

湿热季地下车库诱导射流改善表面结露和 CO 污染

高 军¹, 宋天珩¹, 房艳兵¹, 陈 明²

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 200092; 2. 宝钢集团不锈钢分公司, 上海 200233)

摘要: 针对上海某高层办公楼纵深型地下车库空间湿热季内表面严重结露问题, 在原通风系统分布式均匀排风主导的情况下, 测试分析了表面结露状况. 改进设计了一套诱导射流系统, 兼顾墙面贴附射流和地面冲击射流效应, 提高近壁气流速度和湍流换热水平, 使得表面对流换热和表面温度明显升高, 在湿热季车库通风时段显著改善表面结露问题. 同时, 该系统解决了原有系统在纵深区域 CO 气态污染排除不畅、呼吸区积聚浓度偏高的问题.

关键词: 湿热季; 地下车库; 表面结露; CO 浓度; 诱导射流
中图分类号: TU834.3 **文献标志码:** A

Application of Inductive Air Jet to Underground Garage for Reducing both Surface Condensation and CO Pollution in Hot and Humid Climate

GAO Jun¹, SONG Tianheng¹, FANG Yanbing¹, CHEN Ming²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Stainless Steel Branch Baosteel Group, Shanghai 200233, China)

Abstract: This study tries to resolve the serious condensation problem of a large underground garage with the deeply spatial pattern in Shanghai, which is ventilated by the dominant effect of uniformly distributed exhausts. Test and analysis of surface condensation are carried out in the originally equipped system. An inductive air-jet system is presented by taking into account the attached effect along wall and impinging effect on the floor. The system is applied to intensifying the air velocity and turbulent level near the surface so as to increase the surface heat transfer and temperature. The surface condensation is confirmed to be significantly reduced in the hot and humid season by the inductive air jets. Meanwhile, the improved system also reduces the accumulation of concentration of CO gaseous pollution at the breathing zone in the garage.

Key words: hot and humid season; underground garage;

surface condensation; CO concentration; inductive air jet

地下空间的开发利用是一项复杂的系统工程, 城市地下空间的热湿环境及空气品质问题就是其中的一项重要环节. 由于地下空间受到岩石或土壤包围、通风条件受限等影响, 容易出现高湿结露与污染物积聚的问题. 地下车库作为典型的城市地下工程, 是许多大型商业、办公及住宅建筑的重要配套设施, 在湿热季通风控制车库污染时, 引入的高露点空气极易在内表面结露, 恶化热湿环境, 滋生霉菌, 影响地下空间使用功能, 也对地下围护结构使用寿命和相关设备的正常使用造成负面影响^[1]. 同时, 以 CO 为代表的汽车启停时的有害排放, 对通风运行极为敏感, 易于在呼吸区积聚^[2]. 因此, 提出相应的技术方法来解决地下车库湿环境与空气品质问题具有十分重要的意义. 文献[3]阐述了地下空间热环境和空气品质评价的内涵, 并针对重庆湿热气候下地下空间微环境进行了分析评价. 文献[4]指出通过合理计算湿负荷并采取一定的防潮除湿措施是改善地下空间内部湿度环境的重要途径. 文献[5]则认为因地制宜采取独立除湿技术是改善地下空气热湿环境的必要途径. 文献[6]针对湿热季某地下空间防控湿要求, 提出了“入口防湿+洞壁电加热+除湿剂除湿”综合方案, 以一定能耗代价为条件改善表面结露问题. 可见, 加热除湿、冷却除湿、吸湿剂除湿、压缩除湿等高耗能的地下空间除湿技术应用, 成为湿热季地下空间湿环境控制的重要手段, 通风防结露技术潜力挖掘不足或在高湿季被直接摒弃. 基于诱导射流技术的无风道通风技术被广泛应用于地下车库污染物浓度控制^[2,7-8], 有研究者将其用于地下车库排烟时能见度保障^[9]. 还有研究者引入贴附射流对解

决游泳馆结露和地下景观结露问题开展了研究^[10-11]. 这类技术方法从加强局部对流换热的角度, 在不以加热、冷却、吸湿等高能耗方式改变空气露点的条件下, 通过提升表面温度在改善结露方面进行很好的尝试. 另外还有研究者围绕围护结构热湿传递过程开展深入研究^[12-14], 对地下围护结构湿积累、湿传递引起的结露问题有很好的启示.

本文针对上海某办公楼地下车库表面结露、CO 污染改善的双重目标, 改造现有“机械排风+自然进风”系统, 引入诱导射流技术, 以墙面贴附射流、地面冲击射流效应强化表面对流, 实现湿热季条件下结露点的转移, 改善地下车库湿环境, 延迟和缩短高能耗除湿技术的应用时间; 同时, 利用诱导射流的空间气流分布特性, 降低库内部分呼吸区的 CO 浓度水平. 以相关测试分析为依据, 采用计算流体动力学仿真的方法, 对地下车库原有通风系统及改造后诱导射流系统的应用效果进行了对比, 可为相关地下工程提供技术依据.

1 原通风系统及测试

该办公楼地下车库建筑面积约 7 000 m², 设计停车位 170 个, 车库的地面标高 -4.9 m. 地下车库平战结合使用, 战时为六级人员掩蔽所. 车库现有机机械通风系统按照机械排风和车道(车道 1, 2)自然进风的方式设置, 四个独立系统(T1~T4), 分别由排风机组负担(置于两个集中机房). 图 1 给出了通风系统、自然进风车道的布局.

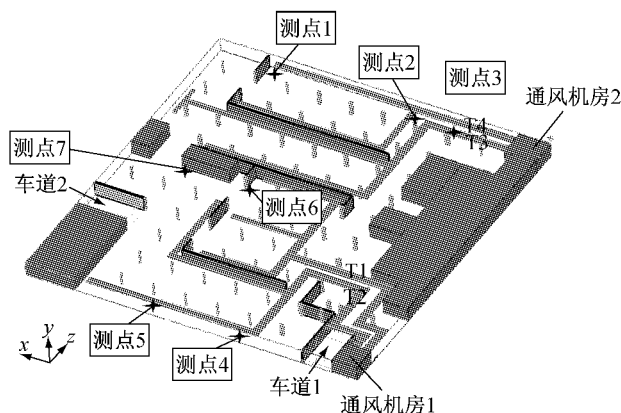


图1 原车库通风系统及结露相关参数测试点分布

Fig. 1 The original garage ventilation system and monitoring point arrangement of dewing related parameters

根据对现有通风系统的现场实测, 排风系统 T1~T3 的风量 20 000 m³ · h⁻¹, T4 的排风量 36 000 m³ · h⁻¹; 按照门洞面积 18.75 m², 门洞总平均风速 0.71 m · s⁻¹; 根据车库容积 17 500 m³, 现有通风系统满足换气次数约 5.5 次 · h⁻¹, 基本满足地下车库通风换气次数要求. 根据现有通风估算, 车库内的最大段面平均风速大致为 0.13 m · s⁻¹. 系统排风口总数 80 个, 各风口排风速度经测试为 0.22~4.47 m · s⁻¹ 不等. 测试结果表明, 现有系统以分布式均匀排风为主导(即使排风口速度由于排风管网水力不平衡而差异悬殊), 排风口动量衰减快, 气流影响范围小, 虽然通风设置基本满足换气次数要求, 但对车库内呼吸区 CO 浓度控制不理想, 对防结露则更为不利.

为了进一步判断现有通风设置与车库结露的影响, 对车库的结露状况进行了现场实测与判断, 采用的仪器包括 QDF-3 热球风速仪、Vaisala HM34 手持式温湿度计和手持式红外表面温度计. 空间测试点分布见图 1(测点 1~7), 测点距地面高 0.8 m, 距墙 0.5 m. 另外, 墙面布置了五个测试点, 地面布置了七个测试点.

表 1 给出各测点处的测试结果. 各点空气露点温度 24~25 °C, 而表面温度受土壤大惯性体的作用维持在 22~23 °C(地面)以及 23~24 °C(墙面); 库内七个空间测点均出现结露, 与现场监测现象吻合. 车道处, 空气露点温度虽高达 27.2 °C, 但低于平均表面温度(28.2 °C), 未发生结露.

2 地下车库诱导射流通风改造

根据前述的测试结果, 对该车库通风系统进行改造. 采用诱导射流方式, 一方面在湿热季通风条件下提升表面换热水平, 使表面温度移出空气露点范围; 另一方面, 结合车库通风排污的需要, 以诱导射流通风方式降低呼吸区 CO 指标污染物的浓度. 按照文献[7]的设计方法, 结合射流改善结露与 CO 污染的要求, 兼顾墙面贴附射流和地面冲击射流, 提出如图 2 所示的诱导射流技术应用方案. 共布置 57 台射流风机, 总功率约 5 kW, 墙上 12 台, 车道入口 10 台, 送风方向为平吹(墙上)、向下 45°(空间), 风机风量 900 m³ · h⁻¹(车道入口 10 台)、600 m³ · h⁻¹(其他的内部空间和墙上的 47 台). 箭头所指为射流气流设计方向, 墙上气流与空间气流同向.

表 1 结露参数测试结果

Tab.1 The test results of dewing parameters

测点号	风速/(m·s ⁻¹)	空气温度/℃	表面温度/℃	相对湿度/%	空气露点/℃	结露与否
测点 1	0.08	27.9	22.0F/23.1W	79.4	24.0	是
测点 2	0.35	28.3	22.7F/23.5W	79.9	24.5	是
测点 3	0.15	28.1	22.2F/23.2W	80.4	24.4	是
测点 4	0.12	28.8	22.8F/23.8W	80.9	25.2	是
测点 5	0.05	29.0	23.0F/24.2W	79.1	25.0	是
测点 6	0.16	31.3	23.0F	78.4	27.1	是
测点 7	0.30	31.1	23.0F	79.8	27.2	是
车道 1	0.62	32.0	28.1F	75.4	27.2	否
车道 2	0.75	32.0	28.3F	75.4	27.2	否

注:W 表示墙面,F 表示地面.

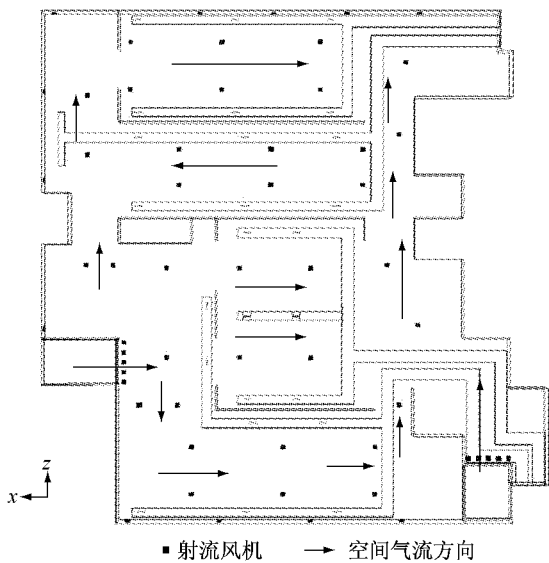


图 2 地下空间射流强化通风系统几何模型

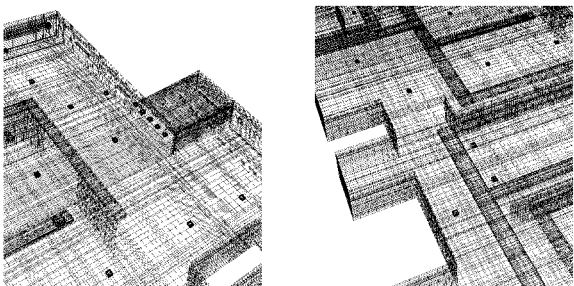
Fig.2 The geometric model of underground space jet strengthening ventilation system

3 车库表面结露和 CO 污染改善

3.1 数值方法与验证

为检验新方案对改善车库表面结露、呼吸区 CO 浓度控制的效果,对原方案、新方案开展了计算流体力学模拟分析.采用标准 $k-\epsilon$ 双方程加标准壁面函数的方法.标准壁面函数用以构建近表面第一网格节点内速度分布函数,以表述气流运动受表面切应力、黏度的影响程度,缓解近表面空气流动刻画对网格密度的高度依赖.采用结构化网格,水平最大网格距设定 1 m,高度上最大 0.5 m,网格最长宽比小于 4,划分单元数 155 万、节点数 158 万(见图 3).网格质量经单元体积分布、网格面直线性和长宽比的三项检测为合格,从而保证网格层次上的计算精度和收敛度要求.

边界条件的设置随着案例的不同有所区别,归



a 车道 2 入口处 b 车道 1 前方

图 3 车库空间结构化网格划分

Fig.3 Structure grid meshing of the garage space

纳起来描述如下:① 风口.排风速度按照 80 个风口测试数据加载,风机按照风量设置.② 车道入口.给定该处室外空气压力等于 1 个大气压,室外空气参数根据测试取 32℃、相对湿度 60%(露点温度 23.3℃).③ 固体壁面.取用地面和墙面分别 200 mm 和 400 mm 厚度的钢筋混凝土材料热物性,按照上海地区土壤温度情况、车库空间的开畅性(夏季高于等深度的土壤温度),取地面和墙体外部温度 21℃(与测试的表面温度吻合).④ CO 散发量.污染源假定为近地面 0.2 m 处均匀散发,车位处布置体积污染源,总散发量按文献[15-16]计算为 2 329 mg·s⁻¹.⑤ 内热源.按照无内热源的最不利情况考虑(忽略车体排热).

通过图 4 对比可知,数值计算值与测试结果吻合良好,测点 2 处速度、温度偏差稍大,但在总体上一致性尚可,能满足工程需要.另外,文献[8]通过模拟与实测数据对比,也指出标准 $k-\epsilon$ 模型在高速射流的充分发展段的应用是可行的.

3.2 表面结露改善

利用上述经过验证的数学模型与边界条件,对有无诱导射流的地下车库空气分布参数及结露状况进行了模拟分析.以库内空气平均温度作为依据,原通风系统下地面平均表面对流传热系数 1.28 W·

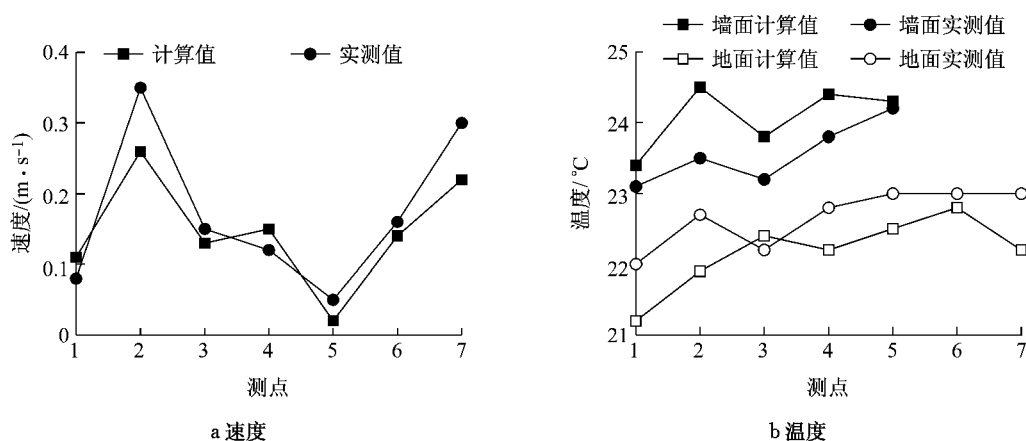


图4 各测点温度、速度模拟结果与实测值对比

Fig.4 Simulation and test results contrast of temperature and velocity

$(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 墙面平均值为 $1.38 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 总平均值为 $1.31 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$. 显然, 在原系统的分布式均匀排风主导的通风方式下, 空气流速低、湍流水平低, 热空气未能与地面和墙面进行充分热交换. 诱导射流作用下, 近壁面流速和湍流被强化, 地面冲击射流由于距离原因, 射流末端动量衰减较大, 但平均表面对流传热系数仍可达 $5.38 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 墙面平均值为 $6.62 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 总平均值为 $5.78 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$.

图5和6给出了原通风系统和射流作用下的地下空间内表面温度分布. 原通风系统下表面温度大范围低于空气露点温度, 地面平均值为 22.1°C , 墙面平均值为 23.9°C ; 地面温度大多处于结露范围内, 而墙面结露状况好于地面. 在射流强化作用下效果很明显, 地面温度平均值为 24.6°C , 墙面平均值为 25.4°C , 表面温度大多高于露点温度, 仅有小部分温度仍低于露点温度.

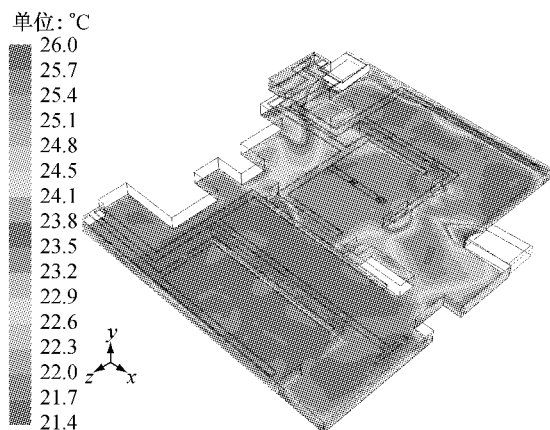


图5 原通风系统下地下空间内表面温度分布

Fig.5 The underground space inner surface temperature distribution of original ventilation system

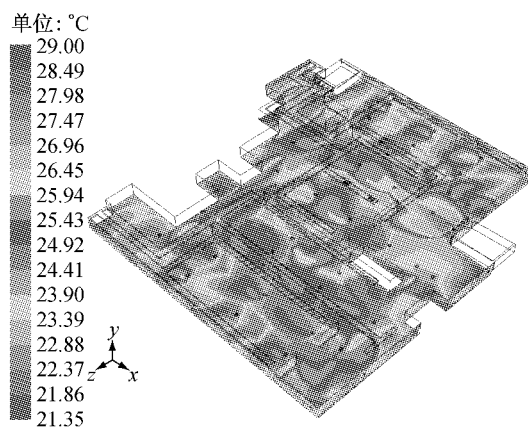


图6 射流强化通风作用下地下空间内表面温度分布

Fig.6 The underground space inner surface temperature distribution of jet strengthening ventilation system

为直观判断有无诱导射流时的地下车库表面结露情况, 定义一个表面结露参数为 $(\text{表面温度} - \text{露点温度}) / \text{露点温度}$. 其值小于零表明极可能存在结露, 且绝对值越大结露越严重. 图7和8给出了原通风系统和射流强化作用下的地下空间表面结露参数分布. 显然, 原通风系统下, 地面的结露范围很大, 地面结露参数平均值为 -0.05 , 墙面平均值为 0.01 , 总平均值为 -0.04 ; 而诱导射流作用下, 地面平均值为 0.03 , 墙面平均值为 0.09 , 总平均值为 0.04 , 结露范围大幅减小. 上述结果表明, 诱导射流大幅提高了车库内表面的对流传热强度, 使表面温度提升明显, 大部分区域移出了空气露点范围, 诱导射流在湿热季改善地下空间结露效果是显著的.

为进一步分析诱导射流改善地下空间表面结露的效果, 先将湿热季土壤温度受气象作用按保守考虑, 取围护结构 2 m 远处为恒温 (取值越小, 则认为土壤热惯性体越大; 实际上, 湿热季地下空间外围土

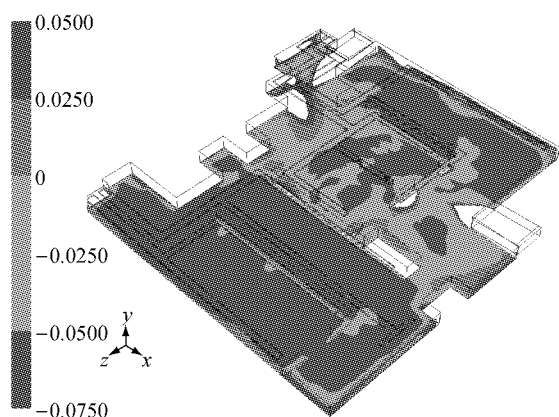


图7 原通风系统下内表面结露参数分布

Fig.7 The inner surface dewing parameters distribution of original ventilation system

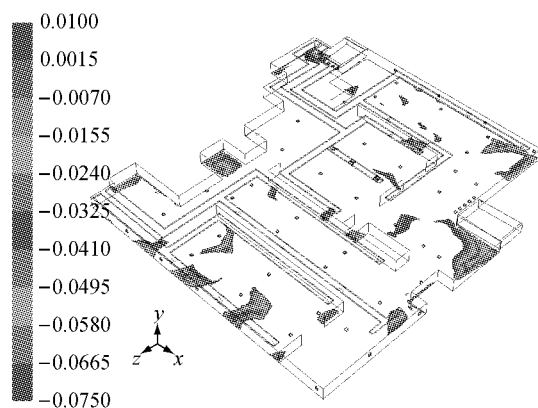


图8 射流强化通风作用下内表面结露参数分布

Fig.8 The inner surface dewing parameters distribution of jet strengthening ventilation system

壤一般超过 2 m 传热深度),按上海地区地质条件取 18℃;以地下车库地面为分析对象,按照“200 mm 厚地面混凝土+2 m 厚土壤”导热体系,以“混凝土内表面第三类边界+土壤外缘第一类边界”,可计算获得不同空气温度、对流传热系数下混凝土表面的温度。如图 9 所示,在不同表面对流传热系数下(为建筑环境常规范范围),地表温度与空气温度成线性关系;在对流传热系数从 $1.00 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 增大至 $5.00 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 时,地表温度提升显著;而对流传热系数再继续增大,则效果不明显。结合图 10 所示上海市典型气象年露点温度变化情况,湿热季露点温度 20~26℃ 占据较大范围;若地表对流传热系数为较小的 $2.00 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$,诱导射流空气温度 28.2℃ 以上可抑制地表结露发生;若对流传热系数达到 $5.00 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$,则空气温度 27.0℃ 即可抑制结露发生;再增大到 $7.00 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$,

则空气温度 26.8℃ 可抑制结露发生,相比对流传热系数 $5.00 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 时,改善效果不明显。上述分析表明,应用诱导射流方式使地表对流传热系数从 $1.28 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 提升到 $5.38 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$,对提高地表温度效果显著,处于地下空间表面“强化对流”提升表面温度的“高效”范围。另外,由于一天内室外空气含湿量变化小,即露点温度变化小,可利用上述分析结果在白天干球温度高时段增加通风量以减少结露。

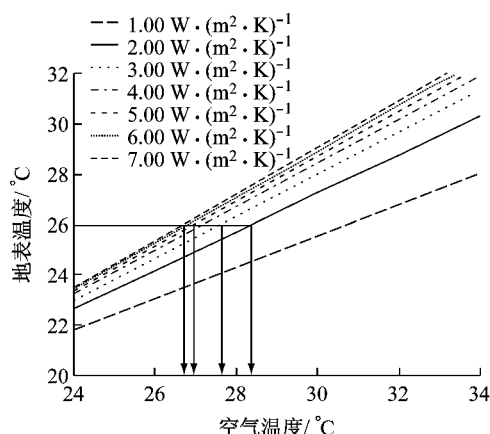


图9 地下空间地表温度随空气温度变化

Fig.9 The underground space temperature variation with air temperature

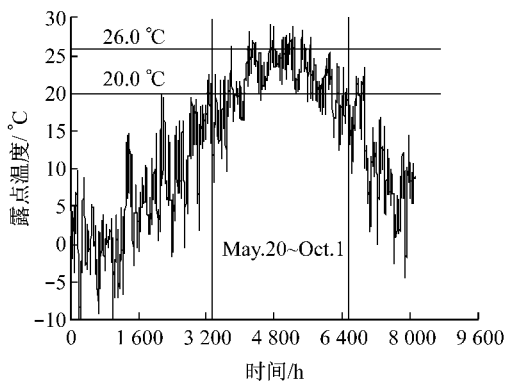


图10 典型气象年空气露点温度变化(上海)

Fig.10 The temperature variation of air dew in typical meteorological year (Shanghai)

3.3 CO 污染情况改善

对地下车库 CO 质量浓度分布情况进行了数值模拟,并比较了原通风系统下和诱导射流下库内 CO 质量浓度分布情况,着重分析人体呼吸区高度的情况。图 11 和 12 给出了两种通风气流方式下人体呼吸区高度上(取 $y=1.6 \text{ m}$)的 CO 质量浓度分布结果。原通风方式下,离进风通道较远的车库内部区域存在较大范围的超标,即 CO 质量浓度大于 125

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;而在诱导射流作用下,即使通风量没有增加,由于其气流“推拉”作用使主要通道的质量浓度值降至合理范围.图 13 给出呼吸区高度上,车库内 x 坐标方向上 $y=1.6 \text{ m}$ 高度处直线上 CO 质量浓度结果的对比.结果表明,原有排风主导通风方式下,远离进风通道的呼吸区 CO 质量浓度较大,较多区域超标(即大于 $125 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$);诱导射流使车库内的污染物质

量浓度由进风随距离呈增加趋势,在近机房排风口处积聚(图 12 圆圈处积聚,以及图 13a 中 $x < 20 \text{ m}$ 范围积聚),积聚影响范围小于原通风方式;进风通道较近的气流贯穿区,两种方案下 CO 质量浓度分布无明显差异.诱导射流在改善湿热季地下车库表面结露的同时,能显著降低车库内大部分区域的 CO 浓度水平,达到了通风系统改造设计的双重目标.

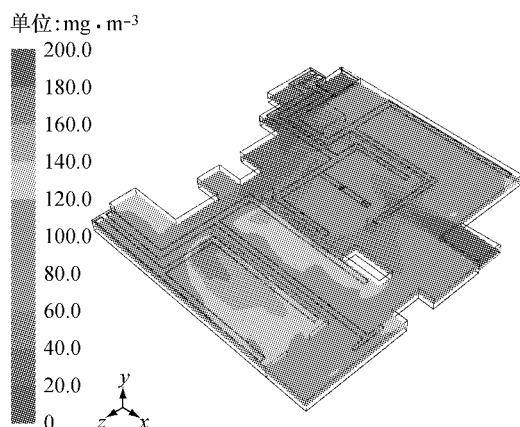


图 11 原通风系统下呼吸区高度 CO 质量浓度

Fig. 11 CO mass concentration in breathing zone of original ventilation system

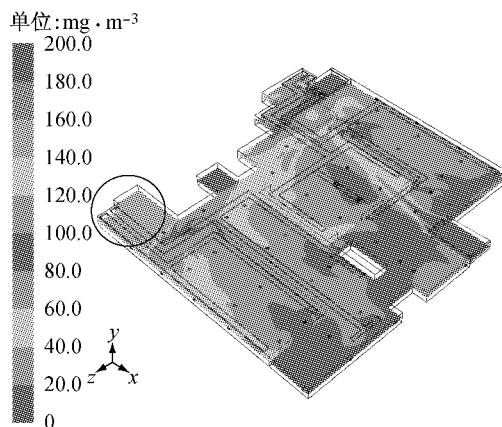


图 12 射流强化通风作用下呼吸区高度 CO 质量浓度

Fig. 12 CO mass concentration in breathing zone of jet strengthening ventilations system

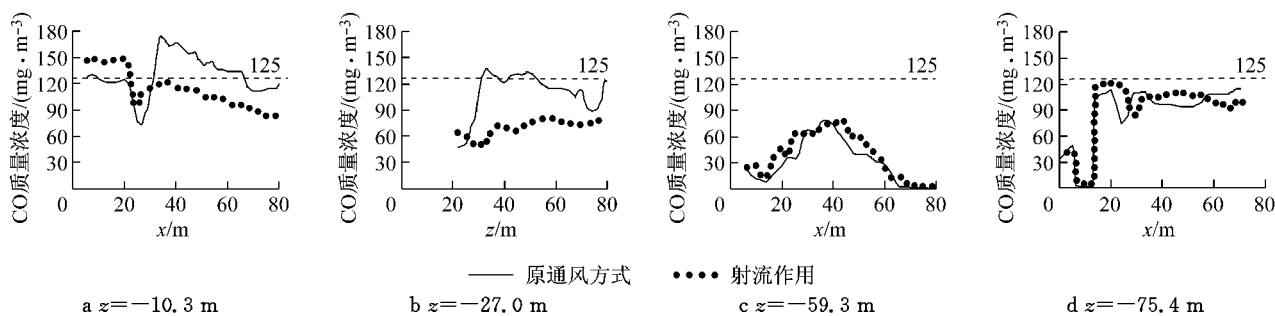


图 13 呼吸区高度 CO 质量浓度值对比(离地 1.6 m 高的沿 x 坐标方向的线上)

Fig. 13 CO mass concentration contrast in breathing zone (x coordinates, 1.6 m high from the ground)

4 结语

本文针对分布式均匀排风主导、自然进风贯穿区域小的某纵深型大型地下车库湿热季内表面的严重结露问题,改进设计了一套诱导射流系统,通过增强近壁流速及湍动水平提升表面对流传热系数和表面温度,显著减少了表面结露区域.研究发现,本文设计的诱导射流系统在测试条件下可提高地表温度 2.5°C 左右,并实现 95% 以上表面区域无结露.通过典型年气象条件下的扩展分析得到,按照“200 mm 厚地面混凝土+2 m 厚土壤”导热体系,应用诱导射

流方式使地面对流换热系数从 $1.28 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 提升到 $5.38 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$,处于地下空间表面“强化对流”提升表面温度的“高效”范围,而再加大射流动量提升对流传热系数则递增效果衰减.分析还表明,在白天干球温度高的时段增加通风量,配以诱导射流的对流强化,对减少结露发生具有较好效果.另外,诱导射流在改善湿热季地下车库表面结露同时,能显著降低车库内大部分区域 CO 浓度水平,将污染“推拉”至特定区域,达到诱导射流技术应用的双重目标.

特定空间条件和有限通风条件下地下空间结露防治是一个复杂的问题,在南方地区湿热季较为典

型。本文研究结论可为相关地下空间的通风防结露提供依据和参考。需要指出的是,诱导射流不能完全解决湿热季大型地下车库的表面结露问题,当露点温度极端高时,或当地下空间湿量来自围护结构大规模渗透和内部蒸发时,则需采用隔湿及其他主动除湿技术。

参考文献:

- [1] Straube J F. Moisture in buildings [J]. ASHRAE Journal, 2002, 44(1): 15.
- [2] 何开远,樊洪明,赵耀华. 地下车库诱导式通风与风管式通风系统的数值模拟分析[J]. 建筑科学, 2008, 24(10): 85.
HE Kaiyuan, FAN Hongming, ZHAO Yaohua. Numerical simulation analysis of inductive ventilation and duct ventilation in underground parking[J]. Building Science, 2008, 24(10): 85.
- [3] 付正惠. 地下空间热环境与空气质量的评价[J]. 地下空间, 1997, 17(1): 37.
FU Zhenghui. Evaluation of thermal environment and air quality of the underground space[J]. Underground Space, 1997, 17(1): 37.
- [4] 赵平歌. 地下建筑的防潮除湿研究[J]. 地下空间与工程学, 2007, 3(6): 987.
ZHAO Pingge. Study on moisture proofing and dehumidifying of underground structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 987.
- [5] 张鹏飞,罗清海,王衍金,等. 衡阳市地下空间热湿环境分析[J]. 环境卫生工程, 2011, 19(6): 9.
ZHANG Pengfei, LUO Qinghai, WANG Yanjin, et al. Temperature and humidity in underground space of Hengyang City[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2011, 19(6): 9.
- [6] 魏代晓,郑立红,马立. 地下工程除湿系统防湿与控湿设计[J]. 制冷与空调, 2011, 25(5): 459.
WEI Daixiao, ZHENG Lihong, MA Li. Anti and control for the design of dehumidification system of underground construction [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(5): 495.
- [7] 潘志信,王雪锦,刘东,等. 地下车库诱导通风射流及风口的计算[J]. 暖通空调, 2007, 37(7): 79.
PAN Zhixin, WANG Xuejin, LIU Dong, et al. Calculation of inductive ventilation jet and its nozzle for underground garages [J]. HV & AC, 2007, 37(7): 79.
- [8] 鲁文,周传辉. 喷流诱导通风系统数值模拟的模型选择[J]. 制冷空调与电力机械, 2009, 30(5): 52.
LU Wen, ZHOU Chuanhui. Model selection in numerical simulation of jet inductive ventilation system[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2009, 30(5): 52.
- [9] 吴靖. 诱导通风系统用于地下车库排烟的数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(8): 667.
WU Jing. Numerical simulation about smoke extraction of underground garage with inductive ventilation system[J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(8): 667.
- [10] 赵金辉,谭羽非,王思赢,等. 贴附射流解决游泳馆结露问题的研究[J]. 低温建筑技术, 2008, 30(4): 115.
ZHAO Jinhui, TAN Yufei, WANG Siying, et al. Study of wall-attached-jet way affecting the natatorium condensation [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008, 30(4): 115.
- [11] 唐春丽,李红兰,张东辉. 射流送风对地下景观内部湿环境的改善[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版, 2011, 25(5): 443.
TANG Chunli, LI Honglan, ZHANG Donghui. Jet air to improve the wet environment in underground landscape[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 25(5): 443.
- [12] Kunzel HM. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope[J]. Solar Energy, 2005, 78(4): 554.
- [13] Aelenei D, Henriques FMA. Analysis of the condensation risk on exterior surface of building envelopes[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(10): 1866.
- [14] Li K S, Zhang X, Gao J. Experimental investigation of hygrothermal parameters of building materials under isothermal conditions[J]. Journal of Building Physics, 2009, 32(4): 355.
- [15] 李晓冬,岳峻岷,陆亚俊,等. 诱导通风系统设计方法初探[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(7): 1134.
LI Xiaodong, YUE Junmin, LU Yajun, et al. Preliminary study on inductive ventilation system design method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(7): 1134.
- [16] 李晓冬,岳峻岷,陆亚俊,等. 地下车库中诱导通风方式的数值模拟[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2003, 19(5): 604.
LI Xiaodong, YUE Junmin, LU Yajun, et al. Study on application of inductive ventilation system in underground parking [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2003, 19(5): 604.