

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20240066

置换通风对局部排风的影响及通风效率分析

林秀丽, 周雨虹, 柳静献

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 置换通风与移动式局部排风耦合的方式可改善大空间厂房非固定点位焊接烟尘的控制效果,但通风参数对控制效果的影响尚需明确. 本文通过数值模拟,探讨了局部排风罩口至焊接点距离、罩口风速、焊接点与置换送风口的相对位置等参数变化时,置换通风送风速度、角度对局部排风罩烟尘捕集效率的影响,并分析了耦合通风效率. 结果表明,送风角度为 0° (水平)时,置换送风速度越大对局部排风影响越大;局部排风罩口速度越大,距焊点越近,烟尘捕集效率受置换通风影响越小. 焊接点距送风口越近,局部排风受置换通风的影响越大,增大送风角度可减弱影响. 耦合通风效率高于单一置换通风效率,在15 min内可稳定到80%. 研究结果可为耦合通风系统设计和管理工作提供依据.

关键词: 烟尘控制; 置换通风; 局部排风; 耦合通风; 通风效率

中图分类号: X 962 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)10-0113-10

Influence of Displacement Ventilation on Local Exhaust Ventilation and Analysis of Ventilation Efficiency

LIN Xiu-li, ZHOU Yu-hong, LIU Jing-xian

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIN Xiu-li, E-mail: linxiuli@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The method of coupling displacement ventilation and mobile local exhaust ventilation can improve the control effect of welding fume generated at non-fixed points in a large-space workshop, but the influence of ventilation parameters on the control effect still needs to be clarified. The effects of air supply velocity and angle during displacement ventilation on the fume capture efficiency of the local exhaust hood were explored when parameters such as distance between local exhaust hood opening and welding point, air velocity at hood opening, and relative position between welding point and air supply outlet during displacement ventilation changed, and the coupled ventilation efficiency was analyzed. The results show that when the air supply angle is 0° (horizontal), a higher air supply velocity during displacement ventilation has a greater impact on the local exhaust ventilation. A higher air supply velocity at the local exhaust hood opening and a closer distance from the hood opening to the welding point mean that its fume capture efficiency is less affected by displacement ventilation. A closer distance from the welding point to the air supply outlet during displacement ventilation indicates a greater impact of displacement ventilation on local exhaust ventilation. Increasing the air supply angle can weaken the impact. The efficiency of coupled ventilation is higher than that of single displacement ventilation, which can be stabilized to 80% within 15 min. Research results can provide a basis for the design and management of the coupled ventilation system.

Key words: fume control; displacement ventilation; local exhaust ventilation; coupled ventilation; ventilation efficiency

焊接作为现代工业生产中不可缺少的基础加工作业,广泛应用于建筑工业、交通运输、机械

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKM20220352); 国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFC2503201).

作者简介: 林秀丽(1974—),女,辽宁抚顺人,东北大学副教授,博士生导师; 柳静献(1966—),男,河北元氏人,东北大学教授,博士生导师.

制造、汽车船舶、航空航天等领域^[1].焊接过程会产生大量的焊接烟尘,焊接人员长期超量接触烟尘,可能引发电焊工尘肺等职业病.通风除尘措施是降低作业环境焊接烟尘质量浓度和控制焊接烟尘扩散的有效途径^[2].传统的利用全面通风控制大空间非固定点位焊接烟尘的方法存在通风量大、控制效果不佳等问题.置换通风与移动式局部排风耦合的通风方式为大空间非固定点位焊接烟尘控制提供了新的思路.

目前,针对电焊烟尘治理问题的研究主要集中在单一的通风方式上^[3-5].全面通风中的置换通风是学者们探索较多的控制大空间厂房焊接烟尘的通风方式.Niemelä等^[6]通过对采样点空气污染物浓度进行测量,发现六价铬在工作区的浓度显著低于厂房上部,证明置换通风对于排出厂房内有害颗粒物的有效性;Wang等^[7]运用数值模拟方法对大空间焊接车间置换通风系统性能和污染物扩散进行研究,结果表明置换通风系统能够有效降低呼吸区域的污染物浓度,有利于为工人创造舒适的热环境;刘坚^[8]针对焊接烟尘的分层悬浮特性提出了分层模型,通过数值模拟方法对自然通风、置换通风和吹吸通风的效果进行比较分析,认为置换通风适用于排出焊接烟尘并调整车间热环境.

采用局部排风的方式进行固定点位焊接作业烟尘控制是比较成熟的技术.Shibata等^[9]通过数值模拟和实验方法探究适用小型封闭焊接空间的最佳通风条件;Flynn等^[10]的研究表明局部排风系统可以将焊接过程产生的颗粒物、锰及六价铬的浓度降低到相关标准水平之下,其中排风罩位置以及排气流量是影响局部通风排尘效果的关键因素;王庆刚^[11]对局部排风罩的空气动力

学特性进行了模拟分析并提出了排风罩的结构设计参数优化方案.可以看出,通过合适的参数设计,局部排风罩对于固定点位焊接烟尘的控制可以达到较理想的效果.

采用置换通风与移动式局部通风耦合的方式对于大空间厂房非固定点位焊接烟尘控制,充分利用两种通风方式的优点无疑是值得探索的通风方式.张雨^[12]对置换通风与局部排风作用下焊接厂房的通风效率进行初步模拟分析,得出耦合通风系统的通风效率要高于单一置换通风,但分析的参数较少;Shaptala等^[13]基于数学分析和计算机模拟提出将局部排气通风和厂房的全面通风结合起来,从而优化电焊生产通风的技术解决方案,但未对耦合通风效果进行具体分析.

综上所述,学者对于置换通风与局部排风耦合控制焊接烟尘的研究较少,置换通风对局部排风的影响尚有待进一步研究.本文采用数值模拟方法,以某高大焊接厂房夏季通风情况为研究对象,在分析单一置换通风效率的基础上,重点分析置换通风风速和角度对移动式局部排风罩烟尘捕集效率的影响,得出耦合通风系统最佳通风设计参数,为同类构筑物的焊接烟尘防治提供技术参考.

1 置换通风与局部排风耦合作用原理

置换通风与移动式局部排风耦合通风方式的原理如图1所示.焊接过程产生的烟尘部分被局部排风罩吸入罩内,没有吸入罩内的部分扩散到空气中,在置换风流的作用下向上运动,从顶部排风口排出.置换通风与局部排风二者相互配合实现最佳烟尘控制效果.

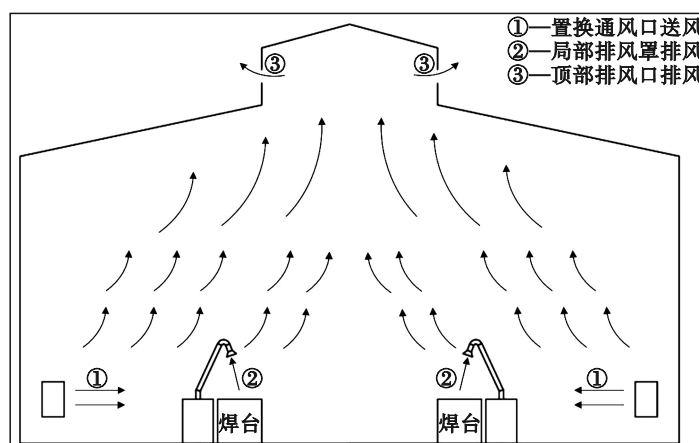


图1 置换通风与局部排风耦合原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coupling principle between displacement ventilation and local exhaust ventilation

2 数值方法

2.1 几何模型

本文以某车辆厂车体底座焊接厂房为实例进行研究,该厂房为多跨大空间厂房,跨宽 24 m,长 90 m,高 12 m.选取该厂房焊接作业部分区域建立几何模型.由于焊接作业对称布置,为减少

计算量,在宽度方向只建立一半,边界条件设置为对称边界,因焊接区域重复排列,将长度端的两侧面设置为周期性边界,即计算模型长宽高尺寸为 20 m×12 m×12 m.焊台尺寸为 1 m×1 m×1 m,将污染源简化为直径 0.04 m 的圆形散发面^[14].将送风筒简化为直径 1.2 m,筒高 0.8 m,安装高度 1 m 的侧面送风圆筒^[15].排风罩罩口直径 0.23 m,排风管道直径 0.1 m.几何模型如图 2 所示.

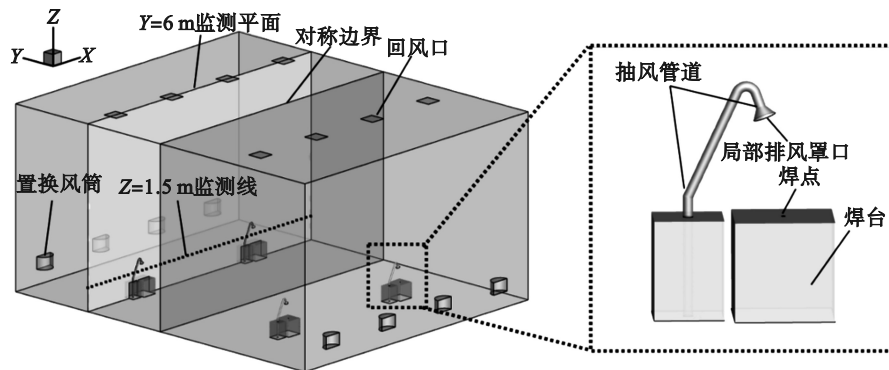


图 2 厂房几何模型

Fig. 2 Geometric model of workshop

2.2 数学模型

2.2.1 基本控制方程

1) 连续方程:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

2) 动量方程:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho \beta g_i (T_{\text{ref}} - T). \quad (2)$$

3) 能量方程:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_H. \quad (3)$$

式中: U_i 为 x_i 方向的速度, m/s; x_i 代表 3 个垂直坐标轴坐标, $i=1, 2, 3$; ρ 为空气密度, kg/m³; U_j 为 x_j 方向的速度, m/s; p 为空气压力, Pa; μ 为空气动力黏度, Pa·s; β 为热膨胀系数, 1/K; T_{ref} 为参考温度, K; T 为空气温度, K; g_i 为 i 方向的重力加速度, m/s²; h 为空气定压比焓, J/kg; S_H 为热源, W; λ 为空气热导率, W/(m·K); c_p 为空气比定压热容, J/(kg·K).

2.2.2 湍流模型

湍流的数值模拟方法有直接数值模拟、雷诺平均模拟和大涡数值模拟,在实际中应用较多的是雷诺平均模拟法^[16].雷诺平均模拟法中的标准

$k-\varepsilon$ 模型在大范围湍流流动中有合理的精度.本文模拟对象为高大焊接厂房的气流组织,厂房内湍流发展充分,故采用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行数值计算^[17].

2.2.3 离散相模型(discrete phase model, DPM)

DPM 是研究粒子在流场中运动状态和变化规律的一种有效方法^[18].本文先用稳态方法模拟气相流场,得到稳定的气流速度场和温度场后,采用 DPM 添加离散相颗粒物与气相耦合,模拟追踪颗粒物的非稳态流场.颗粒物的运动平衡表达式如下:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau} + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho} + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_{\text{therm}} + \mathbf{F}_s. \quad (4)$$

方程左侧表示每单位质量的惯性力, m/s², 其中 \mathbf{u}_p 是粒子速度矢量.方程右侧表示作用在粒子上的力,第 1 项代表 Stokes 曳力, m/s²; \mathbf{u} 是气体速度矢量;第 2 项代表重力和浮力, m/s²; ρ 为空气密度, kg/m³; ρ_p 为颗粒物密度, kg/m³; \mathbf{F}_b 为布朗力, m/s²; $\mathbf{F}_{\text{therm}}$ 为热泳力, m/s²; \mathbf{F}_s 为 Saffman 升力, m/s².

2.3 边界条件

本文模拟的基础条件是流体不可压缩,流体中的空气采用 Boussinesq 假设.流场总压 p_i 设置为 101 325 Pa,环境温度 T 设置为 300 K.壁面设

置为绝热、无滑移条件,使用标准壁面函数.置换送风口、回风口、排风罩抽风口和焊接热源的DPM边界条件类型均为逃逸(Escape),其他壁面均设置为捕集(Trap).具体参数设置见表1.

表1 边界条件及参数设置
Table 1 Boundary conditions and parameters setting

区域	边界类型	边界参数设置		离散相
		速度 $m \cdot s^{-1}$	温度 K	
置换送风口	速度入口	0.5,	300	逃逸
		1.0,		
		1.5,		
		2.0		
回风口	自由出口	—	—	逃逸
排风罩抽风口	速度入口	15,	300	逃逸
		20,		
		25		
排风罩罩口	内部界面	—	—	—
焊接热源	速度入口	0.5	1 500	逃逸
其他壁面	壁面	—	—	捕集

数值模拟时所选用的烟尘颗粒粒径 $2 \times 10^{-7} m$,质量流量 $7 \times 10^{-6} kg/s$ ^[18].为了研究方便将烟尘颗粒简化为球状,将颗粒从进口以面射流源形式注入计算区域.

2.4 网格划分与模拟有效性验证

使用Fluent Meshing软件对模型进行网格划分,网格采用多面体网格.设定全局网格尺寸后,采用曲率控制方法对置换送风口、排风罩处的网格进行局部加密,见图3.选取不同网格单元尺寸进行网格独立性分析,分别包含74万、85万和100万网格单元.以送风速度0.5 m/s为边界条件进行数值模拟,选择焊点上方($X=5 m, Y=6 m, 1 \leq Z \leq 12 m$)的速度值作为相关参数.图4为采用3种不同尺寸网格划分后模拟的速度分布,综合考虑计算机的性能和所需的模拟时间,选用74万数量的网格进行后续的模拟计算.

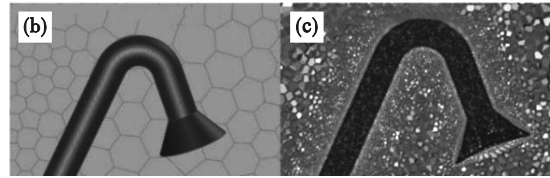
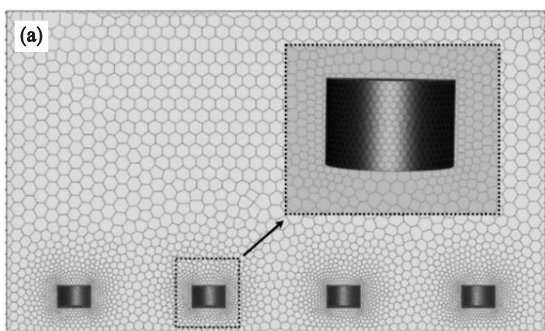


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh dividing

(a)一置换送风口面;(b)一局部排风罩面;
(c)一局部排风罩体.

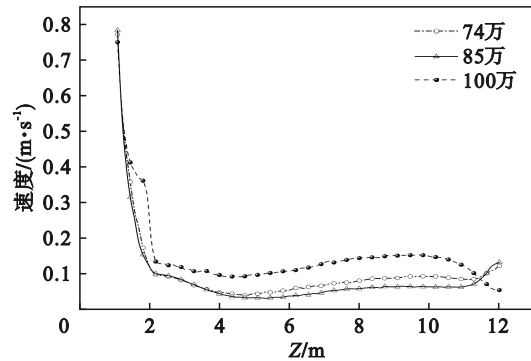


图4 网格独立性检验

Fig. 4 Mesh independence test

根据薛建伟^[18]现场实测的焊接烟尘质量浓度,以本文设定的数值模型对厂房内电焊烟尘质量浓度分布进行模拟有效性验证,现场测点布置如图5所示.将距焊台不同距离处焊接烟尘质量浓度的数值模拟值与现场测试值进行对比,结果如图6所示.可以看出,模拟的焊接烟尘质量浓度分布曲线与测试值呈现高度一致性,说明数值模型能够较为准确地模拟厂房内污染物的浓度分布情况,验证了模拟的有效性.

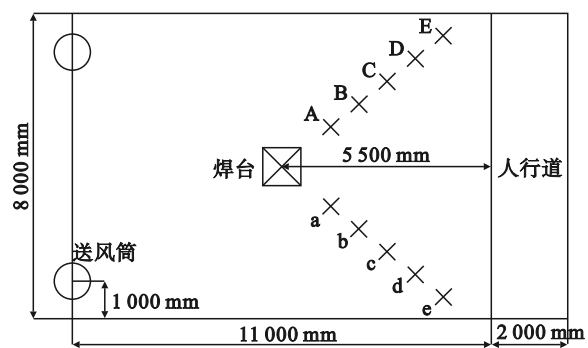


图5 现场测点布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of field measurement point arrangement

3 模拟结果与分析

3.1 单一置换通风方式下的通风效率

设置置换通风送风速度(简称置换风速)分别为0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s,在这4种工况下对厂房

置换通风效率进行模拟分析,时间为 30 min,颗粒持续释放,厂房通风效率如图 7 所示,计算如下:

$$\text{通风效率} = \frac{\text{回风口逃逸粒子数}}{\text{总散发粒子数}} \quad (5)$$

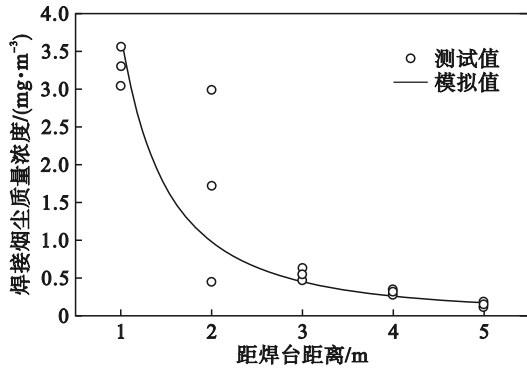


图 6 模拟有效性验证

Fig. 6 Simulation validity verification

从图 7 中可以看出,随着通风过程的进行,置换通风效率在前 5 min 快速增大,之后增速放缓. 置换风速越大,厂房通风效率越高. 但从整体来看,单一置换通风系统的通风效率普遍是较低的水平,置换风速为 0.5 m/s 时,通风 30 min 后,该通风系统的通风效率仅为 37%. 4 种工况中,置换风速为 2.0 m/s 时通风效率最高,在 54% 左右.

T/CWAN 0002—2018《焊接车间烟尘卫生标准》中规定,焊接车间空气中焊接烟尘的最高允许质量浓度为 4 mg/m³. 图 8 为 30 min 时 4 种工况

下车间 Y=6 m 平面烟尘质量浓度分布云图. 从图中可以看出,置换风速 0.5 m/s 时,车间上部空间焊接烟尘质量浓度较高,部分区域已经超过 4 mg/m³,焊接烟尘在车间上部集聚,无法有效排出. 此时车间中下层空间除了焊点上方烟尘质量浓度较高外,其余区域焊接烟尘质量浓度较低. 增大置换风速后,车间上部空间焊接烟尘质量浓度随着风速的增加而降低,中下层空间焊接烟尘质量浓度反而比风速为 0.5 m/s 时高一些,这是由于不断增强的置换风流将更多焊接烟尘带到中下层区域. 当置换风速为 2.0 m/s 时,整个车间焊接烟尘控制较好,可达到相关标准要求.

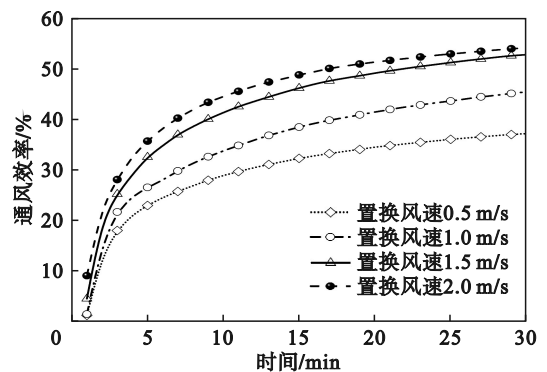


图 7 不同置换风速条件下厂房通风效率

Fig. 7 Ventilation efficiency of workshop under different air supply velocities

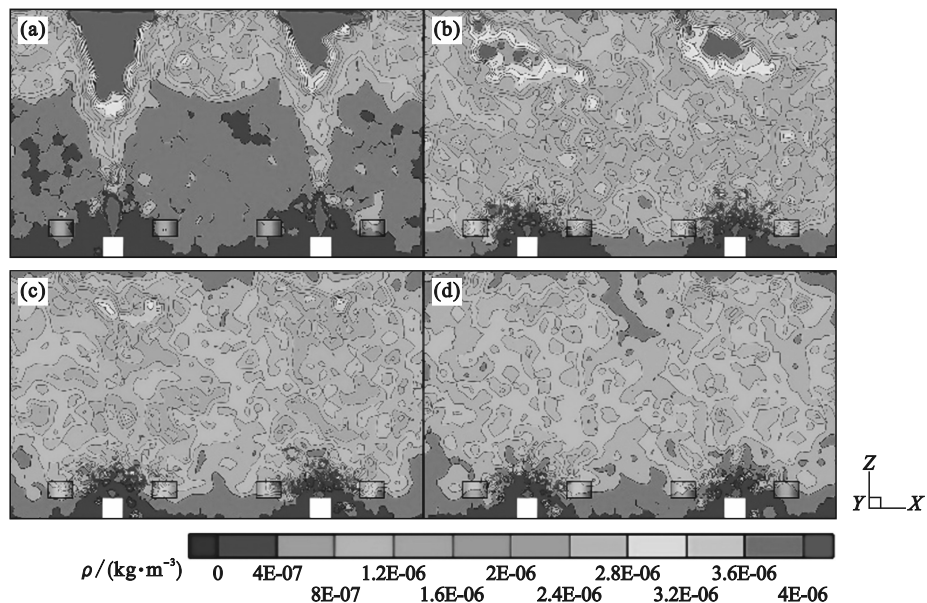


图 8 不同置换风速条件下 Y=6 m 平面烟尘质量浓度分布云图

Fig. 8 Cloud map of fume concentration distribution in Y=6 m plane under different air supply velocities

(a) — 置换风速 0.5 m/s; (b) — 置换风速 1.0 m/s; (c) — 置换风速 1.5 m/s; (d) — 置换风速 2.0 m/s.

在焊接过程中,除了分析车间整体的焊接烟尘控制效果之外,还应重点关注呼吸区域焊接烟尘的分

布情况. 图 9 为距地面 1.5 m 高度处监测线(-10 m ≤ X ≤ 10 m, Y=6 m)的焊接烟尘质量浓度分布情况.

从图9中可以看出,监测线上焊台处的焊接烟尘质量浓度较高,其他区域的焊接烟尘质量浓度较低.置换风速为0.5 m/s时,通风不充分,影响空气流通和气流置换,导致焊接烟尘集聚在呼吸区域,焊点处的烟尘质量浓度极高,远超相关标

准水平.增大置换风速后,更大的通风量促进了空气的快速置换,焊接烟尘随着气流向上运动,不再滞留在呼吸区域,焊接烟尘质量浓度显著降低.置换风速为2.0 m/s时,监测线上质量浓度最高为3.53 mg/m³,符合标准要求.

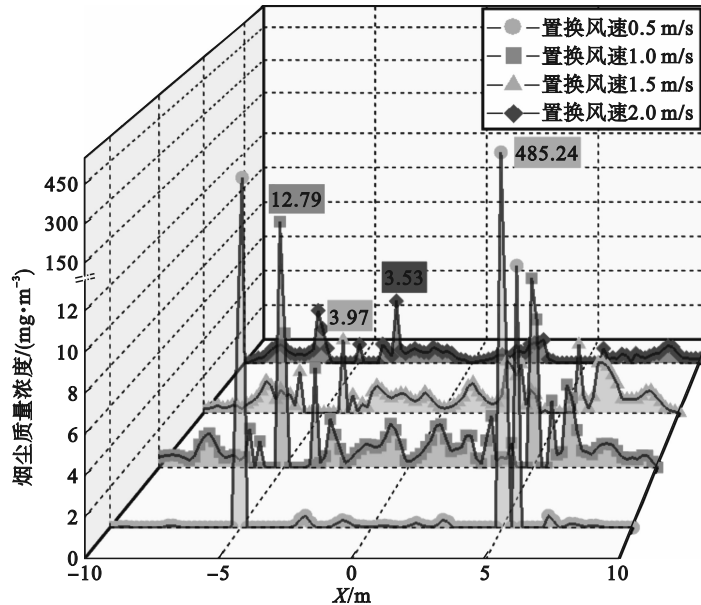


图9 不同置换风速条件下监测线烟尘质量浓度分布

Fig. 9 Fume concentration distribution in monitoring line under different air supply velocities

3.2 置换通风对局部排风罩效率的影响

3.2.1 罩口至污染源距离对排风罩效率的影响

局部排风罩效率指局部排风罩的烟尘捕集效率,其计算方法为

$$\text{局部排风罩效率} = \frac{\text{排风罩捕集粒子数}}{\text{总散发粒子数}} \quad (6)$$

设置排风罩抽风口风速为20 m/s,置换风速为0.5~2.0 m/s,分析罩口至污染源距离对局部排风罩效率的影响,结果如图10所示.

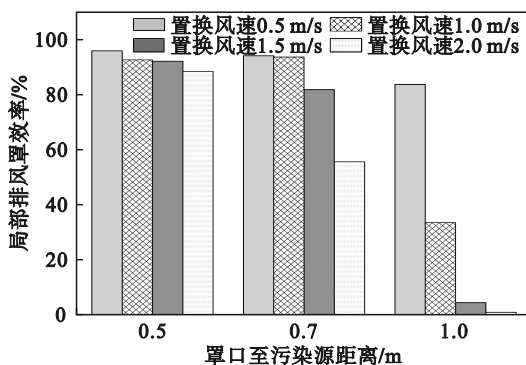


图10 罩口至污染源距离对局部排风罩效率的影响

Fig. 10 Influence of distance between hood opening and pollution source on efficiency of local exhaust hood

从图10中可以看出,罩口距污染源0.5 m时,4种置换风速下局部排风罩的效率都处于较高水平,此时置换风速对局部排风罩影响较小.罩口与污染源距离变大后,局部排风罩的效率会下降.罩口距污染源0.7 m时,置换风速在1.5 m/s及以下时,局部排风罩效率均保持在80%以上;但置换风速在2.0 m/s时,局部排风罩的效率从88%降到55%,置换风速对局部排风罩的效率造成显著影响.罩口距污染源1.0 m时,除置换风速0.5 m/s外,其他风速下局部排风罩效率均较低,置换风速为1.0 m/s时,局部排风罩效率降至33%,置换风速为2.0 m/s时效率接近0.

在实际工作中,受工作空间及工人操作等条件限制,局部排风罩距焊点的距离常常达不到理想状态.此时,可以通过控制置换通风的送风速度来减少其对局部排风效率的影响.同时,操作人员在应用局部排风罩时,应保持罩口距焊点在1 m以内.

考虑不利位置条件下置换通风对局部排风的影响,以罩口至污染源距离1 m为基础条件,分析不同工况下置换通风对局部排风罩效率的影响,找到合适的通风参数.

3.2.2 罩口风速对局部排风罩效率的影响

设置置换风速 0.5~2.0 m/s,分析罩口风速对于局部排风罩烟尘捕集效率的影响,结果如图 11 所示.

罩口风速约为抽风口风速的 1/5,抽风口风速为 15, 20 和 25 m/s 时,罩口风速分别约为 3, 4 和 5 m/s.

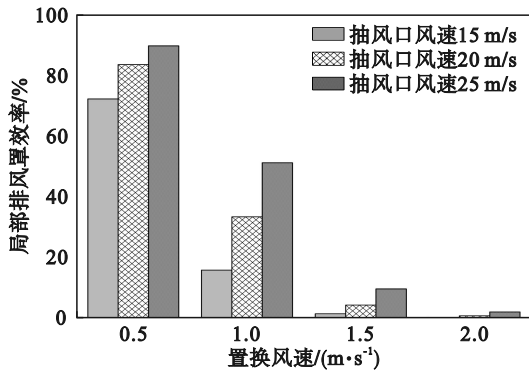


图 11 罩口风速对局部排风罩效率的影响

Fig. 11 Influence of air supply velocity at hood opening on efficiency of local exhaust hood

从图 11 中可以看出,置换风速一定时,排风罩口处的速度越大,排风罩对颗粒物的捕集效率越高.置换风速为 0.5 m/s,抽风口风速为 25 m/s 时,局部排风罩效率可达到 90%,抽风口风速为 15 m/s 时,局部排风罩效率为 72%,降低了约 20%.置换风速也会对局部排风罩效率造成影响.置换风速为 1.0 m/s,抽风口风速为 25 m/s 时,局部排风罩效率仅为 51%.当置换风速增加为 1.5 m/s 及以上时,局部排风罩效率变为低于 10%.

这主要是因为置换风速较小时,局部排风罩周围的速度场没有受到扰动,烟尘控制效果良好.随着置换通风的风速增加,局部排风罩受到风流的干扰作用,导致周围的速度增大,即随着置换通风的风速增大,置换风口处的风流将颗粒物吹偏,导致局部排风罩效率降低.

3.2.3 焊台纵向位置对局部排风罩效率的影响

设置排风罩抽风口风速 25 m/s,置换风速 0.5~2.0 m/s,分析焊台纵向位置即焊接点位于置换通风送风筒的距离对于局部排风罩烟尘捕集效率的影响,结果如图 12 所示.从图中可以看出,焊台距离置换风筒 2.7 m 时,电焊烟尘受到置换通风的干扰作用明显,导致局部排风罩效率很低.置换风速大于 0.5 m/s 时,排风罩效率甚至接近 0.将焊台移至距离置换风筒 5.4 m 时,置换通风对局部排风罩的影响作用降低,局部排风罩效

率显著提高;置换风速为 0.5 m/s 时,局部排风罩效率可达到约 90%.当进一步增大排风罩与置换风筒的距离后,局部排风罩效率并未继续提升,4 种置换风速下的排风罩效率均与之前相近.由以上分析可知,焊接点的位置距送风口不能太近,否则较小的送风速度会导致局部排风罩效率大幅下降.

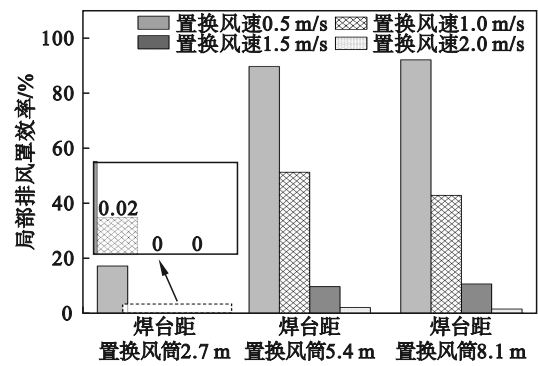


图 12 焊台纵向位置对局部排风罩效率的影响

Fig. 12 Influence of longitudinal position of solder station on efficiency of local exhaust hood

3.2.4 焊台横向位置对局部排风罩效率的影响

设置排风罩抽风口风速 25 m/s,置换风速 0.5~2.0 m/s,分析焊台横向位置对局部排风罩效率的影响,结果如图 13 所示.

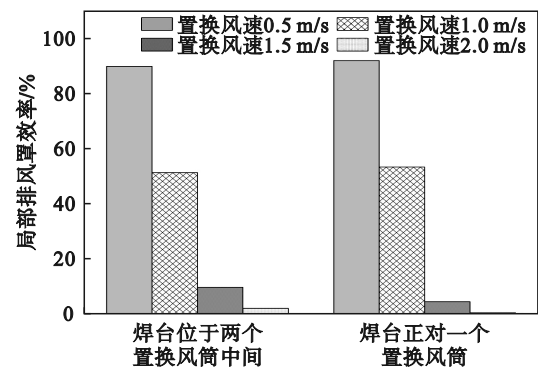


图 13 焊台横向位置对局部排风罩效率的影响

Fig. 13 Influence of lateral position of solder station on efficiency of local exhaust hood

从图 13 中可以看出,焊台位于两个置换风筒中间时,随着置换风速逐渐增加,受置换风流的影响,局部排风罩效率逐渐降低.置换风速为 0.5 m/s 时,局部排风罩效率可达到约 90%;置换风速为 1.0 m/s 时,局部排风罩效率显著降低,仅为 51%;当置换风速进一步增加时,局部排风罩效率变为低于 10%.焊台正对着置换风筒时,4 种置换风速下局部排风罩效率与之前相比差别不

大,说明焊台横向位置对于局部排风罩的排风效率影响较小.

3.2.5 置换通风送风角度对局部排风罩效率的影响

设置排风罩抽风口风速 25 m/s,置换风速 0.5~2.0 m/s,分析置换通风送风角度对局部排风罩效率的影响,结果如图 14 所示.可以看出,送风角度 0°即水平送风时,送风风流对局部排风罩效率有较大影响,置换风速较低时,局部排风罩受到的影响较小,效率最高可达约 90%.置换风速较高时,局部排风罩受到的影响较大,效率低于 10%.向下调整送风角度后,送风风流也随之向下方流动,局部排风罩受到的干扰效应减弱.随着角度的增大,局部排风罩的效率得到有效提升,送风角度为 75°时,4 种置换风速下局部排风罩效率均处于较高水平,置换风速为 2.0 m/s 时,局部排风罩效率可达 75%.

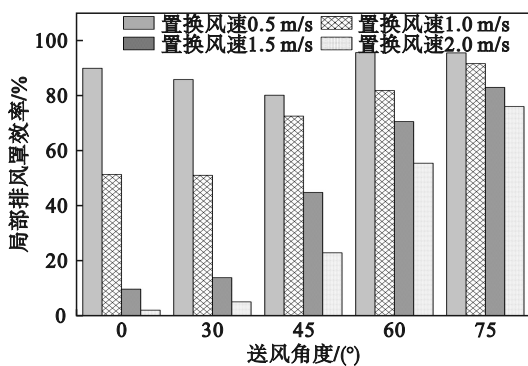


图 14 送风角度对局部排风罩效率的影响

Fig. 14 Influence of air supply angle on efficiency of local exhaust hood

3.3 耦合通风方式下的通风效率分析

为了找到置换通风和局部排风耦合作用下合适的通风设计参数,结合置换通风对局部排风罩的影响因素分析,探究 4 种工况下耦合通风系统的通风效率,工况设置如表 2 所示,耦合通风效率计算方法为

$$\text{耦合通风效率} = \frac{\text{回风口逃逸粒子数} + \text{排风罩捕集粒子数}}{\text{总散发粒子数}} \quad (7)$$

表 2 工况设置

Table 2 Cases setting

工况	置换风速/ (m·s ⁻¹)	排风罩抽风口 风速/(m·s ⁻¹)	送风角度/°
1	0.5	25	75
2	1.0	25	75
3	1.5	25	75
4	2.0	25	75

图 15 显示了 4 种工况下厂房内耦合通风系统的通风效率随时间的变化.从图中可以看出,30 min 时,4 种置换风速下耦合通风系统的通风效率均超过 60%,其中置换风速为 0.5 m/s 时的耦合通风效率可达到 80% 左右;置换风速为 2.0 m/s 时的耦合通风效率相对要低一些,为 67% 左右.从整个过程来看,置换风速为 0.5 和 1.0 m/s 时耦合通风效率曲线在通风 15 min 内即基本达到稳定;而置换风速为 1.5 和 2.0 m/s 时耦合通风效率曲线则随着时间变化呈现继续缓慢增长的趋势,在通风 30 min 时,仍未达到稳定的通风效率.

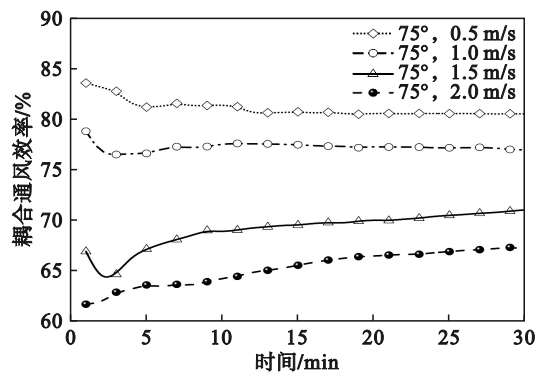


图 15 不同工况下厂房耦合通风效率

Fig. 15 Coupled ventilation efficiency of workshop under different cases

对比单一置换通风方式下的通风效率,耦合通风方式在不同置换风速下的通风效率均有所提升.具体来说,在 0.5 m/s 的风速下,通风效率从 37% 大幅提升至 80%;风速增加到 1.0 m/s 时,通风效率从 45% 提高到 77%;风速进一步增加至 2.0 m/s 时,通风效率从 54% 提高到 67%.以上结果表明,耦合通风方式在不同风速条件下都能更有效地改善通风效果.

图 16 显示了 30 min 时 4 种工况下车间 Y=6 m 平面烟尘质量浓度分布云图.从图中可以看出,除焊点上方因焊接烟尘集聚导致烟尘质量浓度超过 4 mg/m³ 外,4 种工况下车间的焊接烟尘质量浓度都处于较低水平,符合相关标准.其中置换风速 0.5 m/s 的工况相比于其他工况,耦合通风系统排尘的效果最佳,车间整体焊接烟尘质量浓度较低并且得到了有效控制.

通过进一步监测呼吸区域的焊接烟尘质量浓度分布(图 17)发现,相比于单一置换系统,除了焊点处由于局部排风罩距尘源的距离较大导致焊接烟尘集聚,焊接烟尘质量浓度较高外,其余区域的焊接烟尘均处于标准水平之下.置换风

速为 0.5 m/s 的工况监测线上质量浓度均为 0, 烟尘控制较好.

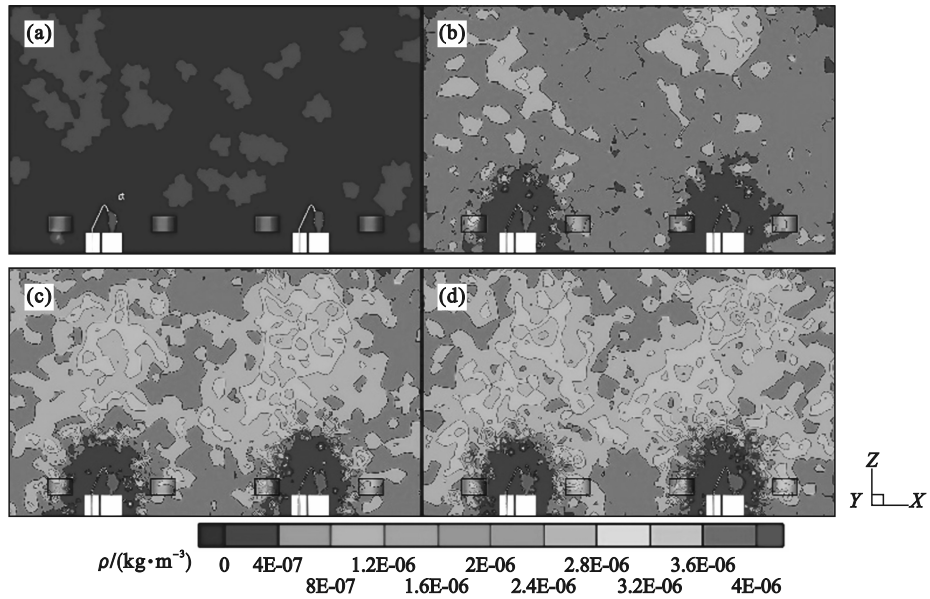


图 16 不同工况下 Y=6 m 平面烟尘质量浓度分布云图

Fig. 16 Cloud map of fume concentration distribution in Y=6 m plane under different cases

(a)— $v=0.5$ m/s; (b)— $v=1.0$ m/s; (c)— $v=1.5$ m/s; (d)— $v=2.0$ m/s.

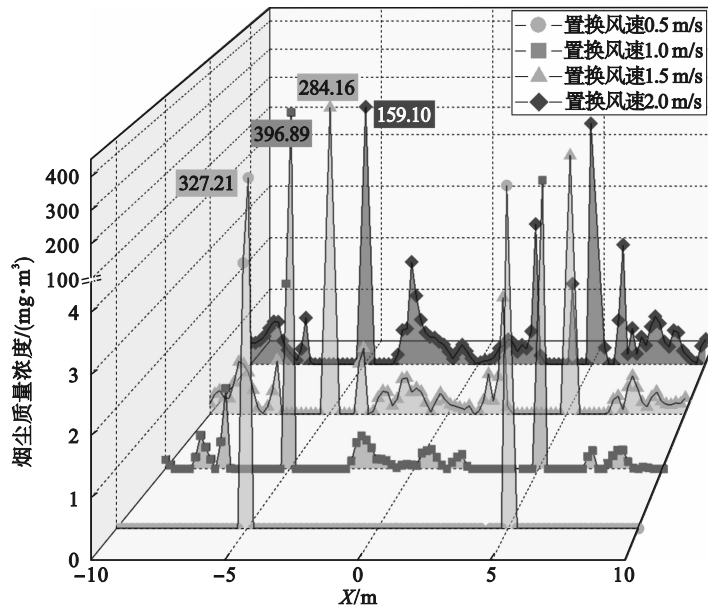


图 17 不同工况下监测线烟尘质量浓度分布

Fig. 17 Fume concentration distribution in monitoring line under different cases

总之,相比于单一置换通风系统,通过合适的参数设置,耦合通风系统通风效率可得到有效提升,车间焊接烟尘可得到更好控制,且用较少的置换通风量即可实现此目标,因此耦合通风是值得推荐的一种通风方法.

4 结 论

1) 置换通风与局部排风耦合时,置换送风速度和角度对局部排风罩效率有影响.较大的置换

风速会将焊接烟尘颗粒吹偏,从而影响局部排风罩效率,置换风速越大,影响越明显.向下调整送风角度,局部排风罩受到的干扰效应减弱.送风角度为 75°时,即使置换风速为 2.0 m/s,局部排风罩效率也不会显著下降.

2) 排风罩距焊点距离、罩口风速、焊台位置等因素均对排风罩效率有较大影响,置换风速增大会加剧影响,降低排风罩的效率.罩口至污染源距离越大,局部排风罩效率越低,工作人员应用移动排风罩时,需将罩口控制在距焊点 1 m 以

内.排风罩罩口处的速度越大,排风效率越高,置换风速为 1.0 m/s 及以上时,排风罩排风效率急剧下降;焊台距置换风筒越近,受到置换通风的干扰作用越明显,导致局部排风罩效率较低.

3) 相比于单一置换通风系统,耦合通风系统的通风效率得到提升,车间整体的焊接烟尘质量浓度降低.在本研究条件下,置换通风和局部排风耦合作用下最佳通风设计参数建议局部排风罩抽风口风速 25 m/s,置换送风角度 75°且送风速度 0.5 m/s,此条件下不仅耦合通风系统通风效率可达到 80%,降低车间整体焊接烟尘质量浓度,还可以有效减少能耗.

参考文献:

- [1] Nejadkoorki F. Current air quality issues [M]. London: IntechOpen, 2015.
- [2] Wang X, Yang B, Chen J W, et al. Numerical simulation on diffusion law of welding fume in a welding workshop [C]// Man-Machine-Environment System Engineering: Proceedings of the 21st International Conference on MMESE. Singapore: Springer, 2022: 474-480.
- [3] Moon J H, Heo J H, Moon S J, et al. Improvement of indoor air environment in a large welding factory by displacement ventilation [C]// Proceedings of the SAREK Conference. Seoul: Korean Society of Mechanical Engineers, 2005: 69-74.
- [4] Watson S I, Cain J R, Cowie H, et al. Development of a push-pull ventilation system to control solder fume [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2001, 45(8): 669-676.
- [5] Lee M H, McClellan W J, Candela J, et al. Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2007, 9(1): 127-136.
- [6] Niemelä R, Koskela H, Engström K. Stratification of welding fumes and grinding particles in a large factory hall equipped with displacement ventilation [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2001, 45(6): 467-471.
- [7] Wang H Q, Huang C H, Liu D, et al. Fume transports in a high rise industrial welding hall with displacement ventilation system and individual ventilation units [J]. *Building & Environment*, 2012, 52: 119-128.
- [8] 刘坚. 多跨高大焊接厂房通风防尘系统研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.
- [9] Shibata N, Tanaka M, Ojima J, et al. Numerical simulations to determine the most appropriate welding and ventilation conditions in small enclosed workspace [J]. *Industrial Health*, 2000, 38(4): 356-365.
- [10] Flynn M R, Susi P. Local exhaust ventilation for the control of welding fumes in the construction industry: a literature review [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2012, 56(7): 764-776.
- [11] 王庆刚. 焊接车间排风罩排烟特性及结构优化研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2020.
(Wang Qing-gang. Study on exhaust characteristics and structure optimization of exhaust hood in welding workshop [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2020.)
- [12] 张雨. 车间焊接烟尘控制数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
(Zhang Yu. Research on numerical simulation of welding fume control in workshops [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.)
- [13] Shaptala V V, Logachev K I, Severin N N, et al. Computer simulation of ventilation during electric welding operations [J]. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2020, 61(4): 463-468.
- [14] Zhao J N, Feng Y, Bezerra M, et al. Numerical simulation of welding fume lung dosimetry [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2019, 135: 113-129.
- [15] 谢东, 田伶, 王汉青. 工业厂房置换通风两种送风口形式的比较[J]. *建筑热能通风空调*, 2019, 38(3): 79-84.
(Xie Dong, Tian Ling, Wang Han-qing. Performance comparison of two air outlet of displacement ventilation in industrial building [J]. *Building Energy & Environment*, 2019, 38(3): 79-84.)
- [16] Wang Y N, Cao L L, Cheng Z F, et al. Mathematical methodology and metallurgical application of turbulence modelling: a review [J]. *Metals*, 2021, 11(8): 1297.
- [17] Zhai Z J, Zhang Z, Zhang W, et al. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD. part-1: summary of prevalent turbulence models [J]. *Heating, Ventilation, Airconditioning and Refrigerating Research*, 2007, 13(6): 853-870.
- [18] 薛建伟. 大空间工业厂房焊接烟尘控制数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
(Xue Jian-wei. Numerical simulation of welding fume control of large space industrial factory [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.)