

# 土遗址加固材料性能及加固效果研究

于龙龙<sup>1,2</sup> 王菊琳<sup>1,2</sup> 张金凤<sup>3</sup>

(1. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029; 2. 北京化工大学材料电化学过程与技术北京市重点实验室, 北京 100029; 3. 中国文化遗产研究院, 北京 100029)

**摘要:** 在对土遗址常用加固材料正硅酸乙酯、硅丙乳液、硅氟材料以及PS的性能进行研究, 并对洛阳某遗址土样基本性能进行测试的基础上, 筛选出合适的加固剂浓度对土样进行加固试验。通过比较加固前后土样的颜色、密度、孔隙比、渗透性、剪切强度、抗压强度以及微观形貌的变化评价加固效果。结果表明, 四种加固剂都具有良好的加固强度, 但同时也有一定的不利影响, 在实际应用中应根据需要选用。

**关键词:** 土遗址 加固 强度 SEM

## 1. 前 言

土遗址是人类珍贵的文化遗产, 受自然环境或人为因素千百年的洗礼, 已风华不再, 有的甚至濒临损毁, 如半坡遗址中的部分房屋墙壁残断, 窑穴和窑址等块状剥落<sup>[1]</sup>。土遗址的病害类型主要是基础侵蚀坍塌, 开裂与坍塌, 冲沟发育, 严重的污染和碎裂, 粉化和硬皮, 片状、层状和块状剥落等, 其加固保护的重要性也已逐渐被认识<sup>[2]</sup>, 保护理念取得了很大的进展且已初具雏形<sup>[3]</sup>。

土遗址加固保护应遵循《中国文物古迹保护准则》<sup>[4]</sup>, 即保护材料不得改变或损伤被保护的原材料且不妨碍再次实施更有效的保护, 只有在传统措施无效或效果不佳时方可用现代材料保护。保护材料老化后对土体结构、成分不能产生负面影响, 因此保护材料成分应尽可能与土遗址土体组分相近, 即由C、Si、O元素组成<sup>[5]</sup>, 尽量选择组成中不含重金属元素, 不含S、N、F、Cl、Br、I等元素, 在固化和分解过程中, 不产生有毒、有害物质等的加固材料。而且要根据土遗址赋存环境和病害特征选择保护材料, 如潮湿地区要求保护膜抗水透气, 干旱地区要求保护膜硬而韧。Degirmenci<sup>[6]</sup>等用火山灰石膏土加固土遗址墙体, 表明该材料对酸性条件下的土遗址有较强的保护作用; Ngowi<sup>[7]</sup>和Bahar<sup>[8]</sup>认为用加固剂加固后土样的抗压强度均可获得满意的结果; Enrico Quagliarini<sup>[9]</sup>等在研究意大利古建筑土砖时发现向泥土中加入稻草和粗砂可以显著提高泥砖的强度, 且强度随着黏土含量的变化而变化, 当黏土含量达到12%~16%时泥砖综合性能最好。

文物保护准则要求土遗址经加固后的强度不能过高, 应与未风化夯土强度接近。土遗址土样的强度一般用无侧限抗压强度和剪切强度表示。赵海英<sup>[10]</sup>等用液压力式万能材料试验机对PS加固后的

西北干旱地区土遗址样品的强度进行测试,发现土样强度的增加幅度与PS浓度、加固次数成正比,对于干密度为 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的土样,用7%的PS加固一次,土样的抗压强度由 $0.8\text{MPa}$ 增加到 $1.330\text{MPa}$ ,增幅为66%,抗剪强度增加约100%。土壤孔隙大小直接影响土壤的含水量、透气性、密度等,土壤孔隙度是土壤孔隙总体积占土壤总体积的百分数,李玉虎<sup>[11]</sup>等用PS、硅丙非水分散体、正硅酸乙酯和Remmers加固遗址土样,发现原土样平均孔隙度从85%变为86%,基本没有变化,说明这些加固材料对土体孔隙度的影响小,孔隙度的测量可根据农业中推荐的标准进行测试<sup>[12]</sup>。对土遗址进行保护不仅要在表面形成保护膜而且要渗入到土体内部,所以加固材料应具有一定的渗透速度和深度,李小洁<sup>[13]</sup>和Charles Selwitz<sup>[14]</sup>的研究证明了加固剂初期渗透速度往往大于后期的,有些加固剂只能渗到土样表层;林业上测定渗透速率的标准LY/T 1218—1999,分为渗滤筒法和环刀法<sup>[15]</sup>;渗透速度与土壤的孔隙度、加固剂的黏度关系很大,对特定土壤,在满足加固效果的前提下,尽可能用黏度小的加固材料。土体含水量和所处环境有一定的联系,是土的一个重要参数,如大雨后,土样虽未淋雨,但含水量明显增加<sup>[16]</sup>。Colston等发现大气相对湿度低于75%时,灰泥样品几乎不吸收水分<sup>[17]</sup>。土体含水量一般用重量法测试,以及表面中子探针法<sup>[18, 19]</sup>及碳化钙反应法<sup>[20]</sup>。

李最雄<sup>[21]</sup>等用X射线衍射(XRD)技术研究了PS加固剂对丝绸之路遗址土的影响,发现加固后遗址土各晶态物质的X衍射峰强度明显下降,认为是由于PS材料固化后产生的二氧化硅与土粒胶凝形成非晶态的网状胶凝体所致。Elert<sup>[22]</sup>等尝试用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、NaOH和KOH保护土质建筑,比较保护前后土样的XRD谱图,发现这三种碱都会迅速与蒙脱石反应,易吸水膨胀的蒙脱石和伊利石被消耗,从而达到稳定土样的目的。赵海英<sup>[10]</sup>等用红外光谱测试PS加固的战国秦长城夯土,发现加固前后的红外谱图基本吻合,没有新晶质物相出现,认为PS几乎没有改变遗址土成分。李小洁<sup>[23]</sup>等用丙烯酸-有机硅-环氧树脂体系加固土遗址,用SEM研究发现原土结构疏松多孔,而加固后的土较为致密,认为加固剂改变了土样的微观结构,使土壤颗粒堆积致密。

由于目前还没有系统地开展对土遗址保护和保护规范的研究,保护技术还不能满足保护工程的需求,因此研究土遗址的破坏原因、加固材料和技术、保护规范等,对土遗址的保护修复有重要意义<sup>[24]</sup>。本文选择土遗址常用保护材料,在同一条件下对各项性能指标进行研究,为土遗址保护材料的选择提供理论依据和基础数据。

## 2. 实验部分

### 2.1 实验材料及仪器

#### 2.1.1 土

河南省洛阳市某土遗址的原状土约50kg,原状土的各性能指标测试结果见表1。

表1 洛阳原状土的性能指标

项目	含水率/%	密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	孔隙比	快剪强度		垂直渗透系 数/( $\text{cm}/\text{s}$ )	水平渗透系 数/( $\text{cm}/\text{s}$ )	抗压强 度/ $\text{kPa}$
				$C/\text{kPa}$	$\phi/(\text{°})$			
指标	8.0	1.5	0.939	20.3	32.0	$9.04 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^{-4}$	247

#### 2.1.2 加固剂

为了筛选出综合性能优异的加固剂,选择常用于土遗址加固的硅丙乳液、正硅酸乙酯

(RM)、硅氟材料(MH)、PS四种加固剂分别加固含水率为8%的土样,加固剂名称、主要成分、生产厂家见表2。

表2 加固剂

名称	简称	主要成分	生产厂家
硅氟材料	MH	硅氟树脂	郑州明弘科技有限公司
硅丙乳液		有机硅改性丙烯酸酯树脂	山东圣光化工集团有限公司
Remmer300	RM	正硅酸乙酯	Remmers Limited Crawley UK
钾水玻璃	PS	模数3.81的硅酸钾	敦煌研究院

### 2.1.3 实验仪器

S-4700扫描电子显微镜、DSJ-3电动四联等应变直剪仪、YYW-2型无侧限抗压仪、PHS-3C pH计、不锈钢环刀(内径61.74mm,高20.1mm)、FA1004电子天平、筛网(10目)、恒温水浴、烘箱、酒精,自制塑料模具(内径40mm,高80mm)等。

## 2.2 实验方法

### 2.2.1 加固剂物理性能测试

黏度测定。采用乌氏黏度计,在25℃恒温水浴中,分别测定上述四种加固剂的黏度,测三次取平均值。

固含量测定。用烘箱加热试样至恒重,根据加热前后试样的质量计算固含量。用量筒量取20mL加固剂精确称量质量 $m_1$ ,将盛有加固剂的烧杯放入烘箱中,60℃下恒温至加固剂和烧杯的质量不再发生变化,称量烘干后的加固剂质量 $m_2$ ,则固含量为 $m_2/m_1$ 。

密度测定。用量筒量 $V$  mL加固剂置于50mL已知质量的烧杯中,称出加固剂的质量 $m$ ,密度由 $m/V$ 计算得到。

pH测定。用PHS-3C型pH计测定四种加固剂的pH,测三次取平均值。

接触角测定。用环刀制作土样,用接触角仪分别测定四种加固剂对土样的润湿性和加固后的拒水性,并做空白试验。

### 2.2.2 加固实验

用注射器吸取一定量的加固液滴加在用环刀法制作的土样上,观察土样表面颜色变化现象、渗透状况,待加固剂完全润湿土样的反面为止,记录加固剂的用量,自然风干三昼夜后,加固第二遍。

### 2.2.3 加固前后土样性质测定

含水率测定。称量环刀和土样的总质量,减去已知的环刀质量,得到湿土样的质量 $m_1$ ;将带有土样的环刀放入烘箱中,在105℃下连续烘8h,得到烘干后土样的质量 $m_2$ ,含水率 $w_0\% = (m_1/$

$m_2-1$ )  $\times 100\%$ 。加固后土样的含水率测试方法同上。

土样密度测定。采用环刀法制备土样，用土样的质量/环刀体积计算得到。

孔隙比测定。称取环刀质量 $m_1$ ，用环刀取土并称环刀和湿土质量 $m_2$ ，根据环刀的容积 $V$ 和湿土的含水率 $W$ ，先计算出容重 $R$ ，即单位体积内干燥土样的重量与同体积水重之比<sup>[12]</sup>：

$$R=[(m_2-m_1) * 1000]/[V * (1000+W)] \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

比重是土壤每单位体积内固体土粒的重量与同体积水重之比，一般土壤的比重为2.60~2.70，通常取其平均值2.65，根据公式计算得到孔隙比：

$$\text{孔隙比}\% = (1-\text{容重}/\text{比重}) \times 100\% = (1-R/2.65) \times 100\%$$

渗透系数测定。加固和未加固土样连带其环刀一同浸入水中，水面不能超过土样，一定时间后将环刀和土样取出；待重力水滴完后，在环刀上加盛一定高度水柱的装置，再将环刀置于漏斗中，漏斗下接烧杯，待漏斗滴下第一滴水开始计时，每隔一定时间 $t$ 更换漏斗下的烧杯并计量滤出的水量，同时将土样上的水柱加至原来的高度；根据公式计算得到土样渗透系数：

$$K = \frac{Q * L}{S * t * h}$$

式中， $K$ 为渗滤系数 $\text{cm/s}$ ； $Q$ 为流量，即渗透过一定截面积 $S$  ( $\text{cm}^2$ ) 的水量， $\text{mL}$ ； $L$ 为饱和土层厚度，即渗滤经过的距离， $\text{cm}$ ； $S$ 为渗滤筒的截面积， $\text{cm}^2$ ； $t$ 为渗滤过水量 $Q$ 时所需要的时间， $\text{s}$ ； $h$ 为水层厚度，水头（水位差）， $\text{cm}$ 。

剪切强度测定。环刀法制作土样，对加固前后的土样用直剪仪进行剪切实验，每组实验5个平行土样。

抗压强度测定。用PVC塑料管模具制作出高8cm，内径4cm的圆柱状土样。分别测试加固前后的土样的抗压强度，每组实验5个平行样。

## 3. 结果与讨论

### 3.1 加固剂黏度、固含量、pH、密度

四种加固剂的性能测定结果见表3。

表3 加固剂的性能

加固剂种类	黏度/(Pa·s)	固含量/%	pH	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	外观、颜色
硅氟树脂(MH)	0.040	6.10	5.39	0.92	无色透明
硅丙树脂乳液	0.064	64.20	8.08	0.89	乳白色
正硅酸乙酯(RM)	0.102	49.65	7.92	0.94	无色透明
钾水玻璃PS(23.57%)	0.571	23.57	11.42	1.15	无色透明

由表3可见，四种加固剂在原状态下的乌氏黏度（运动黏度）由大到小的顺序为PS、RM、硅丙乳液、MH，相差较大，且远高于相同温度下水的运动黏度 $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，黏度越大表明流体流动时内摩擦力越大，则加固同一种土样时的流动能力越小，所需加固时间越长，可考虑稀释后再加固；固含量由大到小的顺序为硅丙乳液、RM、PS、MH，加固剂加固强度既与加固剂本身性质有关也

与加固剂固含量有关，同种加固剂，固含量越高加固强度越高、渗透性越差，加固过程中应综合考虑渗透性和加固强度等，把加固剂固含量稀释到一定程度进行加固；四种加固剂pH由大到小为PS、硅丙乳液、RM、MH，其中MH为弱酸性、PS为强碱性，其余两种为弱碱性，而土样的pH为8.24，因此用MH或PS加固土样后可能会改变土的pH；密度由大到小的顺序为PS、RM、MH、硅丙乳液，均小于土样的密度。

### 3.2 加固剂用量及加固现象

经过试验发现原固含量的加固剂难以渗透、且会改变土样表面颜色，经过试验得出加固第一遍、第二遍时合适的加固剂稀释比例、渗透时间、加固现象见表4、表5和图1。

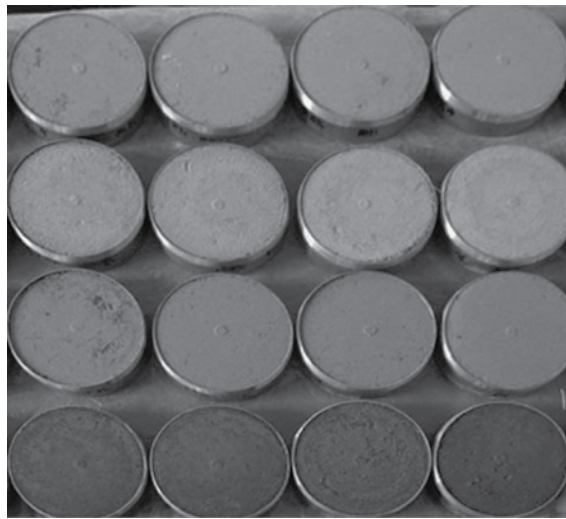


图1 土样加固第一遍后的照片

表4 加固第一遍

种类	配比	渗透时间/s	现象
MH	100%	48	无颜色变化
硅丙乳液	1 : 5纯净水	96	表面泛白
RM	3 : 7乙醇	75	无颜色变化
PS (23.5%)	3 : 97纯净水	88	颜色变深

表5 加固第二遍

种类	配比	渗透时间/s	现象
MH	100%	67	无颜色变化
硅丙乳液	1 : 8纯净水	未渗透	泛白、开裂
RM	1 : 7乙醇	94	颜色变深
PS (23.5%)	3 : 97纯净水	128	局部变黑

在四种加固剂用量分别为10mL且能渗透到土样反面的情况下，第二遍的渗透时间都比第一遍的长，且硅丙乳液在第二遍稀释比例加大的情况下，仍未能渗透。图中第一排为用MH加固后的表

面颜色，可以看出用其加固后土体的颜色没有发生变化，第二排用乳液加固后土体表面泛白，第三排的正硅酸乙酯加固使土体颜色略微变深，而且土样有微裂纹，第四排的PS加固使土样颜色变深。

### 3.3 接触角测量结果

为了解所选四种加固剂对土样的润湿、渗透性能，也为了比较用不同加固剂加固后的土样耐水渗透性，进行了加固剂在未加固土样上的接触角测试和水在已加固土样上的接触角测试。

三种透明加固剂MH、PS、RM滴到土层表面都迅速下渗，接触角为零；硅丙乳液接触角平均值为 $48.2^\circ$ ，因此MH、PS、RM对土样的润湿渗透性能要优于硅丙乳液。

用四种加固剂加固土样后，水在其表面的接触角见表6。

表6 水在加固土样表面的接触角

加固剂种类	MH	硅丙乳液	RM	PS
接触角/ $(^\circ)$	114.5	129.4	107.0	120.2

从表6可见，用四种加固剂加固后的土样对水的接触角均大于 $90^\circ$ ，说明水在加固后的土样上难以铺展，水及其所携带的腐蚀介质难以渗透进入土样，其中用硅丙乳液加固的接触角最大，用RM加固的最小。

### 3.4 加固前后密度、孔隙比、渗透系数的变化

土样加固后，自然风干5天，并测量密度、空隙比、渗透系数和含水率，并与加固前进行对比，结果见表7。

表7 土样加固前后含水率、密度、空隙比、渗透系数的变化

加固剂	空白	MH	硅丙乳液	RM	PS
密度/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.50	1.45	1.49	1.44	1.50
孔隙比	0.915	0.83	0.78	0.84	0.77
渗透系数/ $(\text{cm}/\text{h})$	1.45	0.034	0.017	0.4	0.077
含水率/%	8	5.3	4.7	4.4	4.8

由表7可知土样经加固后密度变化都不大，其中变化最大的是经RM加固后的土样，下降 $0.06 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，PS加固后土样密度不变。土样经加固后孔隙比都有所下降，加固后土样孔隙比大小依次是RM、MH、硅丙乳液、PS。加固后土样渗透系数均明显下降，说明加固剂一定程度地填充了土壤的孔隙，从而起到一定的防水功能。其中透水性最好的是用RM加固的土样，其次是用PS加固的土样，MH的透水性较差，硅丙乳液的透水性最差。

### 3.5 加固前后强度的变化

土的抗剪强度指土对剪切破坏的极限抵抗能力，反映了土体强度的本质。土的抗剪强度由滑动面上土的黏聚力（阻挡剪切）和土的内摩阻力两个力学指标组成，黏聚力是黏性土的特性指标，包括土粒间分子引力形成的原始黏聚力和土中化合物的胶结作用形成的固化黏聚力。空白土样、加固后的土样剪切强度见表8，其中 $C$ 表示黏聚力， $\phi$ 表示内摩擦角。

表8 土样加固前后剪切强度的变化

组号及 测试项目	空白		MH		RM		硅丙乳液		PS	
	C/kPa	$\phi$ / ( $^{\circ}$ )	C/kPa	$\phi$ / ( $^{\circ}$ )	C/kPa	$\phi$ / ( $^{\circ}$ )	C/kPa	$\phi$ / ( $^{\circ}$ )	C/kPa	$\phi$ / ( $^{\circ}$ )
测试结果	26.4	35.78	58.4	30.4	36.7	34.6	57.4	32.9	57.5	25.5

从表8黏聚力可见，加固后土样的黏聚力都明显增加，说明加固后土粒间的连接程度大大加强。黏聚力由大到小的顺序为MH、PS、硅丙乳液、RM，其中前三种加固剂加固的土样剪切强度相差不大，使原土剪切强度增加约119%，用RM加固后土样的剪切强度明显低于其他加固剂的。而加固后内摩擦角却有所下降，因为内摩擦角主要取决于土粒表面的粗糙程度和土粒交错排列的情况，土粒表面越粗糙、棱角越大，则土的内摩擦角越大，加固后由于加固剂包裹在土粒周围，使得土粒表面的粗糙程度下降。

土无侧限抗压强度等于土破坏时的垂直极限压力，从图2可见，加固后土样的抗压强度均增大，但增大的幅度差别很大，加固后土样的抗压强度由大到小为RM、MH、乳液、PS，其中RM、MH分别使土体的抗压强度增加了9~10倍。

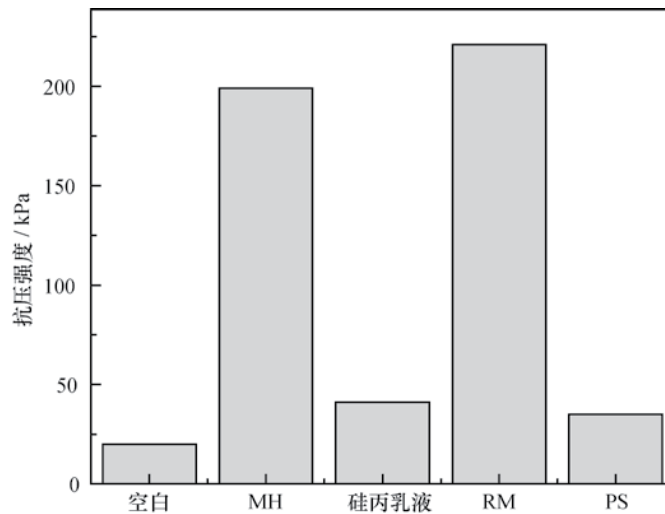


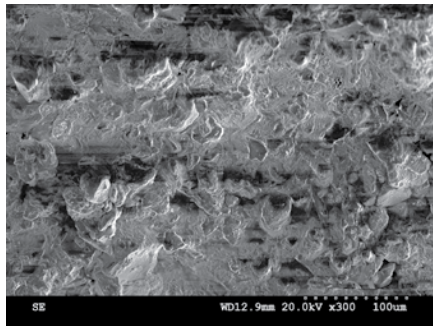
图2 8%含水率土样加固后抗压强度

### 3.6 加固前后形貌变化

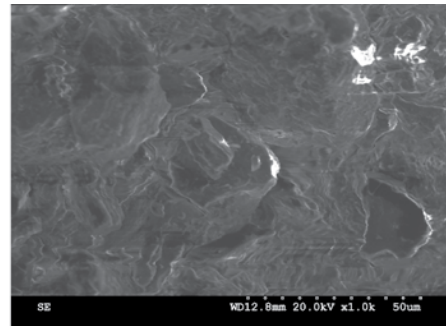
加固和未加固土样内部结构的SEM照片如图3~图7所示。

由图3~图7可见，原状土颗粒与颗粒之间黏结较少且孔隙较多，颗粒脱落留下的凹坑清晰可见；用MH加固后土粒间的孔隙减少，颗粒因硅氟树脂的网状聚合物链黏结在一起，从而增大土样抗剪强度，还有少量没有加固到的孔隙；用硅丙乳液加固后的土壤颗粒被硅丙树脂包裹并紧密地黏结在一起，孔隙被硅丙微粒填充，因此剪切强度明显增加；用RM加固后的土样孔隙中填充着大量的微小颗粒，但小颗粒间的黏结并不致密，因此其剪切强度较弱；用PS加固的土样致密度明显增大，孔隙减少，颗粒间的黏结程度高，可明显看到PS的晶体结构。



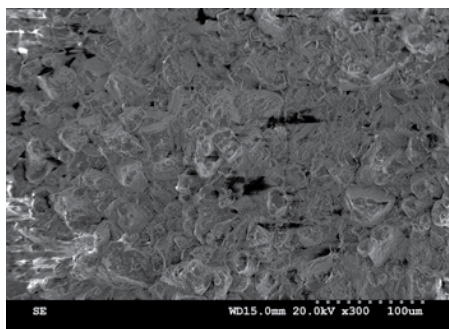


(a) 放大300倍

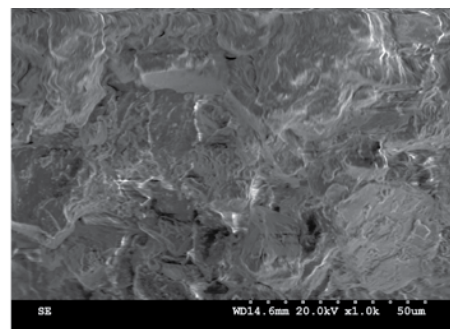


(b) 放大1000倍

图3 原状土SEM图

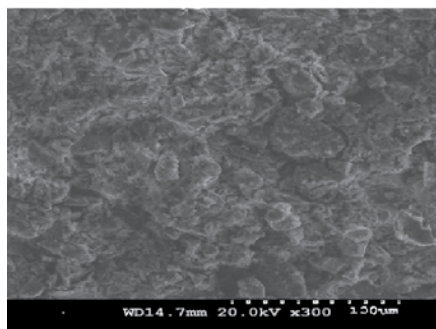


(a) 放大300倍

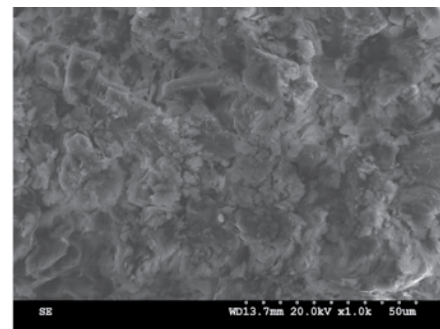


(b) 放大1000倍

图4 用MH加固的土样SEM图

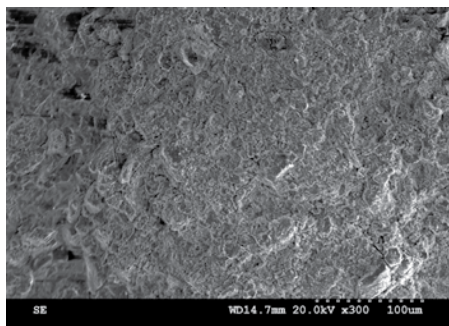


(a) 放大300倍

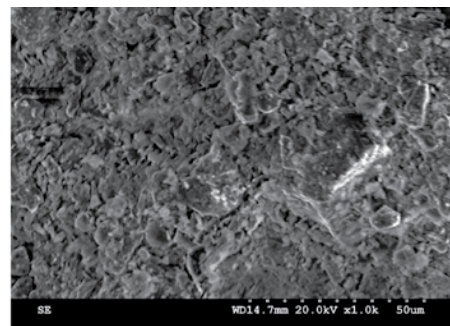


(b) 放大1000倍

图5 用硅丙乳液加固的土样SEM图



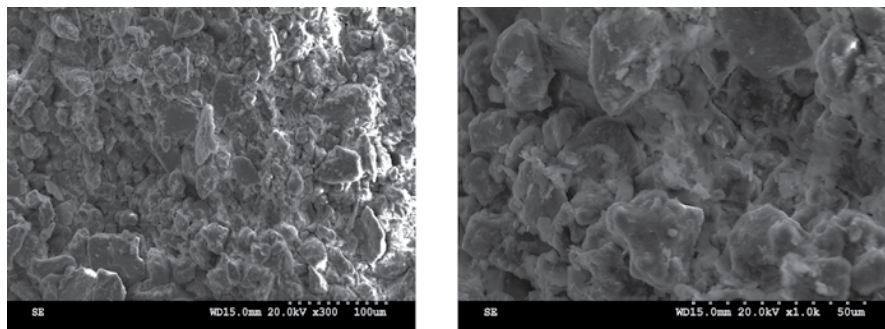
(a) 放大300倍



(b) 放大1000倍

图6 用RM加固的土样SEM图





(a) 放大300倍

(b) 放大1000倍

图7 用PS加固的土样SEM图

## 4. 结 论

(1) 用四种加固剂加固后的土样对水的接触角均大于 $90^\circ$ ，说明水在加固后的土样上润湿铺展能力变差，其中硅丙乳液的最大，正硅酸乙酯的最小。

(2) 用MH加固含水率8%的土样时渗透速度快且土样无颜色变化，无开裂现象；正硅酸乙酯渗透较快，使土样颜色略变深；PS渗透较慢且使土样颜色变深；硅丙乳液渗透最慢且第二遍难以渗透，使土样颜色变白、开裂。

(3) 用四种加固剂加固后的土样孔隙比都下降，说明加固剂会一定程度地填充土壤的孔隙。加固后水对土体的渗透系数大大下降，可有效地阻止雨水对土体的侵蚀，提高了土体的水稳定性。

(4) 加固后土样抗剪切强度都明显增加，其中用硅氟材料、硅丙乳液、PS的抗剪强度增加值相差不大，主要是加固剂中的聚合物链在土粒间形成网状黏结，微粒填充土粒间的空隙，土粒被加固剂包裹而使得土粒黏结增强、空隙减少，强度增加；用正硅酸乙酯加固的抗剪强度增加值相对较小，主要是因为正硅酸乙酯无聚合物网络结构。

(5) 经加固的土样抗压强度均增大，土样加固后抗压强度由大到小的次序为正硅酸乙酯、硅氟材料、乳液、PS。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 赵明霞. 浅谈土遗址加固保护措施. 山西建筑, 2008, 34 ( 8 ) : 144.
- [ 2 ] Walker P. Terra 2003-The ninth international conference on the study and conservation of earthen architecture. Cement Concrete Composites, 2004, ( 26 ) : 911-912.
- [ 3 ] 李最雄, 王旭东. 古代土建筑遗址保护加固研究的新进展. 敦煌研究, 1997, ( 4 ) : 167 - 172.
- [ 4 ] 国际古迹遗址理事会中国国际委员会. 中国文物古迹保护准则. 非正式出版物.
- [ 5 ] 王赞. 土遗址加固保护概述. 土工基础, 2009, 23 ( 5 ) : 30 - 32.
- [ 6 ] Degirmenci N, Baradan B. Chemical resistance of pozzolanic plaster for earthen walls. Construction and Building Materials, 2005: 536-542.
- [ 7 ] Alfred B, Ngowi. Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. Construction and Building Materials, 1997, 11 ( 1 ) : 1-7.
- [ 8 ] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement-stabilised soil. Cement Concrete Composites, 2004, 26: 811-820.

- [ 9 ] Quagliarini E, Lenci S. The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 2010, 11: 309-314.
- [ 10 ] 赵海英, 李最雄, 韩文峰. PS材料加固西北干旱区土遗址试验研究. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(1): 45-49.
- [ 11 ] 李玉虎, 万俐, 张慧, 等. 土遗址防风化加固材料的研制及加固性能比较研究. *东南文化*, 2008, (2): 91-96.
- [ 12 ] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.4—2006. 土壤检测. 第四部分: 土壤容重的测定.
- [ 13 ] 李小洁. 新型土遗址保护材料的制备、表征和应用. 成都: 成都理工大学硕士论文, 2007.
- [ 14 ] Selwitz C, Coffman R, Agnew N. The Getty Research Project at Fort Selden III: An Evaluation of the Application of Chemical Consolidants to Test Walls. 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture, 1990: 255-260.
- [ 15 ] 中国林业科学院林业研究所. LY/T 1218—1999. 森林土壤渗透率的测定.
- [ 16 ] Lehmann R G, Varaprath S, Annelin R B. Degradation of silicone polymer in a variety of soils. *Environmental toxicology and chemistry*, 1995, 14: 1299-1305.
- [ 17 ] Colston B J, Watt D S, Munro H L. Environmentally-induced stone decay: the cumulative effects of crystallization-hydration cycles on a Lincolnshire oopelsparite limestone. *Journal of cultural heritage*, 2001, 4: 297-307.
- [ 18 ] Tominaga T T, Cássaro F A M, Reichardt K, et al. On the use of surface neutron-gamma gauges to estimate soil water content. *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, 57(3): 369-374.
- [ 19 ] ASTM D5220-2002. Standard Test Method for Water Content of Soil and Rock In - Place by the Neutron Depth Probe Method. 2002.
- [ 20 ] 潘兴富, 宋晋汾. 碳化钙气压法快速测定砌块含水率. *安徽冶金科技职业学院学报*, 2010, 20(3): 43-45.
- [ 21 ] 李最雄, 赵林毅, 孙满利. 中国丝绸之路土遗址的病害及PS加固. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(5): 1047-1054.
- [ 22 ] Elert K, Sebastián E, Valverde I, et al. Alkaline treatment of clay minerals from the Alhambra Formation: Implications for the conservation of earthen architecture. *Applied Clay Science*, 2008, 39: 122-132.
- [ 23 ] 李小洁, 林金辉, 万涛, 等. 一种新型土遗址加固材料的制备及加固效果评价. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(3): 321-326.
- [ 24 ] Riegert M, Turkington A. Setting stone decay in a cultural context: conservation at the African Cemetery No. 2, Lexington Kentucky, USA. *Building and Environment*, 2003, 38: 1105-1111.