

DOI: 10.7652/xjtuxb201905016

回风口位置对文物保存环境 置换通风调控性能的影响

李娟, 罗昔联, 常彬, 顾兆林
(西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对遗址文物局部保存环境置换通风调控存在空调负荷高、空间温度梯度大等问题,提出将回风口朝下布置在文物区内以减少对非空调区空气卷吸的改进方法,降低了空调负荷,提高了文物区环境的均匀性。基于现有遗址博物馆实验展厅,进一步搭建了文物区局部置换通风调控系统,对比研究了自然通风工况和回风高度分别为0.4、0.9、1.6 m的3种置换通风工况下,文物区温湿度空间分布特征和空调负荷能耗。研究结果表明:置换通风调控系统有效地改善了文物区环境的稳定性,距坑底0.2 m的范围内温度和相对湿度的波动值较自然工况分别降低了50%和88%;文物区垂直方向上出现了0.2~0.7 m和1.5~1.7 m的两个热力分层,随着回风口高度的降低,置换通风系统对文物区环境参数的调控性能增强,热分层的高度和有效调控高度降低;回风口朝下设置与原方案相比,空调负荷平均降低了57.2%,并且当回风口的高度从1.6 m降低到0.4 m时,单位面积空调负荷进一步降低了22.7 W/m²。研究结果可为文物区局部环境置换通风调控系统设计提供参考。

关键词: 文物保护;遗址博物馆;置换通风;回风口

中图分类号: TU834.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)05-0115-08

Influence of Return-Air Outlet Position on Artifacts' Preservation Environment with Displacement Ventilation System

LI Juan, LUO Xilian, CHANG Bin, GU Zhaolin
(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problems of high energy consumption and large temperature gradient in the local environment control of relics preservation in heritage museum with displacement ventilation (DV) system, an improved DV system, which can reduce the air entrainment from the unconditioned area by laying return-air inlet downwards at the preservation area, was developed. Based on current experimental museum exhibition hall, an experimental setup of the proposed DV system was built. Thus, experiments on natural ventilation system and three DV systems with the heights of return air of 0.4, 0.9 and 1.6 m were performed, and the distributions of temperature and humidity as well as the energy consumption of the system in all test cases were compared and analyzed. The experimental results showed that the DV system could effectively improve the stability of the preservation environment. The fluctuations in temperature and

relative humidity were decreased by 50% and 88%, respectively, at a height of 0.2 m from the pit bottom, compared with that of natural ventilation system. Consequently, two thermal stratifications, i. e., 0.2-0.7 m and 1.5-1.7 m were formed in the vertical direction of the preservation area. With the lowering of the height of return air, the DV system enhanced the control over the environmental parameters in the preservation area, and the height of thermal stratification and effective control height were low. Since the downward layout of return-air inlet was set, the load of air-conditioning was decreased by 57.2% averagely compared with the original design. In addition, when the height of return-air inlet decreased from 1.6 m to 0.4 m, the load of air-conditioning per unit area was further decreased by 22.7 W/m². These results could be used as reference for the design of displacement ventilation control systems.

Keywords: relics preservation; heritage museum; displacement ventilation; return-air outlet

我国已经建成 150 多座遗址博物馆,由于缺少有效的环境调控技术,大量遗址文物面临干裂、泛碱、褪色等病害^[1-4]。环境调控是改善博物馆文物保存条件的重要手段,目前国内外已经开展了很多相关研究,针对开放空间游客和文物对环境需求不一致所带来的调控难题,Gennusa 提出利用不同环境需求重叠区作为调控参数,实现游客热舒适性 with 文物保存环境的同时调控^[5],但该方法的应用条件十分苛刻,对系统控制要求高,推广应用难度很大。针对大空间遗址展厅环境调控系统运行能耗高的问题,罗昔联等采用毛细管辐射调控系统,实现了遗址文物保存局部环境独立调控,但由于缺乏有效的通风换气,无法实现开放保存环境文物对洁净的需求^[6]。针对遗址文物环境净化的需求,顾兆林等提出空气幕隔离调控系统,实现了文物区与游客区的有效隔离和环境净化,但空气幕系统要求文物区为规则的方形区域,由于送风口射流速度较高,容易引起振动,不利于文物的妥善保存^[7]。

为了减少环境调控系统对文物的干扰,并实现遗址文物对保存环境“稳定、洁净”的综合要求^[8],作者所在的课题组在前期研究中,提出采用置换通风系统对文物保存区局部环境进行调控,并通过实验验证了该系统的可行性^[9]。空间热力分层特性是置换通风系统对文物保存区局部环境稳定调控的基础,但热力分层同时会导致垂直方向上出现温度梯度,影响文物区环境温度的均匀性。由于文物区没有人员、设备等内热源,影响置换通风调控空间温度梯度的主要因素为系统送风量和回风口的布置位置,研究表明当送风量达到一定值后,温度梯度随送风量的进一步增加改变很小^[9]。不同遗址博物馆遗址文物的高度存在差异,从而对温度在高度上的分层特性及梯度大小要求也不一致。为确定回风口的

高度对空间温湿度分布及环境调控性能的影响规律,本文在上述研究^[9]基础上,通过改变回风口的布置高度,实验研究了不同回风口布置高度下,文物区温度的分层特性及系统运行能耗,为置换通风系统在大空间遗址博物馆文物保存局部环境调控中的应用提供了设计依据。

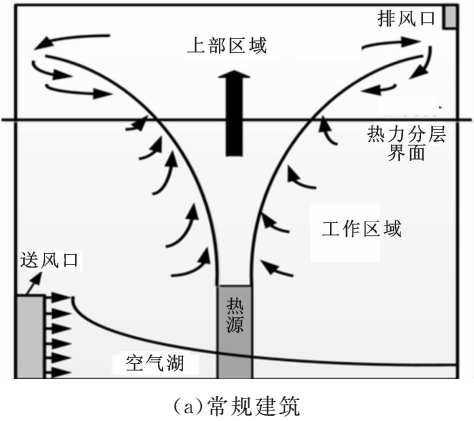
1 文物区局部置换通风调控原理分析

置换通风系统可以提高室内工作区空气品质,降低空调冷负荷,目前已经在很多领域得到广泛应用^[10-11]。置换通风系统应用于公共建筑时,在人员、设备等热源的作用下,系统送风在室内形成热力分层界面,将垂直方向分成工作区(空调区)与非工作区,如图 1a 所示。置换通风系统应用于大空间遗址博物馆文物区环境调控时,面临以下变化:①文物保存区没有人员和设备,在系统送风温度近似等于室温时,土壤所产生的热量几乎可以忽略不计,整个环境调控区域没有明显的内热源;②现有的置换通风热力学分层理论模型都是基于封闭区域内经典热羽流理论提出的^[12-13],而遗址展厅文物保存区域为开放区域,与文物区相邻的并不是屋顶而是游客区,文物区的热量主要由游客区与文物区之间的空气运动所带入,如图 1b 所示。因此,对于遗址文物保存区这一特殊应用场合,置换通风系统的气流组织和热力分层特性主要由回风口位置及游客区渗透热源共同作用。

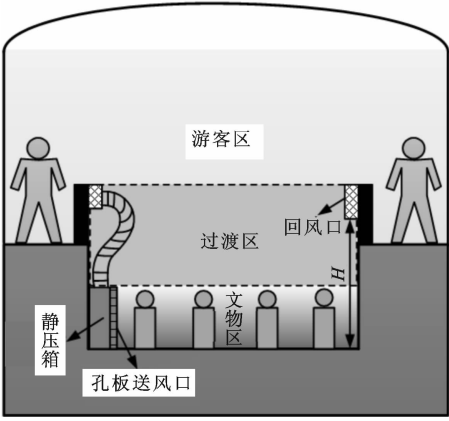
2 实验系统及实验工况

2.1 实验系统

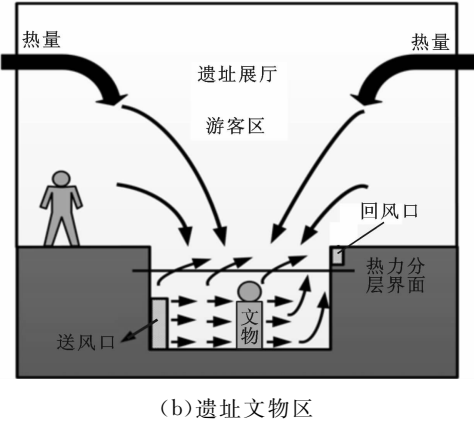
本文参照兵马俑博物馆大空间展厅与文物保存葬坑结构,搭建了一个遗址文物环境调控实验室^[14-15],并设计了置换通风实验系统,实验系统由空



(a)常规建筑

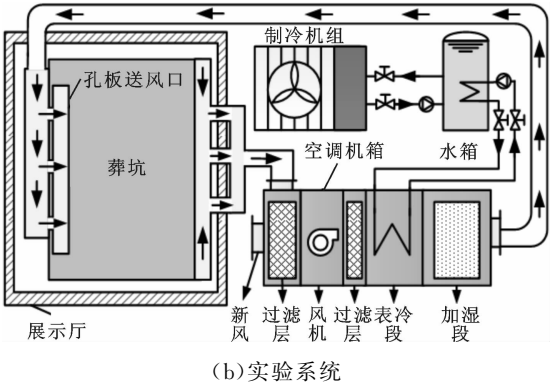


(a)遗址展厅调控系统



(b)遗址文物区

图 1 常规建筑和遗址文物区置换通风原理图



(b)实验系统

图 2 遗址展厅置换通风实验系统

调处理机箱、送回风系统组成。空调机箱布置在室外,可以根据设定参数调节送风温湿度、风量,并对空气进行净化,其中制冷机组为冷热型的热泵机组,可以根据不同季节调控需求,切换为制冷和制热工况;送回风系统由送风静压箱、回风口以及循环风管组成,其中送风静压箱布置在坑底,长、宽及厚度分别为 2.5、0.9 和 0.2 m,其背向坑壁的面被加工成送风孔板,孔口直径是 2 mm,送风开孔面积占送风面板总面积的 25%。送风静压箱的作用主要是通过增加送风口前管道的面积,将送风动能转化为压能,提高送风的均匀性,回风口布置在葬坑侧壁,可以根据需要调节回风口的高度,实验系统和流程如图 2 所示。

2.2 数据监测系统

实验过程中测量的参数包括展厅空间温湿度和送回风温湿度,测点布置如图 3 所示。图中测点 $T_1 \sim T_{10}$ 为葬坑中心垂直方向的温湿度测点,距坑底的高度分别为 0.2、0.5、0.7、1.0、1.3、1.5、1.6、1.7、2.0 和 2.8 m,其中 T_9 位于葬坑区与游客区的分界处, T_{10} 位于葬坑上方 0.8 m 处,代表实验展厅游客区环境的温湿度。 T_{11} 和 T_{12} 与 T_5 处于同一水平高

度,用于记录水平面上温湿度的分布特性, T_{13} 和 T_{14} 用于记录送风和回风温湿度。实验所用仪器为 TR-72Ui 温湿度记录仪,温度和相对湿度测量精度分别为 0.3℃ 和 5%。

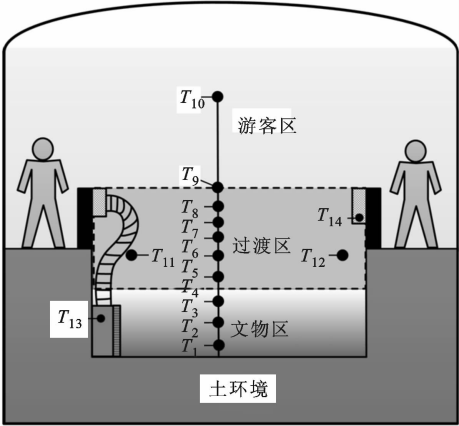


图 3 传感器分布图

2.3 实验工况

在保持送风口不变的情况下,选择 3 个回风口布置高度($H=1.6, 0.9, 0.4$ m)作为测试工况,同时还测试了一个系统关闭时的自然工况作为对比,各实验工况如表 1 所示,其中工况 1 完成时间为 2016

年,在垂直高度上只布置了 5 个温湿度传感器,位置分别与图 3 中 T_1 、 T_2 、 T_5 、 T_9 及 T_{10} 相同。工况 2~4 中,置换通风系统换气次数均为 10.9 次/h(以文物区和过渡区为计算对象,总体积为 22.4 m³),送风温度为 20~21 ℃^[9]。文物区相对湿度主要考虑抑制遗址文物干裂和盐分富集病害的发生,尽量接近饱和^[3],虽然相对湿度高会促进霉菌滋生,但当相对湿度超过 95% 以后,霉菌生长能力急剧下降,特别是相对湿度接近 100% 时,霉菌几乎停止生长^[16],因此本文湿度控制目标为相对湿度尽量接近 100%。

表 1 实验工况

工况	调控模式	实验时段
1	自然通风	2016-08-13—2016-08-14
2	$H=1.6$ m	2018-08-07—2018-08-08
3	$H=0.9$ m	2018-08-09—2018-08-10
4	$H=0.4$ m	2018-08-11—2018-08-12

3 结果分析

3.1 室外气候条件

表 2 所示为各实验工况室外气候参数的统计值。在各工况运行期间,室外平均温度都在 30 ℃ 以上,最高温度都超过了 40 ℃,并且昼夜之间的温差均超过了 13 ℃,将对遗址文物造成极大的威胁,因此非常有必要采取相应的文物区微环境调控措施,为遗址展厅内半暴露的文物营造一个适宜、稳定的保存微环境。

表 2 室外温湿度统计值

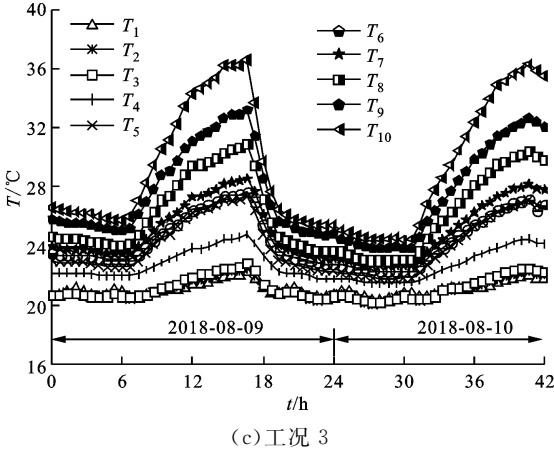
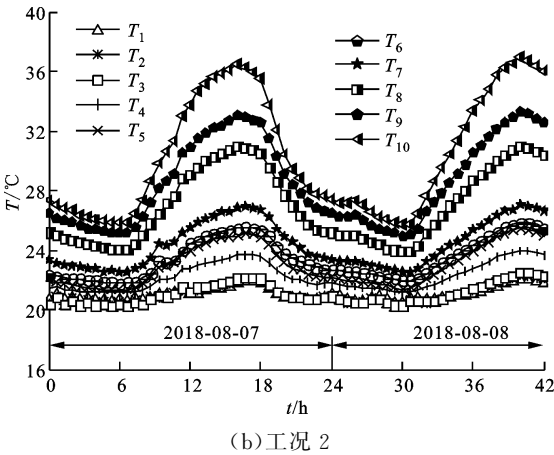
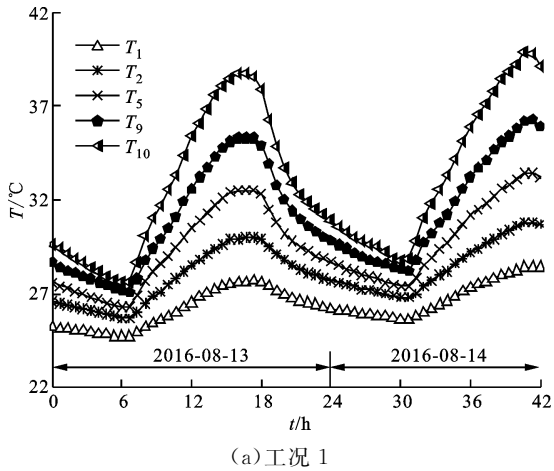
工 况	温度/℃			相对湿度/%		
	$T_{\max}$	$T_{\min}$	T_{avg}	$\varphi_{\max}$	$\varphi_{\min}$	φ_{avg}
1	41.5	28.7	35.1	66	31	46
2	42.6	26.6	33.2	62	22	43
3	41.2	23.4	30.7	82	20	52
4	40.4	26.7	32.1	61	24	43

3.2 垂直方向温湿度分布特征

图 4 所示为各工况展厅垂直方向温度分布。在 4 个工况下,位于游客区测点 T_{10} 的平均温度和波动值都较大,平均温度分别为 31.40、30.45、29.30 和 29.40 ℃,波动值为 11 ℃ 左右,表明游客区主要受室外温度的影响,文物区局部环境调控对游客区影响很小。当工况 1 中空调系统关闭时,坑内测点温度昼夜波动值均超过 3 ℃,远超过推荐值 1.5 ℃^[17],并

且坑底 T_1 测点的平均值达到了 24 ℃,与西安地区夏季土环境温度 20 ℃^[6] 之间存在较大温差,会加速遗址文物土环境的失水而引起文物病害。置换通风系统运行以后,工况 2~4 坑内各测点的温度和波动值得到了有效调控,坑底文物区测点 T_1 、 T_2 的波动值较自然工况均降低了 50%,并且 T_1 点温度降低到 21 ℃,基本达到了空气环境与土环境之间的平衡。

为了进一步分析回风口高度变化对垂直方向温



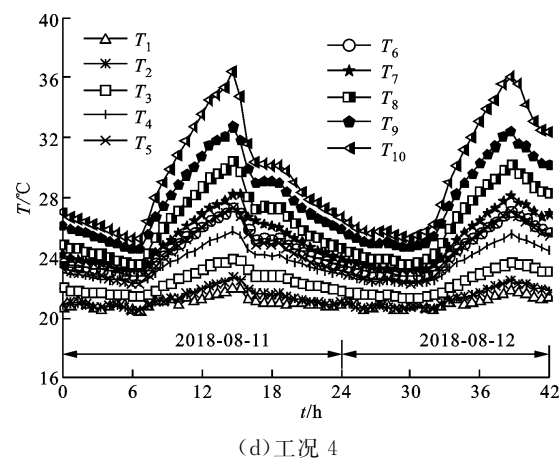


图 4 各工况展厅垂直方向温度分布图

度分布的影响,本文分别对白天、夜晚时段各测点沿展厅高度方向的温度分布进行统计,如图 5 所示。在工况 1 自然通风状态下,各测点温度随着高度呈线性增加,明显高于其他 3 个工况。此外测点 T_1 和 T_2 之间的变化速率较大,白天和夜晚时段的温差分别为 2.03 和 $1.41\text{ }^{\circ}\text{C}$,当开启置换通风调控后,测点 T_1 和 T_2 之间的温差显著降低,工况 2~4 白天时段的温差分别为 0.11 、 0.08 和 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜晚时段温差分别为 0.02 、 0.02 和 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明文物区置

换通风调控措施能有效改善文物区环境。

此外对比工况 2~4 的 3 个局部置换通风调控工况,发现在垂直方向上均出现了两个温升阶段,第 1 阶段出现在文物附近区域,工况 2~4 分别在距坑底 0.7 、 0.5 、 0.2 m 处温度开始升高,其中工况 4 中测点 T_1 与工况 2、3 的相比,温度最低,但也是最早出现温升且温升速率最大的,这主要是回风口高度不同导致的,表明随着回风口高度降低,其对坑底区域的调控能力增强,但有效调控高度在减小。第 2 阶段出现在距坑底 $1.5\sim 1.7\text{ m}$ 的高度上,其中工况 1 的温升幅度最大,且稳定。这个阶段白天的温升幅度明显比晚上大,以工况 1 为例,白天时段温升幅度为 $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,而晚上则为 $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明这一阶段的温升主要影响因素为葬坑上部的热空气,白天室内温度较高,上部渗透热源对坑内气流组织的影响明显大于晚上。

图 6 为各工况展厅垂直方向相对湿度分布图,从图中可以看出相对湿度的整体变化规律与温度的变化规律相似。在工况 1 中,葬坑处于自然通风状态,距坑底最近的测点 T_1 的平均相对湿度为 90% ,波动值为 9% 。当开启局部调控措施后,文物附近区域的相对湿度得到了有效控制,在工况 2~4 中,测点 T_1 的相对湿度平均值均在 99.9% 以上,且相

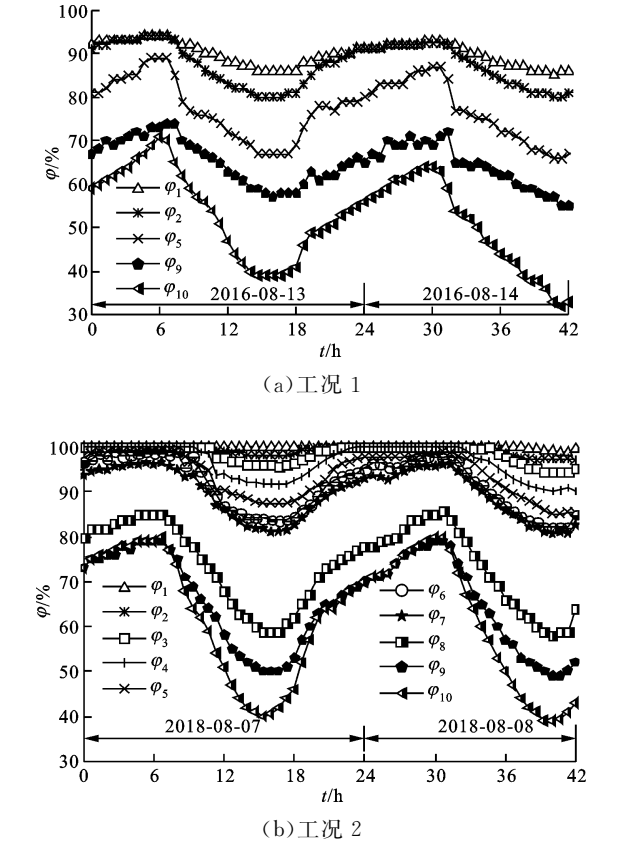
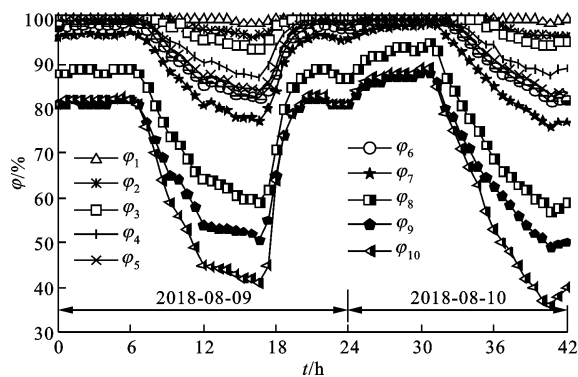
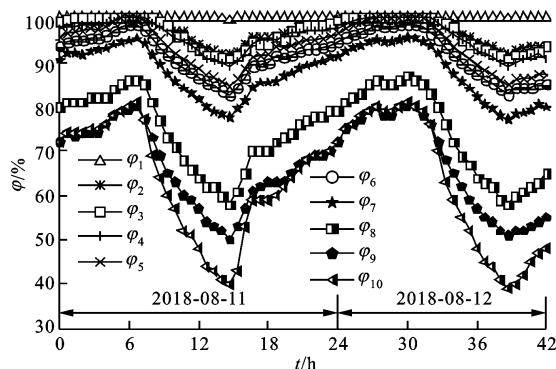


图 5 各工况展厅内温度的垂直分布



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图6 各工况展厅垂直方向相对湿度分布图

应的波动值也降低到 1%，较自然工况的波动值平均降低了 88%，无论从抑制土壤干裂病害还是霉菌病害的角度出发，这个状态参数点均有利于文物的保存，同时也表明在系统加湿器开启的状态下，回风口高度改变对文物区相对湿度的影响并不明显。

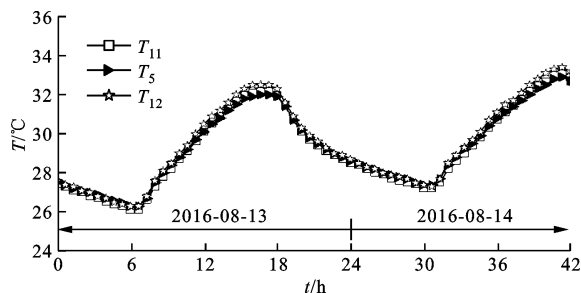
3.3 实验展厅内水平方向上温湿度分布特征

图 7 为各工况展厅距坑底 1.3 m 高度上温度分布图。观察发现，各工况水平方向上温度分布相对均匀，在工况 1 中，各测点之间的平均温度差仅为 0.24℃，但温度波动值在 6.9℃ 左右，当采取置换通风调控后，各测点的温度和波动值明显降低，在工况 2~4 中各测点的波动值分别为 4.1、5.2 和 4.9℃，虽然受送入新风的影响，各工况白天时段测点 T_{11} 的温度稍低，但影响不大。此外对比发现，工况 2 的平均温度较工况 3 和 4 分别低 1.1 和 0.8℃，主要是因为工况 2 中，该平面在回风口平面下方，受置换通风调控系统的影响较大。

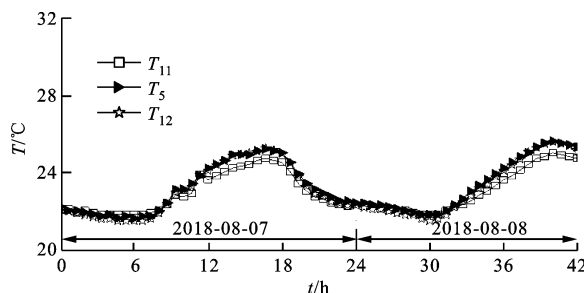
3.4 空调负荷分析

根据实验测量的系统送风量，并利用送风口 T_{13} 和回风口 T_{14} 温湿度计算出空气比焓，即可以根据下式计算各空调负荷

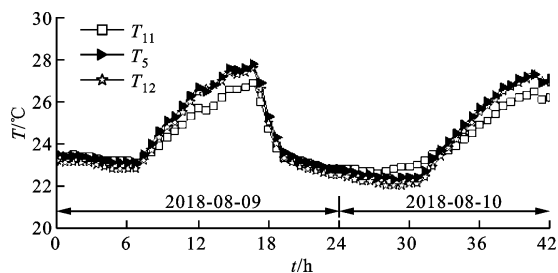
$$Q = L_m(h_r - h_s) = L_m \Delta h$$



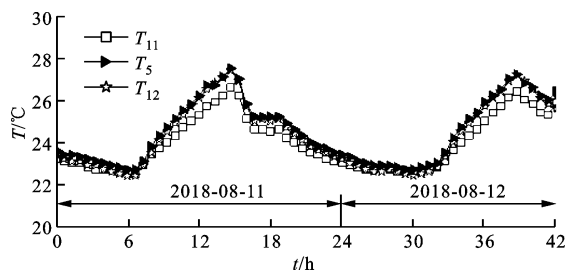
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图7 各工况展厅距坑底 1.3 m 高度上温度分布图

式中 L_m 、 h_r 、 h_s 分别为送风质量流量、回风空气比焓和送风口处空气比焓。表 3 为工况 2~4 对应的能耗统计表，其中 q_i 为单位面积冷负荷，是根据空调总负荷除以文物区面积 (11.2 m²) 计算得到的。从表中可以看出，总能耗随着回风口高度的降低而减少，这主要是因为随着回风口位置的降低，空调区域的有效体积也减小。相比文献[9]中将回风口布置在游客区与文物区界面工况下的单位面积冷负荷 124.7 W/m²，本文工况 2~4 空调负荷分别降低了

47.7%、58.2%和 65.9%。这主要是因为此次实验将回风口由原来的水平设置改成了风口朝下设置,减小了上部热空气的影响,也表明回风口设置对实验系统能耗至关重要。

表 3 能耗汇总表

工况	$\Delta h/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$L_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	Q/W	$q_t/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
2	9.3	282.5	729.8	65.2
3	7.4	282.5	583.0	52.1
4	6.1	282.5	475.5	42.5

4 结 论

本文通过实验研究了夏季工况回风口高度变化对遗址文物区局部置换通风调控性能的影响,对比分析了 4 种实验工况(自然通风以及回风口高度 $H=1.6,0.9,0.4\text{ m}$)下展厅内温湿度分布特征和系统空调负荷变化,得到如下结论。

(1)局部置换通风调控措施有效地改善了文物区环境的稳定性,同时对游客区的影响很小。在工况 2~4 中距坑底最近的测点 T_1 温度波动值较自然通风工况均降低了 50%,相对湿度平均值均在 99.9%以上,波动值在 1%左右,有利于文物的妥善保存。

(2)对于置换通风调控工况,展厅内的温度在垂直方向均出现了两个热分层阶段,工况 2~4 第 1 阶段的热分层高度分别距坑底 0.7、0.5、0.2 m,即有效调控高度随着回风口高度的降低而降低;第 2 阶段均出现在 1.5~1.7 m 的高度上,且白天时段的温升幅度明显大于夜晚时段,主要影响因素为上部渗透热源。文物区水平方向上温度分布相对均匀。

(3)回风口设置对减小置换通风调控系统空调负荷至关重要。回风口朝下设置与水平设置相比,平均降低了 57.2%的系统能耗,同时随着回风口的高度从 1.6 m 降低到 0.4 m,单位面积空调负荷从 65.2 W/m² 降低到 42.5 W/m²。

参考文献:

[1] 马涛,王展,纪娟,等. 南方典型遗址博物馆文物病害与环境的关联研究 [J]. 文博, 2015(4): 71-112.
MA Tao, WANG Zhan, JI Juan, et al. Study on the relationship between cultural relics and environment in typical southern ruins museums [J]. Relics and Museology, 2015(4): 71-112.

[2] HU Tafeng, LEE S C, CAO Junji, 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.

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

[4] AGELAKOPOULOU T, METAXA E, CHS K, et al. Air pollution effect of SO₂ and/or aliphatic hydrocarbons on marble statues in Archaeological Museums [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1/2/3): 182-189.

[5] GENNUSA M L, RIZZO G, SCACCIANOCE G, et al. Control of indoor environments in heritage buildings: experimental measurements in an old Italian museum and proposal of a methodology [J]. Journal of Cultural Heritage, 2005, 6(2): 147-155.

[6] LUO Xilian GU Zhaolin, WANG Zanshe, et al. An independent and simultaneous operational mode of air conditioning systems for visitors and relics in archaeology museum [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 911-924.

[7] LUO Xilian, GU Zhaolin, YU Chuck, et al. Efficacy of an air curtain system for local pit environmental control for relic preservation in Archaeology Museums [J]. Indoor and Built Environment, 2016, 25(1): 29-40.

[8] 国际古迹遗址理事会中国国家委员会. 中国文物古迹保护准则 [M]. 北京: 文物出版社, 2015: 2-3.

[9] LUO Xilian, GU Zhaolin, TIAN Wei, et al. Experimental study of a local ventilation strategy to protect semi-exposed relics in a site museum [J]. Energy and Buildings, 2018, 159: 558-571.

[10] WANG Yang, ZHAO Fuyun, KUCKEIKORN J, et al. Classroom energy efficiency and air environment with displacement natural ventilation in a passive public school building [J]. Energy and Buildings, 2014, 70: 258-270.

[11] GIL-LOPEZ T, GALVEA-HUERTA M, O'DONOHUE P, et al. Analysis of the influence of the return position in the vertical temperature gradient in displacement ventilation systems for large halls [J]. Energy and Buildings, 2017, 140: 371-379.

[12] MANINS P C. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 37(4): 51-80.

- [13] LINDEN P F, LANE-SERFF G F, SMEED D A. Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 212 (2): 309-335.
- [14] 张哲, 宋朋龙, 贺沅平, 等. 多介质耦合环境下的遗址文物原位保护 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50 (11): 150-156.
ZHANG Zhe, SONG Penglong, HE Ruanpin, et al. In-suit relics preservation under multi-media coupling environmental in archaeology museums [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(11): 150-156.
- [15] 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 museum [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(7): 131-139.
- [16] SEDLBAUER K. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components [J]. *Dissertation Universitat Stuttgart*, 2014, 75(2): 66-68.
- [17] THOMSON G. The museum environment [M]. 2nd ed. London, UK: Butterworld-Heinemann, 1986: 139.

(编辑 荆树蓉 赵炜)

(上接第 23 页)

- [15] 张保成. 内燃机动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 3-45.
- [16] 龚曙光. ANSYS 参数化编程与命令手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 501-548.
- [17] 胡成永. 热机载荷对活塞应力与变形影响规律研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 37-42.
- [18] 赖菲. 全钢活塞的热机耦合仿真分析及疲劳寿命预测 [D]. 太原: 中北大学, 2015: 56-57.

(编辑 赵炜)

(上接第 72 页)

- [14] FLEUREAU J, KACHENOURA A, ALBERA L, et al. Multivariate empirical mode decomposition and application to multichannel filtering [J]. *Signal Processing*, 2011, 91(12): 2783-2792.
- [15] TANG Baoping, LI Feng, QIN Yi. Fault diagnosis model based on feature compression with orthogonal locality preserving projection [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(5): 891-898.
- [16] 时培明, 蒋金水, 刘彬, 等. 基于边界特征尺度匹配延拓的 EMD 改进方法及应用 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25(12): 1616-1623.
SHI Peiming, JIANG Jinshui, LIU Bin, et al. Improved method of EMD and its applications based on boundary characteristic scale matching extension method [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2014, 25 (12): 1616-1623.
- [17] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41 (3): 613-627.
- [18] ZHAO J P. Mirror extending and circular spline function for empirical mode decomposition method [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2001, 2(3): 247-252.
- [19] 李勇, 方兆本, 韦勇凤. 基于局部多项式回归的 EMD 端点效应抑制 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2014, 44 (9): 786-792.
LI Yong, FANG Zhaoben, WEI Yongfeng. Suppressing end effect of EMD based on local polynomial regression [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2014, 44(9): 786-792.

(编辑 荆树蓉)