

# 室外空间喷雾降温的建模与分析

刘 春<sup>1</sup>, 吴辰暘<sup>2</sup>, 张 帆<sup>2</sup>

(1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**近年来, 喷雾降温作为一种新型的降温方式, 降温效果好, 耗电量低, 不产生其他污染物, 是一种高效节能的降温装置, 逐渐受到人们的重视. 然而, 国内外对喷雾降温的数值模拟方面的研究相对较少, 尤其缺乏对喷雾降温下温度与其影响因素的函数关系的研究, 因此喷雾降温方案的设计依然停留在经验阶段, 没有理论依据, 限制了该项技术的进一步推广. 建立温度与时间之间的双折线模型, 通过实验数据与模型的回归分析验证了模型的准确性. 分析了湿度对温度平衡时间和降温速率的影响, 根据实验数据绘制了湿度-温度平衡时间和湿度-降温速率包络曲线, 并利用曲线和建立的温度-时间关系模型给出了喷雾降温设备的降温幅度区间计算方法. 模型可以用于分析时间对喷雾降温效果的影响和预测喷雾设备的降温幅度, 为喷雾降温设备的选择和方案的设计提供理论依据, 进而为推广喷雾降温的应用范围打下理论基础.

**关键词:**喷雾降温; 建模; 温度; 回归分析

**中图分类号:** TU831.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)03-0324-06

喷雾降温作为一种新型的降温方式, 得到了越来越多的应用. 该方法降温效果好, 耗能少, 降温过程中不产生污染, 符合高效节能环保的理念, 具有非常大的推广潜力. 国内外对喷雾降温设备的实际应用、喷雾降温设备的雾化机理和喷雾降温设备喷头的设计和改进等方面做了广泛的研究. 在喷雾降温设备的应用方面, 杨洋等通过对世博轴安装的高压喷雾设备的现场试验研究, 验证了喷雾降温设备在室外广场应用的有效性<sup>[1]</sup>; 李成成等回顾了喷雾降温在国内外室外场所的应用, 对比了西安和上海的气象资料, 指出在中等湿度地区运用喷雾降温会比气候湿润的地区效果更加明显<sup>[2]</sup>. 赵德菱等比较了喷雾降温和其他几种降温方式的降温效果, 证明了喷雾降温应用于温室降温会取得良好的降温效果<sup>[3]</sup>. 朱茂等研究了喷雾降温技术在阳极炉高温烟气降温中的应用, 实现了初期的降温目标, 有效地解决了固定阳极炉高温烟气的降温问题, 并且使烟气得到了有效净化<sup>[4]</sup>. Ferng Yuh-Ming 等应用计算流体动力学方法进行了水雾颗粒大小与灭火效果的研究, 指出当水雾颗粒较小时, 蒸发吸热和隔绝氧气起决定性作用, 此时减小水雾颗粒尺寸降温效果更好. 但是当水雾颗粒尺寸较大时, 水雾的灭火作用主要是由水雾的直接降温作用引起的, 此时水雾颗粒尺寸大些降温效果好<sup>[5]</sup>. Sivanand Somasundaram 等研究了顺序函数法 (sequential function specification method) 对安装在电子设备中的喷雾降温设备冷却效果的改善<sup>[6]</sup>. 喷雾降温系统的雾化机理方面, 曹建明对喷雾设备喷射与雾化的基本理论和各种喷嘴的特点, 包括液体碎裂过程、液滴尺寸分布、液滴尺寸测量、喷嘴及其特点等有详细研究<sup>[7]</sup>. 在改进喷雾降温设备方面, 黄晓庆等研究了撞击性雾化喷嘴流量与喷雾压力的关系, 并且比较了不同类型喷嘴组合的喷雾降温效果<sup>[8]</sup>. 在喷雾降温对环境影响的数值模拟方面, 刘乃玲针对狭长空间<sup>[9]</sup>、王小芝针对崇明隧道<sup>[10]</sup>分别进行了水雾蒸发模型的建立和数值模拟, 分析了喷雾降温在狭长隧道中的降温效果; Kim SC 等对喷雾降温在密闭空间中的灭火效果进行了实验模拟和建模<sup>[11]</sup>. 但是, 现有的这些研究没有说明喷雾设备的降温效果究竟与哪些因素有关, 更缺乏对喷雾降温系统降温效果与其主要影响因素的关系的分析和研究, 因而喷雾降温方案的设计与规划还停留在经验阶段, 缺乏理论支持, 致使喷雾方案的设计不是没有完全发挥出喷雾降温设备的降温效果, 就是耗电量、耗水量太大, 无法发挥喷雾降温高效节能的优点. 本文建立了温度与其影响因素关系的数学模型模型, 并且通过实验数据验证了模型的正确性, 并且提供了估算喷雾降温设备降

温幅度的方法,可为喷雾降温设备的选择、喷雾降温方案的合理设计和规划提供理论依据,从而达到优化喷雾方案,帮助喷雾降温设备最大限度地发挥高效节能的优点,促进喷雾降温技术进一步推广的作用。

## 1 实验方法

### 1.1 实验地点及喷头布置

实验地点选择在同济大学土木楼门口的玻璃雨棚下,棚高 3.40 m,长 19.00 m,宽 5.20 m。雨棚背靠土木楼正门,三侧敞开。棚顶安装有两排 TTC 红宝石喷头,相间 1.5 m,每排共有 27 个喷头,喷头两两交叉按不同方向安置(图 1)。喷雾系统采用微孔高压撞击式雾化技术,可使水在瞬间分解成  $1\sim 10\ \mu\text{m}$  的小液滴。

### 1.2 测点布置及实验方案

测点坐标如图 2 所示。测点的布置在  $x$  方向间隔 6 m,  $y$  方向间隔 1.4 m,  $z$  方向距地面分别为 1.5 m 和 2 m(共 32 个测点)。实验于 2010 年 7—8 月选择晴朗高温天气进行,采用 Apresys 高精度温湿度仪测量并记录每一测点在一段时间内的温度和湿度。

实验分两个阶段。第一阶段主要目的是确定温度平衡时间以及决定第二阶段实验每次喷雾所需时间。实验方法是首先测量未喷雾时各测点的温度与湿度,再开启喷雾设备,在喷雾状态下连续测量每一测点的温度和湿度,每 5 s 采集一次数据。温度达到稳定后关闭喷雾设备,继续记录温度湿度到温度湿度回到初始状态。将实验数据绘制成曲线,观察降温达到最大值的点,确定温度平衡点。将所有测量点的温度平衡时间汇总,找到最大的温度平衡时间,即为第二阶段实验每次喷雾所需的喷雾时间。接下来,实验进入第二阶段,即验证模型正确性阶段。实验流程同第一环节一致,只是喷雾时间由 15 min 改为第一阶段确定下来的喷雾时间。实验完成后,对各测点的温度与时间进行处理并与模型进行拟合。

## 2 温度平衡时间确定

以测点(12.0,4.2,1.5)和点(18.0,2.8,2.0)的数据为例。将温湿度仪记录的温度变化绘制成曲线,见图 3~4。

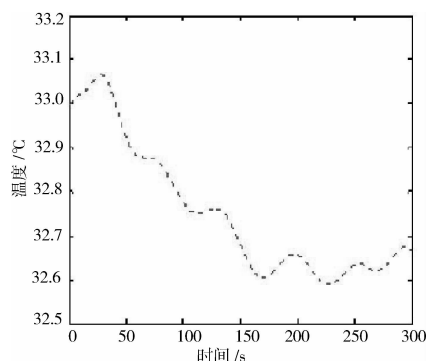


图 3 测点(12.0,4.2,1.5)的温度曲线  
Fig. 3 Temperature curve of point (12.0,4.2,1.5)

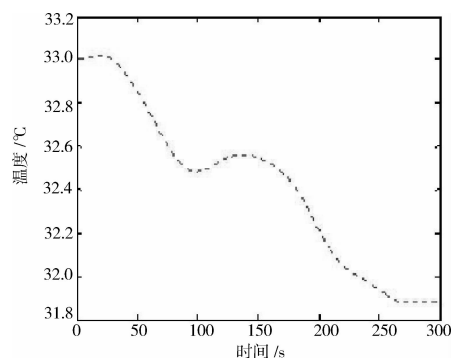


图 4 测点(18.0,2.8,2.0)的温度曲线  
Fig. 4 Temperature curve of point (18.0,2.8,2.0)



图 1 实验地点  
Fig. 1 Experiment site

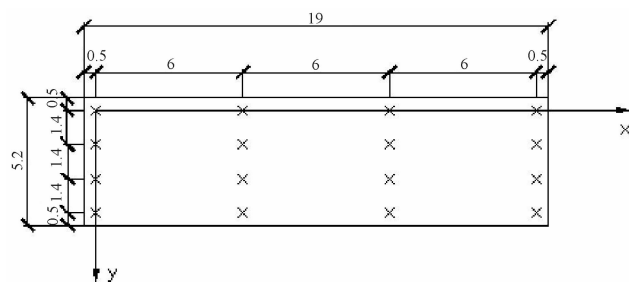


图 2 测点布置示意图 (单位:m)  
Fig. 2 Arrangement of measure points

从图上可以看到,温度在下降一段时间后会基本维持一个比较稳定的值.虽然每一点温度达到平衡状态所需的时间不同,但是都会有这样一个稳定状态存在,也就是说喷雾时间只要维持在这个温度平衡时间以上,喷雾降温设备的降温效果就已经达到极限.实际制定喷雾计划时,应该先测定喷雾设备的温度平衡时间,然后开启喷雾设备到温度平衡时间以上后关闭喷雾设备,间隔一段时间后再开启.间隔时间的长短可以根据当天的实际气温、相对湿度以及喷雾降温设备降温最大值制定.这样既可以确保喷雾降温设备的降温效果最大的发挥,又可以节约能源.本实验中测得的各点的温度平衡时间都在 300 s 以下,因此第二阶段的实验每次喷雾时间定为 300 s.

### 3 回归分析与模型验证

#### 3.1 数据预处理

实验数据和模型拟合前需要剔除关闭喷雾设备后的升温段,保留前 300 s 的降温段.另外,由于原始数据中会出现反常的“跳跃”现象.绘制的图像平滑程度也比较差,存在“奇点”(图 5),不适合直接用来与模型拟合.需要经过预处理,剔除反常数据,使曲线平滑化.数据预处理方法是,以每次喷雾开始时的时间作为起始时间,截取温度变化最明显的前 300 s 数据;以测量时间为步长,对每一点的数据进行差分<sup>[12]</sup>.对差分过大处进行连续处理,用前面两点的差值代替“跳跃的间隔”.之后,再对差分进行加和,得到每个测量时间点处理后的温度或湿度.以预处理后的数据作图,可以得到初步的温度、湿度变化曲线(图 6).

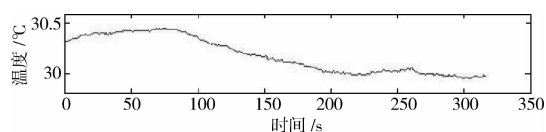


图 5 测点(18.0,0.0,1.5)原始温度曲线

Fig. 5 Temperature curve of point (18.0,0.0,1.5)

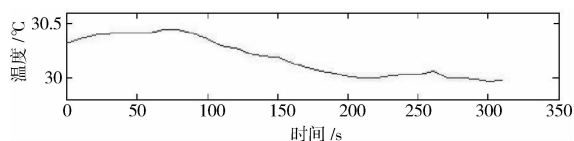


图 6 测点(18.0,0.0,1.5)初步处理后的温度变化曲线

Fig. 6 Temperature curve of point(18.0,0.0,1.5)(1st step data processing)

经过上述处理后的图像平滑程度依然较差.采用高阶泰勒级数拟合,截取前 300 s 数据后,得到图 7:

经过上述两步处理,基本上消除了反常数据,并在保持数据变化规律的前提下,使图像的平滑度明显提高.

#### 3.2 模型及验证

从图 9 和图 11 可以看出,在温度下降阶段,温度随时间的变化较为均匀,且温度变化明显.随后,温度进入平衡阶段.因此可以用分段线性函数对温度与时间的关系进行描述,建立如下函数模型:

$$\begin{aligned} T &= C_0 + C_1 t & (t \leq t_b) \\ T &= C_b & (t > t_b) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $C_0$  为温度初始值,  $C_1$  为降温速率,  $C_b$  为温度平衡值,  $t_b$  为温度平衡时间,显然,

$$C_b = C_0 + C_1 t_b \quad (2)$$

模型是否能够描述温度  $T$  与时间  $t$  之间的关系,就看测量数据的点是否分布在(1)式所描述的曲线两侧.借助 Matlab 将每一测点的实验数据与式(1)进行拟合.第一段斜线段采用回归系数  $R^2$  来评价模型线性回归程度.一般情况下,  $R^2$  在 0~1 之间波动.越接近 1,则说明线性拟合效果越好<sup>[12]</sup>.第二段常数段则采用平衡后温度的均值来拟合.平衡时间的确定方法,则是先通过观察,初步给定一个平衡时间点可能存在的时间范围区段,再以 1 s 为步长计算区段中每一时间点前后的斜线段和直线段边界的差值.以边界差值最小的一点作为温度平衡点,温度平衡点之后的平均温度作为温度平衡值.这里仅选取两点的拟合图为例(图 8、图 9).

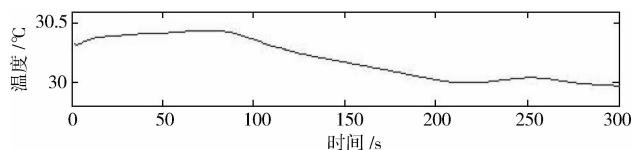


图 7 测点(18.0,0.0,1.5)进一步处理后的温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curve of point(18.0,0.0,1.5)  
(2nd step data processing)

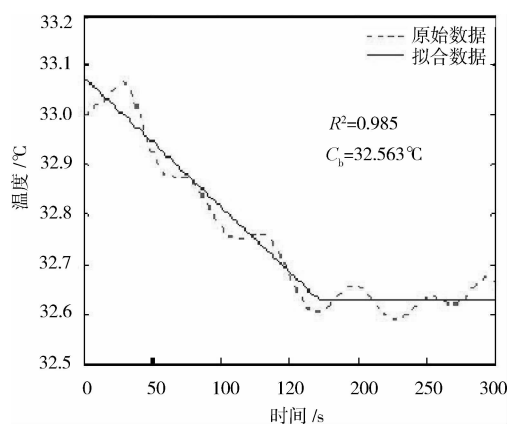


图8 测点(6.0,4.2,1.5)拟合图

Fig. 8 Fitting result of point (6.0,4.2,1.5)

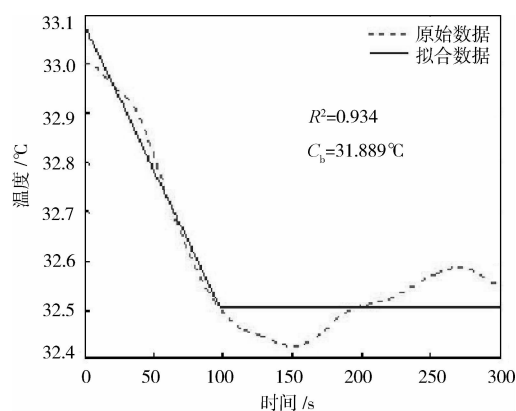


图9 测点(12.0,2.8,1.5)拟合图

Fig. 9 Fitting result of point (12.0,2.8,1.5)

从整体拟合情况可以看到,除了个别在实验范围边界点的测量数据的判定系数以外,实验数据和模型(1)的判定系数都比较接近于1,拟合情况比较理想.因此,认为温度  $T$  与时间  $t$  之间的关系满足式(1)所描述的分段线性模型.

#### 4 湿度对降温幅度的影响

从湿度与降温幅度图10上来看,湿度与降温幅度之间的关系随机性比较大.在模型拟合过程中也发现,有无湿度项对模型与实验数据的拟合程度基本无影响.也就是说,湿度对降温作用的影响不够明显.

虽然湿度对降温幅度的影响不明显,但是我们可以采取统计方法来分析湿度对降温的平衡时间  $t_b$ 、降温速率  $C_1$  以及降温幅度的影响.根据不同湿度条件下的温度平衡时间和降温速率值,可以得到温度平衡时间  $t_b$  与湿度及降温速率  $C_1$  与湿度的散点图,再采取曲线包络极值的方法得到最大值和最小值包络线(图11~12).

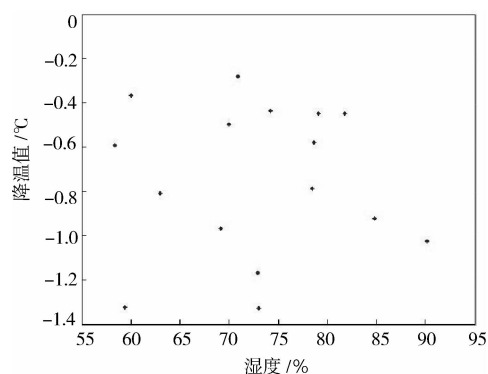


图10 不同湿度条件下的降温幅度

Fig. 10 Cooling effect under various humidity

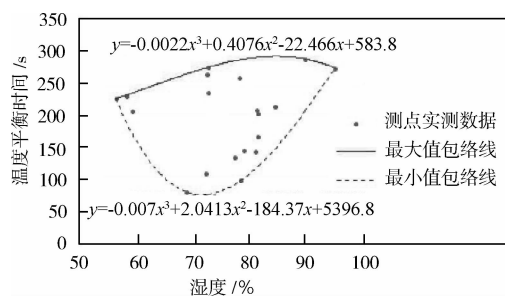


图11 不同湿度条件下温度平衡时间包络曲线

Fig. 11 Envelope curve of balance time under various humidity

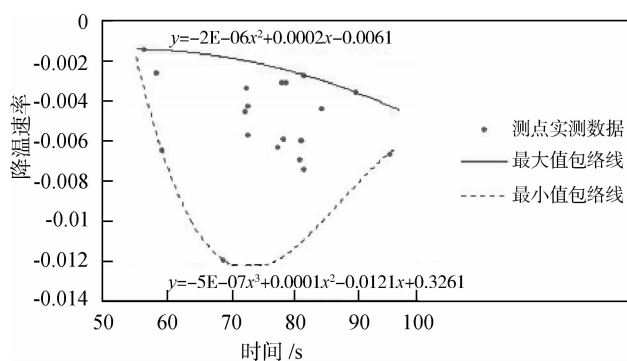


图12 不同湿度条件下降温速率包络曲线

Fig. 12 Envelope curve of cooling rate under various humidity

实际应用中,对于湿度一定的喷雾作用区域,可根据包络图,计算降温平衡时间、降温速率的极值,进而得出降温幅度的范围,以此预测喷雾的降温效果.不同的喷雾设备得到的湿度-平衡时间曲线包络曲线和湿度-降温速率包络曲线是不同的,由此得到的降温区间也是与设备密切相关的.在实际应用中,应该由厂家事先标定好湿度-平衡时间包络曲线和湿度-降温速率包络曲线,计算出降温区间,并附在喷雾设备的说明书中.降温区间的计算方法如下:

不同湿度条件下温度平衡包络曲线可以表示为:

$$\begin{cases} t_{\min} = f_{\min}(h) \\ t_{\max} = f_{\max}(h) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $t_{\min}$  为最小平衡时间;  $t_{\max}$  为最大平衡时间;  $h$  为湿度.

类似地,不同湿度条件下降温速率包络曲线可以表示为:

$$\begin{cases} C_{\min} = g_{\min}(h) \\ C_{\max} = g_{\max}(h) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $C_{\min}$  为最小降温速率;  $C_{\max}$  为最大降温速率;  $h$  为湿度.

由式(3)和式(4)求得平衡时间和降温速率的范围后,就可以由式(2)求得降温设备的降温区间:

$$\begin{cases} C_{\min} = C_{\min} t_{\min} \\ \Delta C_{\max} = C_{\max} t_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Delta C_{\min}$  为最小降温幅度;  $\Delta C_{\max}$  为最大降温幅度.

实际设计喷雾方案时,可以根据当地的湿度条件以及降温速率、温度平衡时间以及降温幅度的要求,根据式(5)估算不同喷雾设备的温度平衡时间、降温速率和降温幅度范围,选择合适的降温设备.

## 5 结 论

喷雾降温设备的降温会在喷雾进行一段时间后达到平衡.达到平衡点所需的时间要根据喷雾设备、周围环境及当地气象条件等确定.因此,在实际应用中可以先测得所用喷雾设备在当地气候环境条件下降温达到平衡所需的时间,以后每次开启喷雾设备的时间控制在这个平衡时间左右即可.这样做既可以最大限度地发挥喷雾降温设备的降温效果,又可以节约资源,发挥喷雾降温高效节能的效果.

温度与喷雾时间之间呈分段线性关系.第一阶段,时间的系数均为负值,温度随时间呈下降趋势.当时间到达平衡时间后,进入第二阶段,温度会保持在一个较为稳定的值.

湿度对降温幅度影响不明显,但是可以根据不同湿度条件下温度平衡时间和降温速率的包络图,确定不同湿度条件下温度平衡时间、降温速率和降温幅度的范围.以上参数对制定喷雾方案以及选择喷雾设备具有指导意义.

由于实验空间并非全封闭,外界其他因素对实验数据有一定影响,导致个别点的数据反常.例如,在喷雾作用边界处,大体上与中心的变化趋势相同,但温度与时间的关系没有中心点显著,实验数据与双折线模型的拟合程度较中间点低.而且,无论是边界点还是中间点,温度和湿度的变化在喷雾开始或结束时间前后往往会有反常,说明可能还有其他因素影响了降温效果.

温度与湿度也是空间位置的函数,理论上可以给出喷雾时温度和湿度随着空间位置的变化.然而,受实验条件所限,本实验不同点的温度与湿度值是在不同时间测量的,无法给出温度与湿度随空间位置变化的函数.外界其他因素对温度的影响,以及温度与湿度随空间位置的变化函数,都有待在将来的研究中进一步探索.

## 参考文献 References

- [1] 杨 洋,黄 晨,王丽慧,等.世博轴喷雾降温前期调研及试验效果分析[J].制冷技术,2008,108(1): 6-10.  
YANG Yang, HUANG Chen, WANG Li-hui, et al. Analysis of research and test results of EXPO axis spray cooling[J]. Refrigeration Technology, 2008, 108(1): 6-10.
- [2] 李成成,黄 翔,霍海红.喷雾降温冷却蒸发技术在西安世界园艺博览会应用的可行性分析[J].制冷空调与电力机械,2011(3): 5-8.  
LI Cheng-cheng, HUANG Xiang, HUO Hai-hong. Spray Evaporation Cooling Technology and Feasibility Analysis of Application in Xi'an International Horticultural Expo[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2011(3): 5-8.
- [3] 赵德菱,罗成定,高秋艳,等.水雾在温室降温中的作用[J].中国农机化,2003,111(3): 14-16.  
ZHAO De-ling, LUO Cheng-ding, GAO Qiu-yan, et al. Application of Fog Cooling in Greenhouse[J]. Chinese

- Agriculture Mechanization, 2003, 111(3): 14-16.
- [4] 朱 茂, 道云宝, 刘炳华. 喷雾降温技术在阳极炉高温烟气降温中的应用[J]. 新技术新工艺, 2012(5): 69-72.  
ZHU Mao, DAO Yun-bao, LIU Bing-hua. Application of Spray Cooling Technology for Cooling High Temperature Flue Gas of Anode Furnace[J]. New Technology & New Process, 2012(5): 69-72.
- [5] FERNG Yuh-ming, LIU Cheng-hong. Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS code [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(8): 3142-3148.
- [6] SOMASUNDARAM Sivanand, TAY Andrew Ah Ong. A study of intermittent spray cooling process through application of a sequential function specification method [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2012, 20(4): 553-569.
- [7] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
CAO Jian-ming. Spray[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [8] 黄晓庆, 张 旭, 叶 蔚. 撞击型雾化喷嘴流量特性及喷雾降温性能试验研究[J]. 流体机械, 2011(12): 54-56.  
HUANG Xiao-qing, ZHANG Xu, YE Wei. Experimental Study on the Flow Characteristic and Cooling Effect of Impingement-type Nozzle[J]. Fluid Machinery, 2011(12): 54-56.
- [9] 刘乃玲. 细水雾特性及其在狭长空间降温效果的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.  
LIU Nai-ling. Study on Characteristic of Fine Mist and the Cooling Effect in Long and Narrow Space[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [10] 王小芝. 崇明隧道累积温升及喷雾降温可行性研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
WANG Xiao-zhi. Research on Operation Heat Accumulation and Spray Cooling Feasibility in Chongming Tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] KIM SC; RYOU HS. An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure [J]. Building and Environment, 2003, 38(11): 1309-1316.
- [12] 李庆扬. 数值分析[M]. 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
LI Qing-yang. Numerical Analysis[M]. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.

## Modeling and analysis of the outdoor space influenced by spray cooling

LIU Chun<sup>1</sup>, WU Chen-yang<sup>2</sup>, ZHANG Fan<sup>2</sup>

(1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** As an energy-efficient and environmental friendly cooling method, Spray cooling has been a growing concern in the past few years. However, there were few researches about the numerical simulation of the outdoor space influenced by spray cooling, especially on the relationship between the temperature and its influencing factors, so the plan of spray cooling is still based on experience because of few theories. This shortage seriously limited the widespread of spray cooling. The model which describes the relationship between temperature and time is built up, to demonstrate the correctness of the model by regression analysis. Meanwhile, the relationship between humidity and temperature balance time, humidity and cooling rate and cooling were analyzed and plotted, and then the method of calculating the cooling range was offered. This model can be used to analyze the relationship between temperature and time, predict cooling range of different spray cooling device, provide appropriate methods for the selection of spray cooling device and spray cooling plan, and make a contribution to the popularization of spray cooling.

**Key words:** *spray cooling; modeling; temperature; regression analysis*