

文章编号: 1000-7598 (2009) 07-1883-09

土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究

张虎元¹, 刘平¹, 王锦芳², 王旭东³

(1.兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000;
2.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 3.敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200)

摘 要: 以交河故城土遗址为原型, 通过现场调查、取样和室内试验, 研究了土建筑表面结皮的物理化学性质, 提出了土质墙体表面结皮的形成与剥离机制。粒度分析、粉晶 X 射线衍射分析、易溶盐离子色谱分析表明, 与下伏母墙相比, 结皮层粒度偏细, 易溶盐含量偏低; 红外摄像测温显示, 结皮层升温、降温幅度更大。研究认为, 土建筑遗址结皮层的形成是墙面土体局部饱和崩解、泥浆蠕移干燥的结果, 其形成初期对抵抗土遗址风化起到一定的保护作用, 但随后在剧烈的热胀冷缩作用及风蚀作用下发生剥离和脱落, 反而加速土遗址的劣化进程。

关键词: 土遗址; 风化; 结皮; 剥离

中图分类号: TU 521 **文献标识码:** A

Generation and detachment of surface crust on ancient earthen architectures

ZHANG Hu-yuan¹, LIU Ping¹, WANG Jin-fang², WANG Xu-dong³

(1.Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China; 3.Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China)

Abstract: Field survey, systematic sampling and laboratory tests were conducted to study the weathering mechanism of earthen architecture taking the Jiaohe Relics site, Xinjiang, China for example. Particle size analysis, X-ray diffraction and chemical analysis of soluble salts illustrate that surface crusts are characterized by finer particles and lower soluble salts contents compared with the host soil. Temperature monitoring by IR thermography camera and thermal sensors shows that thin crusted layers response greatly and quickly to the environmental temperature change. It is concluded that the local saturation and slurry film generation due to rainfall are mainly responsible for the formation of surface crusts; and the crust will be subsequently detached by wind erosion and expansion-contraction induced by the change of temperature. Surface crusted layer prevents the wall from weathering to some degree at its earlier formation stage but tend to accelerate the deterioration of the earthen architectures in the long term considering that Jiaohe site suffer from strong sandstorm and strict weather condition.

Key words: earthen architecture; weathering; crust; detachment

1 引 言

西北干旱、半干旱地区沿丝绸之路遗存了大量的古代土建筑遗址, 这些土遗址是利用粉质黏土或粉质砂土夯筑, 或直接利用生土挖造, 或利用土坯砌筑, 或用木模板筑泥建造而成^[1]。与岩石相比, 遗址土体强度低, 水稳定性能差, 这决定了土质文物尤其是露天保存的不可移动土建筑遗址保护难度极大。得益于干旱少雨的独特气候条件, 西北地区的部分露天土遗址得以保存至今。但是, 长期严重

的风蚀和集中式强降雨冲刷, 大批土遗址由于风化已大面积坍塌, 正遭受毁灭性的破坏。目前关于风蚀、降雨对土遗址的破坏已有相关试验研究^[2-5], 而雨蚀对土遗址的破坏机制还不清楚, 特别是水分、盐分、温度、气流场相互迭加, 如何导致土建筑劣化与损耗, 还没有研究成果报道。

西北地区虽然年降雨量小, 但降雨集中, 且强度大。降雨对土质文物溅蚀和冲蚀的同时, 还在文物表面形成一定厚度的结皮层, 其密度、颗粒组成、盐分含量等与下部土体有一定的差异, 在温湿度变

收稿日期: 2009-01-04

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目 (No. 2006BAK30B02)。

第一作者简介: 张虎元, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师。主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: zhanghuyuan@lzu.edu.cn

化条件下表现出与原墙体材料不同的热力学特性，逐渐从文物表面剥离、脱落，即发生所谓的剥离病害。实际上，结皮层的产生与剥离是土建筑遗址发育的一种普遍病害形式，目前国内外对其机制却了解甚少。

国外对石质文物进行了大量研究，室内模拟试验及现场观测表明，剧烈的温度变化和盐类的参与，对石质文物表部风化起到关键作用^[6-11]。土壤学对土壤结皮理化性质及其成因机制进行了深入研究和探讨^[12-15]，但土建筑以夯填或板筑为主，具有较高的密度和竖直的表面，与结构疏松且表面接近水平的土壤很不相同，这决定了土建筑遗址表面结皮与土壤结皮在成因、结构、性质等方面存在很大的差异，长期演化趋势也不尽相同。本文以新疆交河故城土遗址为研究对象，通过现场调查、监测、取样和室内试验分析，研究土建筑遗址表面结皮的物理、化学特征，从水-热-盐-风多场耦合的角度揭示结皮形成及剥离机制，以期为不可移动土质文物的露天保存和保护加固提供科学依据。

2 取样与测试

交河故城土遗址位于新疆吐鲁番市以西 10 km，坐落在四周由雅尔乃孜河深切而形成的高达 30 m 的柳叶形台地上，是目前世界上保存最完好的土遗址之一。交河故城所在地区属大陆性暖温带干旱荒漠气候，年降水量为 16.2 mm，但历史上多次出现过 40~50 mm 的大暴雨。该区温差极大，记录到的最大日温差为 21.9 °C（1994 年 7 月），地面最大温差则达到 44.5 °C^[16]。工程钻探查明，遗址所在地层为冲湖积地层，以粉土、粉质黏土和粉细砂互层为主。

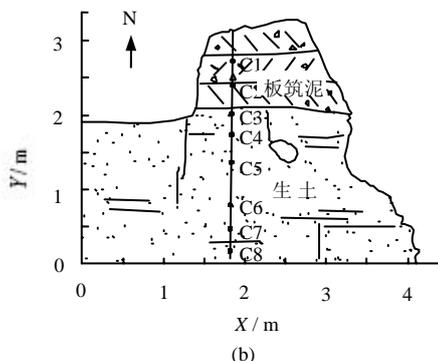
就建筑形式而言，交河故城土建筑主要采用向下开挖和向上堆填两种施工方法。普通低矮民居采用“压地起拱”法，即从天然地面向下开挖庭院或道路，利用残留的“生土”作为建筑物外墙。高大的宗教及军事建筑则采用向上填筑，或从天然地面直接向上夯填，筑成形式多样的夯土建筑（如佛塔和瞭望台），或对压地起拱的生土墙顶面局部夯填“找平”，再在夯土层基础上向上板筑软泥（如大佛寺、东北佛寺等）。交河故城的“压地起拱留墙和软泥堆垛筑墙”工艺，是我国古代岩土工程施工技术中的重要组成部分。

交河故城土遗址建筑材料可划分为生土、夯土和板筑泥 3 大类别，本次研究选择两个剖面，对 3 种典型材料进行分析测试。剖面 C 是大佛寺东墙东

侧 70 m 处的一段墙体（图 1），其上部为板筑泥，下部为天然生土。剖面 D 是塔林区 B20 小塔，见图 2，由夯填土构成。为揭示试样垂直墙面方向的变化，每一样点分为 3 层取样（图 3），从墙体表面向里依次是：表面结皮样（表层）、结皮下部疏松层样（深度 1~2 cm）和内部墙体土样（深度 3~5 cm），分别在原样点编号后添加 1~3 加以区别。



(a)



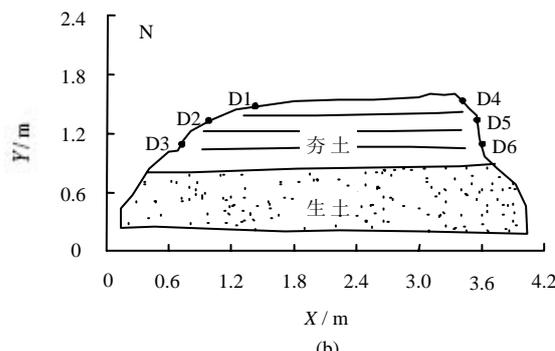
(b)

图 1 C 剖面位置及试样编号

Fig.1 Sampling location and numbering scheme in section C



(a)



(b)

图 2 D 剖面位置及试样编号

Fig.2 Sampling location and numbering scheme in section D

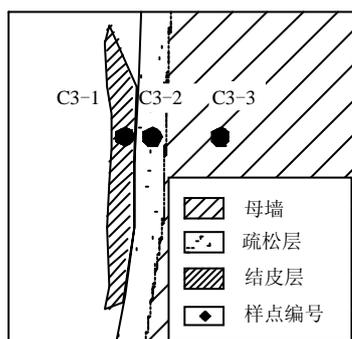


图3 墙体表面结皮层断面特征示意图

Fig.3 Cross section of the host wall covered by surface crust

出于文物保护的特殊需要，室内试验分析选择用样量很少的精密仪器，现场监测优先采用无损方式。颗分试验采用 Mastersizer 2000 全自动激光粒度仪，土中易溶盐离子分析采用 ICS-2500 离子色谱仪，矿物成分测试采用 X'Pert Pro MPD 型粉末 X 射线衍射仪，易溶盐含量分析中试样前的处理按照《土工试验方法标准》^[17] 进行。墙体表面温度监测采用非接触式 IR928+型非制冷焦平面红外热像仪，墙体内部温度测量采用 DNP 系列感温探头（ $\phi 2\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ ）和数字温度计。

3 结果与分析

3.1 结皮层表观特征及空间分布规律

3.1.1 外部形态特征

现场调查发现，绝大部分遗址墙体表部均发育不同形式的结皮层，部分结皮层已剥离脱落，未脱落的结皮层边缘卷曲翘起。结皮层肉眼观察厚度一般在 1~15 mm 之间，下为疏松层，厚 3~8 mm；疏松层之下即为母墙。图 3 为结皮层与墙体关系示意图。

从外观形态上可以将土遗址表面结皮层划分为 3 种主要类型：I 型为结皮层，基本连续分布，受细小裂缝切割，绝大部分仍保持与墙体密切接触，见图 4(a)；II 型为结皮层：片状分布，外部轮廓不规则，大部分仍保持与墙体接触，结皮边缘卷曲翘起特征明显，呈“漂浮状”，见图 4(b)；III 型为结皮层，无数细小结皮呈斑点状分布，边界不清晰，结皮边缘有一定程度卷曲翘起，与墙体部分接触，见图 4(c)。观察对比认为，I 型结皮是剥离病害的初期阶段，主要发育在板筑泥墙体上；II 型结皮是剥离病害的中期阶段，主要发育在生土墙及夯土墙上；III 型结皮是剥离病害的晚期阶段，即早期结皮完全剥落后新形成的微小结皮，主要发育在生土墙及夯土墙上。



(a) I 型



(b) II 型



(c) III 型

图4 结皮外观特征

Fig.4 Characteristic appearance

不同建筑类型的土遗址墙体，表面结皮形态及厚度表现出一定的差异：夯土墙表面结皮层厚度最大，一般为 8~15 mm，如金刚塔、塔林小塔表部；生土墙结皮层厚度次之，一般为 3~10 mm；板筑泥墙表面结皮层厚度相对前二者要小，厚度一般小于 5 mm。经测试，夯土的天然孔隙比最大，其次是生土，板筑泥的最小，分别为 0.613、0.600 和 0.563。在相同降雨条件下降雨入渗深度与孔隙比成正比。据此推测，入渗深度在一定程度上决定了结皮层最初形成的厚度。

3.1.2 分布规律

调查发现，交河故城土遗址大部分墙体表面结皮均有不同程度的剥离病害发育。位于风口处墙体或墙体的迎风面，由于遭受较大的挟沙风吹蚀，表部呈现典型的风蚀外观形貌，结皮剥离病害发育不明显。相反，处于墙体的背风面部位，剥离病害发育较为显著，这说明风化剥离与风蚀作用相互促进，即风化疏松薄壳极易风蚀剥落，风蚀形成的新鲜表面又为新一轮风化剥离创造了条件。

结皮层剥离程度还与墙面朝向有关。调查发现，结皮层剥离程度在墙体西侧和南侧较为严重，北侧和东侧则相对轻微，说明受阳光照射时间长、表面温差变化剧烈的墙面，结皮剥离严重。此外，统一朝向墙面的不同高程上结皮发育也有差别，例如，墙基至 80 cm 高度范围内结皮层基本剥落殆尽；80~200 cm 范围内结皮层部分剥落，随着高度的增加，剥落程度有所减轻；200 cm 以上剥离层一般大部分覆着在墙体上，由此推断毛细水上升引起的水盐迁移对结皮剥离也具有一定的促进作用。

3.2 颗粒分析结果

表 1 颗分试验结果表明，遗址土颗粒组成以粉粒和黏粒为主，砂粒含量较小。结皮层中黏粒含量一般大于疏松层和下伏母墙，粉粒含量差别不大，而疏松层中砂粒含量一般大于结皮层和下伏母墙。

表 1 试样颗粒分析试验结果

Table 1 Results of particle size analysis test

样号	不同粒径(mm)百分含量/%			比表面积 /(m ² /g)
	2~0.075	0.075~0.005	<0.005	
C2-1	2.98	62.64	34.38	1.52
C2-2	10.39	60.20	29.41	1.28
C2-3	4.35	63.70	31.96	1.45
C5-1	4.81	63.84	31.35	1.48
C5-2	10.01	65.15	24.84	1.15
C5-3	11.83	64.31	23.86	1.11
C8-1	10.25	70.33	19.42	0.93
C8-2	16.74	69.82	13.44	0.72
C8-3	11.51	72.75	15.74	0.85
D2-1	10.39	63.61	26.00	1.17
D2-2	13.56	64.68	21.76	1.03
D2-3	11.66	64.81	23.53	1.13
D3-1	11.67	61.76	26.57	1.28
D3-2	13.77	61.14	25.09	1.17
D3-3	14.96	61.79	23.23	1.08

注：2~0.075 mm 为砂粒，0.075~0.005 mm 为粉粒，小于 0.005 mm 为黏粒。

为了精确反映不同部位的粒径差别，将激光粒度仪测定的结果绘制成粒度频率及下累计粒度曲线，如图 5~6 所示。从图中可以看出，结皮层粒径小于 0.02 mm 颗粒含量一般大于疏松层和母墙中对应颗粒含量，而疏松层粒径大于 0.04 mm 颗粒含量一般较大。简单而言，结皮层颗粒偏细，疏松层颗粒则偏粗。

颗粒比表面积测试结果表明（表 1），结皮层中土颗粒比表面积较疏松层和母墙大，从另一角度证实了结皮层土颗粒粒径偏小的规律。对比夯土、生土和板筑泥试样发现，三者土颗粒比表面积依次增加，说明平均粒径依次减小，这可能与古代夯填及

板筑泥施工时适当的筛选有关。C 剖面墙基处 C8 点土颗粒比表面积最小，沿高度向上，试样中土颗粒比表面积逐渐增大，说明毛细水沿墙体向上迁移引起的盐分重结晶，有使土颗粒胶结变粗的趋势。

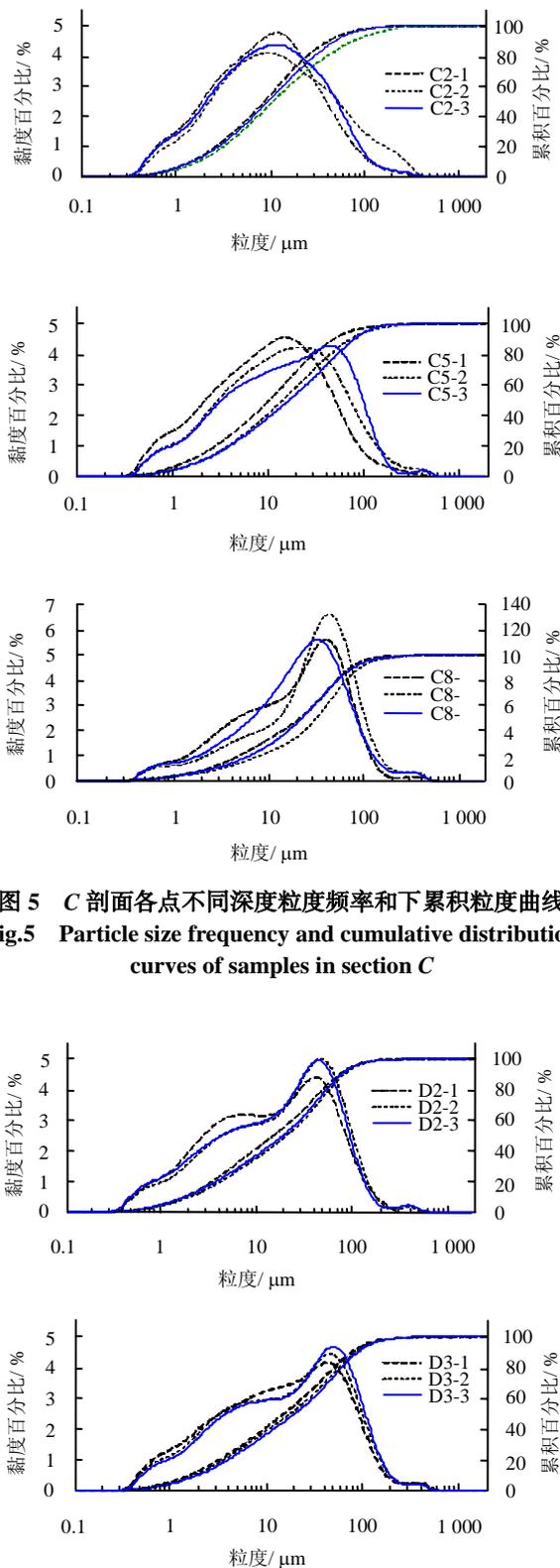


图 5 C 剖面各点不同深度粒度频率和下累积粒度曲线
Fig.5 Particle size frequency and cumulative distribution curves of samples in section C

图 6 D 剖面各点不同深度粒度频率和下累积粒度曲线
Fig.6 Particle size frequency and cumulative distribution curves of samples in section D

3.3 易溶盐化学分析结果

(1) 全盐量

交河故城台地天然生土的易溶盐含量一般小于 0.7%，而本次遗址墙体土易溶盐测试结果（图 7）表明，遗址墙体土含盐量较大，盐分含量一般大于 2%，有些墙体部位盐分含量甚至达到 6%，说明盐分在墙体中的聚集作用相当显著。试验结果表明，一般情况下遗址表面结皮盐分含量最小，其次是疏松层，而墙体盐分含量相对较高。由此推断，表面结皮的形成并不是由盐分表聚造成的板结，这与土壤层表面结皮的积盐效应有很大的区别。

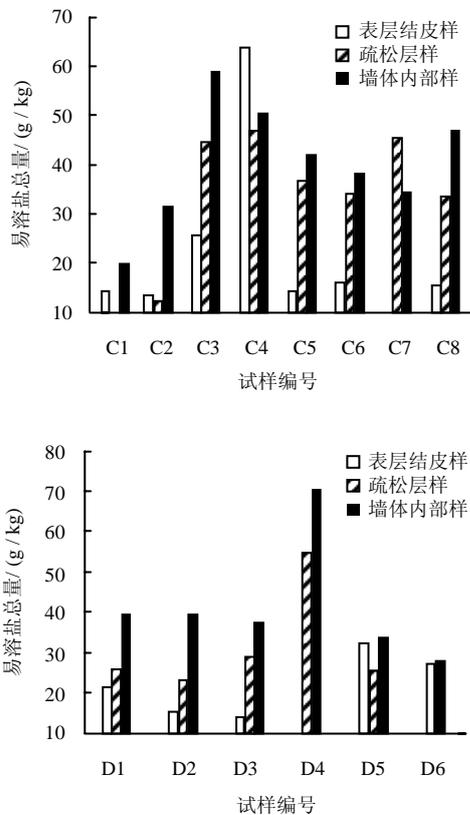


图 7 C 剖面和 D 剖面各点不同深度盐分含量对比图
Fig.7 Salable salt contents for samples in sections C and D

土遗址不同高度盐分含量也存在差异。图 7 表明，在 C3~C8 所在的生土墙高度范围内，墙基处 C8 点盐分含量偏大，紧靠墙基上部 C7 点盐分含量较小，但随着高度的增加，盐分含量又开始逐渐增大，C 剖面盐分在高度距墙基 198 cm 处（即 C3 点）达到最大，这与墙体土毛细水上升引起的可溶盐迁移及重结晶有关^[18]。D 剖面总高度为 140 cm，盐分含量从底部向上至顶部一直呈现增大趋势。D 剖面盐分随高度增大趋势，南侧较北侧表现得更为突出。

(2) 离子浓度

土中易溶盐离子浓度测试结果与溶液电导率测

试结果呈明显的正相关，见表 2，证明化学分析结果是系统可靠的。总体来看，结皮层中各离子浓度一般小于墙体土，这与全盐量测试结果相吻合。土溶液中各离子浓度，阴离子一般是 NO³⁻ 浓度较高，浓度最高可达 4 718 mg/L，其次是 Cl⁻ 和 SO₄²⁻；阳离子中 Ca²⁺ 和 Na⁺ 浓度较高，而 K⁺ 和 Mg²⁺ 浓度较低。值得指出的是，同一高度点中结皮样的 SO₄²⁻ 浓度一般大于疏松层和内部墙体，这与芒硝体系在干/湿变化条件下的吸水和脱水反应密切相关。

pH 值测试结果表明（图 8），交河故城遗址土溶液 pH 值在 7.18~8.28 内，即呈弱碱性，符合干旱半干旱地区土孔隙溶液一般呈碱性的规律^[19]。与结皮层和母墙相比，疏松层偏中性。组成黏粒的矿物一般其等电 pH < 7，碱性条件下颗粒周围往往具有较厚的扩散层，因此，当遇到降雨时微碱性土体表面更容易分散解体，在随后的干燥过程中有利于表面结皮层的形成。

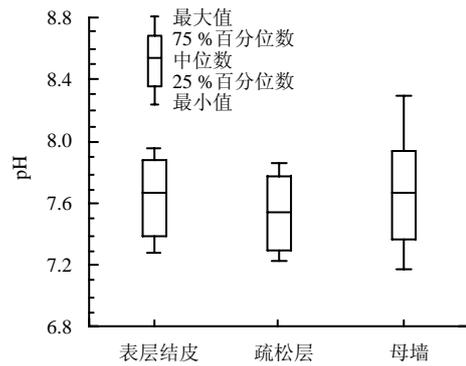


图 8 墙面不同部位土溶液 pH 值统计图
Fig.8 Statistic of pH values for soil solutions at different wall positions

3.4 X-射线衍射分析结果

X-射线衍射试验结果表明（表 3），遗址土的物质组分中白云母和石英含量占总量 60% 以上，其次是长石、方解石和绿泥石，占总量 30% 左右，此外还含有少量白云石、岩盐和石膏等矿物，这表明遗址土表面剥离层与墙体土的主要矿物成分基本无差别，只有个别剥离层和墙体土出现石膏或岩盐富集现象。土遗址表部剥离层的形成并没有改变土的基本矿物成分，而仅表现为土体颗粒成分、可溶盐成分及结构的变化。因此，热致劣化、水盐迁移等物理风化过程，是控制干旱区土遗址劣化的根本原因。

3.5 温度测试结果

土遗址温度测定分为墙体内部和墙体表面两种。墙体内部温度监测位置选择塔林东南 70 m 处

表2 化学分析结果
Table 2 Results of chemical analysis

样号	Cl ⁻ /(mg/L)	NO ₃ ⁻ /(mg/L)	SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	Na ⁺ /(mg/L)	K ⁺ /(mg/L)	Mg ²⁺ /(mg/L)	Ca ²⁺ /(mg/L)	Ec /(ms/cm)
C1-1	263.93	190.44	977.58	240.69	19.37	24.90	567.49	1.04
C1-3	722.26	767.25	675.03	575.19	30.84	24.71	652.48	1.45
C2-1	217.46	151.62	1 180.35	176.66	35.42	33.06	616.57	0.99
C2-2	247.65	243.08	714.15	370.25	25.83	16.19	399.84	0.95
C2-3	1 479.89	1 017.21	621.97	1 014.45	92.03	57.18	929.28	2.24
C3-1	729.12	985.93	1 043.37	304.77	70.83	86.32	934.30	1.28
C3-2	1 900.48	2 153.38	1 156.76	953.84	79.02	123.18	1 495.18	2.18
C3-3	2 993.67	4 075.15	440.84	2 470.43	138.95	211.76	1 808.52	3.14
C4-1	2 480.56	2 852.55	1 109.11	15.49	2.68	1.45	16.43	3.95
C4-2	1 974.37	2 194.65	1 071.48	1 030.50	180.16	155.63	1 370.39	2.95
C4-3	2 452.38	4 717.74	n.a.	1 236.79	406.54	115.30	1 416.71	3.88
C5-1	356.54	303.33	1 098.34	235.21	43.87	33.42	690.44	1.14
C5-2	1 808.68	2 104.39	921.26	916.88	86.58	51.95	1 425.92	2.37
C5-3	1 407.46	4 161.52	324.17	719.66	145.01	41.26	1 471.99	2.50
C6-1	612.40	777.20	837.71	224.35	21.57	54.61	803.61	1.16
C6-2	1 856.04	1 516.14	920.57	810.34	35.75	108.22	1 282.96	2.23
C6-3	2 195.49	2 034.58	780.49	934.50	49.85	106.80	1 463.87	2.48
C7-1	2 432.76	1 618.33	1 158.48	1 797.02	88.29	74.13	1 143.63	3.28
C7-2	2 000.94	2 046.69	407.12	1 339.22	55.40	67.61	917.24	2.76
C8-1	257.32	371.28	1 421.29	356.72	50.93	73.77	730.26	1.23
C8-2	577.62	957.93	1 558.30	859.78	79.65	89.86	693.03	1.88
C8-3	1 120.98	1 851.02	1 548.15	1 497.41	99.94	134.72	1 789.21	3.09
D1-1	14.49	n.a.	687.37	20.81	12.85	15.15	380.48	0.54
D1-2	18.45	29.57	1 081.53	45.69	n.a.	16.24	565.97	0.53
D1-3	496.40	79.69	1 589.09	788.30	24.56	18.98	568.66	1.72
D2-1	56.11	28.44	409.67	91.44	13.02	12.28	206.49	0.54
D2-2	270.88	94.56	833.97	193.65	11.66	22.63	481.27	0.76
D2-3	1 187.70	494.73	762.64	750.72	26.09	40.33	755.92	1.65
D3-1	148.85	105.84	840.64	146.87	14.13	n.a.	457.46	0.68
D3-2	509.93	334.09	809.78	323.39	17.02	25.72	616.04	0.95
D3-3	1 244.07	1 197.34	458.20	662.66	30.32	39.20	825.48	1.47
D4-1	2 228.31	1 721.63	1 042.12	1 317.87	36.90	34.46	1 267.81	2.28
D4-2	2 918.27	3 473.28	705.69	1 363.31	43.05	36.50	1 877.06	2.52
D5-1	609.64	169.59	1 436.98	659.81	22.09	22.07	640.19	1.36
D5-2	1 578.86	398.22	1 386.78	1 243.46	31.63	29.41	826.63	2.11
D5-3	1 217.86	379.36	1 219.10	974.29	26.76	26.16	772.22	1.75
D6-1	361.10	225.11	1 177.22	305.49	14.69	27.74	622.60	0.90
D6-2	686.10	333.33	985.21	511.87	18.52	33.53	597.88	1.13

注：表中 n.a.表示浓度低于仪器检测下限。

的人工试验夯土墙，墙体分为东西走向和南北走向两种，测点分别布置在夯土墙东、南、西、北四墙面，高度距地面 150 cm 处，测点埋深距墙表面 5 cm。墙体表面温度监测选在 C 剖面 C5 点右侧 20 cm 处，采用非接触式红外热像仪监测，通过监测对比表面结皮层和没有结皮覆盖的墙体表面温度差异。

图 9 为 2007 年 11 月 17 日现场不同朝向试验墙内部 5 cm 处温度监测结果。数据表明，0:00 至 4:00 墙体 4 面均处于缓慢的降温过程，且降温幅度不大，4:00 至 10:00 墙体四面温度均保持在(3.3 ± 0.4) °C 内，在 6:00 后略有上升，10:00 开始，受太阳辐射影响，墙体快速升温，升温速度南侧 > 东侧 >

西侧 > 北侧。墙体东侧在 14:00 温度达到峰值后，开始回落，而南侧和西侧继续以较快速度升温，在 16:00 和 18:00 分别达到各自峰值温度。峰值温度之后，墙体南侧和西侧降温速度明显大于东侧和北侧，24:00 时 4 个方向的墙体温度基本回落到前一日的温度值。从温度数据中可以得出，东、南、西、北 4 面墙当日最大日温差分别为 6.7、16.5、8.1 °C 和 4.1 °C。由此可知，墙体南侧和西侧升温降温幅度和速度均较北侧和东侧大，即墙体南侧和西侧受空气温度影响更为明显。结皮的空间分布调查显示，墙体南侧和西侧结皮剥离程度一般较严重，温度在结皮层的形成及剥离过程中起着关键性作用。

表 3 试样 X-射线衍射半定量分析结果
Table 3 Results of semi-quantitative analysis by X-ray diffraction

样号	白云母	石英	长石	方解石	斜绿泥石	白云石	岩盐	石膏	蛭石	(%)
C1-1	34	28	25	5						8
C1-3	39	29	26	6						
C5-1	43	29	12	7	6	1		2		
C5-2	38	29	25	8						
C5-3	35	25	24	7	6	1	1			
C7-2	42	34	8	7		1	2		7	
C7-3	44	26	19	5	5	1				
D1-1	46	27	13	10	5					
D1-2	42	27	20	10				2		
D1-3	38	24	14	8	6	2		2	6	
D3-1	33	25	22	6	5					
D3-2	44	2	37	10	5					
D3-3	31	24	36	8		1				
D5-1	40	28	13	11	7					
D5-2	37	26	21	9	6					
D5-3	40	27	13	12	7					

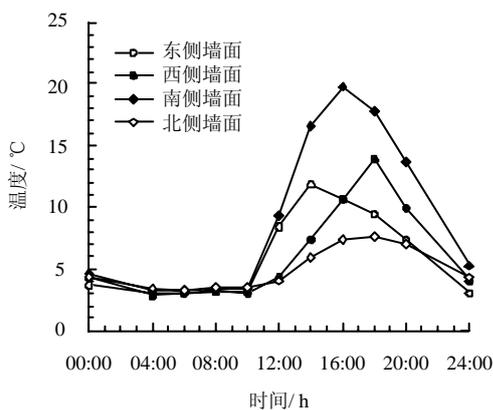


图 9 不同朝向试验夯土墙 5 cm 深度处温度-时间关系
Fig. 9 Temperatures monitored at 5 cm-depth of rammed earth walls with different facings

图 10 为面向朝南的原状生土墙表面温度变化同日监测结果，可以看出墙体南侧表面日温差变化高达 22~29℃，而面向朝南的试验夯土墙内部 5 cm 处的最大日温差为 15℃，说明墙体表面的升温降温幅度比墙体内部更为剧烈。图 10 还表明，有无表面结皮，墙面温度变化存在微妙的差别。0:00 至 6:00 之间结皮层和无结皮墙面开始出现缓慢的升温，且结皮层升温幅度较为明显。6:00 开始至 10:00 结皮层与无结皮墙面温度变化不大，基本保持在 (3.5±0.5)℃，但结皮层温度一直稍低于无结皮墙面温度，10:00 至 16:00 结皮层和无结皮墙面温度急剧升高，11:00 时结皮层温度超过无结皮墙体表面，16:00 时二者同时达到当天中的温度最大值，16:00 后结皮层和无结皮墙面温度迅速降低，结皮层降温速度和幅度大于无结皮墙面。18:00 时结皮层温度

已降至低于无结皮墙面温度。图 10 表明，与无结皮墙面相比，结皮层对外部温度变化的响应更加敏感，主要是结皮层与下伏母墙之间发生一定程度的虚脱和剥离引起的，可见表面结皮一旦形成，升温或降温幅度增大，由此引起的热胀冷缩更加明显，进一步加剧了结皮层与母墙之间的剥离进程。

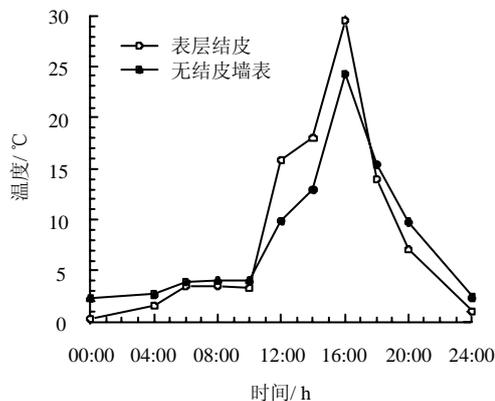


图 10 原状生土墙表面温度-时间关系图
Fig.10 Temperatures monitored at the surface of natural earth wall

4 表面结皮形成与剥离原因分析

4.1 结皮层的形成

已有研究表明，土壤结皮层的形成与土中粉粒和黏粒含量密切相关。Onofriok^[12]研究表明，土壤粉粒含量愈高，土壤结皮越容易形成。朱远达等^[13]研究指出，土壤中 0.2~0.002 mm 内颗粒为土壤结皮的形成提供了物质基础，而大于 0.2 mm 的土壤颗粒则对结皮形成类型起决定性作用。粉粒和黏粒细小，且具有较大的表面能，更容易因毛细水吸力以及其他化学键的连接作用产生各种胶结。李晓丽^[14]认为，土中黏粒和粉粒含量越高，越易于形成结皮。交河土样颗粒组成以粉粒和黏粒为主，其中粉粒含量为 60.20%~72.75%，黏粒含量为 13.44%~34.38%，而砂粒仅为 2.98%~16.74%，为表面结皮层的形成提供了物质前提。

结皮层的形成与降雨产生的表面崩解密不可分。土壤学指出，土壤结皮的形成是以细砂和粗粉砂为骨架，以小于 0.01 mm 的细小颗粒填塞土壤孔隙的一个物理过程^[15]，其形成过程是表土分散后无法随入渗径流下移，当地表径流动力不足以将其搬运时，被雨滴打击压实或沉积而产生^[13]。土建筑遗址墙体表面近于竖直，降雨过程中下落的雨滴在风的吹动下斜向冲击墙体表面，部分雨滴被墙体表面土体吸收。被墙体表面土体捕获的水分，一方面使富含粉粒的表层土迅速崩解，另一方面在毛细力的

驱动下沿水平方向向墙体内部扩散。向内部入渗的水流携带的微小崩解颗粒阻塞孔隙,造成表部土局部饱和。表部饱和土在后续雨滴打击作用下产生的泥浆,在重力作用下沿墙面向下蠕流,形成墙面泥膜。降雨过后泥膜逐渐干燥,因收缩干裂,形成网状结皮。

4.2 水盐迁移对结皮形成的促进作用

结皮一旦形成,随后的降雨过程及干燥过程,即干湿循环对结皮的影响,目前正在进行相关的试验研究。从颗分结果来看,相对于下伏的疏松层而言,结皮中细粒成分含量增大,因此,可以认为在随后的降雨润湿之后,结皮在2次干燥过程中发生较下伏疏松层更为明显的向外翘曲收缩,加速了结皮的干缩剥离。

在太阳辐射作用下,由于水分的蒸发,墙体中的盐分总体上向墙体表面聚集,但实测数据表明表面结皮盐分含量比墙体内部3~5 cm处盐分含量要小。Lewin^[6]通过研究石质文物中水盐迁移现象发现,当孔隙溶液从石质文物内部向表面迁移的速度大于水分从表面的散失速度时,盐分便在石质文物表面结晶并聚集,但当盐溶液向表部的迁移慢于水分的蒸发时,盐分便在石质文物表部下一定深度处结晶并聚集。也就是说,孔隙介质中毛细水输盐机制与外部空气湿度有关。干热的外部环境,有利于快速干燥,但容易导致浅部结盐(即内部酥碱);而相对湿热的外部环境,干燥速度变慢,易于形成表面结盐(即表面盐垢)。图7的易溶盐分布表明,从墙体内部向墙体表面,沿水平方向上并不存在上述的积盐效应。相反,表面结皮存在盐分淋失迹象。这是露天土质文物与洞窟土质文物(如壁画地仗)水盐迁移的差别之处,即前者显示表面轻微脱盐,后者多表现为表面积盐。值得注意的是,图7表明C、D剖面沿竖直高度向上的方向存在盐分增加现象,这与阵雨过后地表积水向上的毛细上升及输盐有关。表面结皮在墙根部80 cm高度范围内剥离严重,80~120 cm高度剥离较严重,200 cm以上几乎没有剥离,是竖直方向水、盐迁移促进的结果。

4.3 热胀冷缩加速结皮层剥离

结皮层形成初期,一般与母墙保持较好的附着关系。与下部墙体土相比,结皮层细颗粒含量增大,比表面积增加,颗粒间连接力增强,对遗址起到一定的保护作用,但实测数据表明,表面结皮和没有结皮的墙体表面,在相同的外界气温变化条件下表现出明显的热响应差异:结皮层升温、降温幅度更大,速率更快,这是因为结皮层较为密实,吸热性

能增大造成的,也可能是下伏疏松层向深部导热不良造成的。总之,结皮层强烈、快速的热响应,导致了更加明显的热胀冷缩现象,加速了结皮的剥离。

土质材料热传导性能很差,很容易在深度方向上引起较大的温度梯度。昼夜交替引起的墙体温度变化特征是,白天外热内凉,夜间外凉内热。交河故城所在的吐鲁番地区是我国内陆的“热极”,实测墙面夏季最高温度可达60℃,即使在深秋季节,墙表日温差也可以达到22~29℃,而同期墙内5 cm深度处的日温差仅有15℃。

墙体表面温度的剧烈频繁变化会造成材料的应力疲劳,甚至导致土体微观结构的破坏^[11]。表面结皮层由于具有密度大、组成颗粒比表面能大、颗粒间连接力强等特点,其力学强度优于下伏疏松层,因此,由温度变化引起的材料应力疲劳甚至结构破坏,可能优先发生在结皮下部的疏松层中,加速结皮层沿疏松层界面的剥离。

通过对交河故城墙体表面结皮层剥落程度的调查发现,墙体西侧和南侧表面结皮层的剥离程度要明显大于墙体北侧和东侧,说明由太阳辐射引发的温度变化是造成结皮层剥离的首要因素。

4.4 风蚀引起结皮层脱落

土壤学研究认为,土壤结皮的形成提高了土壤表面抗剪强度,有力地防止风力剥蚀。李晓丽等^[14]研究发现,土壤结皮较土壤具有较高的密实度、重度和表面稳定性,有效减少了土壤的风蚀。因此推断,土遗址表面结皮在形成初期也起到抵御风蚀的作用,但土遗址结皮在后期干湿循环、热冷循环的反复作用下,从边缘进一步剥离翘起,为风蚀提供了有利条件。首先,携沙风直接磨蚀结皮层,造成连接最差的结皮剥落。另外,部分砂粒灌入结皮裂缝中,在裂隙涡流的推动下转动磨蚀,加速剥离病害的发展。根据交河气象资料,该区盛行西北风。墙体西侧特别是80 cm高度以下剥离病害较为严重,就与风蚀脱落密切相关。

5 表面结皮剥离机制

土建筑遗址表面结皮与土壤表面结皮,在形成机制和含盐量方面存在一定的差别。一般来说,土壤是疏松的,土壤表面接近水平或倾角较缓,雨滴的冲击压实作用有利于形成表面相对阻水层。该阻水层土体发生过饱和崩解及雨后的蒸发积盐,形成土壤结皮。与此相比,土建筑墙体密实度高,有着近于直立的表面,斜向冲击墙面的一部分雨滴才会被墙面土体捕获。墙面土体过饱和崩解形成的泥

浆,会在重力作用下以泥膜的形式沿墙表竖直向下蠕移,干燥后形成的结皮具有一定的淋洗脱盐迹象。

与下伏疏松层相比,土建筑墙面结皮层粒度偏细,在两次降雨湿化之后的干燥过程中,结皮层向临空面方向的收缩翘曲更加明显。边缘翘曲的结皮层因为与下伏墙体局部虚脱,向墙体内部传导热量的能力变差,随外界气温变化自身升温、降温速度更快,幅度更大,热胀冷缩现象更为突出,促进了结皮层的进一步剥离。携沙风或直接磨损结皮层表面,或进入结皮层虚脱裂隙旋转磨蚀,导致脆弱的结皮层脱落。之后,降水湿化与崩解形成新泥膜,热胀冷缩加速结皮层剥离虚脱,风蚀导致结皮层脱落。这样,由水—热—风控制的新一轮土建筑墙体表面劣化进程重复发生。

6 结 论

(1) 以粉粒和黏粒为主的土建筑遗址,在降雨作用下表面饱和崩解产生蠕流泥膜,经蒸发干燥作用形成龟裂外翘结皮。

(2) 与下伏疏松层相比,结皮层结构致密,颗粒偏细,随着环境气温变化,升温、降温速度更快,幅度更大。热胀冷缩现象加剧了结皮层的虚脱与剥离。

(3) 风沙流对结皮层表面磨蚀和裂隙内部旋转磨蚀导致结皮层脱落。

(4) 在降雨-热胀冷缩-风沙流联合作用下,土遗址表面重复演化“结皮形成→结皮剥离→结皮脱落”这一劣化模式。

参 考 文 献

- [1] 张虎元, 赵天宇, 王旭东. 中国古代土工建造技法[J]. 敦煌研究, 2008, (5): 81-90.
ZHANG Hu-yuan, ZHAO Tian-yu, WANG Xu-dong. The geotechnical construction methods in ancient China[J]. *Dunhuang Research*, 2008, (5): 81-90.
- [2] 严耿升, 张虎元, 王旭东, 等. 古代生土建筑风蚀的主要影响因素分析[J]. 敦煌研究, 2007, (5): 78-82.
YAN Geng-sheng, ZHANG Hu-yuan, WANG Xu-dong, et al. Study on the main affecting factors of wind erosion of ancient adobe construction[J]. *Dunhuang Research*, 2007, (5): 78-82.
- [3] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 周环, 张秉坚, 陈港泉, 等. 潮湿环境下古代土遗址的原位保护加固研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 954-962.
ZHOU Huan, ZHANG Bing-jian, CHEN Gang-quan, et al. Study on consolidation and conservation of historical earthen sites in moisture circumstances conservation of Tangshan Site in situ[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 954-962.
- [5] 赵海英, 李最雄, 汪稔, 等. PS材料加固土遗址风蚀试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 392-396.
ZHAO Hai-ying, LI Zui-xiong, WANG Ren, et al. Wind erosion experiment of ancient earthen site consolidated by PS material[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 392-396.
- [6] LEWIN S Z. The mechanism of masonry decay through crystallization[J]. *Conservation of Historic Stones Buildings and Monuments*, 1982, (1): 120-144.
- [7] ROSSI MANARESI R. Scientific investigation in relation to the conservation of stone[J]. *Science and Technology in the Service of Conservation*, 1982, (1): 39-45.
- [8] ROSSI MANARESI R, TUCCI A. Pore structure and the disruptive or cementing effect of salt crystallization in various types of stone[J]. *Studies in Conservation*, 1991, 36: 53-58.
- [9] HALL K. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rocks in cold regions[J]. *Geomorphology*, 1999, 31: 47-63.
- [10] YATSU E. The nature of rock weathering[M]. Tokyo: [s.n.], 1988.
- [11] STÉPHANE H. Rock temperatures as an indicator of weathering processes affecting rock art[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31: 383-389.
- [12] ONOFIOK O, SINGER M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48: 1138-1143.
- [13] 朱远达, 蔡强国, 胡霞, 等. 土壤理化性质对结皮形成的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 13-19.
ZHU Yuan-da, CAI Qiang-guo, HU Xia, et al. Effects of soil physical and chemical properties on soil crusting[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 13-19.
- [14] 李晓丽, 申向东. 结皮土壤的抗风蚀性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 203-206.
LI Xiao-li, SHEN Xiang-dong. The analysis on the mechanism of anti-wind erosion of soil crust[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(2): 203-206.
- [15] 吴发启, 范文波. 坡耕地黄壤土结皮的理化性质分析[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 22-24.
WU Fa-qi, FAN Wen-bo. An analysis of physicochemical characteristics of crust in loess soil on slope farmland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(4): 22-24.
- [16] 解耀华. 交河故城保护与研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1999.
- [17] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [18] 张虎元, 闫玲, 王锦芳. 土质文物毛细输盐机制研究[C]//2008 古遗址保护国际学术讨论会暨国际岩石力学学会区域研讨会论文集. 甘肃: 敦煌研究院, 2008: 118-124.
- [19] HINRICH L B, BRIAN L M, GEORGE A. O'Connor. soil chemistry[M](3rd Edition). [S. l.]: John Wiley & Sons, 2001.