

# 中国丝绸之路土遗址的病害及 PS 加固

李最雄<sup>1, 2</sup>, 赵林毅<sup>1, 2</sup>, 孙满利<sup>3</sup>

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200;  
3. 西北大学 文博学院, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 中国丝绸之路土遗址遗存种类多、类型全、赋存环境复杂, 其主要病害按保存环境分为两类: 露天土遗址, 主要有风蚀、雨蚀和裂隙; 室内土遗址, 主要有污染、风化和裂隙。以吐鲁番交河故城为例, 研究保护加固技术, 通过对 PS 处理前后遗址土样的 X-衍射分析、结晶度测定、扫描电镜和透射电镜等方法的分析测试, 探讨 PS 加固土遗址的机制, 提出以 PS 为加固材料, 对土遗址防风蚀、雨蚀的化学加固方法; 对裂隙和危土体提出锚固和裂隙灌浆联合使用的加固技术, 尤其是楠竹加筋复合锚杆解决了大体量松软危土体的锚固问题; 对掏蚀缺损部分提出夯补及土坯砌补等加固工艺和方法。这些加固措施, 基本解决了干旱土遗址的主要问题, 提出的加固措施具有较好的适用性和应用价值。

**关键词:** 土力学; 土遗址; 病害; 保护; 加固

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)05-1047-08

## DETERIORATION OF EARTHEN SITES AND CONSOLIDATION WITH PS MATERIAL ALONG SILK ROAD OF CHINA

LI Zuixiong<sup>1, 2</sup>, ZHAO Linyi<sup>1, 2</sup>, SUN Manli<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;  
2. Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China;  
3. School of Culture and Museology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract:** The numerous earthen sites along the Silk Road of China have different environmental conditions, whose deteriorations are mainly divided into two types in terms of their locations: the unsheltered ones suffering from wind and rain erosion and crevasses, and the sheltered ones suffering from the pollution, efflorescence and crevasses. This paper studies the consolidation and conservation of the Jiaohe Ruins in Turpan, analyzing the earthen samples taken before and after consolidation with PS materials by X-ray diffractometer, measuring the degrees of crystallization and testing them with scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. This paper also discusses the mechanism of the earthen sites consolidated with PS materials, and proposes the following conservation methods: chemical consolidation method against wind and rain erosion to earthen sites with PS as the consolidating materials; consolidation method combining bamboo-steel composite anchor and crevasses grouting for dangerous soil masses; and consolidation method associating back-filling and patching-up for the eroded parts of the earthen sites. These consolidation methods provide a key to the main problem of the arid earthen sites basically; and they are practicable and applicable.

**Key words:** soil mechanics; earthen sites; deterioration; conservation; reinforcement

**收稿日期:** 2008-11-07; **修回日期:** 2009-02-05

**基金项目:** 国家科技支撑计划重点项目(2006BAK30B02)

**作者简介:** 李最雄(1941-), 男, 博士, 1964年毕业于西北师范大学高分子专业, 现任研究员, 主要从事古代壁画和土遗址保护方面的教学与研究。E-mail: lizuixiong@yahoo.com.cn

## 1 引言

土遗址是指古代建筑被毁后遗留下的土建筑体部分。按照建筑形制中国古代土遗址主要有4种类型：木构建筑被毁后，遗存下的夯土、土坯墙体以及房屋地面等；木构建筑、砖石建筑等建筑体的夯土、生土基础；生土挖掘的坑、穴、窑、窖等；夯土、生土、土坯及板筑泥等建造的长城、烽燧、关隘、故城、土塔、陵墓等。

根据土遗址的性质，中国古代土遗址的主要主要分为以下几类：

### (1) 新石器时代的居住遗址

最著名的如西安东南郊的半坡遗址和甘肃秦安县的大地湾遗址。半坡是中国黄河流域的一个典型的母系氏族公社聚落遗址，距今6 000多年，主要建筑土遗址包括房屋遗址(墙壁残段、椽痕迹、堆积泥块等)、圈栏遗迹、窑穴和窖址等。秦安大地湾遗址是仰韶时期的一处人类生活居住遗址，距今4 500~7 000 a，主要遗迹有房屋遗址、陶窖、混凝土地面、夯土墙以及夯土和外敷泥层的柱洞等。

### (2) 古城

交河故城是丝绸之路上一座以生土、夯土与埥泥(又称版筑泥)相结合建造的，是一座具有非常重要的历史、科学和考古价值的古城。著名的古城还有新疆吐鲁番的高昌故城等，是以夯土及土坯相结合建造墙体。

### (3) 长城、关隘、烽燧及土塔等

这一类型的土遗址以甘肃临洮、渭源一带的战国秦长城和敦煌、安西境内的汉长城最具有代表性。战国秦长城以粉质黏土夯筑，烽燧以粉质黏土夯筑基础，之上的房屋以土坯建造墙体。敦煌、安西境内的汉长城由戈壁的砂土夯筑，一定厚度夹一层芨芨草、芦苇或灌木枝条等。

### (4) 陵墓

宁夏回族自治区东部贺兰山下的西夏王陵最具有代表性。西夏王陵的土遗址包括巨大的粉质砂土夯筑的封土、陵院的墙体、土塔和部分木构建筑的墙体。

### (5) 出土的坑、穴、窑、窖

这一类土遗址有2个典型代表：一个是陕西省临潼县的秦始皇兵马俑土坑，坑道是在生土层中挖

建的，上面是木构建筑，木建筑被烧毁后留下土坑遗址，部分坑壁被火烧呈土红色，坑壁上残留木构件遗迹；另一个是河南三门峡的虢国墓地车马坑，遗址土属黄色粉土，战车以土构外形保存。

以上是遗存在中国西北丝绸之路上具有很高历史、科学和艺术价值各类土遗址的典型代表。由于该地区气候干燥、少雨，这批土遗址才能幸存下来。但是，千百年来，在戈壁荒野中强劲风沙的风蚀和集中式强降雨的严重雨蚀破坏下，这些幸存下的土遗址也处于濒危之中，现正以惊人的速度毁坏成一堆堆砂土，消失在中国西北戈壁荒野中。

20世纪80年代末开始，作者<sup>[1-3]</sup>开展了对遗存在中国西北古丝绸之路上较干燥环境中土遗址的保护研究。十多年来，经过大量的室内试验研究和在交河故城、玉门关、西安半坡、秦俑坑以及三门峡西周墓地车马坑等土遗址的现场试验和加固工程<sup>[4-14]</sup>，建立了一套以PS(高模数硅酸钾)为主要加固材料的土遗址加固工艺和方法，有效地抢救保护了一批这一地区的土遗址。

## 2 土遗址的主要病害

遗存在中国西北地区的土遗址所处的环境有两类：一类是露天，如交河故城、西夏王陵、汉长城、玉门关等；另一类是保存在室内的土遗址，如西安的半坡遗址，在考古发掘后立即建造了保护性的建筑掩体，还有甘肃秦安大地湾 F901 房屋遗址，在发掘后也立即建造了大厅，将遗址保存在室内。由于土遗址保存的环境不同，因此所存在的病害及破坏因素也不同<sup>[15-22]</sup>。露天土遗址以交河故城为例，室内土遗址以半坡遗址为例，分别介绍其主要病害和破坏因素。

### 2.1 交河故城

交河故城处于新疆吐鲁番盆地，属典型的大陆性暖温带干旱荒漠气候。气候环境具有干热、少雨的特征，夏季高温、干燥，冬季干冷，最大降水量为48.4 mm，最少为2.9 mm。在这种环境中土体有较高的强度，因此，遗址基本保存下来，如大佛殿直立高达约8 m的墙体，可看出当年建筑的宏伟和壮观。

但是，遗址在严重风蚀破坏和集中式强降雨的雨蚀破坏下，遗址土体四处开裂坍塌，其主要病害

有风蚀、雨蚀、裂隙发育及危土体坍塌等。

### (1) 风蚀

吐鲁番地区长年吹强劲的西北风, 8~12 级大风和沙暴年出现率高。遗址处于一个地理位置较高的台地上, 大风携带台地的砂土、砂粒以及钙结核, 年复一年对遗址造成的风蚀破坏非常严重。板筑泥墙面上的草泥层被磨蚀殆尽, 特别是遗址面向西北的墙面被风蚀得千疮百孔, 有的墙面凹凸不平呈蜂窝状, 有的呈鳞片状龟裂剥离, 甚至有的墙体局部被风蚀穿透(见图 1)。



图 1 风蚀

Fig.1 Wind erosion

遗址的墙基由于在生土层上开挖而成, 强度较低, 因此大部墙基被风蚀凹进, 使墙体呈倒立“棒槌山”形, 很容易造成坍塌破坏。

### (2) 雨蚀

经分析, 遗址的墙体是由台地的砂土制作的垛泥建造而成。这种砂土在干燥的环境中, 虽有较高的强度, 一旦遇到雨水便立即崩解成泥浆而流失, 或者形成较厚的泥皮在其他外营力作用下脱落(见图 2)。气象资料记载, 吐鲁番地区虽然非常干旱少



图 2 雨蚀

Fig.2 Rain erosion

雨, 但会出现集中式的强降雨, 有时一场大雨的降雨量几乎接近年降雨量。在两千多年漫长岁月里, 这种偶尔大雨冲刷和侵蚀所造成的破坏是可想而知。

### (3) 裂隙发育、墙体坍塌

强烈日温差所引起的反复胀缩、以及地震、冻融和卸荷等自然因素的影响, 使遗址产生许多纵横交错的裂隙。在遗址内, 长期经雨水侵蚀, 裂隙逐渐发育延伸, 导致开裂坍塌的残墙断壁四处可见, 对遗址的毁坏非常严重。

### (4) 风化

经过分析, 遗址墙体的土中含有较多的方解石。由于方解石是一种耐冻融很差的矿物, 当遭到反复冻融后, 易产生风化。虽然遗址的土体中可溶盐含量不大, 但是遗址的墙基处, 可溶盐随雨水迁移富集, 相对含量却较高。随环境温湿度频繁变化, 可溶盐反复溶解收缩—结晶膨胀—再溶缩—再结晶膨胀, 这样频繁活动产生的风化在墙基处十分明显。因此, 遗址的墙基大部凹进, 像即将倾倒的“棒槌”。

## 2.2 半坡遗址

半坡遗址位于西安东郊浐河东岸, 是黄河流域一个典型的母系氏族公社聚落遗址, 距今 6 000 多年。1953 年发掘后建造了保护掩体。其主要病害有污染、风化、裂隙发育、块状剥落等。

### (1) 严重的污染

半坡遗址发掘出土已 40 多年, 虽然当时修建了保护大厅, 但因保护大厅比较简陋, 四周有许多高窗。遗址附近有火力发电厂、煤场和绵纺织厂。电厂的烟尘、随风飘来的煤粉、纺织厂飘来的棉绒, 对遗址的污染十分严重。遗址新出土时表面呈淡黄微带红色的黄土, 但经过 40 多年的污染, 表面覆盖了一层厚 2~3 cm 的灰尘和棉绒, 呈暗灰色。

### (2) 风化、泛碱

由于遗址的黄土中含有可溶盐, 分析结果主要是无水芒硝( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )。受环境温湿度变化和地下水的影 响, 可溶盐反复溶解收缩—结晶膨胀, 使遗址受到严重的风化破坏。如部分房屋遗迹、墙壁残段和椽痕迹等, 和出土时相比, 外观变化很大。一些风化特别严重者, 已面貌全非, 变成一堆堆的积土。风化严重的遗址面上又覆盖了一层厚厚的烟尘、棉绒, 和 风 化 层 混 在 一 起, 无 法 分 离, 给 化 学 加 固 带 来 了 很 大 困 难。

### (3) 裂隙发育、块状剥落

半坡遗址中的部分房屋墙壁残段、窖穴和窑址等, 由于受干燥收缩和卸荷等自然因素的影响, 严重开裂、块状剥落, 使遗址遭受到严重破坏。

## 3 土建筑遗址的加固

根据土遗址的主要病害特征和破坏因素, 并以吐鲁番交河故城为例, 介绍以 PS 为加固材料, 对土遗址防风蚀和雨蚀的化学加固; 对裂隙、危土体的锚固和裂隙灌浆; 对掏蚀缺损部分的夯补及土坯砌补等。

### 3.1 防风蚀、雨蚀的喷洒 PS 渗透加固及滴渗、压注 PS 渗透加固

总结过去 PS 在土遗址现场所做的加固试验, 以及近年在吐鲁番交河故城所做的加固工程, 根据土遗址表面风化特征的不同, PS 防风蚀、雨蚀和风化的渗透加固有以下主要工艺方法:

#### (1) 低浓度 PS 多次喷洒渗透加固

根据遗址墙体风蚀的严重程度, 将加固的墙体分为两类: 一类是严重风蚀, 另一类是轻微风蚀。对轻微风蚀的墙面以低浓度的 PS 进行多次喷洒渗透加固, 每次喷洒间隔一般 3 d 为宜, 其原则是待第一次喷洒的 PS 凝固且干透后再做第二次喷洒。这样尽可能使 PS 达到理想的渗透深度。同时, 在加固过程中逐渐提高 PS 的浓度。依次采用模数为 3.8, 浓度分别为 3%, 5%, 7% PS 喷洒进行渗透加固。一般情况下, 最后一次喷洒用 5% PS, 孔隙特别大的墙体, 最后一次喷洒用 7% PS。

土遗址中, 有些墙体风蚀特别严重, 墙面上形成许多约 5 cm 大小不同的凸出小块, 这些凸出小块的底部非常疏松, 大部已松动, 和墙体连接不牢, 随时都会剥离。遇到这种情况时, 先用 3% PS 喷洒加固, 使松动的小块初步加固, 同时具有一定耐水性。待第一遍喷洒的 PS 干燥后, 再从墙体上部开始, 依次向下喷洒 3% PS 掺加少量细粒遗址土的稀浆液。注意泥浆不宜太稠, 应有较好的流动性, 使其充分渗入到小土块底层疏松部位和裂隙中, 使与墙体黏连。待喷洒的泥浆完全干透后, 用与上述相同方法喷洒(3%~5%)PS, 以加固喷洒在墙体上的泥浆及墙面。如果松动的小块有 10 cm 以上的大小, 可在小块上钉入相当于饭筷粗细的竹钉, 再在小块

的下部用注射器注入上述 PS 掺加少量细粒遗址土的稀浆液。待小土块加固完全干透稳定后, 再按上述工艺方法对遗址墙体做进一步的 PS 渗透加固。

有些遗址的墙体夯筑较密实, PS 渗透性较差。如果在气温较高的环境下喷洒加固, 水分挥发快, 大部分 PS 凝固在墙体表面, 使强度过高, 就有可能形成较硬的外壳而产生剥离。遇到这种情况时, 先以干净水喷洒, 使墙面湿润, 半干时再喷洒 PS, 能获得较好的渗透加固效果。另外, 遗址土体表面做完 PS 渗透加固后, 还要喷洒一遍 3% PS 掺加适量细粒遗址土配制的浆液作旧, 这样可达到保持原状的效果。

#### (2) 滴渗及压注渗透

有些土遗址局部风化严重, 疏松层较厚。这种情况下, 只用喷洒渗透的方法达不到加固的目的。对这种土体的加固, 通过现场试验找到了一种有效的加固方法, 即“滴渗”, 其工艺程序是: ① 在遗址疏松土体的适当部位开一些直径 6 mm 左右的微孔; ② 在微孔中插入直径 3 mm 较硬的胶管; ③ 将配制好的(5%~7%)PS 盛入一个特制的容器, 并将容器安置在较高的部位; ④ 将插入疏松土体小胶管与盛 PS 容器上的小出浆管连接, 这时就可开始利用 PS 的静压向疏松土体中慢慢滴渗 PS。这种滴渗过程正如人打吊针一样。疏松土体上的孔距以每个孔的渗透半径而定, 其原则是渗透范围最后连片。

对文物本体, 如墙面上的小裂隙及上述松动小土块下部的小裂隙, 用注射器压注射 7% PS, 或压注 3% PS 掺加少量细粒遗址土的稀浆液进行加固。

交河故城崖体上有多处较厚的夹沙层或松软层, 对这一松散崖体加固时, 采用在松软夹层中插入直径约 15 mm、管壁上有许多小注浆孔的注浆钢管, 以注浆机压注(7%~10%)PS 进行渗透加固。注浆管的长短视松软层的厚度而定, 以达到需注浆的部位为目的。若松软层孔隙特别大, 可在(7%~10%)PS 中掺加适量细粒黏土配制的浆液注浆加固。

PS 加固后的墙体, 一般呈现较新, 颜色和质感与原墙体稍有差别。这种情况下, 可进行作旧处理。其工艺方法是, 在已经做完 PS 渗透加固的遗址土体面上, 喷洒一遍用净水与遗址细粒黏土配制的稀泥浆, 待干燥后, 再以 3% PS 喷洒加固, 可达到修旧如旧的效果。有些加固后的墙体, 经半年左右的

时间, 也可恢复到与原墙体基本相同的外貌, 这种情况下, 就不必再进行作旧处理。

在实际施工时, 上述 2 种办法可单独使用, 也可组合使用, 这要根据遗址表面特征的实际状况选择。

### 3.2 掏蚀缺损部位夯补及土坯砌补加固

#### (1) 掏蚀缺损部位夯补

露天的古代土遗址, 经过千百年的风化、风蚀和雨蚀作用, 一般墙基被严重掏蚀, 形成上大下小的倒立“棒槌山”形, 很容易造成坍塌破坏。如果轻微掏蚀, 就可用夯补的方法进行加固。这种补缺的工艺方法是: ① 先将缺损部位酥松的风化层清理干净, 然后用(3%~5%)PS 喷洒渗透加固 2~3 遍, 这样可使夯土体与遗址土体牢固结合; ② 待缺损部位风化面处理完并干燥后, 就可用可溶盐含量较低的黏土, 掺加约 1/6 的石灰(过筛), 用净水拌和均匀, 培筑被掏蚀凹进的部分。若用掺加适量 PS 的水(约 0.5%)拌和夯土, 效果会更好。如果补夯的土体体量较大、较厚时, 可在夯土体与遗址土体间布放一些小木杆以增强两者的结合强度。其做法是, 每夯一层土, 就布置适当大小及适当数量的木杆。做法是将木杆的一端钉入遗址土体, 另一端布放在夯土层面上。若木杆较大时, 插入遗址土体的一端要进行锚固, 这样才可确保两土体间的牢固结合。木杆的大小、长短、插入遗址土体的深度以及布放在夯土层面上的长度等, 都以工程具体的设计要求而定, 同时, 对木杆最好做防腐处理。

#### (2) 掏蚀缺损部分土坯砌补

如果墙基被严重掏蚀, 凹进很深, 这时无法夯筑。原因之一是垂直墙体夯筑无法施工; 原因之二是夯筑会产生振动, 随时可能造成墙体坍塌。这种情况下, 将配制的夯筑土调成泥, 制作土坯, 用这种干透的土坯做砌体, 填充掏蚀凹进的部位。在建造砌体前, 像上述夯补一样对遗址缺损部位的风化层面进行清理和 PS 渗透加固。建造土坯砌体时, 也要像上述夯补遗址缺损部分一样, 在土坯砌体与遗址土体间布放一些小木杆以增强两者的结合强度。另外, 建造土坯砌体时, 每做一层土坯砌体, 就要做一次灌浆, 以使土坯砌体与遗址土体间, 以及土坯相互间牢固紧密地结合, 防止大气降水入渗而对遗址造成破坏。

无论夯补还是砌补都应坚持以下原则: 在满足

遗址稳定的前提下尽可能少干预; 新加部分要灌浆密实并与原遗址用连接筋相连; 加固是应尽量淡化外形, 不要求表面很规整。

### 3.3 裂隙、危土体的锚固和裂隙灌浆加固

与过去做石窟加固工程一样, 在土遗址加固工程中, 对裂隙进行灌浆和对危土体进行锚固是一项非常重要的工程措施。遗存在戈壁荒野中土遗址, 由于强烈昼夜温差、长年不停的风蚀、集中式强降雨的冲刷入渗、地震、冻融和卸荷等自然因素引起的开裂——坍塌, 是造成土遗址毁灭性破坏的主要原因。因此, 遗址的加固保护不仅要进行表面的防雨蚀、风蚀、风化的化学加固处理, 更重要的要进行裂隙灌浆及危土体锚固, 这样才能达到对土遗址的有效加固保护。

#### (1) 危土体锚固

经过多年室内研究、现场试验及玉门关、河仓城、宁夏西夏陵三号陵、特别是目前正在进行的吐鲁番交河故城加固工程的总结, 对于旱半干旱地区土遗址锚固的锚杆主要有: 硬木质锚杆、楠竹锚杆及楠竹加筋复合锚杆。

楠竹加筋复合锚杆是加固交河故城崖体时研发的、并获得国家专利的一种新型锚杆。因为交河故城崖体加固设计中有近 30 m 长的锚杆, 同时, 松软土体的锚杆应体量大、重量小, 这样才能达到有效的锚固。经过试验研究, 用环氧树脂掺加粉煤灰、石棉等调制的胶泥将钢绞线浇筑在楠竹中, 再用环氧树脂将玻璃布缠裹楠竹。因为环氧树脂是目前所有的黏接剂中, 老化性能最好、黏接性最强且价廉的黏接剂, 既能很好的黏接金属, 也能很好的黏接竹木材。楠竹中浇筑钢绞线的数量视设计而定。

锚固采用的浆液为: PS-(C+F)(PS 为模数为 3.8, 浓度为 10%的硅酸钾, C 为遗址粉土, F 为粉煤灰)。

锚固工序为: 成孔→清除孔中积土→渗透 PS 加固孔壁→安置锚杆→压浆→安放锚板(只限楠竹加筋复合锚杆)→修复锚孔并作旧。

另外, 交河故城崖体高达近 30 m, 崖体之上离崖面 3~25 m 处有多条平行于崖面的宽深裂隙, 导致崖体向外倾斜。这种裂隙锚固之前必须采取临时性支护措施, 先将危崖体稳定。否则, 施工过程中由于钻机的振动, 很可能造成崖体坍塌。

#### (2) 裂隙灌浆

交河故城文物本体和崖体上大小不同的裂隙纵

横交错,将遗址土体切割成许多大小不同的块,特别在崖体上,多条平行于崖面的宽深裂隙,将大块的土体与崖体切割开。这种情况下,一旦雨水入渗到裂隙中,会使土体软化,造成崖体坍塌而毁坏遗址。因此,交河故城文物本体和崖体裂隙均应进行灌浆以填充密实,防止雨水入渗。同时,危土体锚固后,一旦雨水入渗到裂隙中,也会使锚杆周围的土体软化,使锚固力迅速下降,造成土体坍塌。另外,若裂隙不进行注浆填充,时间长了,裂隙中会不断填充砂土、裂隙两壁会产生风化,也会影响锚固效果。因此,锚固后裂隙灌浆填充的密实与否,是保证锚固作用的关键。但是,裂隙灌浆应在锚固之后并达到一定强度后进行,理由与上述相同。

裂隙灌浆的工艺程序是:①先用模数为3.8、浓度5%PS对裂隙口两侧喷洒渗透加固,然后用7%PS与遗址土调制的泥封闭裂隙并插入注浆管;②较宽的裂隙注入适量5%PS以渗透加固裂隙两壁的风化面及裂隙中无法清除的砂土;③注浆;④待浆液完全凝固并达到一定强度后切割露出的注浆管;⑤用3%PS与遗址土调制的泥修复注浆口并作旧。文物本体的裂隙均采用PS-C浆液进行注浆。较宽大的裂隙(裂隙宽>10cm),用注浆机压力注浆,小裂隙用大型注射器人工注浆。究竟采用哪一种浆液,以施工设计要求而定。

交河故城崖体上有些裂隙宽达50~100cm、深达约20m,像这样宽深的裂隙应采取分期、分段、或分层的工艺方法进行灌浆,且待第一期注入的浆液凝固并达到一定强度后再进行第二、三等,依次注浆。否则,短时间内一次性将大量浆液灌注到裂隙中,可能造成土体软化而崖体坍塌。另外,像这样宽深的裂隙灌浆时,可灌一层浆液,适量填充一层小土块,依次注浆。为保证灌浆的密实度,在裂隙上部注浆时不宜填充土块,因为这种注浆的主要目的是填充裂隙,防止雨水入渗对遗址造成破坏。

## 4 PS加固土遗址的机制探讨

通过对PS处理前后的黏土试样的X-衍射分析、结晶度测定、扫描电镜和透射电镜分析等方法的测试研究,探讨PS加固土遗址的机制。

### 4.1 X衍射分析

X衍射分析采用日本理学D/max-2400型X-衍射仪,分析经PS处理前后的遗址土。

### 4.2 扫描电镜分析

SEM分析是在日本电子公司(TEOL)生产的JSM-5600LV扫描电镜上进行。

### 4.3 透射电镜分析

TEM分析是在日本电子公司生产的JEM-1200EX透射电镜上进行。

### 4.4 结果讨论

对遗址土做PS处理前后的XRD分析(见图3,4),遗址土各晶态物质的X衍射峰强度明显下降,衍射谱图中出现了一个非晶态物质的弥散峰。这主要是由于PS材料固化后产生的二氧化硅与土粒胶凝形成一种非晶态的网状胶凝体所致。

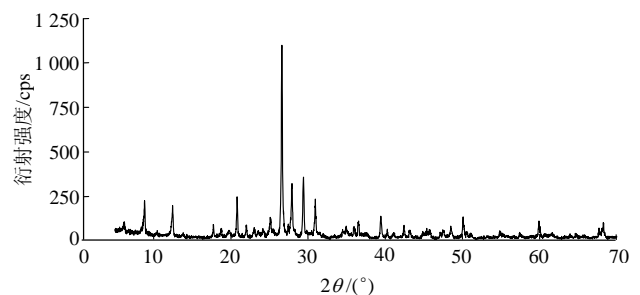


图3 PS处理前的遗址土XRD图谱

Fig.3 XRD graph of the site earth without being treated by PS solution

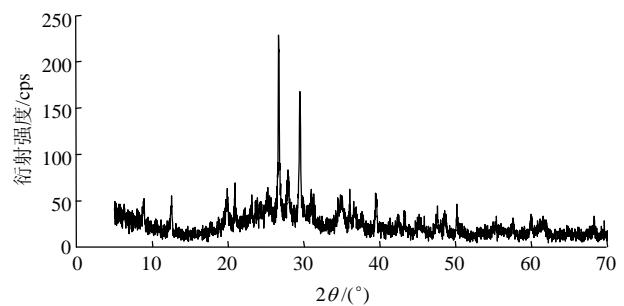


图4 PS处理后的遗址土XRD图谱

Fig.4 XRD graph of the site earth treated by PS solution

从图5,6可以看出,黏土试样经PS处理前为层状、片状结构,各晶体之间相互分离、孔隙大,这种结构具有吸水性强、力学强度小的特点,是黏土矿物易于风化的内在原因。而经PS加固后,可看到黏土的片状结构消失,较大的孔隙也被充填,变为一种网状的致密结构。

从图7,8可以看出,黏土矿物的单晶呈规则的片状形态,电子衍射图也呈规则的六边形,说明是一个完好的单晶。经PS处理后,晶体形状发生了很大变化,电子衍射图证明黏土矿物已由纯粹的单晶变化为非晶化的混合晶体。



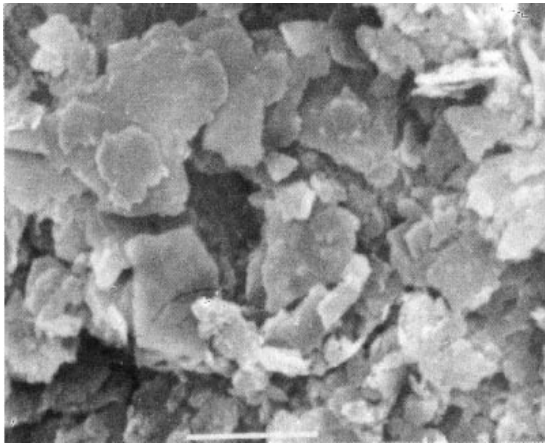
图 5 未经 PS 处理的遗址土电镜照片( $\times 5\ 000$ )

Fig.5 Scanning picture of the site earth without being treated by PS solution( $\times 5\ 000$ )

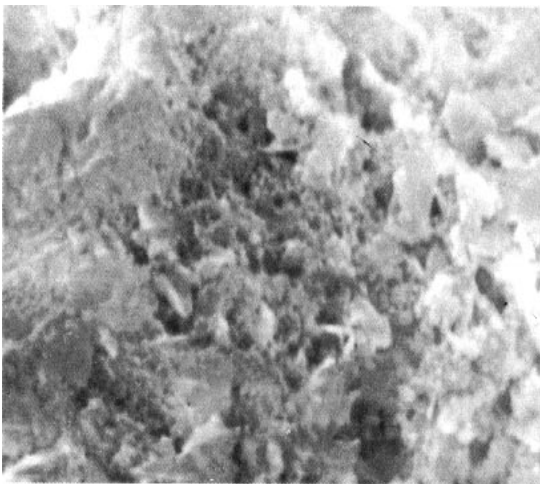
图 6 经 PS 处理后的遗址土电镜照片( $\times 5\ 000$ )

Fig.6 Scanning picture of the site earth treated by PS solution( $\times 5\ 000$ )

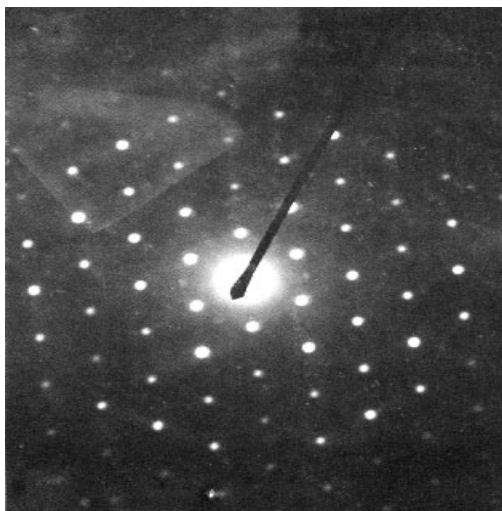


图 7 未经 PS 处理遗址土电子衍射图

Fig.7 Diffraction graph of the site earth without being treated by PS solution



图 8 经 PS 处理后的遗址土电子衍射图

Fig.8 Diffraction graph of the site earth treated by PS solution

## 5 结 论

不同环境下土遗址的病害也不相同, 丝绸之路土遗址的保存形式有 2 种: 露天和室内, 露天土遗址的主要病害是风蚀、雨蚀和裂隙, 室内土遗址的主要病害是污染、风化和裂隙。保护土遗址需要解决的主要问题是表面风化和坍塌。遗址土经 PS 处理后, 改变了分离状、片状的晶态黏土矿物微观结构, 形成了一种致密的非晶态网状凝胶结构, 这种结构的变化大大提高了黏土力学强度、水稳定性和抗风化能力, 采用 PS 加固土遗址表面风化是一种有效的方法。而对遗址的坍塌, 可采用补缺、锚固和化学灌浆的方法处理。

## 参考文献(References):

- [1] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 2003.(LI Zuixiong. Conservation of ancient sites on the silk road[M]. Beijing: Science Press, 2003.(in Chinese))
- [2] 李最雄, 王旭东. 古代土建筑遗址保护加固研究的新进展[J]. 敦煌研究, 1997, (4): 167 - 172.(LI Zuixiong, WANG Xudong. The new progress of protection and reinforcement for the ancient earthen architecture site[J]. Dunhuang Research, 1997, (4): 167 - 172.(in Chinese))
- [3] 李最雄, 张虎元, 王旭东. 古代土建筑遗址的加固研究[J]. 敦煌研究, 1995, (3): 1 - 17.(LI Zuixiong, ZHANG Huyuan, WANG Xudong. The reinforcement research of the ancient earth-structure sites[J]. Dunhuang Research, 1995, (3): 1 - 17.(in Chinese))
- [4] 李最雄, 王旭东, 张志军, 等. 秦俑坑土遗址的加固试验[J]. 敦煌研究, 1998, (4): 151 - 158.(LI Zuixiong, WANG Xudong, ZHANG

- Zhijun, et al. A reinforcement test of the earthen sites of Qin's Terra-cotta Army pit[J]. Dunhuang Research, 1998, (4): 151 - 158.(in Chinese))
- [5] 李最雄, 王旭东, 田琳. 交河故城土建筑遗址的加固试验[J]. 敦煌研究, 1997, (3): 171 - 181.(LI Zuixiong, WANG Xudong, TIAN Lin. Experimentation of chemical consolidation on ancient earth-structure sites of Jiaohe[J]. Dunhuang Research, 1997, (3): 171 - 181.(in Chinese))
- [6] 李最雄, 王旭东, 郝利民. 室内土建筑遗址的加固试验——半坡土建筑遗址的加固试验[J]. 敦煌研究, 1998, (4): 144 - 149.(LI Zuixiong, WANG Xudong, HAO Limin. The reinforcement test of indoor ancient earth-structure sites, Banpo sites[J]. Dunhuang Research, 1998, (4): 144 - 149.(in Chinese))
- [7] 王旭东, 张鲁, 李最雄, 等. 银川西夏3号陵的现状 & 保护加固研究[J]. 敦煌研究, 2002, (4): 64 - 72.(WANG Xudong, ZHANG Lu, LI Zuixiong, et al. The study of existing condition and consolidation project of No.3 Tomb of the Western Xia mausoleums[J]. Dunhuang Research, 2002, (4): 64 - 72.(in Chinese))
- [8] 内蒙古博物馆. 大窑遗址四道沟地层剖面“PS”材料保护加固试验报告[J]. 内蒙古文物考古, 2002, (1): 135 - 139.(Inner Mongolia Museology. The test report of reinforcement and protection of stratum section of fourth gulch in Dayao sites by PS material[J]. Inner Mongolia Cultural Relics and Archaeology, 2002, (1): 135 - 139.(in Chinese))
- [9] 杨涛, 李最雄, 谌文武. PS-F 灌浆材料的物理力学性能[J]. 敦煌研究, 2005, (4): 40 - 50.(YANG Tao, LI Zuixiong, CHEN Wenwu. Mechanical and physical properties of PS-F grouting material[J]. Dunhuang Research, 2005, (4): 40 - 50.(in Chinese))
- [10] 王旭东. 中国西北干旱环境下石窟和土遗址保护加固研究[博士学位论文][D]. 兰州: 兰州大学, 2003.(WANG Xudong. The conservation and consolidation of the grottoes and the earthen architecture site in the arid region of Northwest China[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2003.(in Chinese))
- [11] 赵海英. 甘肃境内战国秦长城和汉长城保护研究[博士学位论文][D]. 兰州: 兰州大学, 2005.(ZHAO Haiying. Study on conserving the Great Wall of Qin Dynasty at the waring states period and the Han Dynasty in Gansu Province[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005.(in Chinese))
- [12] 孙满利. 交河故城保护加固研究[博士学位论文][D]. 兰州: 兰州大学, 2006.(SUN Manli. A study of the protection and reinforcement about the Ruins of Jiaohe of Turpan[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.(in Chinese))
- [13] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 交河故城瞭望台保护加固技术[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 163 - 168.(SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Technology of protection and reinforcement for observation platform in Ruins of Jiaohe[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 163 - 168.(in Chinese))
- [14] 郭青林, 王旭东, 李最雄, 等. 敦煌阳关烽燧现状调查与保护研究[J]. 敦煌研究, 2007, (5): 63 - 67.(GUO Qinglin, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Actuality investigation and protection research on Yangguan in Dunhuang[J]. Dunhuang Research, 2007, (5): 63 - 67.(in Chinese))
- [15] 黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 111.(HUANG Kezhong. The conservation of rock and earth structure sites[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 111.(in Chinese))
- [16] 王银梅. 西北干旱区土建筑遗址加固概述[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 189 - 192.(WANG Yinmei. A brief of reinforcement of earth structure sites in the arid areas of Northwest China[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(2): 189 - 192.(in Chinese))
- [17] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 西北干旱区土遗址的主要病害及成因[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2 875 - 2 880.(ZHAO Haiying, LI Zuixiong, HAN Wenfeng, et al. Main diseases and their causes of earthen ruins in region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 2 875 - 2 880.(in Chinese))
- [18] 孙满利, 李最雄, 王旭东. 交河故城的主要病害分析[J]. 敦煌研究, 2005, (5): 92 - 94.(SUN Manli, LI Zuixiong, WANG Xudong, et al. The characteristic of primary damages about the Ruins of Jiaohe[J]. Dunhuang Research, 2005, (5): 92 - 94.(in Chinese))
- [19] 秦俑坑土遗址保护课题组. 秦俑坑土遗址的研究与保护[C]// 秦始皇兵马俑博物馆. 秦俑学研究. 西安: 陕西人民教育出版社, 1996: 1 388 - 1 403.(The Problem Team of the Conservation Arthen Sites of Qin's Terra-cotta Army Pit. Preservation and research of the earthen sites of Qin's Terra-cotta Army Pit[C]// Emperor Qin's Terra-cotta Warriors and Horse Museum ed. Studies on Chin Yung. Xi'an: Shaanxi People's Education Press, 1996: 1 388 - 1 403.(in Chinese))
- [20] 解耀华. 交河故城的历史及保护修缮工程[C]// 交河故城保护与研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1999: 31 - 32.(XIE Yaohua. History, protection and restoration of the Ruins of Jiaohe[C]// Preservation and Research of the Ancient Ruins of Jiaohe. Urumchi: Xinjiang People's Publishing House, 1999: 31 - 32.(in Chinese))
- [21] 张志军. 秦兵马俑文物保护研究[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1998: 104 - 106.(ZHANG Zhijun. A study of conservation of Emperor Qin's Terra-cotta Warriors and Horse[M]. Xi'an: Shaanxi People's Education Press, 1998: 104 - 106.(in Chinese))
- [22] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 交河故城的裂隙特征研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 612 - 617.(SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Study about the cranny characteristics of the Ruins of Jiaohe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 612 - 617.(in Chinese))