

乾陵无字碑温度场分布规律研究

任 兴^{1,2}, 秦立科^{1,2}, 甄 刚^{2,3}, 马宏林^{2,3}, 王 番^{1,2}

(1. 西安科技大学, 建筑与土木工程学院, 陕西西安 710054;

2. 砖石质文物保护国家文物局重点科研基地(陕西省文物保护研究院), 陕西西安 710075;

3. 陕西省文物保护研究院文物修复部, 陕西西安 710075)

摘要: 由于长期裸露在自然界中, 无字碑表面风化严重, 温度是影响无字碑风化的主要因素之一。为了探究无字碑温度场的分布规律, 在传热学基本原理的基础上建立了无字碑三维分析模型, 基于 Comsol Multiphysics 仿真软件对无字碑在太阳辐射下的温度场进行了计算。结果表明无字碑温度由表面到内部的变化趋势呈抛物线型, 越靠近无字碑中心处日温度变化量越小。随着太阳方位角和高度角的改变, 无字碑4个表面温度分布极不均匀, 在水平方向和竖直方向均出现了温度梯度, 形成了较大温差。该研究结果可为无字碑的保护工作提供科学有效的依据。

关键词: 无字碑; 温度场; 太阳辐射; 分布规律

中图分类号: K877.42 **文献标识码:** A

0 引言

乾陵是女皇武则天和唐高宗李治的合葬陵, 距今已有1400余年历史, 陵内石质文物众多, 为研究唐朝文化提供了重要依据。其中无字碑更是作为乾陵的象征, 具有重大的历史意义和社会价值。然而, 由于长期受到温度、湿度、风力、酸雨、生物、地震等因素影响, 无字碑风化得很严重。找出影响风化的主要因素, 研究分析其发生的机理, 为石刻的保护提供科学的依据已经是当下工作的重中之重。马涛、孙渊等^[1]利用超声波技术对乾陵石刻内部裂隙的发育分布情况进行了研究; 杨军昌、甄广全^[2]对乾陵石刻的保存状况进行了统计, 给石刻的保护提出了建议; 马涛^[3]通过废弃柱础的钻孔样品研究了乾陵石刻水理和物理性质; 甄刚、秦立科等^[4]对无字碑的裂隙分布进行了调查并给出了稳定性分析; 闫敏^[5]对影响乾陵石刻的气候环境因素进行了研究, 指出温度、湿度对石刻风化产生了严重的影响。以上研究虽然为乾陵石刻保护工作提供了大量的理论依据和科学分析, 但关于影响无字碑风化的温度因素方面的研究却相对甚少。温度的剧烈变化可使无

字碑中不同矿物发生热胀冷缩, 不同矿物的膨胀量不同^[6], 长期反复的差异性胀缩会加速无字碑的物理风化, 不利于无字碑的安全保存。可见研究清楚无字碑温度场的分布规律对无字碑的保护工作至关重要。

本研究在传热学基本原理的基础上, 通过查阅相关文献和对乾陵无字碑现场勘查, 建立了无字碑的三维分析模型, 利用 Comsol Multiphysics 仿真软件计算分析了无字碑在太阳光辐射下的温度场分布规律, 为无字碑的保护工作提供科学的依据。

1 无字碑与外界环境的热能交换

在一个物体内部或物系之间, 只要存在温度差, 热量就将自发的从高温处传向低温处, 热量传递有三种基本方式: 热传导、热对流和热辐射。

无字碑的内部热传导属于无内热源、三维热传导问题, 根据傅里叶定律, 在直角坐标系下导热微分方程一般形式可表示为^[7]:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (1)$$

收稿日期: 2016-09-18; 修回日期: 2017-01-09

基金项目: 砖石质文物保护国家文物局重点科研基地开放课题资助(ZK2016001)

作者简介: 任 兴(1993—), 男, 西安科技大学建筑与土木工程学院硕士生, 主要研究方向为石质文物保护修复, E-mail: 534309351@qq.com

式中, ρ 为密度 (kg/m^3); c 为比定压热容 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

流体在和固体表面发生热量传递时同时有热对流和热传导两种传热方式, 传热学将这种热量传递过程叫做对流换热。根据牛顿冷却公式计算:

$$q_c = h_c(T_{sur} - T_{air}) \quad (2)$$

式中, q_c 为对流换热产生的热流密度 (W/m^2); T_{sur} 为无字碑表面温度 (K); T_{air} 为空气温度 (K); h_c 为对流换热表面传热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)。其计算公式如下^[8]:

$$h_c = 5.6 + 4.0v \quad (3)$$

式中, v 为当地风速 (m/s)。

从辐射角度分析, 进入无字碑的能量包括太阳的短波辐射 E_s 和周围环境的长波辐射 E_L , 同时无字碑还会向外界散发长波辐射 q_L ^[9]。将以上各部分求和, 可得到进入无字碑的净热能总量 q :

$$q = \alpha E_s + \varepsilon E_L - q_L - q_c \quad (4)$$

式中, α 为无字碑对太阳短波辐射的吸收系数; ε 为无字碑表面的长波辐射发射率, 在数值上等于无字碑对于长波辐射吸收率。

2 无字碑计算模型建立

乾陵地处东经 108.25° , 北纬 34.54° , 属暖温带, 盛行风基本为西北-东南向, 风速一般为 $2.0 \sim 2.5 \text{m}/\text{s}$ ^[10]。无字碑碑高 6.30m , 宽 2.1m , 厚 1.49m , 碑座尺寸为 $3.3 \text{m} \times 2.9 \text{m} \times 1.2 \text{m}$, 总重量大约 98.8t , 所用材料为奥陶纪石灰岩^[11]。无字碑露天放置, 周围铺设有一层灰砖。土体下方 6m 处温度基本稳定在 15°C ^[12], 所以边界条件取无字碑下 $15 \text{m} \times$

$15 \text{m} \times 6.53 \text{m}$ 的立方体代表砖块和土体, 所建模型计算网格划分见图 1。

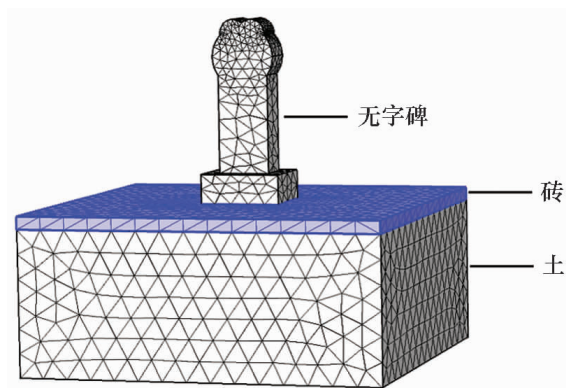


图 1 三维模型网格划分

Fig. 1 Mesh generation of 3D model

大气温度的取值直接影响对流换热的效率, 从而影响整个无字碑的温度场分布。国内外大量实测资料表明, 可以用一个正弦函数来模拟大气温度在一昼夜间的变化。本研究采用下式来计算各时刻大气温度 T_A ^[13]:

$$T_A(t) = 0.5(T_{\max} + T_{\min}) + 0.5(T_{\max} - T_{\min})\sin[(t-9) \cdot \pi/12] \quad (5)$$

式中, T_{\max} 为当天最高温度; T_{\min} 为当天最低温度; t 为时刻数。

根据监测资料^[5] 选出冬、夏各一天的气温数据来分析无字碑在冬、夏两个极端季节温度场分布规律。其中冬季某天最高气温 15.2°C , 最低气温 -5.9°C ; 夏季某天最高气温 37.6°C , 最低气温 25.4°C , 计算结果代表无字碑当天温度场, 天气状况均选择晴空无云的理想天气, 热传输系统中主要涉及的热工参数见表 1。

表 1 温度场计算所需参数表

Table 1 Parameters for calculation of temperature field

材料	热传导率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	表面发射率(黑度)	太阳辐射吸收率	对流换热表面传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
石灰岩	2.15	0.95	0.70	—
灰砖	0.69	0.93	0.65	16
土	1.20	—	—	—

3 计算结果分析

基于 Comsol Multiphysics 软件对无字碑在冬、夏两季各一天的温度场进行计算, 为了考察无字碑温度场的变化规律, 在无字碑距地面高 1.5m 、 3.5m 、 5.5m 处各取一水平截面代表无字碑的上部、

中部和底部, 在 3.5m 截面上选取 2 条测线 4 个观测点进行分析, 截面位置、测线及观测点位置分布图如图 2 所示。

3.1 无字碑内部温度场分布规律

图 3 是所选 3 个截面处的温度场在夏季和冬季两个温度较高时刻的分布图, 从图中可以看出: 夏季

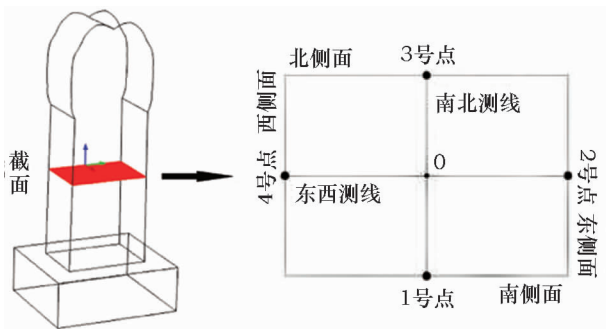


图2 3.5m 截面及观测点分布位置

Fig. 2 Section and observation point distribution to 3.5 m

和冬季无字碑碑体外表面温度均高于内部温度,表面温度与中心处温度相差较大,越靠近无字碑底部,温度分布越不均匀。由于太阳照射方向的变化导致

夏季和冬季同水平面的高温区域分布不同,但低温区域夏季和冬季基本一致,主要集中在无字碑碑体中心处。

图4 是以0点为中心,两条测线在冬季和夏季不同时刻的温度变化图,从图中可以看出:温度由表面至内部变化基本呈抛物线型,越靠近表面温度变化速率越快。根据传热学基本原理分析:绝大多数的非透明物体,接受和发射热辐射能量只发生在表面以内很浅的距离,辐射是一种表面物理过程。无字碑在受到太阳照射后表面温度迅速升高,然后以固体传热的方式将温度传给内部温度低的区域。由于无字碑传热性能较差,所以无字碑同时刻在同一水平面内产生了巨大温差,夏季最大温差可达 20.9℃,冬季最大温差可达 25.9℃。

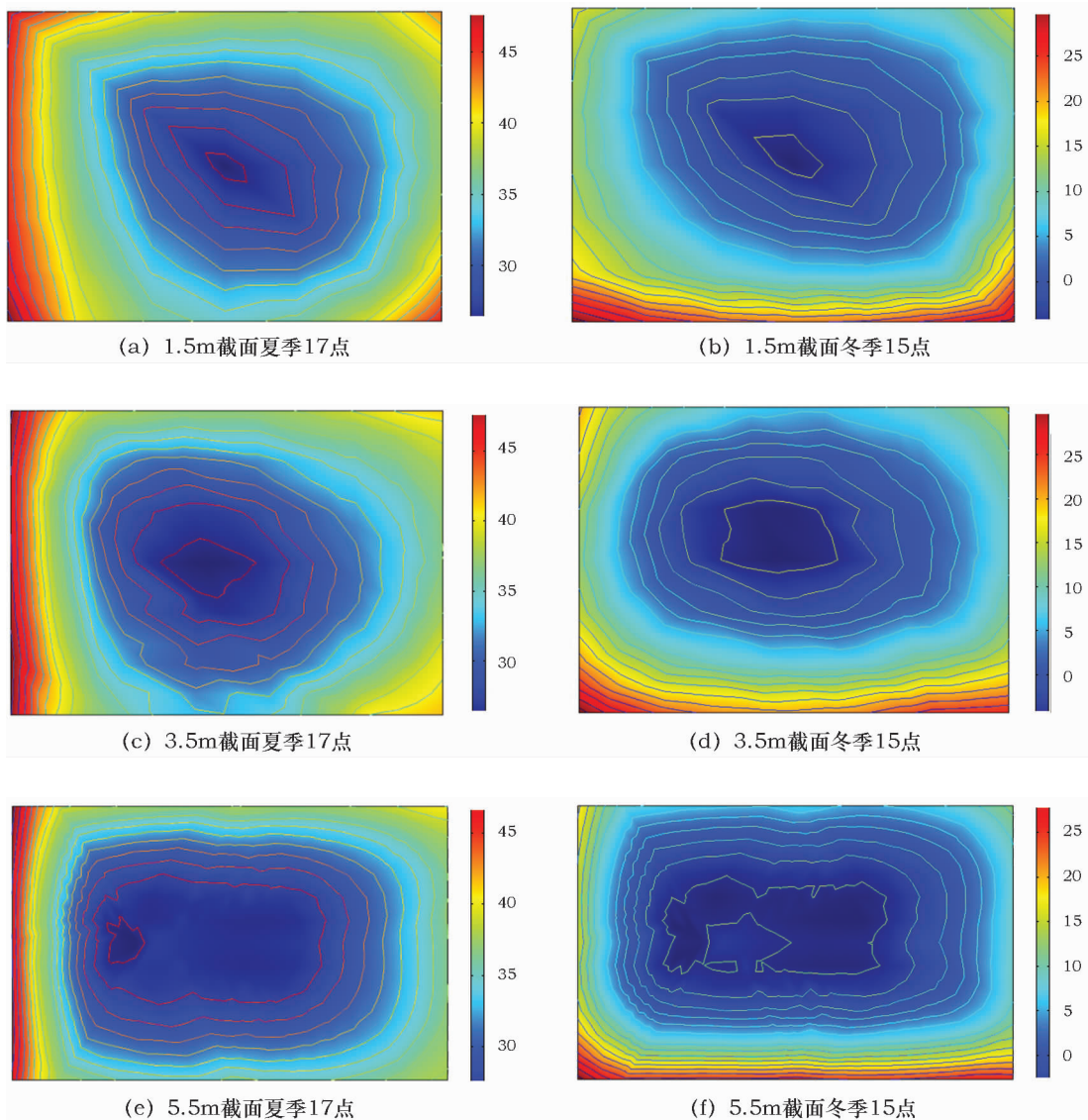


图3 截面温度场分布

Fig. 3 Temperature field distribution of cross section

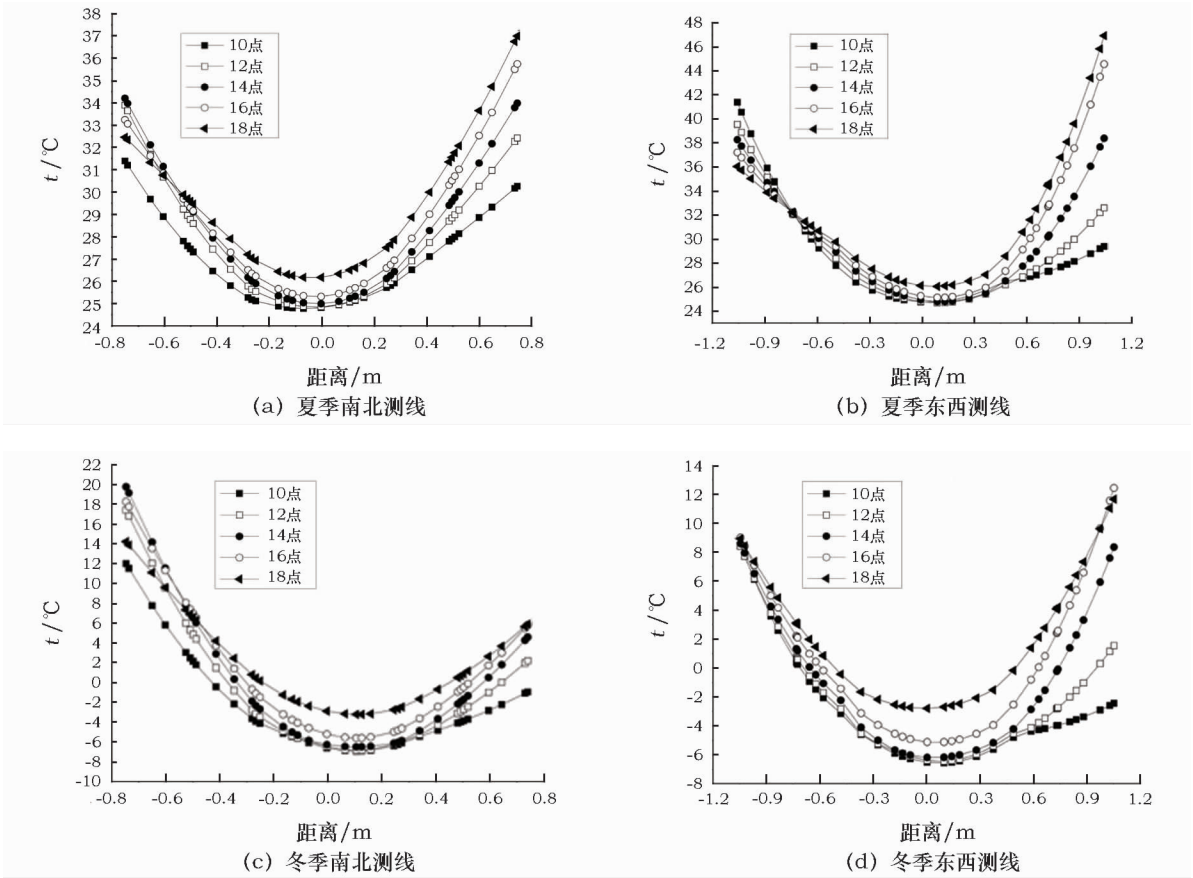


图 4 截面测线不同时刻温度场分布

Fig. 4 Distribution of temperature field at different time of cross section measurement

3.2 夏季无字碑表面温度场分布规律

从图 5 可以看出:夏季无字碑一昼夜的最低温度为 26.4℃,出现在 4:00~5:00 点之间,最高温度为 47.6℃出现在 17:00~18:00 之间;碑面朝向的不同导致接受太阳直射时间、强度不同,无字碑不同表面温度变化规律差异较大;在 5 点多太阳升起后碑体东侧面先受到太阳光直接照射而迅速升温,在 11 点左右达到峰值 42.1℃,随后由于太阳方位角和高度角改变而转为背阳面温度逐渐降低;西侧面在太阳刚升起时属于背阳面,所以温度上升最慢,在 12 点左右太阳转向西侧后其温度急剧上升,并在 18 点左右达到峰值 47.6℃,太阳落山后其温度迅速下降;由于夏季太阳始终没有直接照射南侧面和北侧面的缘故,所以南、北侧面升温比较缓慢,温度峰值分别为 37.2℃和 38.5℃。

通过与环境温度变化曲线对比可以发现:在太阳升起后,向阳面的温度增长速率远快于环境温度增长速率,未被太阳照射到的碑面温度增长速率基本和环境温度增长速率相同,升温时间和峰值出现时间滞后于环境温度。这说明无字碑内部传热性能较差,向阳面并不能及时将温度传给背阳面,背阳面

温度主要随着环境温度的上升而增长,所以向阳面温度与背阳面温度产生了巨大差异。

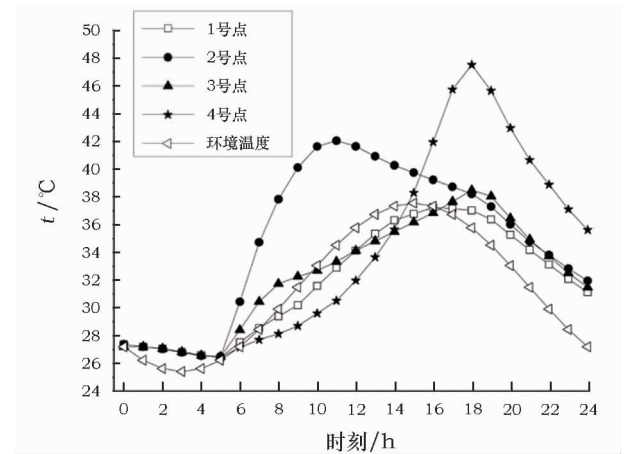


图 5 夏季观测点和环境温度变化趋势

Fig. 5 The trend of observation point and ambient temperature in summer

从图 6 可以看出:夏季 10 点钟时碑体东侧面上部温度最高,由上到下形成了明显的温度梯度。这是因为 10 点时太阳已经位于无字碑斜上方,造成了温度的分布不均。此时碑体的南侧面、北侧面和西

侧面由于未受到太阳光的直接照射,温度分布比较均匀,南、北侧面平均温度略高于西侧面。17 点太阳移至西侧后,西侧面的平均温度远高于其他面,西侧面温度分布不均匀,呈现出上部温度高下部温度低的温度梯度。碑座基本和碑体对应,温度场分布出现相似的规律。

面温度高过北侧面并持续增长。在 16 点到达峰值 14.3℃后匀速下降。

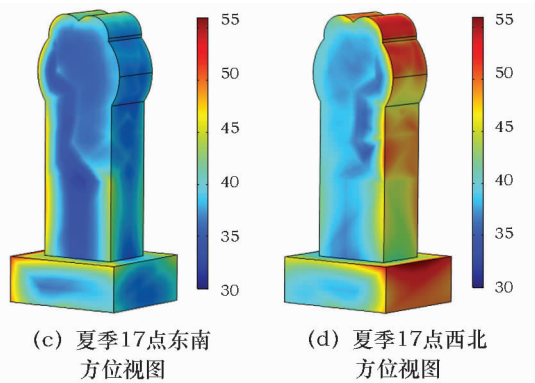
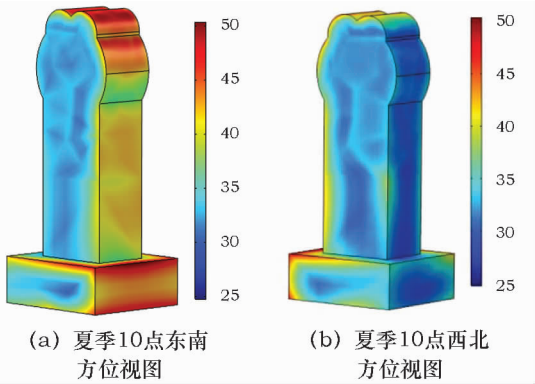


图6 夏季无字碑表面温度场分布

Fig. 6 In the summer of Inscriptionless Stele surface temperature distribution

3.3 冬季无字碑表面温度场分布规律

从图7可以看出:冬季夜晚无字碑整体温度低于0℃,最低温度为-3.9℃,出现在6点左右,最高温度为22.6℃,出现在16点左右,无字碑大部分区域温度在9:00~10:00间从0℃以下变为0℃以上;无字碑各表面温度变化趋势相近,但数值存在较大差异,在6:00~18:00之间,无字碑北侧面、东侧面和西侧面温度一直低于环境温度。这是由于这三个面在这段时间内温度上升主要来源于环境温度。在7点多太阳升起后碑体东侧面和南侧面首先受到太阳光直接照射迅速升温,增温速率也大致相同。随后由于太阳方位角和高度角变化的缘故,东侧面温度在11点左右达到峰值10.8℃。随后持续了一段时间后缓慢降低,而南侧面温度持续快速增长。在16点左右达到峰值22.6℃后快速下降;北侧面起初增温速度略快于西侧面。在中午1点钟过后,西侧

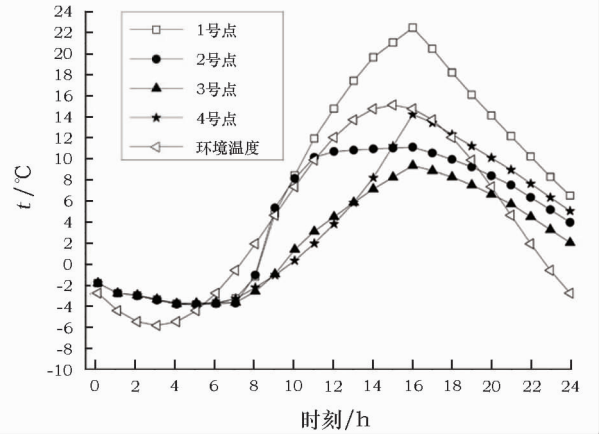


图7 冬季观测点和环境温度变化趋势

Fig. 7 Trend of observation point and ambient temperature in winter

从图8可以看出:冬季上午10点太阳直接照射在无字碑的东侧面和南侧面。由于太阳方位角的原因,碑体东侧面温度分布为上高下低,南侧面温度梯度不明显。10点时碑体局部温度仍然低于0℃,东、南侧面平均温度明显高于西、北侧面。15点太阳直

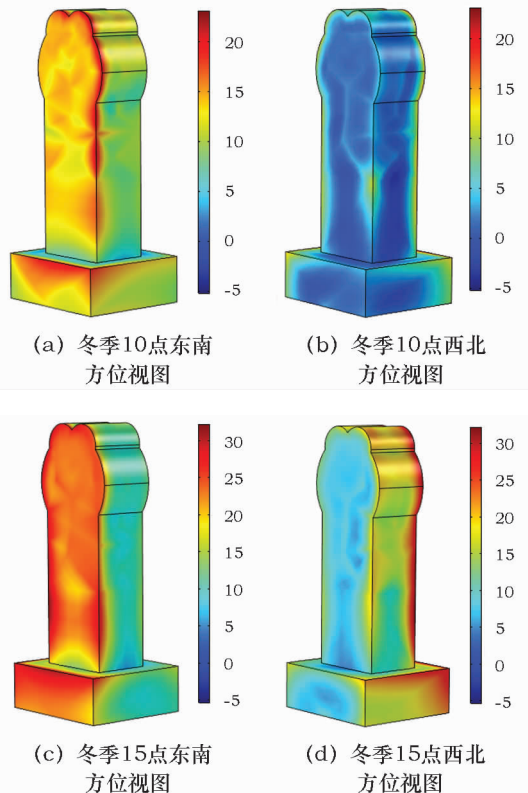


图8 冬季无字碑表面温度场分布

Fig. 8 In the winter of Inscriptionless Stele surface temperature distribution

接照射在碑体南侧面和西侧面上,东侧面已经降温与北侧面温度比较接近,西侧面温度分布呈现出上高下低的温度梯度,南侧面温度分布沿水平方向也出现西部温度略高于东部温度的温度梯度。碑座温度分布与对应碑体趋同。

3.4 无字碑温度场分布对风化的影响

上述温度场分布规律表明无字碑4个表面温度分布差异较大,夏季无字碑最高温度出现在西表面且持续较长时间,冬季无字碑最高温度出现在南表面且持续较长时间,相邻表面产生的较大温差会产生温度应力,并且无字碑下部较上部温度分布更不均匀。

现场观测的结果与理论分析的结论基本吻合:无字碑碑体与碑座相连的四个角和碑棱底部均有部分碑体剥落,温差大的西北角和西南角碑体表面剥落最为严重;同一表面的碑体很少发现剥落现象,碑体剥落主要发生在面与面交界的棱上。综上所述,温度是影响无字碑表面风化的重要因素之一。

4 结论

1) 无字碑的最低温度出现在在太阳升起前1个小时左右。冬季无字碑最低温出现在6点左右,数值为 -3.9°C ,最高温出现在16点左右,数值为 22.6°C 。夏季最低温出现在5点左右,数值为 26.4°C ,最高温出现在18点左右数值为 47.6°C 。

2) 太阳辐射是无字碑在白天温度分布变化的主要因素。无字碑在白天的温度分布极不均匀,沿水平方向和竖直方向均出现温度梯度,无字碑的4个表面升温 and 降温速率也大不相同,尤其向阳面和背阳面差异巨大。

3) 无字碑同时刻在同一水平面内温差较大,高达 20°C 以上。无字碑温度由表面到内部的变化趋势呈抛物线型,越靠近石刻中心处日温度变化量越小。

参考文献:

- [1] 马涛,孙渊,Simon S. 乾陵石刻内部裂隙的超声波探测研究[J]. 文物保护与考古科学,2002,14(2):9-20.
MA Tao, SUN Yuan, Simon S. Research on ultrasonic detections for inner cracks of Qianling sculptures[J]. Sciences of Conservation Archaeology,2002,14(2):9-20.
- [2] 杨军昌,甄广全. 乾陵石刻保存状况及保护处理建议[J]. 文博,1998(4):91-96.
YANG Jun-chang, ZHEN Guang-quan. Qian-ling stone sculptures preservation condition and protection suggestions[J]. Relics and Museology,1998(4):91-96.
- [3] 马涛. 乾陵风化石刻物理及水理学性质研究[J]. 文博,1998(2):87-90,81.
MA Tao. Qianling stone sculptures weathering and water physical properties of science[J]. Relics and Museology,1998(2):87-90,81.
- [4] 甄刚,秦立科,马宏林. 乾陵无字碑裂隙分布情况调查及其稳定性分析[J]. 文博,2015(1):94-98.
ZHEN Gang, QIN Li-ke, MA Hong-lin. Qianling stele crack distribution Investigation and stability analysis[J]. Relics and Museology,2015(1):94-98.
- [5] 阎敏. 小气候环境因素对乾陵石刻风化的影响研究[J]. 文博,2011(4):82-85.
YAN Min. Study on microclimate effects of environmental factors on Qianling stone sculptures weathering[J]. Relics and Museology,2011(4):82-85.
- [6] 孙博,周仲华,张虎元,等. 夯土建筑遗址表面温度变化特征及预报模型[J]. 岩土力学,2011(3):867-871.
SUN Bo, ZHOU Zhong-hua, ZHANG Hu-yuan, et al. Characteristics and prediction model of surface temperature for rammed earthen architecture ruins[J]. Rock and Soil Mechanics,2011(3):867-871.
- [7] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
ZHAO Zhen-nan. Heat transfer theory[M]. Beijing:Higher Education Press,2002.
- [8] Saetta A, Scotta R, Vitaliani R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads[J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(3):446-457.
- [9] 贾璐,孙立军,黄立葵,等. 沥青路面温度场数值预估模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007(8):1039-1043.
JIA Lu, SUN Li-jun, HUANG Li-kui, et al. A numerical temperature prediction model for asphalt concrete pavement[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2007(8):1039-1043.
- [10] 马涛,易学发,杨军昌,等. 陕西乾陵地理-地质环境条件与病害的初步勘察与研究[J]. 西北地质,1994(4):13-15.
MA Tao, YI Xue-fa, YANG Jun-chang, et al. Shaanxi Qianling geography-preliminary exploration and research on geological environment conditions and diseases[J]. Northwestern Geology,1994(4):13-15.
- [11] 杨钟堂. 陕西乾陵石刻材料溯源[J]. 西北地质,1998(2):70-75.
YANG Zhong-tang. Shaanxi Qianling stone sculptures material trace-Ability[J]. Northwestern Geology,1998(2):70-75.
- [12] 王铁行,刘明振,鲁洁. 黄土路基温度场数值分析[J]. 路基工程,2008(3):1-3.
WANG Tie-hang, LIU Ming-zhen, LU Jie. Numerical analysis of temperature field of loess subgrade[J]. Subgrade Engineering,2008(3):1-3.
- [13] 付春雨. 混凝土梁桥的温度场与温度应力研究[D]. 四川:西南交通大学,2006.
FU Chun-yu. The study of temperature field and thermal stress for concrete girder Bridges[D]. Sichuan:Southwest Jiaotong University,2006.

Study on the temperature field distribution pattern of the Inscriptionless Stele of Qianling Mausoleum

REN Xing^{1,2}, QIN Li-ke^{1,2}, ZHEN Gang^{2,3}, MA Hong-lin^{2,3}, WANG Pan^{1,2}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Scientific Research Base of Conservation on Stone and Brick Materials (Shaanxi Provincial Institute of Cultural Relics Protection), State Administration for Cultural Heritage, Xi'an 710075, China;

3. Ministry of Cultural Relics Restoration, Shaanxi Provincial Institute for Conservation of Cultural Property, Shaanxi 710075, China)

Abstract: Due to long exposure to nature, the Inscriptionless Stele of the Qianling Mausoleum has been suffering from serious weathering on its surface. Temperature is one of the main factors affecting it. In order to explore the distribution regularity of the Inscriptionless Stele temperature field, we constructed a 3D analytical model of the Inscriptionless Stele based on fundamental principles of heat transfer theory and then calculated its temperature distribution under solar radiation by using Comsol Multiphysics simulation software. The results show that the temperature variation tendency of the Inscriptionless Stele from the surface to the inside manifests itself as a parabola. The closer to the center of the Inscriptionless Stele, the smaller the daily temperature variation. Depending on sun's azimuth and elevation angles, the temperature distribution on the four surfaces of the Inscriptionless Stele is extremely uneven. A temperature gradient occurs both horizontally and vertically. The results of this study can provide effective scientific evidence for the protection of the Inscriptionless Stele.

Key words: Inscriptionless stele; Temperature field; Solar radiation; Distribution

(责任编辑 谢 燕)