

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-493-08

某动车检修库空调与风扇 联合运行室内热环境数值模拟研究

范相慧¹ 潘国峰² 舒良平² 袁媛³ 余涛^{1,4}

- (1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;
2. 广东迦南通用设备有限公司 佛山 528200;
3. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031;
4. 天府永兴实验室 成都 610213)

【摘要】 动车检修库内列车散热量大, 夏季库内温度高, 严重影响作业人员的身心健康和作业效率。以成都某动车检修库为研究对象, 建立其数值计算模型, 模拟分析夏季自然通风、空调独立运行及空调和风扇联合运行工况下库内热环境分布。结果表明: 自然通风工况下各工作面空气平均温度超过 32℃ 的区域达 69.2%, 湿黑球温度超过 30℃ 的区域为 25.6%, 检修环境较为恶劣; 空调开启后使得库内热环境整体得到改善, 各工作面空气温度超限区域较自然通风最高降幅为 0.6℃, 湿黑球温度超限区域为 17.9%; 空调和风扇联合运行使得库内热环境得到有效控制, 各工作面温度超限区域降至 15.4%, 湿黑球温度超限区域仅为 7.7%, 库内中部区域热环境得到显著改善。

【关键词】 动车检修库; 热环境; 空调; 吊扇; 联合运行
中图分类号 TU83 文献标志码 A

Numerical Simulation Study on Indoor Thermal Environment with Combined Operation of Air Conditioning and Fans in an Electric Multiple Unit Maintenance Depot

Fan Xianghui¹ Pan Guofeng² Shu Liangping² Yuan Yuan³ Yu Tao^{1,4}

- (1.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;
2.Guangdong Jianan General Equipment Co., Ltd, Foshan, 528200;
3.China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031;
4.Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu, 610213)

【Abstract】 The heat dissipation from trains within the EMU (Electric Multiple Unit) maintenance depot is substantial, leading to significantly elevated indoor temperatures during summer. This severely impacts the physical and mental well-being of maintenance personnel, as well as their operational efficiency. This study focuses on an EMU maintenance depot in Chengdu, establishing a numerical simulation model to analyze the thermal environment distribution under three operational conditions: natural ventilation, standalone air conditioning operation, and combined operation of air conditioning and ceiling fans. The results indicate that under natural ventilation conditions, 69.2% of the working areas experience an average air temperature exceeding 32℃, while 25.6% of the areas have a wet-bulb globe temperature (WBGT) exceeding 30℃, indicating a harsh maintenance

environment. When the air conditioning system is activated, the overall thermal environment within the depot improves significantly. The areas exceeding the air temperature limit are reduced by up to 0.6°C compared to natural ventilation, and the areas exceeding the WBGT limit decrease to 17.9%. The combined operation of air conditioning and ceiling fans further enhances the thermal environment, reducing the areas exceeding the air temperature limit to 15.4% and those exceeding the WBGT limit to only 7.7%. Notably, the thermal conditions in the central area of the depot are markedly improved.

【Keywords】 EMU maintenance depot; Thermal environment; Air conditioning; ceiling fan; Combined operation

0 引言

随着我国铁路事业的蓬勃发展,越来越多的高铁动车投入运营,动车检修库的数量也日益增加。作为车辆停放、检查、整备、探伤及维修的管理中心,列车通电检修过程中空调冷凝器大量散热,夏季动车检修库室内最高温度可达 40°C 以上^[1]。而高温闷热的工作环境会加剧体力消耗,引发中暑事件^[2],同时影响到作业效率,进而危及动车组检修质量及运行安全,故改善动车检修库内部热环境非常重要。国内外学者提出了自然通风+机械送风+吊扇+局部壁扇+西窗百叶外遮阳^[3]、移动式局部空调^[4]、蒸发冷却系统^[5]、工业吊扇通风系统增设排风系统^[6]以及带有辅助机械风扇的局部冷却系统^[7]等不同优化降温方案进行相关研究,但未考虑降温系统复杂且能耗高等问题。空调与风扇联合运行降温方式在改善室内热环境的同时节能效果显著,目

前在居住建筑及公共建筑中已有部分研究^[8-10],但尚无在动车检修库独特热环境中的应用研究。

本文以成都某动车检修库为研究对象,采用 CFD 数值模拟方法,对自然通风、空调独立运行以及空调与吊扇联合运行工况下检修库内热环境分布进行对比分析,为我国南方地区夏季动车检修库室内热环境保障提供技术依据。

1 工程概况

动车检修库位于夏热冬冷地区,主要负责动车组一、二级检修、临修、专项修等任务,含 12 条检修线。检修库尺寸为 $468\text{m}\times 108\text{m}\times 12.6\text{m}$,其平面图、剖面图如图 1、图 2 所示。库内检修轨道之间有 6 列多联机空调,每列 32 台;有 3 列小吊扇,每列 25 台;2 列大吊扇,每列 17 台。



图 1 动车检修库平面图

Fig.1 Floor plan of the EMU maintenance depot

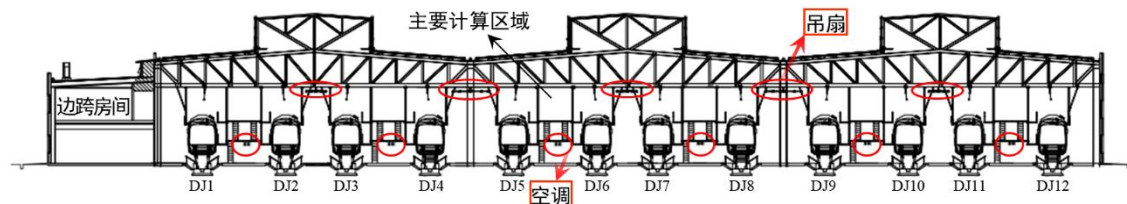


图 2 动车检修库剖面图

Fig.2 Cross-sectional view of the EMU maintenance depot

根据动车检修工作要求,库内设三层作业平台,地面为一层作业平台,二层作业平台距离地面

2.3m, 三层作业平台距离地面 4.6m。

2 数值计算模型

2.1 数值模型建立

由于检修库体量较大,且在西南东北方向上对称,本文选取1/2库内区域进行具体分析,数值模型如图3所示。计算模型尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=234\text{m}\times108\text{m}\times12.6\text{m}$ 。主要开口为门洞以及屋顶通风天窗,门洞尺寸为 $6.8\text{m}\times4.2\text{m}$,共12个。库内停放车型多为CRH1A型,均按照8节车厢为一个编组进行研究,按照 $210\text{m}\times3.36\text{m}\times4.05\text{m}$ 的尺寸简化车体。每台空调有三个直径为 0.18m 的圆形喷口送风,回风口尺寸为 $0.8\text{m}\times0.4\text{m}$,距地面高度为 2.5m 。库内每列大小吊扇交错布置,水平方向上均

匀分布,垂直方向上距地面 8.2m ,直径分别为 2.4m 、 4.2m 。

为便于计算,对现有物理模型做出相应的简化与假设,具体如下:

(1) 假设库内气体流动为不可压缩流体流动且符合 Boussinesq 假设;

(2) 忽略空调内部的流场,仅对送、回风口进行建模设置;

(3) 忽略吊扇支架等部件的影响,仅对吊扇的叶片进行建模;

(4) 动车检修库靠边跨房间的内墙视为绝热壁面。

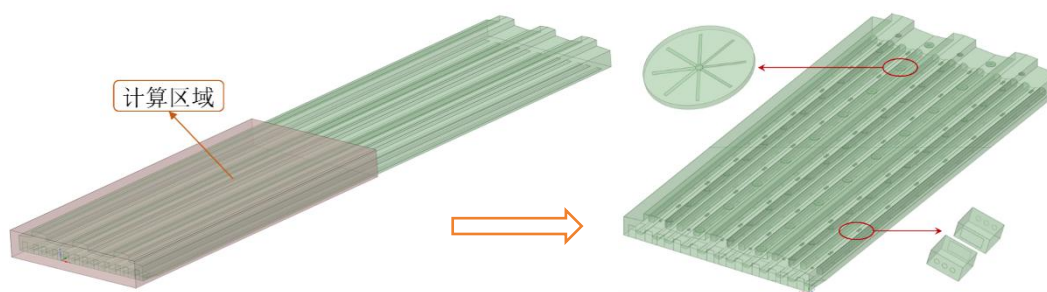


图3 动车检修库数值模型

Fig.3 Numerical model of EMU maintenance depot

2.2 边界条件

库内得热包括围护结构传热、太阳辐射得热、人员、灯光及设备得热,车体表面散热,动车检修时的空调散热。本文在模拟不同工况检修库日间热环境时主要考虑围护结构传热、天窗太阳辐射得热和列车检修时的空调冷凝器散热^[1]。其中围护结构除与边跨房间相连的内墙和地面外,均采用工业建筑现场实测数据,边界类型均选择定壁温,外墙设定为 33°C ,透明屋顶设定为 37.8°C ,非透明屋顶设定为 34.1°C ^[12]。天窗太阳辐射得热设置在地面上,热流密度为 $30.95\text{W}/\text{m}^2$ 。库内多停放CRH1型动车,考虑最不利工况下库内停满动车,中间10列动车组空调系统均处于通电检修状态。冷凝器排热布置于列车底部,每列动车组散热 686.4kW 。库内多联机空调单台额定制冷量为 8.4kW ,循环风量为 $1800\text{m}^3/\text{h}$ 。

风扇旋转流体域采用多重参考系(MRF)进行求解计算。多联机空调送风口、列车冷凝器出风口均设置为速度入口,多联机空调回风口、列车冷凝器排热回风口均设置为速度出口,检修库库门设置为压力入口,通风天窗设置为压力出口,靠近东北

方向检修库1/2处横截面设置为对称面。

2.3 网格划分

采用 ANSYS Meshing 软件对模型进行非结构网格划分,对空调送/回风口、列车冷凝器送/回风口、吊扇扇叶、旋转域、动车组以及门窗位置均进行局部加密。检修库基础尺寸为 0.8m ,空调送风口尺寸最大为 0.02m ,回风口尺寸最大为 0.06m ,增长率为1.2,曲率法向角为 15° ,吊扇旋转域尺寸最大为 0.6m ,局部加密均设置捕获曲率及捕捉邻近度,整体网格生成目标偏度控制设置为0.8,模型网格总数约2391W,模型网格划分细节如图4所示。

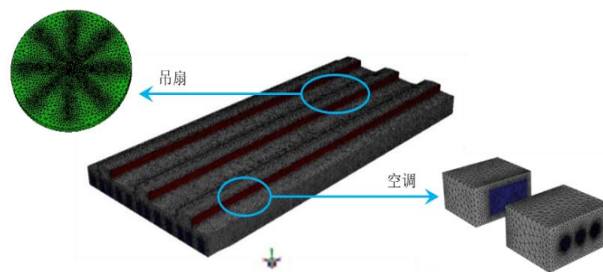


图4 数值模型网格图

Fig.4 Grid diagram of the numerical model

2.4 模拟工况

本文将空调与风扇联合运行工况对动车检修库内热环境的改善情况与自然通风工况以及空调独立运行工况进行对比分析，计算工况如表 1 所示。

表 1 模拟工况表

Table 1 Simulated working conditions

工况	工况描述
1	DJ1~DJ12 全线停车; DJ2~DJ11 通电检修; 仅自然通风对库内热环境进行通风降温
2	DJ1~DJ12 全线停车; DJ2~DJ11 通电检修; 在自然通风的基础上, 开启库内全部空调对库内热环境进行通风降温
3	DJ1~DJ12 全线停车; DJ2~DJ11 通电检修; 在自然通风的基础上, 开启库内全部空调和吊扇联合运行对库内热环境进行通风降温

3 模拟结果及分析

3.1 库内热环境评价指标

成都市夏季通风室外计算温度为 28.5℃, 根据《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019-2015) [13] 中相关规定, 动车检修库夏季室内工作地点最大允许温度为 32℃。为进一步综合评

价工作人员受高温工作环境的影响程度, 以及及时采取安全措施避免人体受到热损失, 本文在空气温度限值的基础上采用目前应用最广泛的 WBGT 指数 (湿黑球温度) 作为主要评价指标。根据《工作场所所有害因素职业接触限值第 2 部分: 物理因素》[14], 按照轻劳动, 接触时间为 100%, 检修库室内湿黑球温度限值为 30℃。室内湿黑球温度受空气温度、风速、相对湿度等因素影响, 我国研究者根据回归统计提出的直接计算湿黑球温度的关联表达式为 [15]:

$$WBGT = 0.8288t_a + 0.0613\bar{t}_r + 0.007377Q_s + 13.8297\phi - 8.7284v^{-0.0551} \quad (1)$$

式中: t_a 为空气温度, ℃; $\bar{t}_r$ 为辐射温度, ℃; Q_s 为太阳总辐射照度, W/m²; ϕ 为空气相对湿度, %; v 为空气速度, m/s。

3.2 工况一: 自然通风库内热环境分布

为分析检修工作区热环境, 对各区域进行编号, 如图 5 所示, A1~A2 为无空调和风扇布置工作区域, B1~B6 为布置有空调的检修工作区, C1~C5 为布置有吊扇的工作区域。其中仅 B1~B6 区域有二三层检修作业平台, A1~A2、C1~C5 区域工作人员频繁活动区域为一层作业空间。

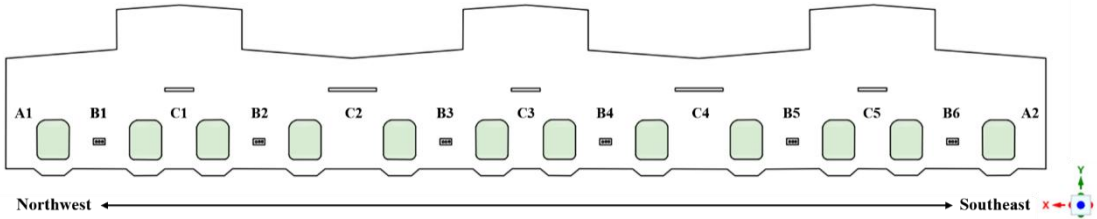
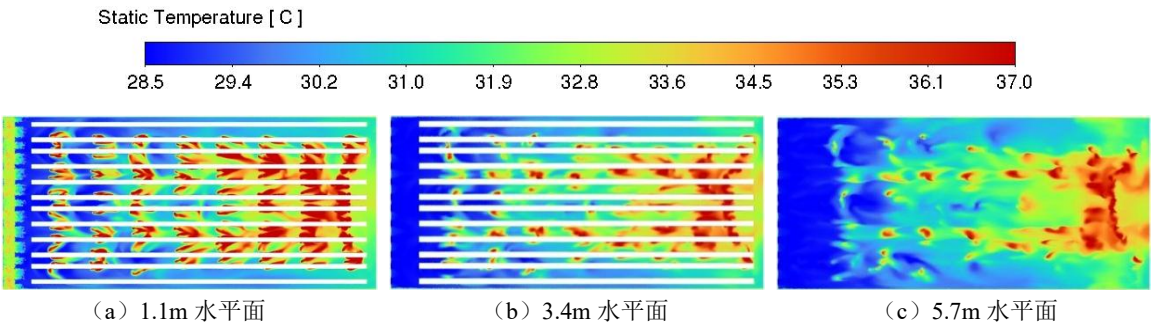


图 5 动车检修库工作区示意图

Fig.5 Schematic diagram of the working area of the EMU maintenance depot

取离作业平台 1.1m 高度处的水平面作为工作面进行分析。自然通风作用下各典型工作面、

B1~B6 纵截面及 C1~C5 纵截面温度分布云图如图 6 所示。



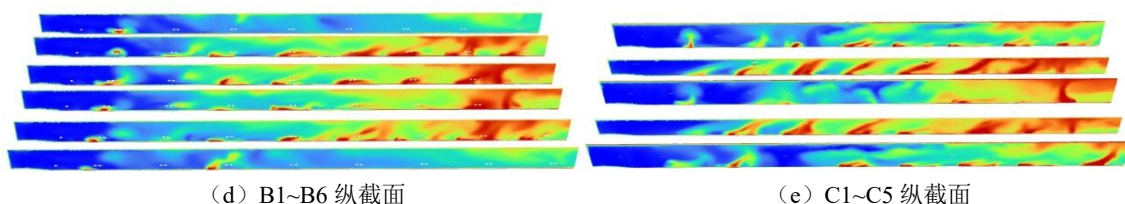


图 6 工况一检修库典型水平面、纵截面温度分布云图

Fig.6 Temperature contours at typical horizontal planes and longitudinal sections of the EMU maintenance depot in working condition 1

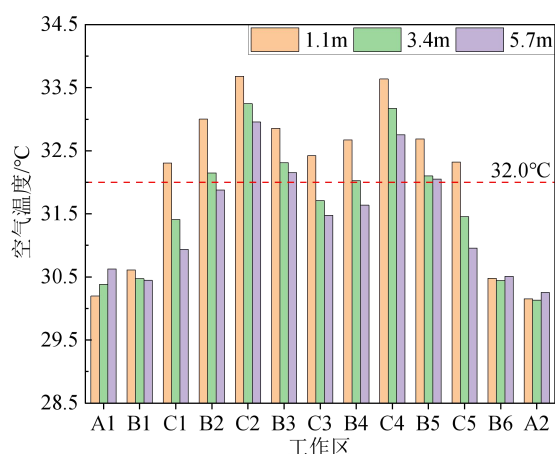


图 7 工况一温度分布图

Fig.7 Temperature distribution diagram for operating condition 1

本文设定 0~6.5m 高度空间为工作区, 工作区平均温度为 31.7℃, 室内外温差 3.2℃, 热压作用下, 室外空气通过库门流入库内, 从屋顶的通风天窗排出, 形成稳定的热压通风。库内进风量为

400.4m³/s, 换气次数为 4.5h⁻¹。从工况一 (见图 6) 典型截面温度分布云图可以看出, 靠近库门侧, 由于大量新风不断流入, 加强了入口侧区域的空气流动, 库内温度随离库门距离的增加而增加。同时从纵截面可以看出, 由于库内热量经冷凝器排风口排出, 从动车底部散发开来, 热量在浮升力和空气流动的作用下向检修库顶部流动, 呈现出明显的热羽流现象。

由于动车空调冷凝器位于车体底部, 1.1m 高度工作面处于冷凝器排热区, 有 69.2% 的区域温度超过了 32℃, 最高温度为 33.7℃; 3.4m 工作面有 46.2% 的区域温度超过了 32℃, 最高温度为 33.2℃; 5.7m 工作面有 30.8% 的区域温度超过了 32℃, 最高温度为 33.0℃。自然通风作用下库内热环境较差, 需增加降温措施以改善库内热环境。

3.3 工况二: 空调独立运行库内热环境分布

开启库内所有空调, 各典型工作面、B1~B6 纵截面及 C1~C5 纵截面温度分布云图如图 8 所示。

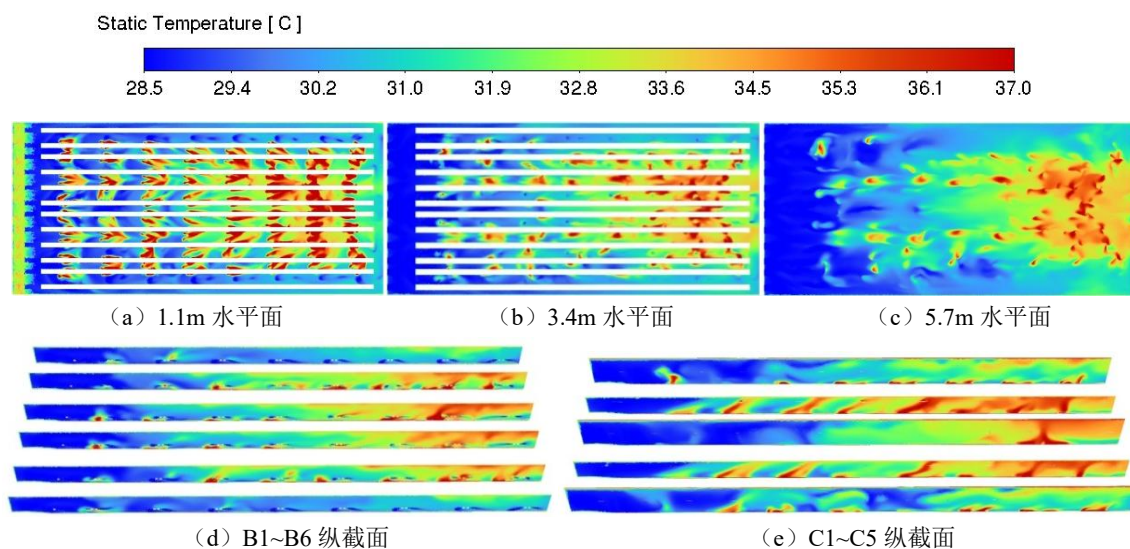


图 8 工况二检修库典型水平面、纵截面温度分布云图

Fig.8 Temperature contours at typical horizontal planes and longitudinal sections of the EMU maintenance depot in working condition 2

工况二开启空调后,库内热环境整体得到了改善,各工作面温度明显降低。相较于自然通风工况,B1~B6 区域热量堆积面积显著降低。

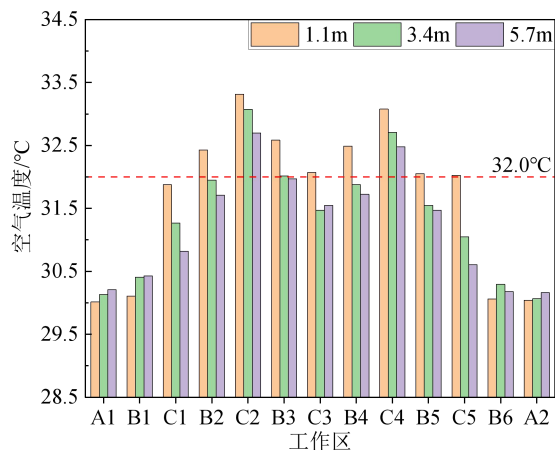


图 9 工况二温度分布图

Fig.9 Temperature distribution diagram for operating condition 2

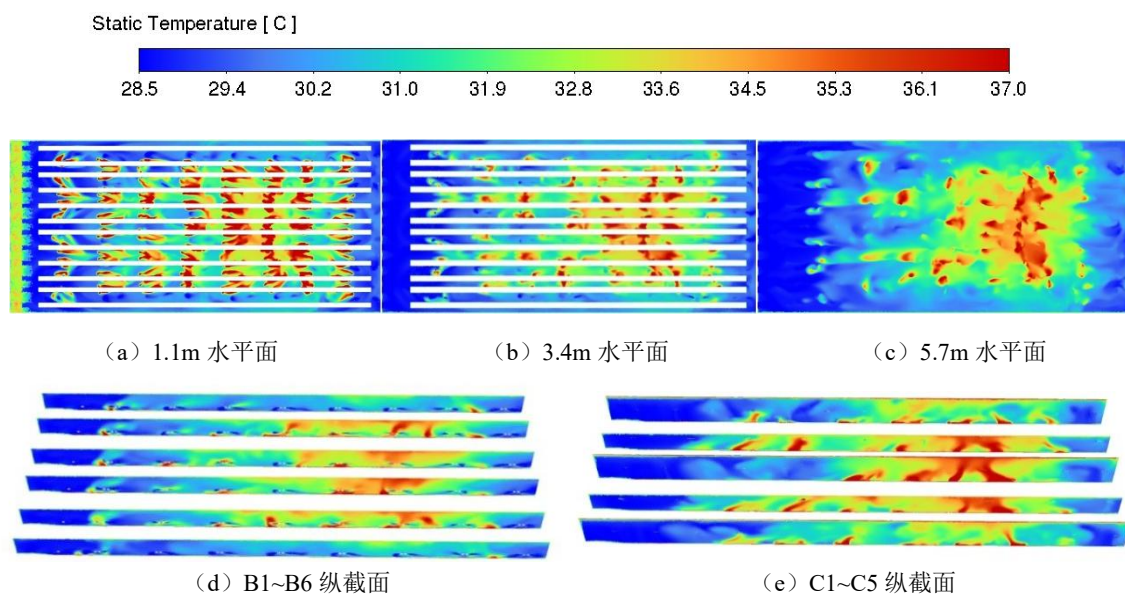


图 10 工况三检修库典型水平面、纵截面温度分布云图

Fig.10 Temperature contours at typical horizontal planes and longitudinal sections of the EMU maintenance depot in working condition 3

工况三中风扇的开启增强了空气的混合和流动,各层工作面热空气向中部区域扩散面积减小。对比图 8 (d) 和图 10 (d),可看出距库门距离最远的中部区域温度分布得到显著改善,风扇对空气的扰动使得空调冷量更为均匀地产生了降温效果。

从工况三各工作面温度分布可以看出,1.1m 工作面有 38.5%的区域温度超过了 32℃,最高温度为 32.9℃,较工况一最高温度降低 0.8℃,较工况

从工况二各工作面温度分布可以看出,1.1m 工作面有 61.2%的区域温度超过 32℃,最高温度 33.3℃,较自然通风最高温度降低 0.4℃;3.4m 工作面有 23.1%的区域温度超过 32℃,最高温度 33.1℃;5.7m 工作面有 15.4%的区域温度超过 32℃,最高温度 32.7℃。相较于工况一,由于空调机的布置高度为 2.5m,3.4m 工作面温度超限区域降幅最大,三个工作面温度超过 32℃区域从 48.7%降至 33.3%,但仍有部分区域超过限值。

3.4 工况三:空调风扇联合运行下库内热环境分布

空调和风扇联合运行工况中,在工况二基础上开启全部吊扇,其中大吊扇转速为 50RPM,小吊扇转速为 70RPM,作为工况三。各典型工作面、B1~B6 纵截面及 C1~C5 纵截面温度分布云图如图 10 所示。

二最高温度降低 0.6℃;3.4m 工作面有 23.1%的区域温度超过了 32℃,最高温度为 33.1℃;5.7m 工作面有 15.4%的区域温度超过了 32℃,最高温度为 32.7℃。相较于工况一,三个工作面温度超过 32℃区域从 48.7%降至 23.1%。其中温度超过夏季室内工作地点最大允许温度 32℃的区域主要集中在 C2 和 C4 区域以及 1.1m 工作面空调冷凝器排风口附近,其他区域温度均在 32℃以下,基本满足规范

要求。工作区平均温度为 31.3°C , 局部高温区域可进行短时间作业。

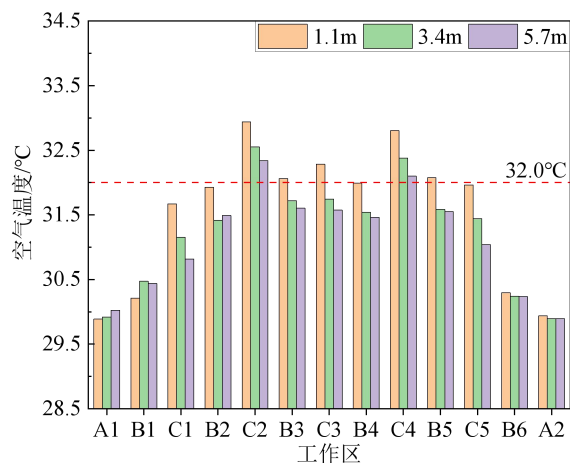
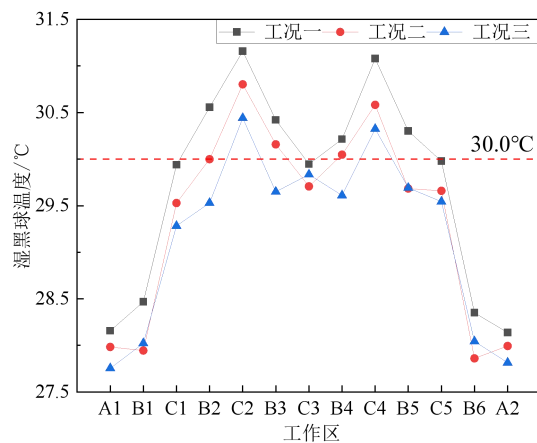
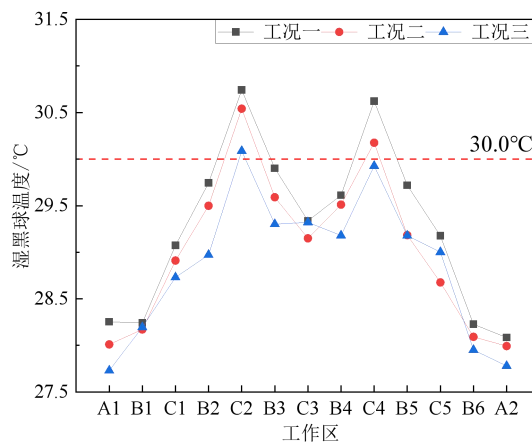


图 11 工况三温度分布图

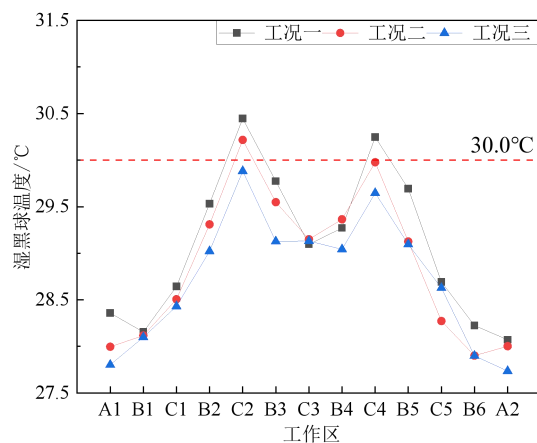
Fig.11 Temperature distribution diagram for operating condition 3



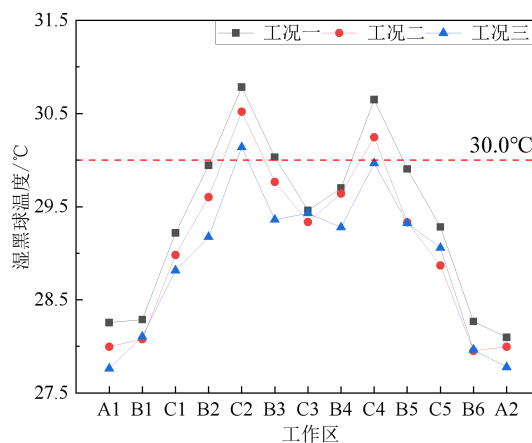
(a) 1.1m 水平面



(b) 3.4m 水平面



(c) 5.7m 水平面



(d) 各工作区整体

图 12 各工况湿黑球温度对比分布

Fig.12 Comparative distribution of WBGT under different working conditions

3.5 各工况湿黑球温度对比分析

本文以湿黑球温度限值 30°C 作为检修库热环境舒适性的评价标准。分别对三个工况下 1.1m、3.4m、5.7m 工作面以及各工作区整体的湿黑球温度进行对比分析, 如图 12 所示。

从三个工况下工作区的湿黑球温度对比分布图可以看出, 工作区整体湿黑球温度呈对称分布。空调开启后, 较工况一自然通风, 工况二湿黑球温度整体降低, 1.1m 水平面湿黑球温度最大降幅为 0.6°C , 随着工作面高度增加, 空调送风对湿黑球温度的影响逐渐降低。工况三吊扇全部开启后, 空调与吊扇的协同作用提高了整体空气的流动性、促进了库内空气分布的均匀性, 更好地优化了库内热环境, 仅 C2 区域一二层工作面和 C4 区域一层工作面湿黑球温度超过了 30°C , 最高湿黑球温度为 30.4°C , 库内热环境改善情况良好。工作区各工况湿黑球温度超限区域分别为 25.6%、17.9%、7.7%。

4 结论

本文建立了成都某动车检修库数值计算模型,分析了自然通风、空调独立运行及空调和风扇联合运行工况下库内热环境分布特征及降温效果,主要结论如下:

(1) 自然通风作用下,库内热环境较差,热量堆积在检修库中部区域,距库门距离最远处温度和湿黑球温度均超过规范限值,各工作面温度超限区域在 30.8%~69.2%之间,工作区湿黑球温度超限区域为 25.6%,需增设通风降温设施以改善库内热环境。

(2) 空调开启后,库内热环境得到明显改善,较自然通风工况各工作面温度超限区域降低至 15.4%~61.2%,温度最高降幅 0.6℃;工作区湿黑球温度超限区域降低至 17.9%,由于空调送出的冷空气向下运动,空调送风对各层工作面的湿黑球温度的影响程度随工作面高度的增加而降低。

(3) 空调和风扇联合运行作用下,库内热环境得到有效控制,各工作面温度超限区域较自然通风降低至 15.4%~38.5%,其中温度超限区域多集中在列车空调冷凝器排风口附近,工作区其余区域温度均在 32℃以下,基本满足规范要求。工作区湿黑球温度超限区域仅为 7.7%。空调和风扇的联合运行对库内中部区域热环境改善效果显著,促进了库内热环境分布的均匀性。

参考文献:

- [1] 曾现宏,于靖华,赵金罡,等.夏热冬冷地区动车检查库室内热环境测试研究[J].暖通空调,2021,51(S2):394-398.
- [2] 王荣华.关于广州动车段转向架检修库增设空调设施的探讨[J].铁道车辆,2018,56(10):40-41,5.
- [3] 赵金罡,田利伟,郭辉,等.动车检查库降温方式对比及优化研究[J].暖通空调,2022,52(S2):16-21.
- [4] 许力方.列车检修库移动式空调研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [5] Kowalski P, Kwiecień D. Evaluation of simple evaporative cooling systems in an industrial building in Poland[J]. Journal of Building Engineering, 2020,32: 101555.
- [6] 田利伟,郭旭晖,郭辉,等.盖下动车检修库工业吊扇通风效果分析[J].暖通空调,2020,50(S1):133-136.
- [7] Mei S J, Hu J T, Di L, et al. Thermal buoyancy driven flows inside the industrial buildings primarily ventilated by the mechanical fans: Local facilitation and infiltration[J]. Energy and Buildings, 2018,175:87-101.
- [8] 姚灵烨,杨小山,叶燕华.空调结合风扇策略对建筑空调能耗的影响[J].建筑科学,2017,33(4):15-22.
- [9] Mihara K, Sekhar C, Takemasa Y, et al. Thermal comfort and energy performance of a dedicated outdoor air system with ceiling fans in hot and humid climate[J]. Energy and Buildings, 2019,203:109448.
- [10] Chen W, Zhang H, Arens E, et al. Ceiling-fan-integrated air conditioning: Airflow and temperature characteristics of a sidewall-supply jet interacting with a ceiling fan[J]. Building and Environment, 2020,171:106660.
- [11] 邹磊,于靖华,郭辉,等.动车检查库库内热源特性实测与分析[J].制冷与空调,2022,36(3):390-395.
- [12] 陈思,余南阳.南宁某动车检修库夏季热环境实测与分析[J].制冷与空调,2020,34(6):707-710.
- [13] GB 50019-2015,工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑标准设计研究院,2015.
- [14] GBZ 2-2007,工作场所有害因素职业接触限值第2部分:物理因素[S].北京:人民卫生出版社,2007.
- [15] Dong L, Chen Q G. A correlation of WBGT index used for evaluating outdoor thermal environment[C]. Proceedings of International Conference of Human Environmental System. Tokyo, 1991.