

文章编号:1673-9469(2025)01-0097-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.013

风幕系统对地下车库防结露效果分析

王哲¹, 王晓明², 刘治鸣¹, 李建伟¹, 鲍玲玲^{1*}

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 邯郸市荣科房地产开发集团有限公司, 河北 邯郸 056000)

摘要: 针对因地下车库结露造成的汽车打滑、壁面墙皮脱落、地面发霉等问题, 以邯郸某车库为例, 通过对实际监测数据进行分析, 运用 FLUENT 软件对车库加装风幕系统进行模拟, 设置不同的送风速度, 观察车库内空气的温湿度云图状况, 并与自然通风工况下车库内温湿度进行对比分析, 提出防治措施及通风运行策略。模拟结果表明: 当风幕系统送风速度分别为 2、4 m/s 时, 其车库内空气温度分别提升 0.7 °C、1.2 °C, 其相对湿度分别降低 5.5%、8.9%, 露点温度分别降低至 13.92 °C、13.73 °C; 送风速度由 4 m/s 增大至 6 m/s 时, 其变化与风速由 2 m/s 增大至 4 m/s 时一致, 此时, 露点温度降低至 13.52 °C, 低于壁面温度 14 °C 与地面温度 15 °C, 防结露效果明显。

关键词: 地下车库; 结露; 风幕系统; 温湿度; 通风

中图分类号: TU834

文献标识码: A

Analysis of Effect of Air Curtain System on Anti-condensation of Underground Garage

WANG Zhe¹, WANG Xiaoming², LIU Zhiming¹, LI Jianwei¹, BAO Lingling^{1*}

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Handan Rongke Real Estate Development Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000, China)

Abstract: In response to the problems of car slippage, wall peeling, and ground mold caused by condensation in underground garages, taking a garage in Handan as an example, the actual monitoring data was analyzed. Fluent software was used to simulate the installation of an air curtain system in the garage, set different air supply speeds, observe the temperature and humidity cloud map of the air inside the garage, and compare and analyze it with the temperature and humidity inside the garage under natural ventilation conditions. Preventive measures and ventilation operation strategies were proposed. The simulation results show that when the air supply speed of the air curtain system is 2 and 4 m/s respectively, the air temperature in the garage increases by 0.7 °C and 1.2 °C respectively, and the relative humidity decreases by 5.5% and 8.9% respectively, and the dew point temperature decreases to 13.92 °C and 13.73 °C respectively; When the air supply speed increases from 4 m/s to 6 m/s, the change is consistent with the increase in wind speed from 2 m/s to 4 m/s. In this case, the dew point temperature decreases to 13.52 °C, which is 14 °C lower than the wall temperature and 15 °C lower than the ground temperature, and the anti-condensation effect is significant.

Key words: underground garage; condensation; air curtain system; temperature and humidity; ventilate

雨季的到来容易导致墙壁涂料脱落、墙面渗水发霉等问题的发生^[1], 特别是地下车库容易出

现结露现象, 造成车库结构损害、车辆损害及其他安全隐患等, 这一问题需引起足够重视并采取有

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2023402072)

第一作者: 王哲 (2000—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为不同通风方式对地下空间的影响。

* 通信作者: 鲍玲玲 (1982—), 女, 河北石家庄人, 博士, 教授, 研究方向为中深层地热利用理论与技术、低品位热能利用技术、传热传质理论及应用。

效措施加以防范^[2]。很多学者对此展开了研究,如孔凡红等^[3]通过建立质能方程,探讨了通风率对围护结构温湿度的影响。Park等^[4]指出,仅通过热扩散难以准确预测地下空间热湿负荷,需要综合考虑湿度和降水量。Kunzel等^[5]模拟了围护结构的热湿传递及水分缓冲能力。赵猛^[6]研究了华北地区地下车库通风方式对结露的影响。张恒等^[7]研究发现采用个性化送风和地板送风能够有效去除室内的余湿。吴国光^[8]模拟了地下建筑不同气流组织形式下的速度、温湿度场,考虑了送风参数、送风口高度、送风口形状对气流组织的影响。廖鸿利等^[9]研究了地板送风模式下的结露情况。王威等^[10]建立了含有湿源的影响壁面结露的三维非稳态数学模型,模拟了通风强度对结露形成的影响。

本文基于前人的研究成果,针对地下车库结露问题,通过实测数据与 FLUENT 模拟结合,系统分析了不同送风速度下风幕系统的防结露效果。研究表明,风幕系统能够显著降低空气湿度和露点温度,有效抑制结露现象的发生,为地下空间湿度控制提供了科学依据和优化策略。该研究不仅具有理论价值,还对实际工程设计和管理工作具有重要指导意义,同时为相关领域的环境优化研究提供了参考。

1 车库概况

研究对象为邯郸市某小区地下车库,共两层,长 83.9 m,宽 56.3 m,高 4.5 m,排风口面积为 0.6 m×0.8 m,所测分区共有 13 个排风口,位于顶墙位置。该车库于 2023 年完工,尚未完全投入使用,车库用户较少。地上部分既有办公层也有住宅层。

车库整体结露状况如下:(1)地下一层相比于

地下二层更为潮湿,地下二层空气较为潮湿但几乎无结露现象。(2)地下一层区域通风口处的壁面和地面结露严重,若无人工及时清除除湿,结露严重易造成积水。(3)发生结露时为阴雨天气,室外空气湿度较大,结露问题严重。

该车库地面材料为环氧树脂类材料,该材料透水效果极差,附着在地面上的水汽无法有效被混凝土的“呼吸作用”排出,并且在机械通风设备未开启的情况下,自然通风强度较低,不能有效地将水汽带走,车库内的水汽蒸发后仍存在于空气中,会再次结露,导致车库内结露现象的反复发生。

2 车库结露测量方案

采用现场测量的方法进行调查,对结露表面、发霉墙面和车库内空气进行温湿度的记录。

前后共进行了两次实际测量,2023 年 4 月 12 日至 14 日于晴朗天气第一次测量,车库内无结露现象发生。测量地点选择湿度较大的车库负二层,使用温度自记仪和温湿度自记仪对四个测点进行了测量。2023 年 5 月 4 日至 6 日于阴雨天进行第二次测量,此时车库内产生结露,地点为车库负一层,使用相同仪器对负一层三个测点进行了测量,两次测点位置如图 1、图 2 所示。

实验所用测量仪器包括 WSZY-1 型温湿度自记仪和 WZY-1 型温度自记仪,均由北京天建华仪科技发展有限公司生产。其中,WSZY-1 型温湿度自记仪的测量范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (温度)和 $0\% \sim 100\%$ (湿度),精度分别为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 0.3\%$ 。WZY-1 型温度自记仪的测量范围为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,还使用了 FLUKE 品牌的热成像仪进行相关测量。测点具体位置与对应测量仪器见图 1、图 2。

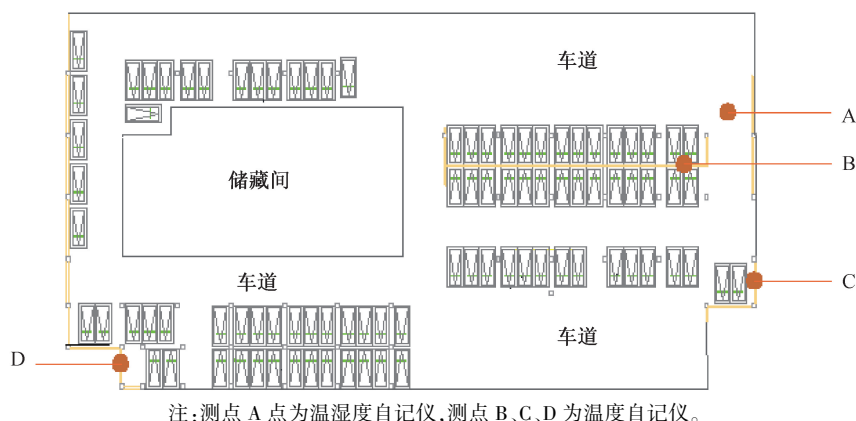
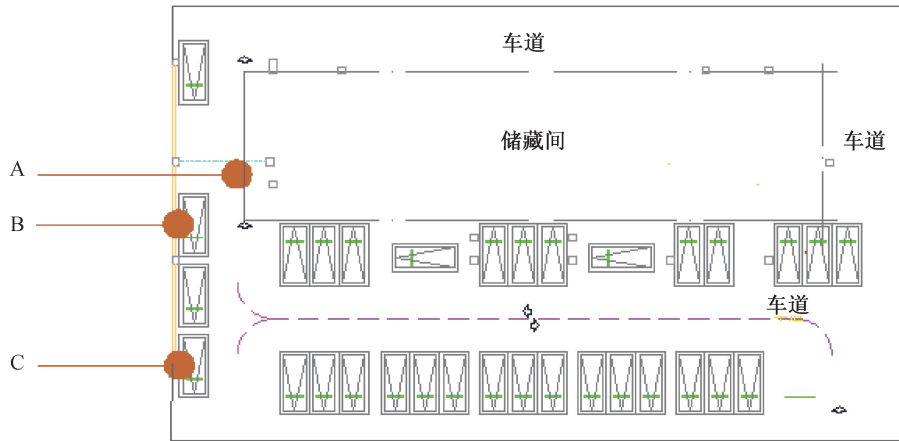


图 1 2023 年 4 月 12 日测点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement point on April 12, 2023



注:测点 A 为温湿度自记录仪,测点 B、C 为温度自记录仪。

图 2 2023 年 5 月 4 日测点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement point on May 4, 2023

3 测量结果

图 3 为 2023 年 4 月第一次测量的温湿度自记录仪数据。由图 3 数据可知,该地下车库负二层进风口处最高温度为 13.3 °C,最低温度为 12.8 °C,平均气温为 12.93 °C。相对湿度最大值为 83.8%,最小值为 62.8%,平均值为 73.81%。计算所得露点温度最大值为 10.44 °C,最小值为 5.91 °C,平均值为 8.37 °C。

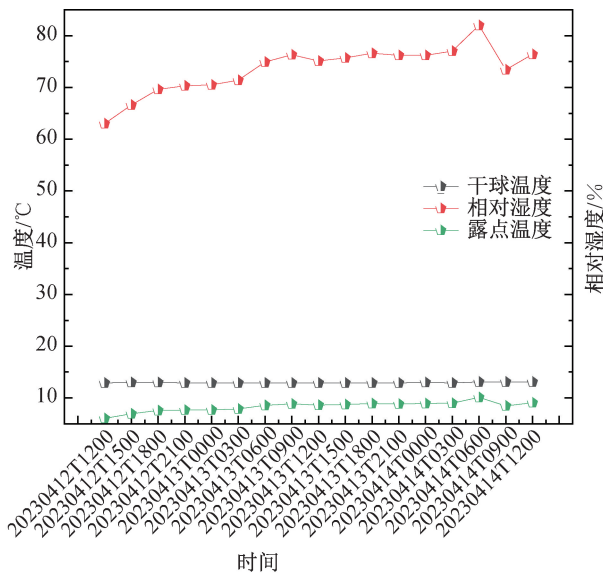


图 3 2023 年 4 月测点 A 数据图

Fig. 3 Data plot of measurement point A on April, 2023

图 4 为 2023 年 5 月第二次测量的温湿度自记录仪数据,由图 4 数据可知,该地下车库负一层空气最高温度为 17.8 °C,最低温度为 15.7 °C,平均气温为 16.32 °C。相对湿度最大值为 93.1%,最小值为 71.3%,平均值为 89.02%。计算所得露点温

度最大值为 15.88 °C,最小值为 10.83 °C,平均值为 14.48 °C。

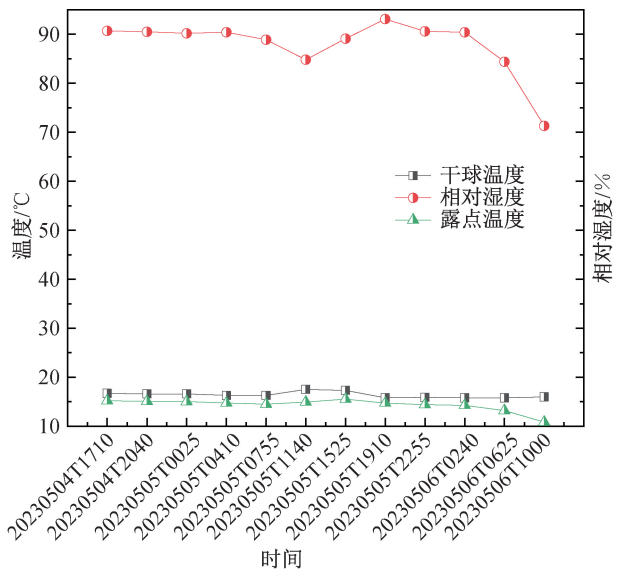


图 4 2023 年 5 月测点 A 数据图

Fig. 4 Data plot of measurement point A on May, 2023

图 5 为第一次测量各测点温度与露点温度的对比图,从图中可以看出,三个测点的平均温度分别为 13.1 °C,12.7 °C,12.7 °C,且温度变化不大,皆为平稳趋势,露点的平均温度为 8.37 °C。三个测点温度皆高于露点温度且温差较大,并无结露现象发生。

图 6 为第二次测量各测点温度与露点温度的对比图,由图 6 可知,两测点 B、C 处的外壁面温度一致,平均温度为 15.1 °C,露点温度变化范围较大,图中可以清晰看出于 5 月 5 日 15 时 10 分露点温度有明显提高,测量日当日出现结露现象。

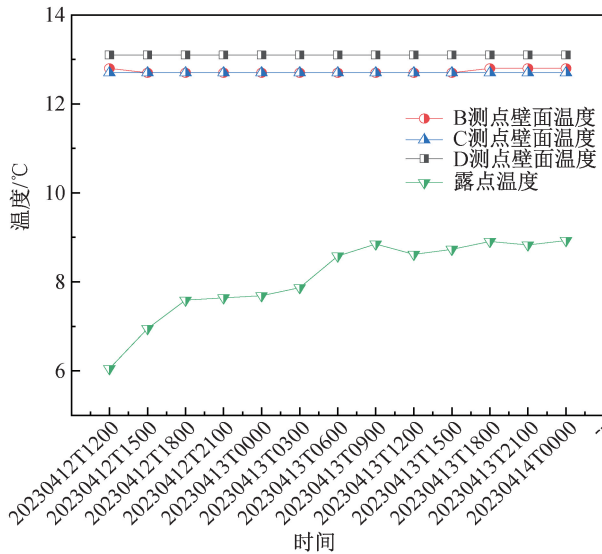


图5 2023年4月测点B、C、D与露点温度对比图

Fig. 5 Comparison chart of measurement points B, C, D and dew point temperature on April, 2023

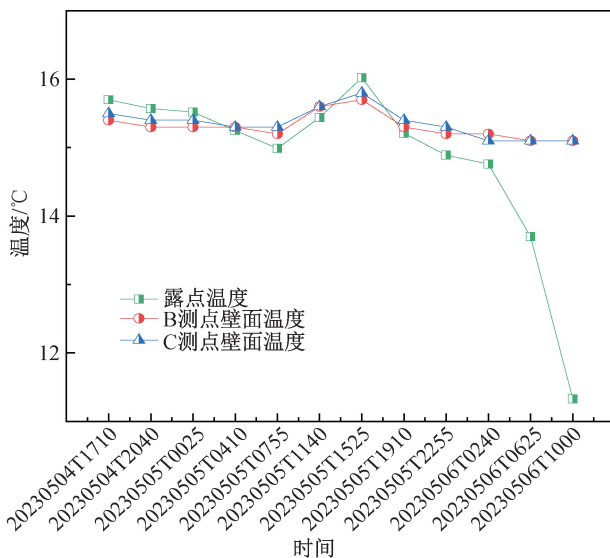


图6 2023年5月测点B、C与露点温度对比图

Fig. 6 Comparison chart of measurement points B, C and dew point temperature on May, 2023

4 风幕优化对比模拟研究

针对车库结露现象,在车库进出口设置风幕系统。风幕系统可以高效隔绝室外空气,将其对车库的影响降到最小,对于车辆的正常通行也并无影响。

4.1 数学模型

在模拟过程中,数值的离散方法选择有限元体积法,求解方法选择 SIMPLE 算法,湍流模型选择 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,打开组分运输选项,

其中组分成分选择为 air 和 H_2O 。控制方程^[9]如下:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中, u, v, w 分别代表 x, y, z 方向上的速度分量, m/s 。

(2) 能量方程

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}) + S_k \quad (2)$$

其中 S_k 包括了内热源, W/m^3 ; k_{eff} 为流体的传热系数, $W/(m \cdot K)$; T 为温度, $^{\circ}C$ 。

(3) 动量方程

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} [u_{\text{eff}} (\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i})] + g\beta\Delta\rho \quad (3)$$

其中, p 为静压, Pa ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为应力张量, Pa ; g 为体积力, N/kg ; β 为修正系数。

(4) k 湍流粘度方程

$$\mu_t = \rho c_{\mu} \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

其中, μ_t 为粘度, $Pa \cdot s$; c_{μ} 为常数项; K 为紊流脉动动能, J ; ε 代表耗散率, W/m^3 。

(5) 湍流动能运输方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (5)$$

其中, k 为湍流动能, J ; σ 为普朗特数。

(6) ε 湍流动能输运方程

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_i}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon C_1}{k} \cdot \mu_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

4.2 物理模型

该车库位于居民建筑地下一层,车库形状不规则,根据不同居民楼划分不同分区,自然通风口随分区设置,用 FLUENT 前处理软件建立车库地下一层三维模拟图,实物的图形规则比较复杂,建立模型、划分网格和数值模拟计算工作量巨大,在不影响结果的情况下,对其进行适当简化。车库进出口为唯一进风口,已在图 7 模型标识出。

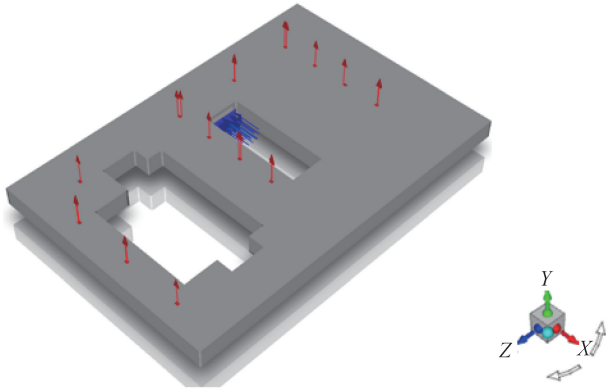


图 7 无风幕模型图

Fig. 7 Model diagram without air curtain

边界条件设置:(1)车库入口边界条件设置:采用不可压流动的速度入口边界条件,由实测获得数据,设置入口风速为 2.1 m/s,温度为 16 °C,相对湿度为 90%。(2)车库出口边界条件设置:采用自由出流边界条件。(3)壁面边界条件设置:壁面为无滑移壁面,均匀壁温,且温度不随时间发生变化,由实测获得数据,壁面温度设为 15 °C,地面温度设为 14 °C。(4)初始化设置:车库内空气温度为 17 °C,相对湿度为 75%。

4.3 收敛性判断

各方程收敛标准见表 1:

表 1 各方程收敛残差标准

Tab. 1 Convergence residual standards for each equation

连续性方程	X 动量方程	Y 动量方程	Z 动量方程	能量方程
10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-6}

迭代步数选择 500 步,在 450 步各方程达到收敛标准。

4.4 模型验证

图 8 表示了车库结露状态下的测点实测温度与模拟温度,由图可知,实测数据与模拟数据最大差值为 0.54 °C,相对误差为 4.1%,在误差范围内,偏差范围合理。

4.5 风幕不同送风工况模拟

在原有车库模型基础上,车库入口上方加装风幕系统。对不同送风工况下车库高度 $Y = 2.25$ m 处截面速度云图及贴壁面 $Z = 1$ m 处截面温湿度云图进行分析,不同风速工况见表 2。模型如图 9 所示。

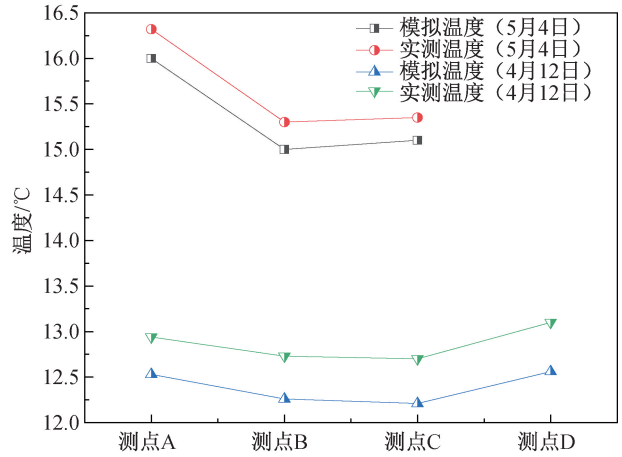


图 8 测点实测温度与模拟温度对比图

Fig. 8 Comparison of measured temperature and simulated temperature at measuring point

表 2 风幕送风不同工况

Tab. 2 Different working conditions of air supply by air curtain

工况	风幕送风速度 / (m · s ⁻¹)	温湿度 / °C	湿度 / %
一	2	20	62
二	4	20	62
三	6	20	62
无风幕	—	—	—

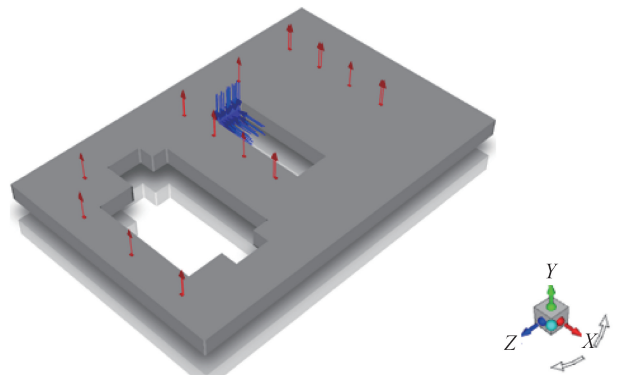


图 9 风幕模型图

Fig. 9 Air curtain model

由图 10 可知,工况一中,当风幕送风速度为 2 m/s 时,风幕送风速度较低,车库内空气流通无法达到较好效果;工况二中,风幕送风速度增大,其与入口外界空气混合带动周围空气运动,但周围空气速度在 2 m/s 左右,无风区风速在 0~1 m/s 之间;工况三中,风幕送风速度为 6 m/s 时,气流流动状态发生较大变化。外界空气流动与风幕送风流动相互影响,入口空气不再直接贴壁面进行扩散,而是向车库入口两侧进行流动,与自然通风状态下的车库内空气流动状态呈现出相反趋势。

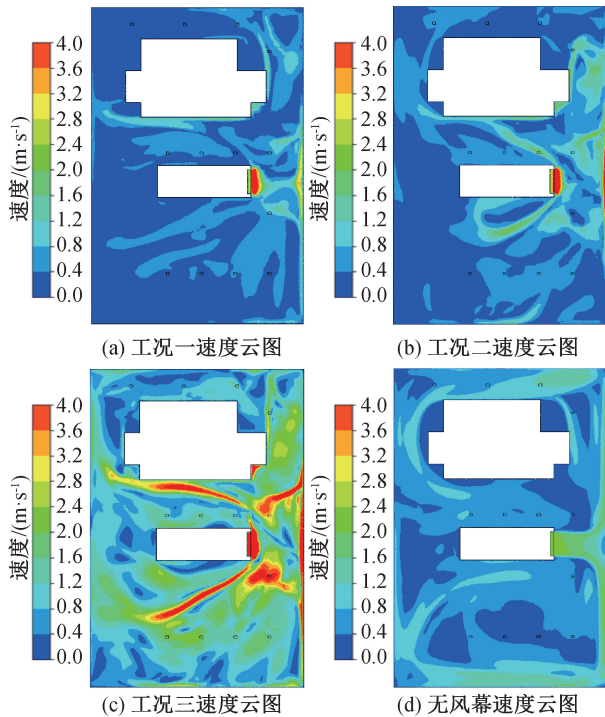


图 10 $Y=2.25\text{ m}$ 处风幕送风速度云图
Fig. 10 Speed cloud of air curtain at $Y=2.25\text{ m}$

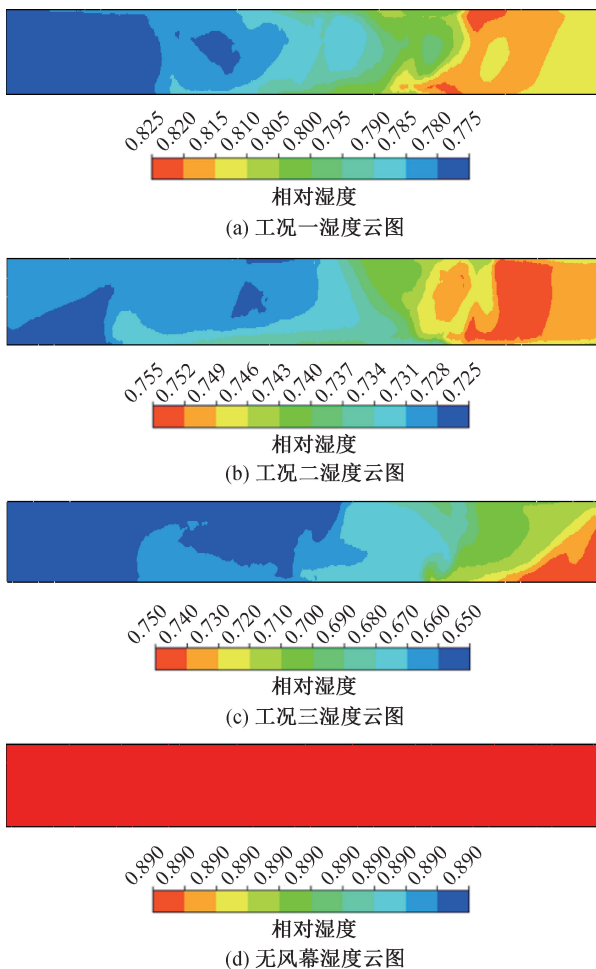


图 11 $Z=1\text{ m}$ 处湿度云图
Fig. 11 Humidity cloud at $Z=1\text{ m}$

由图 11 可知,当风幕处于工况一条件下,车库处相对湿度有大幅度下降;工况二条件下,对比工况一车库内相对湿度整体有所下降,相对湿度大部分区域在 73%左右;工况三条件下,截面 $Z=1\text{ m}$ 处湿度云图发生较大变化,从距离入口较近处至远离入口处,截面湿度呈现逐步升高趋势,湿度在 65%~75%之间变化,湿度梯度跨度不大,湿度分布规律与两个工况大致相同。

如图 12 所示,相比于车库自然通风情况,工况一壁面处空气温度有较小升高,近入口处壁面空气温度较低,与相对湿度呈现相反趋势;工况二较工况一壁面处温度上升 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右;工况三温度变化与湿度变化相互对应,从距离入口较近处至远离入口处,截面温度呈现逐步升高趋势,温度在 $16\text{ }^\circ\text{C}\sim 18\text{ }^\circ\text{C}$ 变化。

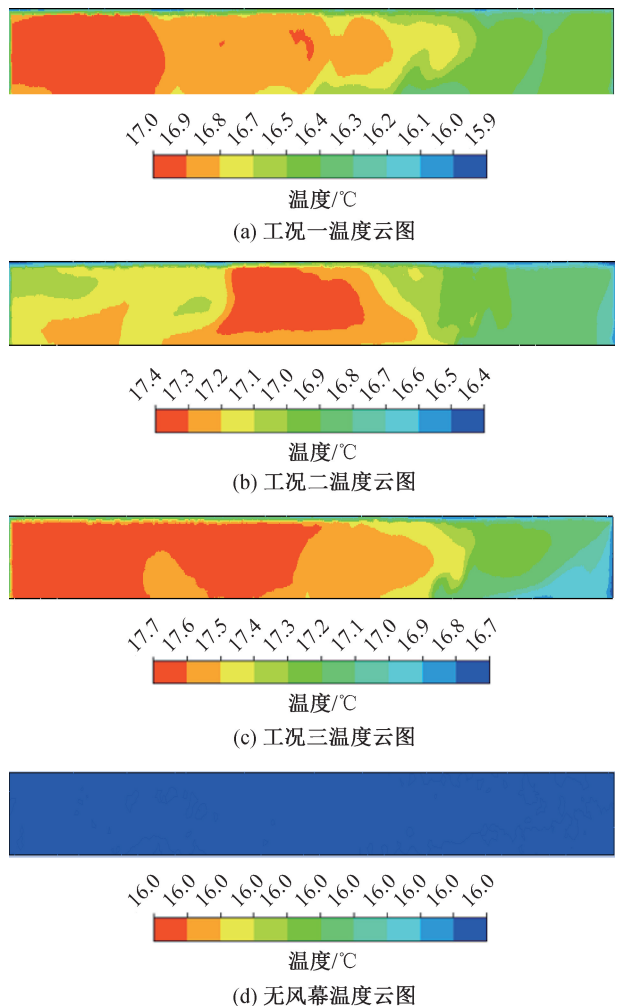


图 12 $Z=1\text{ m}$ 处温度云图
Fig. 12 Temperature cloud at $Z=1\text{ m}$

测点温湿度对比分析:为研究有无风幕状况下车库壁面温湿度变化情况,在截面 $Z=1\text{ m}$ 、高度 $Y=1.3\text{ m}$ 处设置 10 个测点,从壁面位置 $0\sim$

56.3 m 平均设置 10 个测点,提取坐标点温湿度数据,绘制成点线图,如图 13、图 14 所示:

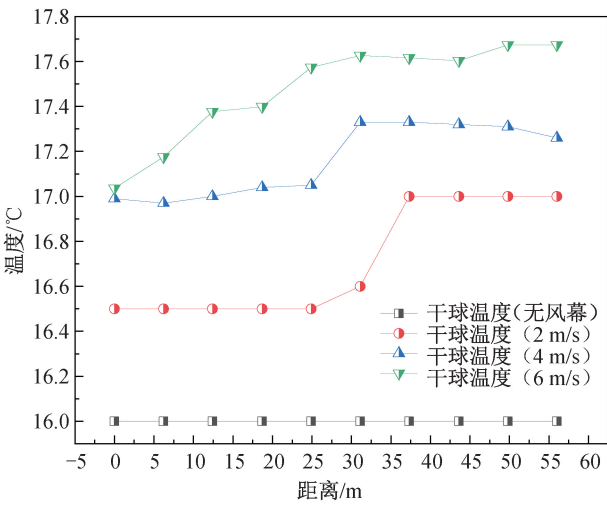


图 13 对比温度变化图

Fig. 13 Comparison of temperature changes

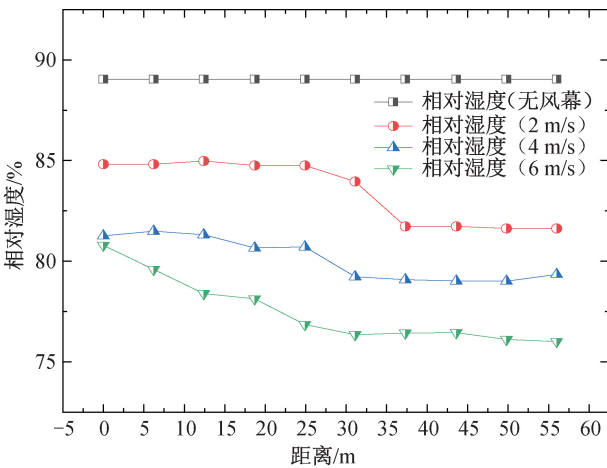


图 14 对比湿度变化图

Fig. 14 Comparison of humidity changes

在沿着截面方向上,无风幕状况下,温湿度并无变化。加装风幕系统后,温湿度产生明显变化,受入口系统与风幕系统风速影响,随着风幕送风速度增大,车库内相对湿度在逐渐减小,风速由 2 m/s 增大到 4 m/s 相比于风速由 4 m/s 增大到 6 m/s,相对湿度下降较为显著,其变化趋势几乎一致;随着送风速度增大,三种工况都是由靠近风幕到远离风幕相对湿度逐步下降。

对壁面测点空气温湿度进行计算可得其露点温度,露点温度点线图如图 15 所示:

无风幕影响状态下,车库内空气露点温度在 14.2 °C 左右,在车库内壁面温度 15 °C,地面温度 14 °C 状况下,与壁面温差较小,结露可能性较大,

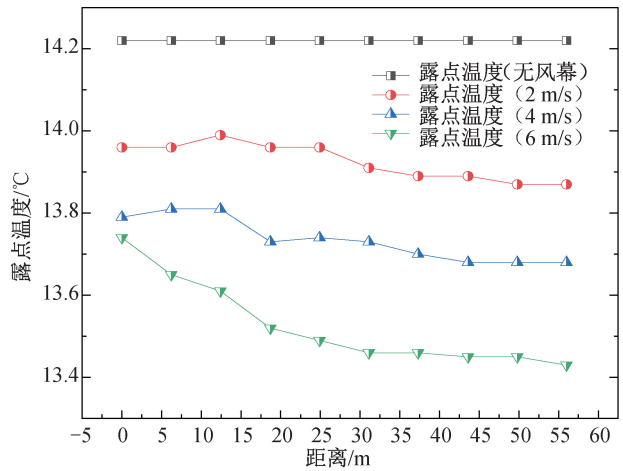


图 15 对比露点温度变化图

Fig. 15 Comparison of temperature changes at dew point

地面结露状况更为严重。加装风幕系统进行送风后,随着送风速度增大,露点温度逐步有效降低,平均露点温度分别降至 13.96 °C、13.73 °C、13.47 °C,与车库壁面和地面温度逐渐拉大差距,可以有效防止结露,风幕送风系统可有效抑制结露状况发生。

5 结论

1) 实测结果显示,在自然通风情况下,外界为晴朗天气时车库内露点温度远低于车库内壁面与地面温度,无结露可能;而阴雨天气时,外界空气湿度提高,致使车库内露点温度提高,车库内出现结露现象。

2) 风幕系统送风速度为 2 m/s 时,相比于自然通风,车库内空气温度平均提升了 0.71 °C,相对湿度平均降低了 5.5%,此时露点温度为 13.92 °C,对比自然通风露点温度 14.38 °C 降低了 0.46 °C;当送风速度由 2 m/s 增大至 4 m/s 时,车库内空气温度平均提升了 1.1 °C,相对湿度平均降低了 8.9%,露点温度为 13.73 °C,对比自然通风露点温度 14.38 °C 降低了 0.19 °C;送风速度继续增大至 6 m/s 时,温湿度变化趋势与风速由 2 m/s 变化至 4 m/s 相同,此时露点温度为 13.52 °C,对比自然通风露点温度 14.38 °C 降低了 0.89 °C。

3) 风幕系统可以将露点温度有效降低至地面温度与壁面温度以下,有效隔绝外部湿空气侵入车库,抑制车库结露现象。

参考文献:

[1] 邓持友. 地下车库结露现象的分析及防治措施[J].

- 黑龙江科技信息, 2015(11): 180.
- [2] 吴本国. 地下车库漏水与结露调查暨改进措施[J]. 建筑工人, 2013, 34(9): 46-47.
- [3] 孔凡红, 郑茂余, 韩宗伟, 等. 新建建筑围护结构热质传递对室内温湿度环境的影响[J]. 建筑科学, 2008(8): 94-97.
- [4] PARK K, NAGAI H. Study on the heat load characteristics of underground structures part 2. computational analysis of the heat/moisture behavior and heat load of underground structures[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2007, 6(1): 189-196.
- [5] KUNZEL H M, HOLM A, ZIRKELBACH D. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope[J]. Solar Energy, 2005, 78(4): 554-561.
- [6] 赵猛. 华北地区地下车库除湿防结露方式研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- [7] 赵恒, 赵彬, 吴俊. 用于湿度独立控制的送风气流组织研究[J]. 制冷与空调, 2006(4): 10-13.
- [8] 吴国光. 地下建筑气流组织的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [9] 廖鸿利, 陈奕纯, 丁云飞, 等. 新风地板送风模式下冷辐射板结露特性研究[J]. 低温与超导, 2023, 51(5): 64-70.
- [10] 王威, 姜建中, 王戎, 等. 利用 CFD 模拟通风小室壁面结露分布的规律[J]. 制冷与空调(四川), 2019, 33(5): 556-561.
- (责任编辑 唐彦彦)
-
- (上接第 96 页)
- [8] 刘永前, 邵振州, 颜灵伟, 等. 基于改进二进制萤火虫算法的风电场微观选址优化研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(1): 112-118.
- [9] 戴朋林, 李方彦. 多约束条件下智能优化风电场微观选址方法的探究[J]. 能源研究与利用, 2015(1): 31-34.
- [10] 谢博武, 李磊, 张垒, 等. 基于 WeFarm 的复杂地形风电场低效出力影响因素研究[J]. 风机技术, 2023, 65(4): 90-96.
- [11] 程雪玲. 风能模型的发展及 CFD 在风资源开发利用中的应用[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(6): 1-15.
- [12] 薛飞飞, 许昌, 韩星星, 等. 基于 CFD 的复杂地形风电场地形改造方案研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1959-1965.
- [13] 刘成堃, 张力, 马瑞, 等. 面向 3D GIS 场景的 BIM 模型转换与集成研究[J]. 地理空间信息, 2022, 20(1): 111-114+144.
- [14] 仲炜, 葛莹, 张杰, 等. 基于 GIS 的高海拔山区风电场智能微观选址研究[J]. 地理信息世界, 2018, 25(1): 130-134.
- [15] 何祥平, 王浩, 郜辉, 等. 高铁连续梁桥 BIM 参数化建模及其工程应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(3): 311-317.
- [16] 陈可仁, 王亚强. 基于 GIS+BIM 的风电场三维数字化设计系统研究[J]. 能源科技, 2021, 19(4): 50-53.
- [17] 尚海勇, 刘利强, 齐咏生, 等. 基于数字孪生技术的风电机组建模研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 391-400.
- [18] 吴红华, 张亮, 冯豪, 等. 基于无人机的复杂地貌上空风场实测研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(2): 92-103.
- [19] 崔丛, 胡立伟. BIM 与 GIS 技术在风电场三维建模中的应用研究[C]//第六届中国风电后市场交流合作大会论文集. 天津: 中国农业机械工业协会风力机械分会, 2019: 227-231.
- [20] 陈斌. BIM+GIS 在输变电工程建设管理中的研究与应用[C]//第七届全国 BIM 学术会议论文集. 重庆: 中国建筑工业出版社出版, 2021: 126-130.
- [21] 许昌, 陈丹丹, 韩星星, 等. 复杂地形风电场一体化优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3368-3375.
- [22] 吕宙安, 王东, 王中平, 等. 基于改进 RRT* 算法的山地风电场道路路径优化[J]. 新能源进展, 2023, 11(6): 564-571.
- (责任编辑 唐彦彦)