

DOI: 10.7652/xjtuxb201611023

多介质耦合环境下的遗址文物原位保护

张哲¹, 宋朋龙², 贺沅平², 罗昔联²

(1. 西北大学城市与环境学院, 710127, 西安; 2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 根据遗址博物馆对文物保存环境调控的特殊需求,提出了一种控制土壤文物空气多介质耦合环境内变量的梯度、实现出土文物原位环境重建的保护策略;进一步搭建了遗址博物馆实验葬坑,采用毛细管辐射系统对文物保存区原位环境进行了调控实验。研究表明:毛细管辐射调控系统可以实现文物保存环境的稳定,相比辐射调控系统关闭工况,环境温度昼夜波动值从 3.6℃减小到 1.6℃,文物土壤空气间的温差从 2.1℃减小到 0.3℃,文物本体不同部位的温差从 3.8℃减小至 0.8℃,同时文物保存区的风速控制在 0.06 m/s 以下,远低于文物保存标准规定的上限值 0.15 m/s;毛细管辐射调控系统可以有效地抑制文物保存环境之间的物质与能量迁移,实现遗址文物原位保存环境的平衡保护。

关键词: 遗址博物馆;文物保护;原位环境;环境调控

中图分类号: K854 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)11-0150-07

In-Situ Relics Preservation under Multi-Media Coupling Environment in Archaeology Museums

ZHANG Zhe¹, SONG Penglong², HE Yuanping², LUO Xilian²

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;
2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To satisfy the requirement for environmental control of relics preservation in archaeology museums a preservation strategy for reintegrating primitive environment is proposed, in which some environmental parameters are strictly restricted in the soil-air coupled environment. In order to verify this technique, a laboratory room with a funerary pit was constructed to simulate a large open exhibition hall of archaeology museums, and a capillary radiant system was built to perform the environmental control for relics preservation. The field test showed that the capillary radiant system provided a more stable condition for the unearthed relics in the funerary pit. Experimental results proved that the temperature fluctuation of preservation area was reduced from 3.6 to 1.6℃, the average temperature difference of soil-air coupled environment decreased from 2.1 to 0.3℃, and the average temperature difference across the relic decreased from 3.8 to 0.8℃. Meanwhile, the air velocity in the preservation was controlled within 0.06 m/s, which is well below the upper limit value of 0.15 m/s prescribed for museums. The proposed preservation method is effective in mitigating heat and mass transfer and creating a more balanced environment for relics preservation.

Keywords: archaeology museum; relics preservation; in-situ environment; environmental control

陕西作为中华民族的发祥地之一,是文物大省,现已查明的古遗址超过 10 000 处,古墓葬 4 000 多处,历代帝王陵 72 座^[1]。这些遗址文物作为一种重要的历史文化遗迹,具有很高的科学价值与文化价值。但是,在风吹、雨淋及太阳辐射等自然环境的作用下,很多遗址文物面临着日益严重的损坏,此外,环境污染与气候变化带来的环境问题对遗址文物的影响和损害也日趋明显地暴露出来^[2-3]。同时,随着旅游事业的发展,遗址作为一种公共文化资源,如何通过科学规划、在保护的同时更好地加以合理利用,如向社会开放、展示,已成为文物部门考虑的重点。

为了更好地实现对遗址文物的保护与传承,近年来在遗址资源比较集中的陕西、四川、江苏、河南和新疆等省区,文物界与建筑规划界联手,已就遗址的保护、展示与利用的模式进行了许多规划保护及预防性保护技术方面的探索和实践,形成了包括在发掘后进行标识保护、建立遗址博物馆保护等多种保护模式和方法。在技术上,这些方法能解决遗址文物面临的风吹、雨淋、日晒等自然危害,改善保护条件,但不能解决遗址文物面临的环境污损。国家文物局于 2002 年至 2005 年组织开展的全国馆藏文物腐蚀损失调查显示:全国共有 50.66% 的馆藏文物存在不同程度的腐蚀损害。即使是规划和保护工作做得比较好的陕西著名文物遗址,也面临着比较严重的问题:陕西半坡土遗址本体表层风化深度已超过了 40 cm^[3];秦始皇兵马俑遗址出现了遗址土隔梁开裂、局部表面风化病害;汉阳陵丛葬坑全封闭式地下保护遗址开放 8 年以来,已在局部出现了明显可察的土遗址干化、开裂、局部泛碱等问题^[4-5]。

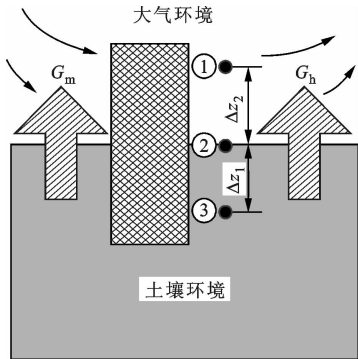
本文从传质传热学角度对文物土遗址博物馆文物保存中出现的干裂等环境问题进行了分析,认为控制并减少保存环境内各参数的梯度,是减缓文物遭受污损的重要方法;同时,搭建了一个土遗址局部环境调控实验平台,对文物保存的土壤-文物-空气耦合环境进行综合调控,实现了文物保存多介质环境内温湿度参数分布的均匀一致。

1 问题描述

图 1a 所示为汉阳陵博物馆遗址文物出土保存现场,从中可以看出,遗址文物部分暴露在空气中,部分埋藏在土壤中,形成了一个土壤-文物-空气多介质耦合的复杂保存环境,其中空气通常被称为上环境,而土壤称为下环境。温度和相对湿度等参数在土壤-空气耦合环境的分布存在梯度差时,能量和



(a) 土遗址文物展示现场



(b) 水分和热量迁移

图 1 遗址文物现场及土壤-空气耦合环境中的水分和能量迁移示意图

水分就会从温度(浓度)高的位置向温度(浓度)较低的位置迁移。由于大气土壤在一年四季中存在周期性的变化,再加上游客、空调等的影响,导致这一耦合环境内的温度参数出现频繁波动,从而造成文物表面发生热应力破坏。此外,当土壤中的水分向空气中迁移时,一起迁移的盐分会沉积在土壤或文物表面,这些盐分中的钠离子和钙离子会与空气中的硫酸根离子发生化学反应生成 Na_2SO_4 和 CaSO_4 ,这 2 种产物都会导致土遗址和文物本体发生剧烈体积膨胀,从而对文物造成毁灭性的损坏^[6-7]。对遗址文物的大气-土壤耦合环境中物质和能量的迁移过程进行简化,如图 1b 所示,其中 G_m 、 G_h 分别代表水分和热量的迁移通量,根据对流传质传热的基本定理,该通量可以通过下式^[8-9]进行计算

$$G_m = h_m \Delta \rho_v = h_m (\rho_{v2} - \rho_{v1}) \tag{1}$$

$$G_h = h_o \Delta T + h_m \Delta \rho_v \lambda_{\text{water}} = h_o (T_2 - T_1) + h_m (\rho_{v2} - \rho_{v1}) \lambda_{\text{water}} \tag{2}$$

式中: h_m 为界面的对流传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; h_o 为界面的对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_1 、 T_2 分别为靠近土壤的空气环境温度和土壤-空气界面的温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ_v 为水蒸气的密度, kg/m^3 ; λ_{water} 为水的汽化

潜热, kJ/kg。根据固体导热方程可知,图 1b 中点 2 和点 3 之间的传热量可以按下式进行计算

$$G_h = -k_{soil} \frac{\partial T}{\partial z} = -k_{soil} \frac{T_2 - T_3}{\Delta z_1} \quad (3)$$

式中: k_{soil} 为土壤导热系数, kg/(m · K); T_3 为土壤温度, °C。

根据式(1)~式(3)可知,影响土遗址文物水分和能量迁移的关键要素是各环境介质之间的温差和相对湿度差。对流传质和传热系数 h_m 、 h_o 。主要与环境的风速相关,风速越大,则系数的值也越大。从抑制物质和能量迁移、缓解文物所遭受的热应力破坏和干裂危害的角度出发,要保护处于土壤-文物-空气耦合环境内的文物,需要尽量减小这一环境内的温差和相对湿度差,同时还要将环境风速尽量维持在较低的水平。本文根据这一原理,提出采用毛细管辐射调控系统来对文物保存区域进行局部调控,以实现不同环境介质之间的平衡,缓解由不平衡迁移所导致的文物破坏。

2 遗址博物馆文物保存局部环境调控实验

2.1 展示厅空间及文物保存区域的模拟现场再现

由于遗址博物馆保存着珍贵的出土文物,因此任何未经严格论证的环境调控方法都不能直接在博物馆进行使用。本文选择在西安交通大学曲江校区闲置绿化用地上搭建了一个占地面积 100 m² 的展示空间作为实验室,用于模拟博物馆展示厅空间^[10]。该实验室区域的土壤环境为单一的黄土地质,土质条件和地理位置与兵马俑、半坡、汉阳陵等土遗址博物馆的接近。为了模拟葬坑内土遗址文物的保存环境,参照兵马俑和汉阳陵博物馆多数坑道的宽度,设计了一个长、宽、深分别为 4、3、1.8 m 的实验葬坑作为文物保存区,如图 2 所示。

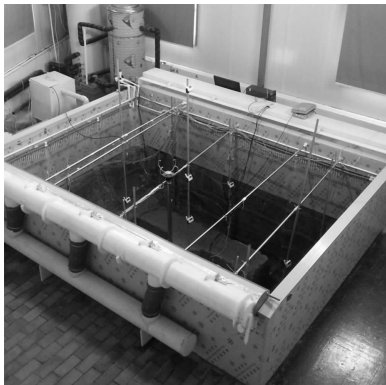


图 2 实验葬坑

2.2 文物保存局部环境调控系统

如图 3 所示,遗址博物馆展示空间可以分为游客区和文物区,由于游客区与文物区对环境参数的要求及调控时间上存在很大差异^[2],导致我国早期建设的遗址博物馆大都没有采用任何环境调控措施。近年来,新建遗址博物馆的环境调控以满足游客舒适性要求为主,但却忽略了文物保存的需求。遗址博物馆具有建筑密封性差、围护结构热阻小、外墙面积大、文物区占展示厅空间比率小等很多不利于节能的特点,如果对整个展示厅进行全年连续环境调控将消耗巨量的能源,并且绝大部分能源都会浪费在非文物保存区。为了节约系统运行的能源,本文在葬坑侧壁布置毛细管作为辐射冷却末端,通过在葬坑内形成稳定的逆温层,实现对葬坑内文物保存局部环境的调控。由于土环境是文物保存的原位环境,且环境参数相对稳定,为了建立土壤-空气耦合保存环境内的热质平衡,调控系统运行以土壤的环境参数作为调控目标参数。

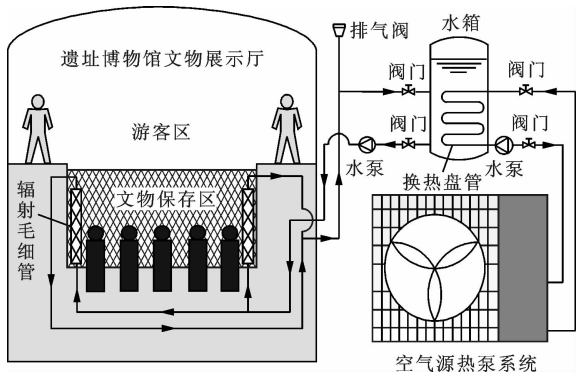


图 3 葬坑内文物保存局部环境调控系统流程图

图 3 为本文设计的葬坑局部环境毛细管辐射调控系统流程图。图中毛细管网采用悬挂方式敷设在葬坑四周,毛细管内、外径分别为 2.35 和 3.35 mm,总敷设面积为 18.5 m²;系统冷热源为一台额定制冷量为 5 300 W 的空气源热泵,该泵与毛细管网之间通过一个容积为 0.2 m³ 的保温水箱连接;水箱在系统中除了收容和补偿循环水的胀缩量外,还起蓄冷和平衡空气源热泵制冷速度与毛细管网释冷速度的作用,可以提高毛细管供水温度的稳定性,避免室外机的频繁启停,有利于延长室外机的使用寿命。

系统运行时,通过控制空气源热泵的启停,保证水箱中的冷水维持在指定温度范围内(15~17 °C),从而保证毛细管供水温度相对稳定。当水箱中的水温低于设定下限时,空气源热泵将关闭,在毛细管末

端的释冷作用下,水温将逐步回升;当水温超过上限时,将再次开启空气源热泵。葬坑内文物保存区的空气温度通过控制毛细管回路循环水泵启停来实现;当坑内空气温度低于设定值下限时,毛细管循环水泵关闭,停止冷水流经毛细管;当空气温度回升超过设定值上限时,室内循环水泵再次开启,继续对葬坑区域进行冷却。西安地区的表层黄土在夏季平均温度为 21°C 左右^[11],为了维持葬坑内土壤-空气环境的平衡,实验中将葬坑内环境控制点温度设定值取为 $21\sim 22^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 数据测量系统

为了评估系统运行时葬坑内文物保存环境参数的分布情况,在葬坑内布置了温湿度传感器和风速传感器对环境参数进行测量,传感器测点的布置如图 4 所示。图中:T1~T5 为温湿度传感器,它们的位置到坑底地面的距离分别为 0.3、0.7、1.3、1.9 和 2.6 m,其中 T1 和 T2 布置在文物保存区域,测量文物保存环境的温度和湿度,T5 的位置在葬坑上方 0.5 m 处,测量游客区环境的温度和湿度,T3 和 T4 则布置在过渡区域内;Tr1、Tr2 为布置在葬坑内模拟文物本体中的温度传感器,模拟文物为陶质方形砖块,总高度为 0.6 cm,暴露在空气中的部分与埋藏在土壤中的部分都是 0.3 cm,Tr1、Tr2 距离地表均为 0.25 cm;Ts 为布置在坑底土壤环境中的温度传感器,埋藏深度为 0.05 m;TaV 为布置在文物保存区中的微风速测量仪,布置点距坑底 0.7 m。

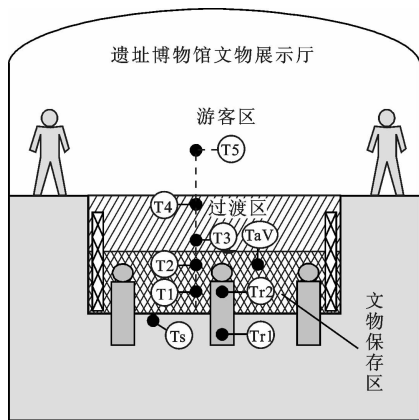


图 4 环境参数监测传感器布置点

上述测试仪器及其性能参数如下:T1~T5 采用 TR-72Ui 温湿度记录仪,温度测量精度为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$,湿度测量精度为 $\pm 5\%$;TaV 采用 Swema 03 风速仪,测量精度为 $\pm 0.03\text{ m/s}$;Ts、Tr1 和 Tr2 均采用 T 型热电偶,测量精度为 $\pm 0.004|T|$ 。

3 实验结果分析

利用以上实验系统研究葬坑内文物保存局部区域的毛细管辐射调控性能,整个实验分为 2 个阶段:第一阶段为毛细管辐射系统运行的工况,持续时间为 2014 年 7 月 13—16 日;第二阶段为毛细管辐射系统关闭、葬坑处于自然状态的工况,持续时间为 2014 年 7 月 18—21 日。不同工况之间预留 1 天作为过渡期。

3.1 空间温湿度分布

图 5 所示为 2 种测量工况下 T1~T5 测点的温度和相对湿度分布曲线。由图 5a 和 5c 可以看出:在毛细管辐射系统关闭时,文物区测点 T1、T2 的温度平均值分别为 25.5 和 26.5°C ,且随着时间推移有明显的上升趋势,温度昼夜分布受室外环境影响比较大,平均波动幅度达到 3.6°C ;当毛细管辐射系统开启后,T1、T2 的温度平均值分别为 21.4 和 21.9°C ,接近土壤的平均温度,昼夜波动幅度减小为 1.6°C ,表明毛细管辐射系统能有效保持文物保存环境温度的稳定以及土壤与空气环境温度之间的平衡;在 2 种工况下,游客区的温度(T5)基本不受毛细管辐射系统的影响,都存在较大的温度波动,说明利用毛细管辐射冷却系统达到了对葬坑局部区域进行环境调控的目的。

由图 5b、5d 可以看出,在 2 种工况下文物区测点 T1、T2 的相对湿度都维持在很高的水平,甚至接近 100% 。然而,2 种工况下高相对湿度产生的原因却并不相同:对于新开挖的实验葬坑,由于土壤含水量比较高,当毛细管辐射系统关闭时,葬坑内相对高的温度会导致土壤水分蒸发量增加,从而使坑内的相对湿度提高,这种情况在兵马俑百戏俑坑刚开挖时也曾出现过^[2];在毛细管辐射系统启动的工况下,相对湿度提高是由文物区温度降低所致。文物保存区的高相对湿度可以降低土遗址的失水速度,有效缓解土遗址的干裂病害。

3.2 葬坑内文物保存区的风速分布

遗址文物土环境与空气环境间的热量 and 水分迁移速度与坑内空气的流速密切相关,空气流速越大,土环境的失水速度就越快^[12]。从文物保存的角度衡量,要求博物馆文物保存区的风速控制在 0.15 m/s 以内^[13]。传统的大空间博物馆空调系统为了实现送风与馆内空气的充分混合,风口送风速度都很大,这会导致馆内剧烈的空气流动,加速土遗址的干裂过程。本文所采用的毛细管辐射系统的环境调

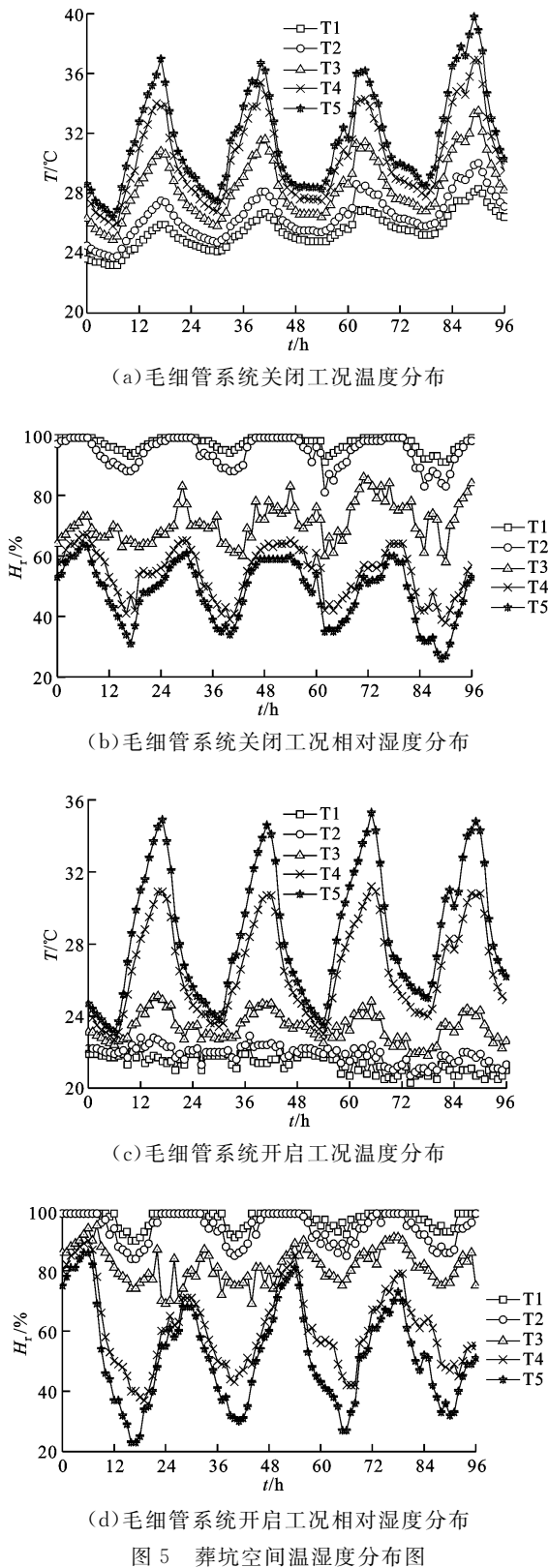


图 5 葬坑空间温湿度分布图

控过程主要通过辐射与自然对流实现,在降低温度的同时,坑底处于微风速状态。图 6 所示为毛细管辐射系统关闭与开启工况下,文物保存区测点 TaV 处的风速随时间的变化情况。从图中可以看出,2

种工况下葬坑内的风速都很低,特别是在毛细管辐射系统开启的工况下,文物保存区的空气流速都在 0.06 m/s 以下,远低于国外文献的推荐值(≤ 0.15 m/s^[12]),表明毛细管辐射系统在调控葬坑环境的同时,并没有引起葬坑内空气流动的显著变化,有利于减少土壤-空气界面水分和热量的迁移。

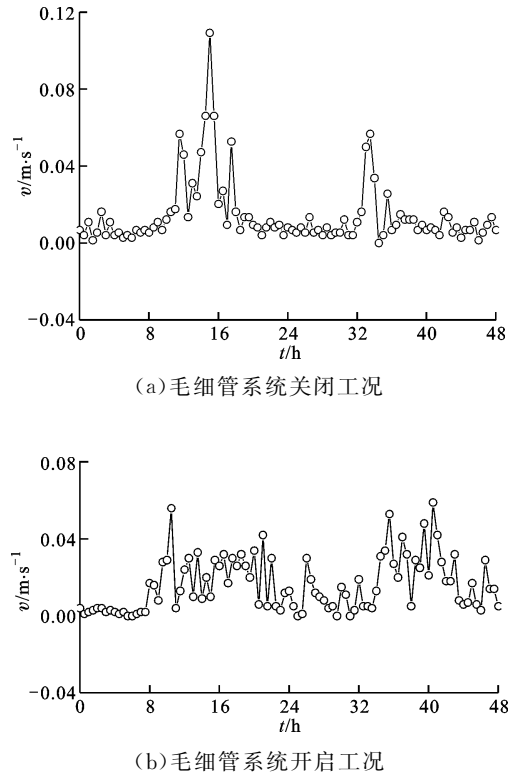


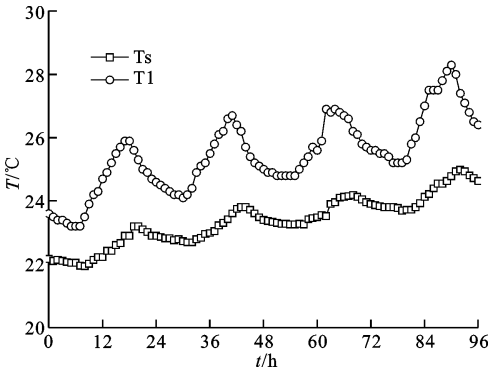
图 6 坑底文物保存区的风速分布图

3.3 不同环境介质的温度分布对比

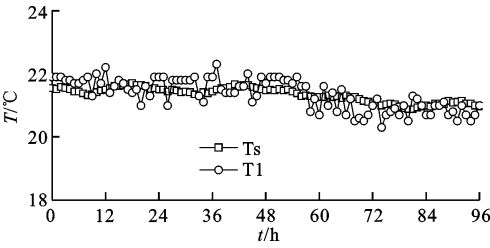
遗址文物保存环境包括土壤和空气 2 种介质,两者之间的能量和物质交换是造成文物干裂、盐分析出的重要原因,因此,通过环境调控使大气环境更接近土壤环境、减少两者之间的温差、建立 2 个环境之间的平衡,是实现土遗址环境稳定的重要思路。图 7 所示为 2 种测试工况下土壤环境(Ts)与空气环境(T1)的温度分布情况,从中可以看出:当毛细管辐射系统关闭时,2 种环境介质之间存在较大的温差(温差平均值达 2.1℃),并且随着时间的推移有明显的上升趋势;当毛细管辐射系统开启时,2 种环境介质之间的温度基本保持相同,平均温差降低到 0.3℃,表明通过毛细管辐射系统的调控,使大气温度和土壤温度基本达到了平衡。

3.4 文物本体温度分布对比

遗址文物暴露在空气中的部分与埋藏在土壤中的部分之间的温度均匀性是衡量保存环境是否适宜



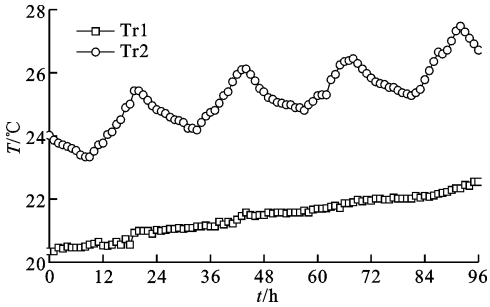
(a)毛细管系统关闭工况



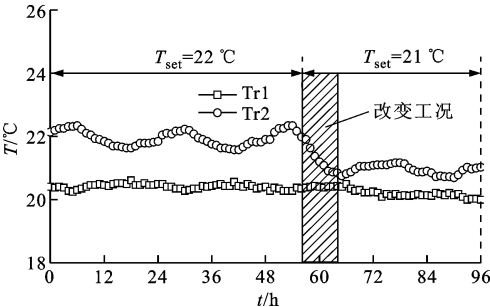
(b)毛细管系统开启工况

图 7 土壤、空气介质的温度分布图

的重要指标,当两者之间的温差较大时,不但会导致文物本体的热应力破坏,还会增加水分和盐分的迁移速度。图 8 所示为不同实验工况下文物本体内各部分的温度分布情况,从图中可以看出:当毛细管辐射系统关闭时,同一文物埋藏于土壤中的部分与暴



(a)毛细管系统关闭工况



(b)毛细管系统开启工况

图 8 文物本体温度分布图

露在空气中的部分之间存在显著温差,平均值达到 3.8℃;当毛细管辐射系统开启后,两者之间的温差显著减小,当系统调控设定温度(T_{set})为 22℃时,平均温差减小到 1.5℃,而当调控温度进一步降低到 21℃时,平均温差则减小到 0.8℃。文物内部温差减小有利于减小文物本身的热应力,可抑制文物热应力开裂病害的发生。

4 结 论

本文根据遗址博物馆原位保存文物的土壤-文物-空气耦合环境内物质与能量迁移的数理方程,提出通过控制耦合环境内各参数的梯度值、实现多介质耦合环境内各参数均匀分布的出土遗址文物保存思路,并搭建了实验台开展遗址文物局部原位环境调控研究,得到如下结论:

(1)毛细管辐射调控系统运行时,葬坑内文物保存局部环境温度分布均匀,文物保存区温度的昼夜波动值从系统关闭时的 3.6℃减小为 1.6℃,降低幅度为 56%,同时使文物保存区的风速控制在 0.06 m/s 以下,几乎可以忽略不计,实现了文物保存环境的稳定,有利于减轻文物本体的热应力破坏;

(2)文物保存的土壤-空气多介质环境之间的温差从毛细管辐射系统关闭时的 2.1℃减小为系统运行时的 0.3℃,减小了 86%,同时文物本体不同部分的温差从 3.8℃减小至 0.8℃,实现了不同环境介质之间及文物本体不同部分之间温度分布均匀,从传热角度考虑,可以大幅度减小传热温差,有利于抑制文物保存环境之间的物质与能量迁移。

参考文献:

[1] 罗昔联. 切削网格算法研究及其在遗址博物馆文物保存环境模拟中的应用 [D]. 西安: 西安交通大学, 2013.

[2] GU Z L, LUO X L, MENG X Z, et al. Primitive environment control for preservation of pit relics in archaeology museums of China [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(3): 1504-1509.

[3] LUO X L, GU Z L, YU C. Desiccation cracking of earthen sites in archaeology museum: a viewpoint of chemical potential difference of water content [J]. Indoor and Built Environment, 2015, 24(2): 147-152.

[4] LUO X L, GU Z L. Numerical study of indoor environment in Yang-ling relics museum heated from the envelop glass [C]// Proceedings of 5th International Symposium on Heating, Ventilating and Conditioning.

- Beijing, China: Tsinghua University Press, 2007: 328-332.
- [5] 杨雅媚, 曹军骥, 李库, 等. 汉阳陵地下博物馆土壤、大气及风化壳的理化特征 [J]. 中国粉体技术, 2009, 15(2): 38-45.
- YANG Yamei, CAO Junji, LI Ku, et al. Physico-chemical characteristics of soil, weathering salt and total suspended particles in the Yang Mausoleum of the Han Dynasty [J]. China Powder Science and Technology, 2009, 15(2): 38-45.
- [6] HU T F, LEE S C, CAO J J, et al. Atmospheric deterioration of Qin brick in an environmental chamber at Emperor Qin's Terracotta Museum, China [J]. Journal of Archaeological Science, 2009, 36(11): 2578-2583.
- [7] CAMUFFO D, MONTE M D, SABBIONI C, et al. Wetting, deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area [J]. Atmospheric Environment, 1982, 16(9): 2253-2259.
- [8] LIU W, ZHAO X X, MIZUKAMI K. 2D numerical simulation for simultaneous heat, water and gas migration in soil bed under different environmental conditions [J]. Heat and Mass Transfer, 1998, 34(4): 307-316.
- [9] NOVAK M D. Dynamics of the near-surface evaporation zone and corresponding effects on the surface energy balance of a drying bare soil [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(10): 1358-1365.
- [10] 王宇昂, 路昭, 罗昔联, 等. 遗址博物馆特殊环境温度场调控系统的设计及优化 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7): 131-139.
- WANG Yuang, LU Zhao, LUO Xilian, et al. Design and optimization of temperature control system for special environment in site museums [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(7): 131-139.
- [11] 张小刚. 西安地区岩土综合热物性参数分析及土壤源热泵经济适宜区域研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [12] ROGERS J A, KAVUANY M. Funicular and evaporative-front regimes in convective drying of granular beds [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(2): 469-480.
- [13] YAU Y H, CHEW B T, AZA S. A field study on thermal comfort of occupants and acceptable neutral temperature at the National Museum in Malaysia [J]. Indoor and Built Environment, 2013, 22(2): 433-444.

(编辑 葛赵青)

(上接第82页)

- [16] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? statistical self-similarity and fractional dimension [J]. Science, 1967, 155(3775): 636-638.
- [17] 曾强. 具有串并混联形式与变自由度特性的空间多环机构的拓扑设计方法 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [18] 廖明, 刘安心, 沈惠平, 等. 面向计算机辅助分析的并联机构符号描述方法 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 310-317.
- LIAO Ming, LIU Anxin, SHEN Huiping, et al. Symbolic description of parallel mechanism for computer aided analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 310-317.
- 设计方法. 2016, 50(9): 1-9. [doi:10.7652/xjtuxb201609001]
- 孟凡刚, 巫世晶, 贾俊峰, 等. 考虑间隙的弹性断路器弹簧操动机构动力学特性研究. 2016, 50(7): 75-82. [doi:10.7652/xjtuxb201607012]
- 秦友蕾, 曹毅, 陈海, 等. 两移动三转动完全解耦混联机器人机构型综合. 2016, 50(1): 92-100. [doi:10.7652/xjtuxb201601015]
- 王安麟, 孟庆华, 李文嘉, 等. 液力变矩器机构变量交互作用研究. 2015, 49(9): 1-7. [doi:10.7652/xjtuxb201509001]
- 杨德伟, 冯祖仁, 张翔. 新型三臂巡线机器人机构设计及运动分析. 2012, 46(9): 43-48. [doi:10.7652/xjtuxb201209009]
- 谢嘉, 赵升吨, 梁锦涛, 等. 压力机杆系优化求解的变量循序组合响应面法. 2012, 46(5): 57-62. [doi:10.7652/xjtuxb201205010]

(编辑 葛赵青)

[本刊相关文献链接]

周奇才, 吴青龙, 熊肖磊, 等. 桁架结构拓扑及截面尺寸优化