	10%	12%
$a$	-0.242 7	-0.322 63	-0.358 64	-0.548 55	-0.398 61
$b$	1.971 52	2.167 22	2.391 11	2.758 55	2.797 11
$R^2$	0.999 35	0.998 95	0.998 91	0.997 94	0.998 9

### 2.3 麦秸秆长度对秸秆孔隙面积比的影响

不同长度下, 麦秸秆孔隙面积比和浸泡时间关系曲线如图 7 所示。可知不同长度下, 随浸泡时间的增长, 麦秸秆孔隙面积比在 1~4 d 内均在减小, 4 d 后各长度的麦秸秆孔隙面积比基本相等, 说明麦秸秆长度与最终孔隙面积比无关。但对 1~4 d 内的曲线进行分析, 发现秸秆长度越短, 相同浸泡时间下的孔隙面积比越小; 要达到相同的孔隙面积比, 越短的秸秆所需要时间也越少。

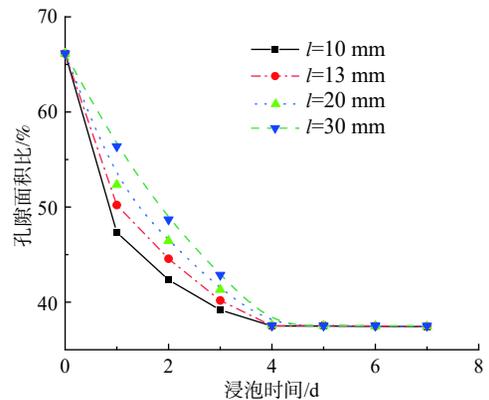


图 7 不同长度下, 麦秸秆孔隙面积比和浸泡时间关系 (c=10%)

Fig. 7 Relationships between the pore area ratio and soaking time at different wheat straw lengths (c=10%)

对图 7 中  $l=30$  mm 这条曲线, 纵坐标取对数, 得到曲线如图 8 所示, 可用公式(3)进行描述:

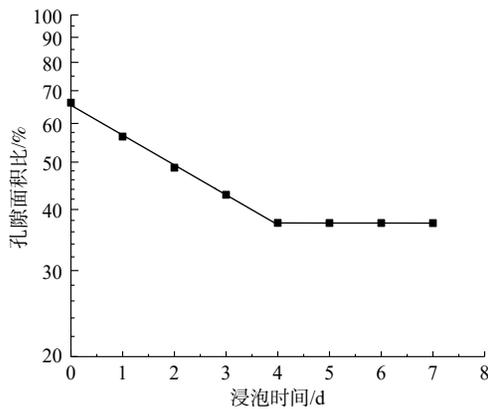


图 8 半对数坐标系下孔隙面积比和浸泡时间关系 ( $l=30\text{ mm}$ )  
 Fig. 8 Relationship between the pore area ratio and soaking time in semi-logarithmic coordinate system ( $l=30\text{ mm}$ )

$$\ln y = \begin{cases} p + qt & t \in [0, 4] \\ k & t \in [4, 7] \end{cases} \quad (3)$$

式中： $p$ ——秸秆初始孔隙面积比；  
 $q$ ——对数坐标系下孔隙面积比的变化速率；  
 $k$ ——最终孔隙比。  
 其他长度下的曲线也符合上述方程，各长度下的拟合参数如表 4 所示。

表 4 不同长度下 0 ~ 4 d 范围内的曲线拟合参数  
 Table 4 Curve fitting parameters in the range of 0 to 4 days under different lengths

长度参数/mm	10	15	20	30
$p$	4.082 34	4.116 08	4.140 74	4.180 01
$q$	-0.132 41	-0.135 69	-0.136 79	-0.140 72
$R^2$	0.849 11	0.924 47	0.965 35	0.997 82

#### 2.4 不同环境下的麦秸秆孔隙面积比分析

由图 9 可见，常温常压下天然麦秸秆孔隙面积随时间变化不大，说明干燥状态下麦秸秆一般不会发生腐蚀。浸水会导致麦秸秆腐蚀，孔隙面积比增大。防腐处理后，麦秸秆孔隙面积比大幅降低，再次浸水后，秸秆孔隙面积比与浸水前变化不大，且再次浸水时间的长短对秸秆孔隙面积比基本无影响，说明聚乙烯醇对麦秸秆起到了较好的防腐效果。

#### 2.5 麦秸秆极限拉力分析

图 10 给出了浸水麦秸秆和浸聚乙烯醇溶液麦秸秆不同天数下的极限拉力变化曲线。从中可以看出，10 mm 长的麦秸秆，天然状态下的极限拉力为 169.80 N；浸水 4 d 再烘干后极限拉力降低到 122.2 N，降幅为 28%；用 10% 聚乙烯醇溶液浸泡 1 d，其强度就得到提高，在第 4 d 达到了强度最高值 208.2 N，较天然秸秆增加 23%，

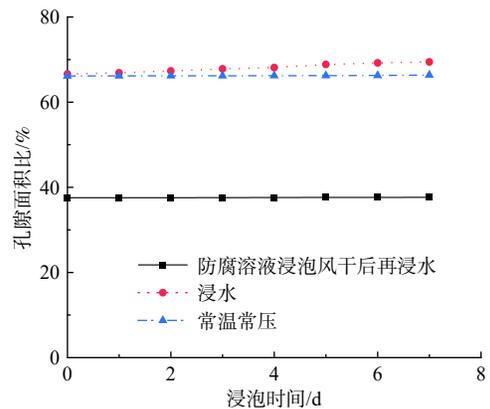


图 9 常温常压、浸水、防腐后浸水麦秸秆孔隙面积比变化 ( $l=10\text{ mm}$ )  
 Fig. 9 Changes in the pore area ratio of wheat straw after soaking, soaking and antiseptic ( $l=10\text{ mm}$ )

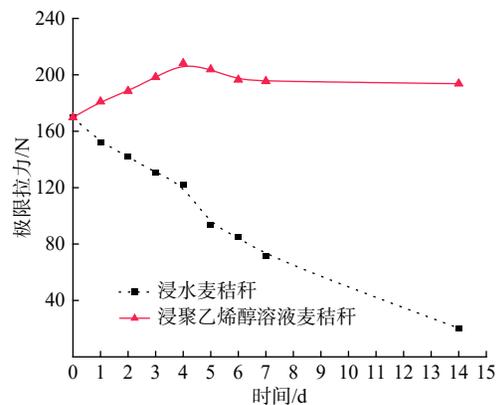


图 10 麦秸秆极限拉力变化曲线  
 Fig. 10 Change in the limit tensile force of wheat straw

较浸水后的麦秸秆增加 70%。说明防腐处理在保证秸秆不被水腐蚀的基础上，对秸秆抗拉强度还有很强的提升作用。

#### 2.6 防腐麦秸秆对粉土抗剪强度的影响

图 11 为不同麦秸秆掺量下、压实度为 0.95 的粉土试样照片，可见秸秆掺量越大、数量越多，在土中的分布就越无序。此外，秸秆掺量越大，达到相同压实度所需的击实功越大，土体密实度越高，抵抗变形的能力越强。

直剪试验测得不用秸秆长度下，秸秆加筋粉土抗剪强度指标随掺量的变化曲线如图 12 所示。可见随秸秆掺量的增加，相同压实度、秸秆长度下，粉土试样的黏聚力均呈现出先增大后减小的趋势，对每条曲线均存在一个最优掺量，此时获得最大的黏聚力。由图 12(a) 可知，对试验范围内不同长度下的黏聚力曲线，这个最优掺量的范围为 0.4% ~ 0.6%。

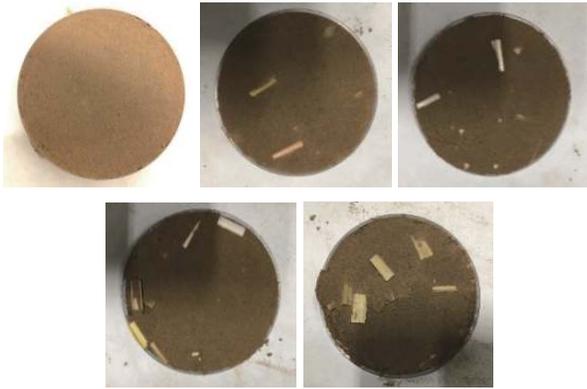
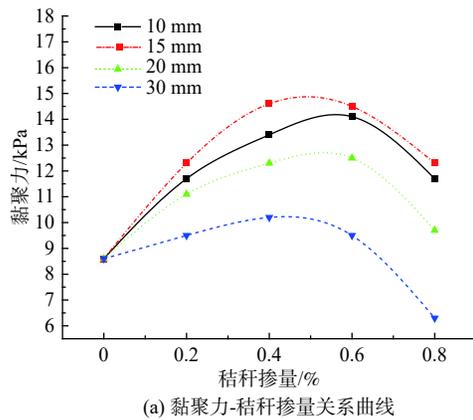
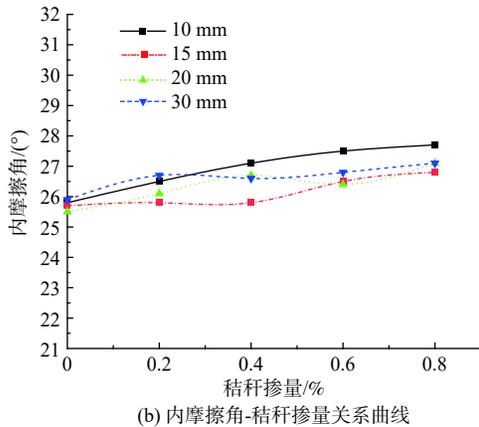


图 11 素土、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 掺量土样

Fig. 11 Plain soil and 0.2%, 0.4%, 0.6% and 0.8% straw mixed soil samples



(a) 黏聚力-秸秆掺量关系曲线



(b) 内摩擦角-秸秆掺量关系曲线

图 12 不同长度、秸秆掺量下粉土抗剪强度指标变化曲线

Fig. 12 Variation in the silt shear strength at different lengths and different straw contents

随着秸秆长度的增加,黏聚力出现先增长后减小的趋势,甚至当秸秆长度为 30 mm、掺量为 0.8% 时,秸秆加筋粉土的黏聚力出现了比素土小的情况。其他秸秆长度和掺量下的黏聚力均大于素土,尤其是长度为 15 mm 的秸秆,在 0.4% 掺量时,其黏聚力较素土提高了 69.7%。

随着掺量的增加,不同秸秆长度下的加筋土内摩擦角均增大,但增量很小,且没有明显规律。

### 3 机理分析

麦秸秆中内层组织疏松,含有较多孔隙,易吸水而被腐蚀,将其浸泡到聚乙烯醇溶液中,在溶液渗透压的作用下聚乙烯醇充填到秸秆孔隙中,其良好的防腐性能如胶黏特性、受周围环境尤其是水和微生物的影响小等,使秸秆具有了一定的防腐能力。同时聚乙烯醇充填到秸秆孔隙中后使水进入秸秆的通道减少,水、微生物与秸秆的接触面积减小,腐蚀相应降低。可见,秸秆孔隙填充程度越高、进水的通道越少、防腐剂充填数量越多,防腐效果越好。而孔隙面积比是描述秸秆孔隙填充程度的定量指标,因此可用来评价秸秆的防腐效果,孔隙面积比受以下几个因素的影响。

麦秸秆在防腐剂溶液中浸泡时间的长短对孔隙面积比的影响,主要体现浸泡时间对秸秆孔隙的填充量和填充速率上。相同长度的麦秸秆,在浸泡初期,由于麦秸秆孔隙被防腐剂填充的部分少,秸秆吸收聚乙烯醇溶液的能力强,且此时溶液中溶质的含量多,溶质渗入秸秆孔隙的能力强,填充速率快、孔隙面积比减小快;随着浸泡时间的增长,麦秸秆孔隙被聚乙烯醇溶液填充的数量增多,孔隙周边黏附了一层聚乙烯醇薄膜,阻挡了麦秸秆孔隙对聚乙烯醇溶液的吸收,且溶液中的溶质含量减少、渗透压减小,孔隙面积比减小速率降低。随着浸泡时间的进一步增长,秸秆中的多数孔隙被聚乙烯醇填充,溶液中的溶质数量、渗透压进一步降低,以至到 4 d 后,麦秸秆孔隙被聚乙烯醇溶液填充达到最大值,不再吸收聚乙烯醇;之后的浸泡过程中,溶液中的聚乙烯醇已经没有足够的空间和能进入秸秆孔隙中,孔隙面积比将不随浸泡时间发生变化。孔隙面积比不随浸泡时间发生变化的初始时间即为秸秆最佳的浸泡时间,在这个时间下,秸秆孔隙面积比达到最小,且所需时间最短。

防腐剂溶液浓度对秸秆孔隙面积比的影响主要体现在防腐剂溶液中的溶质数量上。对相同长度、浸泡时间的麦秸秆,防腐剂浓度较高时溶液中溶质含量多、渗透压大,溶质进入秸秆孔隙的能力强,故孔隙面积比小,当溶液防腐剂浓度小于 10% 时,这种规律较明显。而当浓度超过 10% 后,此时溶质含量多,但秸秆中的孔隙有限,不能容纳太多的溶质进入,尽管此时还有大量的溶质分散在溶液,且溶液的渗透压也较大,但秸秆中的孔隙已经被溶质填充的较多,溶质的

增加并不会使得更多的孔隙被填充,因此孔隙面积比与 10% 时的接近。说明防腐剂溶液也存在一个最优浓度,此时溶质数量、溶液中的渗透压和秸秆中的孔隙达到最优组合,孔隙面积比最小,但溶液浓度并不是最大。

长度对秸秆孔隙面积比的影响主要是体现在麦秸秆内部孔隙通路的长短上,对相同防腐剂溶液浓度、浸泡时间的麦秸秆,聚乙烯醇溶液能较快的通过孔隙通路较短的麦秸秆,孔隙面积比减小快;而较长的麦秸秆孔隙通路长,且聚乙烯醇溶液本身有一定黏滞性,溶液通过孔隙通路需克服较大的张力,渗透通过孔隙的时间相对较长,孔隙面积比减小慢。但最终的孔隙面积比差别不大,因为无论长短,浸泡一定时间,秸秆中的孔隙就会被最大限度的填充,孔隙面积比相应达到最小值,而这个最小值和秸秆长度关系不大。

被聚乙烯醇填充后的麦秸秆,防腐性能极大提高,防腐后再浸水,秸秆中的孔隙最大限度的被聚乙烯醇填充,水能进入的通路少,水对防腐麦秸秆孔隙面积比的影响就小。此外,聚乙烯醇充填在秸秆孔隙中,替代了之前充填的空气,同时胶结了秸秆的中内层组织,使秸秆内部结构更加致密,对拉力的抵抗能力增强,抗拉强度显著提高。

秸秆加筋旨在利用秸秆的抗拉强度和秸秆在土中的交织作用来提高土体抗剪、抗裂和抗变形的能力,通过直剪试验发现,抗剪强度的确有提升。试验用粉土黏粒缺乏,其黏聚力并非来源于黏土颗粒间的胶结和化合键,而是摩擦强度表现为黏聚力。摩擦强度和摩擦界面的摩擦系数、摩擦界面上的应力有关,秸秆掺量越高,相同压实度下的土样密实度越高,颗粒之间接触越紧密,摩擦系数提高;但与此同时,秸秆表面比较光滑,秸秆的掺入使得秸秆和土接触面处的摩擦系数降低。摩擦系数提高和降低之间存在着一个平衡,秸秆掺量增加初期,秸秆含量少,土颗粒之间摩擦系数的提高大于秸秆和土接触面之间摩擦系数的降低,故黏聚力表现为增加;当超过某掺量后,秸秆和土颗粒接触面积显著增多,致使秸秆和土接触面摩擦系数的降低速度快于土颗粒之间摩擦系数的提高,甚至出现加筋后黏聚力小于素土的情况,因此黏聚力呈现出先增加后减小的趋势。但总体上,粉土掺加秸秆后的黏聚力大于未掺加前。在加筋率不变的情况下,麦秸秆长度由 10 mm 增至 15 mm 的过程中,加筋土的黏聚力逐渐提高,主要是因为麦秸秆筋材长度越长,麦秸秆的锚固长度也就越长,增强了麦秸秆与土

体的交织作用,发挥了其良好的抗拉性能,有效的抵抗了土体变形的发生;当麦秸秆长度由 15 mm 增加到 30 mm 时,土体的黏聚力降低,是由于相同加筋率的情况下,虽然麦秸秆与土体的整体接触面积不变,但长度的增加造成了个数的减少,使得单位体积的麦秸秆数量减少,等效间距增大,削弱了麦秸秆加筋的作用。内摩擦角取决土颗粒之间产生相互滑动时需要克服由于颗粒表面粗糙不平而引起的滑动摩擦,以及由于颗粒物的嵌入、连锁和脱离咬合状态而移动所产生的咬合摩擦,由于试验范围内的秸秆掺量不是非常多,不足以起到明显的减小滑动摩擦的作用,而咬合摩擦由于密实度的提高而增大了,因此内摩擦角整体上表现为随秸秆掺量增加而增大,但整体增幅较小。

## 4 结论

(1) 聚乙烯醇溶液防腐处理可提高麦秸秆的防腐性能和抗拉强度,利于秸秆在土中的应用,秸秆孔隙面积比可用来定量分析秸秆的填充程度,间接评定秸秆防腐效果。

(2) 试验研究范围内,4 d 是麦秸秆在聚乙烯醇溶液中的最佳浸泡时间,此时浸泡时间最短、孔隙面积比最小。10% 为麦秸秆防腐的最佳聚乙烯醇溶液浓度,当浓度小于 10%,随溶液浓度增加,孔隙面积比减小且速率较快;当超过 10%,孔隙面积比减小速率很低且增量很少。

(3) 相同聚乙烯醇溶液浓度下,在麦秸秆防腐浸泡 4 d 内,麦秸秆长度越短,达到相同孔隙面积比所需的时间越少;4 d 后,不同长度的麦秸秆均达到了基本相同的孔隙面积比,麦秸秆长度对最小孔隙面积比影响不大。

(4) 常温常压下的麦秸秆孔隙面积比随时间基本保持不变,浸水会导致秸秆孔隙面积比增加,水是引起秸秆腐蚀的主要因素;聚乙烯醇溶液防腐处理、再次浸水后秸秆孔隙面积比变化不大,说明防腐处理降低了水对秸秆的腐蚀,防腐效果较好。

(5) 麦秸秆加筋对粉土黏聚力提升作用显著,存在一个位于 0.4% ~ 0.6% 最优掺量,在该掺量下黏聚力最高。随着麦秸秆长度的增加,黏聚力出现先增加后减小的趋势,相同掺量下长度为 15 mm 的麦秸秆加筋后黏聚力较大。内摩擦角随秸秆掺量的增加而增大,但增量小且增速缓,最优掺量下的提升效果相对较好。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 张笑峰,张艳美,刘锦程,等.纤维与粉煤灰改良粉土的正交试验分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(1):36-40. [ZHANG Xiaofeng, ZHANG Yanmei, LIU Jincheng, et al. Orthogonal test analysis of improved silt with fiber and fly ash[J]. Journal of Water Resources Architectural Engineering, 2019, 17(1): 36 - 40. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 肖军华.循环荷载下路基压实粉土的临界应力与应变水平[J].水文地质工程地质,2010,37(5):61-66. [XIAO Junhua. The threshold stress and strain levels of compacted silt under repeated loadings[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 61 - 66. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 谭毓清,彭成,田宗坤.石灰改良路基填料的动力特性试验研究[J].南华大学学报(自然科学版),2020,34(1):81-87. [TAN Yuqing, PENG Cheng, TIAN Zongkun. Experimental study of dynamic characteristics of lime modified roadbed filler[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2020, 34(1): 81 - 87. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 潘望文.水泥改良黏性土的循环动力特性[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2020,33(1):38-43. [PAN Wangwen. Dynamic characteristics of cement-improved cohesive soil under cyclic loading[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 2020, 33(1): 38 - 43. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 张沛云,马学宁.水泥改良黄土路基动力稳定性评价参数试验研究[J].水文地质工程地质,2019,46(2):141-147. [ZHANG Peiyun, MA Xuening. An experimental study of the evaluation parameters of dynamic stability of the cement-improved loess subgrade[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 141 - 147. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 李国勋,张艳美,马丁,等.纤维对纳米二氧化硅石灰改良粉土力学性质的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2020(2):37-44. [LI Guoxun, ZHANG Yanmei, MA D, et al. Mechanical properties of nano-silica and lime stabilized silt reinforced by fiber[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020(2): 37 - 44. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] KHATTAK M J, ALRASHIDI M. Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(1): 53 - 62.
- [ 8 ] YETIMOGLU T, SALBAS O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, 21(2): 103 - 110.
- [ 9 ] KUMAR A, WALIA B S, MOHAN J. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(10): 1063 - 1068.
- [ 10 ] 陈轮,李广信.纤维加筋粘性土的抗拉和抗裂性能研究[J].地基处理,1992(2):25-31. [CHEN Lun, LI Guangxin. Research on tensile and crack resistance of fiber reinforced clay[J]. Ground Improvement, 1992(2): 25 - 31. (in Chinese) ]
- [ 11 ] 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. [TANG Chaocheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1186 - 1193. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 李广信,陈轮,郑继勤,等.纤维加筋粘性土的试验研究[J].水利学报,1995,26(6):31-36. [LI Guangxin, CHEN Lun, ZHENG Jiqin, et al. Experimental study on fiber-reinforced cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(6): 31 - 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 郝建斌,魏兴梅,姚婕,等.麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(6):764-768. [HAO Jianbin, WEI Xingmei, YAO Jie, et al. Strength characteristics and mesostructure of wheat straw reinforced soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6):764 - 768. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 刘阳.麦秸秆加筋土强度特性及应用试验研究[D].西安:长安大学,2019. [LIU Yang. Research on the strength characteristics and application of wheat straw reinforced soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. ]
- [ 15 ] 沙琳川,王桂尧,张永杰,等.含水率与加筋率对加筋土抗剪强度的影响规律研究[J].水文地质工程地质,2018,45(2):51-58. [SHA Linchuan, WANG Guiyao, ZHANG Yongjie, et al. A study of influence of water content and reinforcement ratio on the shear strength of reinforced soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 51 - 58. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 王桂尧,沙琳川,曹文贵,等.加筋率对稻秸秆加筋土开裂特性的试验研究[J].水文地质工程地质,2017,

- 44(5): 52 – 58. [ WANG Guiyao, SHA Linchuan, CAO Wengui, et al. An experiment study of cracking properties of rice straw reinforced soil with different ratios[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 52 – 58. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 白汉营, 高宇豪, 陈学军, 等. 纳米石墨粉红黏土改良机理试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 86 – 92. [ BAI Hanying, GAO Yuhao, CHEN Xuejun, et al. An experimental study of the improving mechanical properties of the nano graphite powder red clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 86 – 92. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 张齐齐, 王家鼎, 刘博榕, 等. 水泥改良土微观结构定量研究[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 92 – 96. [ ZHANG Qiqi, WANG Jiading, LIU Borong, et al. Quantitative research on microstructure of modified soil with cement[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 92 – 96. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 刘红光, 罗斌, 申士杰, 等. 秸秆建材的研究与发展现状概述[J]. *林业机械与木工设备*, 2019, 47(5): 4 – 12. [ LIU Hongguang, LUO Bin, SHEN Shijie, et al. Review of research and development of straw building materials[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2019, 47(5): 4 – 12. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 张继元. 简述生土建筑历史演变与建筑生态发展视域下引发创作的相关思考[J]. *居舍*, 2018(29): 168. [ ZHANG Jiyuan. A brief description of the historical evolution of the raw soil architecture and the related thinking of creation from the perspective of the development of architectural ecology[J]. *Residence*, 2018(29): 168. (in Chinese) ]
- [21] 张虎元, 赵天宇, 王旭东. 中国古代土工建造方法[J]. *敦煌研究*, 2008(5): 81 – 90. [ ZHANG Huyuan, ZHAO Tianyu, WANG Xudong. Ancient Chinese geotechnical construction method[J]. *Dunhuang Research*, 2008(5): 81 – 90. (in Chinese) ]
- [22] 张剑辉. 关中地区传统民居生土建造技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2017. [ ZHANG Jianhui. Research on Construction Technology of Raw Soil for Traditional Residential Buildings in Guanzhong Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. ]
- [23] 赵宜芊. 传统生土营建经验与土质特性的关联性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018. [ ZHAO Yiqian. Research on the correlation between traditional raw soil construction experience and soil characteristics [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. ]
- [24] 彭丽云, 王剑焯. 玉米秸秆防腐及其粉土加筋效果研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 132 – 138. [ PENG Liyun, WANG Jianye. Experimental study on anti-corrosion of corn straw and its effect in silt improvement[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 132 – 138. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 张毅, 汪明礼. 聚乙烯醇及其应用[J]. *黄山学院学报*, 2004, 6(3): 71 – 74. [ ZHANG Yi, WANG Mingli. Polyvinyl alcohol and its application[J]. *Journal of Huangshan University*, 2004, 6(3): 71 – 74. (in Chinese) ]
- [26] 王天华, 杨菲, 于凤琴, 等. 聚乙烯醇(PVA)市场分析与展望[J]. *山东化工*, 2016, 45(2): 49 – 50. [ WANG Tianhua, YANG Fei, YU Fengqin, et al. Analysis and Prospect of Polyvinyl Alcohol (PVA) Market[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2016, 45(2): 49 – 50. (in Chinese) ]
- [27] 吴春林. 聚乙烯醇薄膜的特性及应用[J]. *维纶通讯*, 2006(4): 10 – 12. [ WU Chunlin. Characteristics and applications of polyvinyl alcohol film[J]. *Vinyon Communications*, 2006(4): 10 – 12. (in Chinese) ]

编辑: 张明霞