

· 研究报告 ·

# 汉阳陵遗址文物保存风幕隔离及富氮低氧环境数值模拟研究

孟祥兆, 路 昭, 金立文, 罗昔联, 顾兆林

(西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

**摘要:** 汉阳陵帝陵从葬坑遗址保护展示厅常年的高湿度环境(空气相对湿度为  $95\% \pm 5\%$ ) 容易使遗址文物发生霉变等病害。为此本研究以从葬坑遗址保护展示厅 15 号坑为研究对象, 根据基本假设, 建立了从葬坑文物保存区域空气流动的二维数学模型, 并采用标准  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型和 SIMPLE 算法进行了数值计算。研究了风幕送风速度和送风仰角对风幕隔离性能的影响, 并确定了 15 号坑适宜的送风速度为  $1.5\text{m/s}$ 、送风仰角为  $10^\circ$ 。研究结果对高湿环境下如何营造风幕隔离及富氮低氧环境提供了依据, 对坑式遗址文物保护具有重要意义。

**关键词:** 汉阳陵帝陵从葬坑; 风幕隔离; 富氮低氧环境; 数值模拟

**中图分类号:** K854.3      **文献标识码:** A

## 0 引言

汉阳陵是汉景帝刘启与其皇后王氏的合葬陵园, 建于公元前 153 年, 并于公元 2001 年成为国家第五批重点文物保护单位。汉阳陵博物馆是中国占地面积最大的博物馆, 大约占地  $20\text{km}^2$ , 其中地下陵墓主要由主葬坑和 81 个从葬坑组成(东侧 21 座、南侧 19 座、西侧 20 座、北侧 21 座)。1998~1999 年, 陕西省考古研究所对东边的 12~21 号从葬坑进行了保护性挖掘, 并于 2006 年建成汉阳陵帝陵从葬坑遗址保护展示厅。汉阳陵地下博物馆采用了一种全新的保护理念, 在建筑设计上将展示厅全部埋于地下, 同时在建筑顶部覆盖草皮植物, 完好地恢复了陵园原有的历史和自然风貌。为了更好地保护遗址文物, 展示厅采用了特种玻璃将遗址环境和游人参观环境隔离开来, 有效地防止了参观人员带来的  $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、VOCs 及尘土等有害物质对遗址文物造成的损害。同时特种玻璃上采用电加热的方式防止结露和调节、稳定环境温度, 展厅内全年空气温度为  $18^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , 温度日变化幅度小于  $1^\circ\text{C}$ 。实体墙面采用粗陶粒蓄水砖, 可以自

动吸收土壤自然蒸发的水分, 以调节和稳定展厅内的相对湿度, 展厅内全年空气相对湿度为  $95\% \pm 5\%$ , 相对湿度日变化幅度小于  $3\%$ 。为消除紫外辐射可能对遗址文物造成的损害, 展厅内照明均采用光纤和 LED 等先进光源<sup>[1-3]</sup>。根据上文分析得知, 汉阳陵帝陵从葬坑遗址保护展示厅采用新型的保护方式能有效缓解温湿度波动、紫外辐射和污染物对遗址文物的影响。然而, 相关研究表明博物馆内较高的空气相对湿度对文物具有一定的损害作用, 如高湿度条件下 ( $70\% \sim 100\%$ ), 各种微生物会大量繁殖。文物很容易发生霉变以及文物表面的颜料中含有的动植物胶是微生物生长代谢的营养源, 而代谢产生的有机酸可以与含铜或钙的颜料反应, 从而加速胶结材料的老化, 最终导致文物表面颜料层强度降低、脱落<sup>[4-7]</sup>。目前, 关于高湿环境下如何防止微生物对文物影响的研究尚未报道。本研究正是基于此, 提出以汉阳陵帝陵从葬坑遗址保护展示厅为研究对象, 通过数值模拟方法研究风幕隔离及富氮低氧环境在高湿环境下保护遗址文物的可行性。

收稿日期: 2014-05-30; 修回日期: 2014-07-20

基金项目: 国家科技支撑项目资助(2012BKA14B01)

作者简介: 孟祥兆(1975—), 男, 博士, 2006年毕业于西安交通大学人居学院, 副教授。710049, E-mail: xzmeng@mail.xjtu.edu.cn

通讯作者: 罗昔联 E-mail: xlluo@mail.xjtu.edu.cn

## 1 风幕隔离及富氮低氧环境控制系统概述

目前,富氮低氧环境主要用于粮食储存方面,即在仓房满足气密性条件下,将压缩的空气经过滤器送入制氮装置,运用先进的膜分离技术,把氮气从空气组分中分离出来送入粮仓,使粮仓长期处于低氧或贫氧状态(氧气浓度低于5%),达到杀虫、抑制霉菌繁殖、控制粮食呼吸,确保粮食安全储存的目的<sup>[8-10]</sup>。如图1、图2所示,遗址文物均处于从葬坑遗址保护展示厅底部,因此本研究拟采用风幕隔离技术将展示厅分为从葬坑文物保存区域(展厅下部区域)和展厅上部区域。并且在从葬坑文物保存区域营造富氮低氧环境,以防止高湿环境下微生物及其产物对遗址文物的影响。风幕隔离及富氮低氧环境控制系统如图3所示。其中空气处理模块、制氮装置均置于室外设备间内,并通过管道实现送回风和释放富氮气流。



图1 汉阳陵帝陵从葬坑保护厅

Fig.1 The protective hall for burial pits of Han Yang Ling Mausoleum

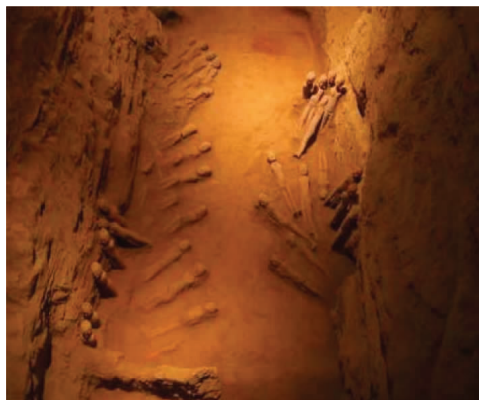


图2 汉阳陵帝陵从葬坑遗址文物保存示意图

Fig.2 The schematic diagram of burial pits relics protection for Han Yang Ling Mausoleum

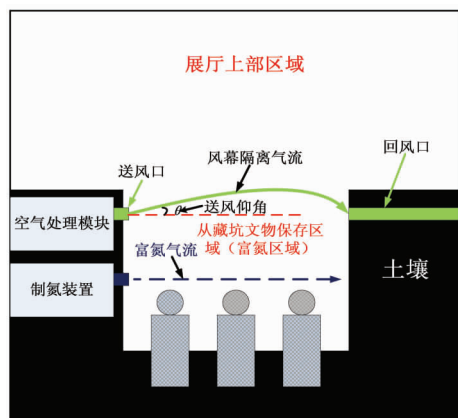


图3 风幕隔离及富氮低氧环境控制系统示意图

Fig.3 The schematic diagram of control system for air curtain isolation and high nitrogen-low oxygen environment

## 2 汉阳陵帝陵从葬坑的数学模型

### 2.1 模型的简化与假设

1) 本研究选取展示厅中的15号坑为研究对象,其中展示厅尺寸取22.9m(长)×6.8m(宽)×4.5m(高),葬坑尺寸取19.4m(长)×2.8m(宽)×3.0m(高)。即15号坑的长度远大于宽度,从而可以将复杂的三维流动问题简化为二维流动;

2) 将空气和富氮气体视为理想不可压缩流体;

3) 内部气流为自然对流、强迫对流都存在混合对流流动;

4) 采用 boussinesq 假设,忽略粘性耗散,假设除密度以外的其他物性参数为常数,密度变化只考虑动量方程中与体积力有关的项;

5) 流体沿固体表面流动时无滑移,采用标准  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型进行计算,近壁面区域采用壁面函数法处理。

### 2.2 控制方程

模型的通用控制方程可表示成如下形式<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi}$$

式中,  $\phi$ —通用变量,分别表示动量方程中的速度  $u, v, w$ , 能量方程中的温度  $T$ , 湍流动能方程中的湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$ , 组分运输方程中污染物的平均浓度  $c$ ;  $\partial(\rho\phi)/\partial(t)$ —表示非稳态项;  $\text{div}(\rho U\phi)$ —表示对流项;  $\text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi)$ —表示扩散项;  $S_{\phi}$ —表示源项。

### 2.3 边界条件

本研究借鉴卧式陈列柜边界处理方法,采

用扩大区域进行计算,即将计算区域扩大至从葬坑上方一定区域,计算边界条件包括以下几部分:

1) 扩大区域与环境接触边界。认为在扩展后的表面上射流区的影响可以忽略不计,本研究将展示厅的外边界(22.9m(长)×6.8m(宽)×4.5m(高)作为扩展后的区域边界,按此边界对控制方程进行求解;

2) 扩展后的区域边界条件。扩展后的区域边界为展示厅的屋顶和加热玻璃,由于屋顶为钢筋混凝土结构加保温层组成,因此可认为屋顶为绝热边界,而加热玻璃温度常年基本稳定在26℃;

3) 从葬坑底部、侧壁边界条件。由于从葬坑底部、侧壁均为原生的土壤环境,经对15号坑现场实测取其为18℃;

4) 风幕入口边界条件。本研究采用速度入口边界条件,送风速度分别取1.0m/s、1.5m/s、2.0m/s;送风仰角分别取0°、10°;送风温度 $t$ :18℃(采用与文物保存土壤相同的温度);湍动能 $k$ : $k = (I \times u)^2$ , $I = 0.1$ ;耗散率 $\varepsilon$ : $\varepsilon = C_\mu^{4/3} \cdot k^{3/2} / l$ , $l = 0.1$ ;

5) 富氮气体入口边界条件。本研究采用质量进口边界条件(mass-flow-inlet),释放强度为 $6 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ ;

6) 出口边界。本研究采用自由流出边界条件(outflow)。

## 2.4 计算区域

本研究选取展示厅中的15号坑作为研究对象,根据上文将从葬坑简化为二维模型,尺寸为2.8m(宽)×3.0m(高)、扩展区域尺寸为6.8m(宽)×4.5m(高),空气送回风口缝隙高度分别取0.1m、0.2m,富氮气流出口高度取0.1m。同时根据工程实际经验,本研究将气流回风口的位置与从葬坑侧壁错开,从而提高风幕的隔离效果,确保文物保存区域的富氮低氧环境。计算区域如图4所示。

## 3 风幕隔离及富氮低氧环境数值模拟结果与分析

本研究主要研究不同送风速度 $v$ 、送风仰角 $\theta$ 对风幕隔离性能的影响,通过分析水平方向上距扩展区域左边界 $x = 2.7\text{m}$ 、 $3.4\text{m}$ 、 $4.1\text{m}$ 处(文物保存区域四等分的位置)垂直方向的氮气浓度分布评价风幕的隔离效果,从而确定最佳的送风速度、送风仰角。

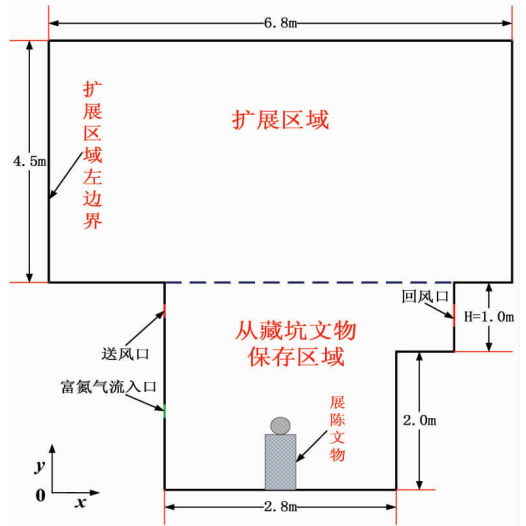


图4 计算区域示意图

Fig. 4 The schematic diagram of computational domain

### 3.1 不同送风速度和送风仰角对风幕隔离性能的影响

图5(a)、5(b)分别为送风速度1.0m/s,水平送风和送风仰角为10°时, $x = 2.7\text{m}$ 、 $3.4\text{m}$ 、 $4.1\text{m}$ 处氮气浓度的垂直分布。由图5(a)可得, $x = 2.7\text{m}$ 、 $3.4\text{m}$ 处氮气浓度沿高度方向急剧下降,分析原因是送风速度过小,射流在出口处由于重力作用明显下沉,从而导致射流与富氮气体大量掺混,最后在射流的诱导下,富氮气体大量流向回风口。而 $x = 4.1\text{m}$ 处,氮气浓度在高度方向 $y = 1.5\text{m} \sim 3.0\text{m}$ 急剧变化,主要是由于富氮气流在射流的作用下不断流向回风口,导致回风口处沿高度方向氮气浓度不断增大(1.5m~2.5m),而回风口上部空间氮气浓度沿高度方向急剧下降。由图5(b)可得,较水平送风而言,当送风仰角 $\theta = 10^\circ$ 时从藏坑文物保存区域氮气浓度较高且氮气浓度场较均匀。其中 $x = 3.4\text{m}$ 、 $4.1\text{m}$ 处,氮气浓度沿高度方向变化趋势一致,均在高度方向 $y = 2.5\text{m} \sim 2.7\text{m}$ 处急剧下降,且在该高度范围以下氮气浓度基本保持稳定状态。而 $x = 2.7\text{m}$ 处,氮气浓度在高度方向 $y = 1.5\text{m} \sim 1.7\text{m}$ 处急剧下降。分析原因是当送风速度为1.0m/s,送风仰角可减缓射流快速下沉,从而可以有效避免射流核心区与富氮气流大量掺混。但由于送风速度小,并没有形成完整的风幕,从而导致空气流对富氮气体有一定的影响。

图6(a)、6(b)分别为送风速度1.0m/s,水平送风和送风仰角为10°时,计算区域的流场分布云图。

由图6可得,送风仰角为10°时,有利于形成隔离风幕,缓解射流快速下沉。

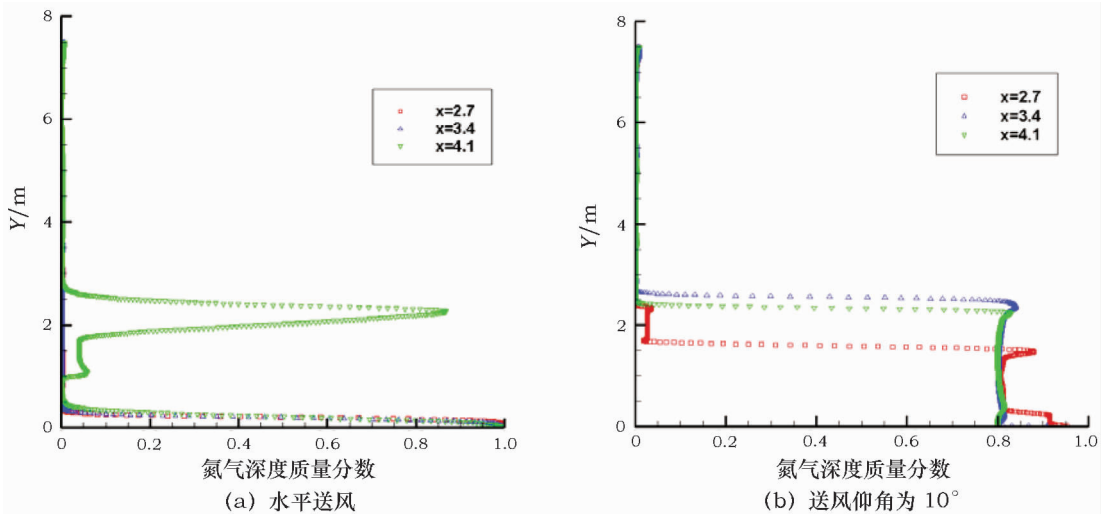


图 5 送风速度为 1.0m/s 时的浓度场

Fig. 5 Concentration fields of  $v = 1.0\text{m/s}$  in (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 10^\circ$

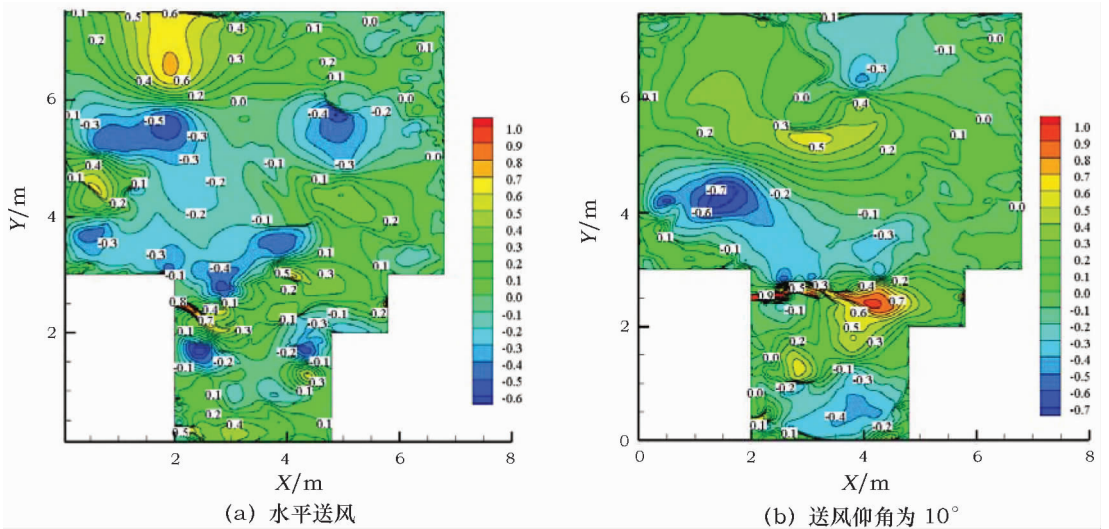


图 6 送风速度为 1.0m/s 时的速度场

Fig. 6 Velocity fields of  $v = 1.0\text{m/s}$  in (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 10^\circ$

图 7(a)、7(b)分别为送风速度 1.5m/s,水平送风和送风仰角为  $10^\circ$  时,  $x = 2.7\text{m}$ 、 $3.4\text{m}$ 、 $4.1\text{m}$  处氮气浓度的垂直分布。与图 5 相比较而言,当送风速度为 1.5m/s 时,从葬坑文物保存区域氮气浓度场整体分布较优。同时较水平送风而言,送风仰角为  $10^\circ$  时从葬坑文物保存区域氮气浓度较高且氮气浓度场较均匀。分析原因是当送风速度为 1.5m/s 时,可以形成完整的风幕。较水平送风而言,送风仰角为  $10^\circ$  时射流形成的空气幕整体抬升,并且在外形上呈现弯月状,从而可以有效避免射流核心区域与富氮气流掺混。

图 8(a)、8(b)分别为送风速度 2.0m/s,水平送

风和送风仰角为  $10^\circ$  时,  $x = 2.7\text{m}$ 、 $3.4\text{m}$ 、 $4.1\text{m}$  处氮气浓度的垂直分布。由图 8 可得,当送风速度为 2.0m/s,水平送风和送风仰角为  $10^\circ$  时,文物保存区域氮气浓度场基本一致。其中在高度方向  $y = 2.5\text{m} \sim 3.0\text{m}$  处氮气浓度急剧下降,且在该高度范围以下氮气浓度基本保持稳定状态,但文物保存区域整体浓度偏低(相对送风速度为 1.5m/s)。分析原因是当送风速度为 2.0m/s 时,可以形成完整的风幕,但送风速度增大导致射流湍流强度变大,导致空气流与富氮气体掺混,同时在射流核心区的诱导下富氮气体不断流向回风口,最终造成从葬坑文物保存区域氮气浓度偏低(相对送风速度为 1.5m/s)。



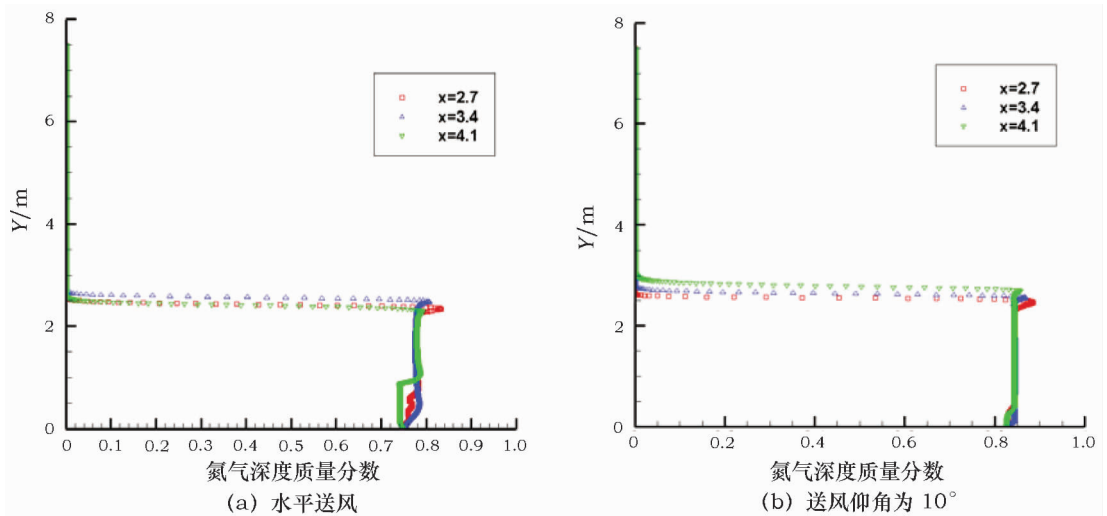


图 7 送风速度为 1.5m/s 时的浓度场

Fig. 7 Concentration fields of  $v = 1.5\text{m/s}$  in (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 10^\circ$

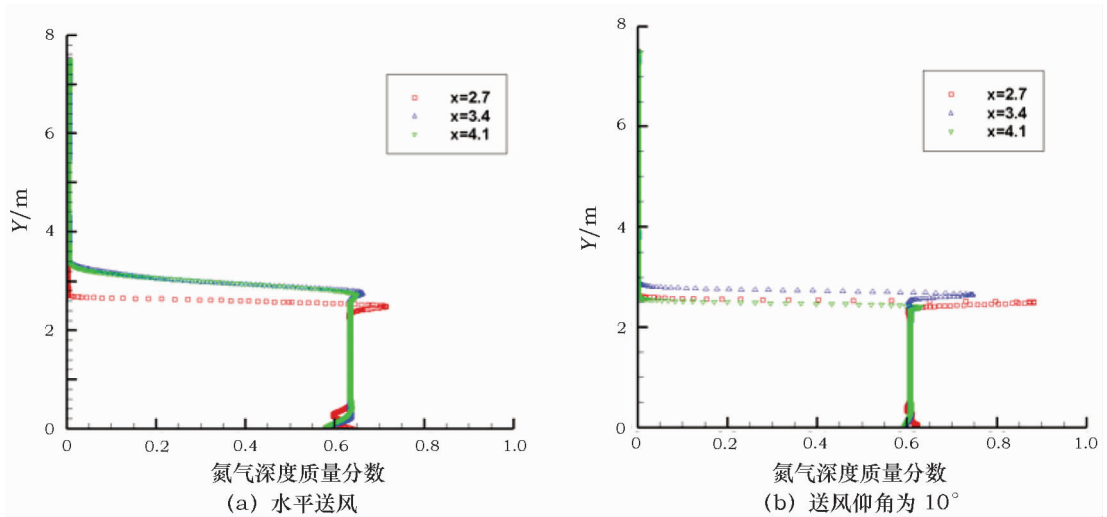


图 8 送风速度为 2.0m/s 时的浓度场

Fig. 8 Concentration fields of  $v = 2.0\text{m/s}$  in (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 10^\circ$

### 3.2 最佳送风参数条件下风幕隔离系统能耗

根据上文可得,当送风速度为 1.5m/s、送风仰角为 10°时,风幕系统的隔离性能最佳,即从葬坑文物保存区域的氮气浓度最高,氮气浓度场最均匀。

风幕隔离系统能耗主要包括输送空气所消耗的能耗和处理空气所消耗的能耗。本研究主要考虑处理空气所消耗的能耗,忽略空气的湿负荷,即仅考虑风幕隔离系统运行所需要的冷负荷  $Q$ ,其计算公式如下:

$$Q = MC_p(T_{out} - T_{in})$$

式中, $M$ —送风量,kg/s。其中  $M = \rho L b v$ , $\rho L b v$  分别表示空气密度、葬坑长度、送风口宽度以及送风速度,取  $1.2\text{kg/m}^3$ 、 $19.4\text{m}$ 、 $0.1\text{m}$ 、 $1.5\text{m/s}$ ;

$C_p$ —空气的定压比热容,kJ/(kg·K)。取  $C_p = 1.005\text{kJ/(kg·K)}$ ;

$T_{in}$ —风幕隔离系统空气流的送风温度,K。取  $T_{in} = 291\text{K}$ ;

$T_{out}$ —风幕隔离系统空气流的回风温度,K。本研究通过数值模拟结果对回风口空气温度加权平均后计算,其值为  $T_{out} = 291.42\text{K}$ 。

因此风幕隔离系统运行所消耗的冷负荷  $Q$  为:  
 $Q = 1.2 \times 19.4 \times 0.1 \times 1.5 \times 1.005 \times (291.42 - 291) = 1.47\text{kW}$

根据计算结果可得,虽然从葬坑遗址文物保存空间较大( $19.4\text{m} \times 2.8\text{m} \times 3.0\text{m}$ ),但风幕隔离系统所需要的制冷量较小,即风幕隔离系统的经济性较优。

## 4 结 论

本研究以汉阳陵帝陵从葬坑遗址保护展示厅 15 号坑为研究对象,采用标准  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型,建立展示厅 15 号坑的二维数学模型,采用结构化网格对计算区域离散化、一阶迎风格式对控制方程进行离散化处理、SIMPLE 算法对离散方程进行求解。本研究主要研究不同送风速度和送风仰角对风幕隔离性能的影响,其计算结果表明:

- 1) 风幕隔离方式能有效营造富氮低氧的文物保存环境;
- 2) 展示厅 15 号坑风幕隔离系统需要的最佳送风速度为  $1.5\text{m/s}$ 、送风仰角为  $10^\circ$ ;
- 3) 尽管从葬坑遗址文物保存空间较大 ( $19.4\text{m} \times 2.8\text{m} \times 3.0\text{m}$ ),但风幕隔离系统所需要的制冷量较小,即风幕隔离系统的经济性较优,具有一定的实用价值。

## 参考文献:

- [1] 刘克成,肖 莉. 汉阳陵帝陵外藏坑保护展示厅[J]. 建筑学报, 2006, (7): 68-70.  
LIU Ke - cheng, XIAO Li. The protective exhibition hall for the outer burial pits of Han Yang Ling Mausoleum [J]. Archit J, 2006, (7): 68-70.
- [2] 吴晓丛,王保平,李 库. 全新的地下遗址博物馆——西汉阳陵帝陵外藏坑保护展示厅[J]. 中国文化遗产, 2006, (2): 80-83.  
WU Xiao - cong, WANG Bao - pin, LI Ku. The new underground site museum—the protective exhibition hall for the outer burial pits of Han Yang Ling Mausoleum [J]. China Cult herit, 2006, (2): 80-83.
- [3] 辛 友. 汉阳陵地下遗址博物馆[J]. 收藏界, 2006, (5): 110.  
XIN You. The underground site museum of Han Yang Ling Mausoleum [J]. Collect World, 2006, (5): 110.
- [4] 陈元生,解玉林. 博物馆文物保存环境质量标准研究[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(增刊): 152-191.  
CHEN Yuan - sheng, XIE Yu - lin. Studies on museum environmental standards [J]. Sci Conserv Archaeol, 2002, 14(suppl): 152-191.
- [5] 刘建波,陈新征. 文物保管环境对文物保存的影响及控制[J]. 网络财富, 2008, (6): 154-155.  
LIU Jian - bo, CHEN Xin - zheng. The influence and control of museum environment for cultural heritage conservation [J]. Internet Fortune, 2008, (6): 154-155.
- [6] 郭 宏,黄槐武. 文物保护中的“水害”问题[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(1): 56-62.  
GUO Hong, HUANG Huai - wu. The problem of water damage faced in the conservation of antiquities [J]. Sci Conserv Archaeol, 2002, 14(1): 56-62.
- [7] 马 涛,马宏林. 陕西遗址、陵墓博物馆文物保存环境研究[J]. 陕西环境, 2003, 10(5): 10-13.  
MA Tao, MA Hong - lin. Studies on the cultural heritage conservation environment for Shaanxi sites and tombs museum [J]. Shaanxi Envir, 2003, 10(5): 10-13.
- [8] 莫 敏,卢佐昌,王 广,等. 富氮低氧储粮防虫试验[J]. 粮油仓储科技通讯, 2010, (5): 32-34  
MO Min, LU Zuo - chang, WANG Guang, et al. Test on pest control of paddy stored with high nitrogen and low oxygen [J]. Sci Tech Comm Grain Oil Stor, 2010, (5): 32-34.
- [9] 吴卫平,乐炳红,焦林海,等. 富氮低氧储存稻谷品质变化试验[J]. 粮食储藏, 2013, 42(1): 30-33.  
WU Wei - ping, LE Bing - hong, JING Lin - hai, et al. Test on quality change of paddy stored with high nitrogen and low oxygen [J]. Grain Stor, 2013, 42(1): 30-33.
- [10] 李 森. 富氮低氧储粮系统的研发及应用[J]. 粮食加工, 2011, 36(6): 69-72.  
LI Sen. Development and application of grain storage systems with high nitrogen and low oxygen [J]. Grain Proc, 2011, 36(6): 69-72.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.  
TAO Wen - quan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.

## Digital simulation of air curtain isolation and a high nitrogen – low oxygen environment for conservation of relics unearthed at the Han Yang Ling Mausoleum

MENG Xiang – Zhao, LU Zhao, JIN Li – wen, LUO Xi – lian, GU Zhao – lin

(School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Unearthed relics easily grow mildew at exhibition sites due to extremely high relative humidity. At the Han Yang Ling Mausoleum, located at Xi'an, China, the relative humidity is around  $95\% \pm 5\%$  perpetually. The environmental conditions of the 15th burial pit at the Han Yang Ling Mausoleum were investigated digitally and a two – dimensional mathematical model of the conservation area of the burial pits relics was established according to certain hypotheses. Air curtain technology was used to isolate the relics from the viewing area. Based on this model, a digital computation was carried out using a standard  $k - \varepsilon$  turbulence model and the SIMPLE algorithm. In this investigation, the influence of the inlet velocity and elevation angle to the air curtain isolation performance was studied. This study shows that the appropriate inlet velocity of the air curtain for the 15th pit is 1.5 m/s with an elevation angle of 10 degrees. This study provides basic guidance for creating air curtain isolation and high nitrogen – low oxygen condition in high relative humidity environments. The method is instructive and meaningful for the protection of pit relics.

**Key words:** The burial pits of Han Yang Ling Mausoleum; Air curtain isolation; High nitrogen – low oxygen environment; Digital simulation

(责任编辑 谢 燕)

· 通 讯 ·

### 《文物保护与考古科学》编辑部搬迁公告

《文物保护与考古科学》编辑部将于2015年9月1日起由上海市长宁区延安西路1357号汇中商务楼搬迁至上海市徐汇区1118号上海博物馆文物保护科技中心。新址从2015年9月1日起正式办公,原址同时停止办公。为方便工作,现公告新址联系方式:地址:上海市徐汇区龙吴路1118号上海博物馆文物保护科技中心

邮编:200231

电话:021 – 54362886

《文物保护与考古科学》编辑部