

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.04.005

多污染源集成式排风罩有害气体控制研究

熊 寒¹, 彭小勇^{1*}, 谢 海², 柳建祥¹

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湖南核三力技术工程有限公司, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 为了研究控制多污染源污染物散发的有效方法, 采用 CFD 技术模拟分析了集成式排风罩与独立排风罩在相同条件下对多污染源有害气体的控制效果, 研究结果表明: 集成式排风罩气流流向有利于工人呼吸健康; 独立排风罩和集成式排风罩两侧排风罩对有害气体的控制效果均要优于中间排风罩的控制效果, 但在呼吸区相同控制点处集成式排风罩对有害气体的控制效果要明显优于独立排风罩。

关键词: 多污染源; 集成式排风罩; 独立排风罩; 数值模拟

中图分类号: X51 **文献标志码:** B **文章编号:** 1673-0062(2019)04-0038-07

Study On Multi-pollution Sources of Harmful Gas Control with Integrated Exhaust Hood

XIONG Han¹, PENG Xiaoyong^{1*}, XIE Hai², LIU Jianxiang¹

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. Hunan Sunny Technology Engineering Co. Ltd., Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to study the effective methods of controlling the emission of pollutants from multiple pollution sources. The CFD technology was used to simulate the effect that integrated exhaust hood and the individual exhaust hood control the harmful gases under the same conditions when multi-pollution sources emit harmful substances simultaneously. The results show that the flow direction of integrated exhaust hood is more favorable for workers to breathe fresh air than that of individual exhaust hood. It found that the control effect of both sides of the independent exhaust hood and the integrated exhaust hood is better than that of the middle one, but the integrated exhaust hood has better control effect on harmful gases at the same control point in the respiratory area.

收稿日期: 2019-03-13

基金项目: 湖南省高校产业化培育项目(12CY011)

作者简介: 熊 寒(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事空气环境与计算机仿真方面的研究。E-mail: 1106754630@qq.com。* 通信作者: 彭小勇(1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事空气环境与计算机仿真方面的研究。E-mail: pengxiaoyong@126.com

key words: multi-pollution sources; integrated exhaust hood; individual exhaust hood; numerical simulation

0 引言

工业生产通常会伴随着一些污染物(如颗粒物,有害气体等)的产生,尤其在某些生产车间还存在多个污染源同时释放有害物的模式(如生产线,输送带,铝电离等特殊工艺)^[1]。如果不进行有效控制,会影响室内外环境空气及生产过程的正常运行,甚至可能危害人类健康^[2],因此对多污染源有害物的扩散进行有效的控制已成为急需解决的问题。

在工业生产行业中采用局部排风罩是防止工业污染物扩散到工位区的最有效的方法之一,侧吸罩作为一种有效的局部排风装置已被广泛应用于工业场所中^[3-4]。目前,人们对于单污染源作用下的局部排风系统已有深入的研究^[5-7],而针对多污染源的研究主要集中在污染源数目、污染源源项浓度、污染源散发速度、污染源间的距离以及污染源高度对污染物浓度分布的影响等研究上;却鲜有人对多污染源作用下的局部通风系统进行研究。刘波^[8]等以双污染源为例运用实验和数值模拟研究了污染源数量、污染源源项浓度、污染源分散性和污染源高度对室内污染物浓度分布的影响;2015年,王怡等^[9]首次提出了叠加差的概念,并通过对单污染源和双污染源浓度分布的研究,总结出了叠加差与源项浓度的关系式;2017年,李聪聪等^[10]首次提出了污染源浓度贡献率的概念,并通过实验和数值模拟的方法研究了在工业厂房内污染源数目、污染源间距等对浓度分布的影响;2017年,Y. Q. Huang等^[11]首次提出来排气罩去除瞬态污染物的动态评价指标(transient contaminant removal ratios, TCRRT),并说明了该指标与传统捕集效率的关系。在实际工业生产中多污染源是非常常见的,通常采用独立排风罩来控制生产中多污染源有害物的散发,但效果并不理想,而集成式排风罩在一些大型厨房中已有了较好的应用效果,但在工业生产中的应用还较少。

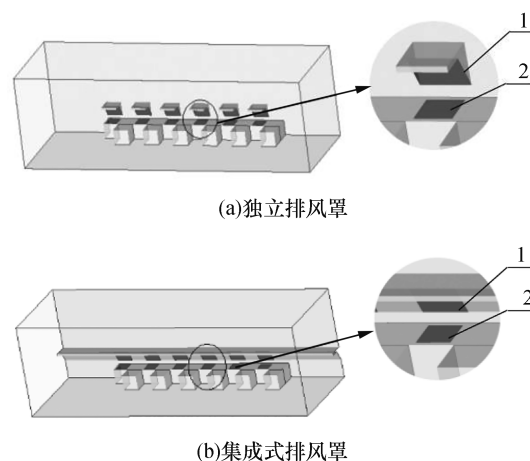
为了对比分析多污染源集中散发处独立排风罩与集成式排风罩的排风效果,本文采用(computational fluid dynamics, CFD)技术模拟了在相同工况下侧吸式独立排风罩与集成式排风罩二者的气流流场及有害物浓度变化规律,并分析了二者在相同排风量下不同排风口典型控制点有害气体浓

度百分数变化。

1 物理模型和数值方法

1.1 物理模型

如图1所示分别为独立排风罩和集成式排风罩物理模型,右侧为单个排风罩的局部放大图,局部排风罩设置在宽敞的厂房内,由于受计算机的运行内存的限制,只考虑了可能会受局部排风罩影响的一个 $16.4\text{ m}\times 5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的计算流域;工作台尺寸为 $9.6\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,其距离左右两侧侧墙分别为 3 m , 3.8 m ;台上共有6个一线排列的污染源源项,其尺寸均为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$,每个污染源源项间隔为 1 m ;污染源源项前方为工位区,每个工位右侧有一个物料堆,其尺寸为 $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,每个物料堆之间间隔为 0.8 m ;排风罩罩口尺寸为 $0.8\text{ m}\times 2\sqrt{3}/5\text{ m}$,其倾角为 30° ,距离工作台 0.2 m ,罩口上方为挡板,其尺寸为 $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$;而集成式排风罩模型则是在独立排风罩模型基础上将各排风罩用挡板连接。



1—排风罩罩口;2—为污染物释放源面。

图1 物理模型

Fig. 1 Physical model

1.2 数学模型

由于车间通风通常为低速常温,气流相对稳定,污染物释放有限,因此做出如下假设:

- 1) 气流可视为常温不可压缩气流;
- 2) 气流流动为定常流动;
- 3) 污染气体为稀浓度相。

在以上假设的基础上,气流流场可由等温不

可压 N-S 方程描述如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

式中: p 为流体微元体上的静压; τ_{ij} 为分子粘性作用产生的作用在微元体表面的粘性应力张量; f_i 为 i 方向的质量力, 在质量力只受重力, 且 Y 轴垂直向上时, $f_x = f_z = 0, f_y = -g$ 。

由于污染气体为稀浓度相, 组分方程描述如下:

$$\frac{\partial}{\partial X}(u_x c) + \frac{\partial}{\partial Y}(u_y c) + \frac{\partial}{\partial Z}(u_z c) = \Gamma \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + S(X, Y, Z) \quad (3)$$

Γ 为空间内任一点污染物扩散系数; $S(x, y, z)$ 为源项, 即任一点的污染物的释放强度。

湍流控制模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 其方程如下:

湍动能方程(k 方程):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍流耗散率方程(ε 方程):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

式中: k ——湍流动能; ε ——湍流动能耗散率; G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能; C_2 , C_1 ——常量, $C_2 = 1.9$, $C_1 = 1.44$; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —— k 方程和 ε 的湍流 Prandtl 数 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$; S_ε ——用户定义的湍流动能。

1.3 数值方法

本文应用数值方法模拟定常不可压缩 N-S 方程, 数值方法为 SIMPLE 算法, 采用一阶格式离散主管方程, 用非耦合隐式求解器对离散方程进行求解, 计算结果采用后处理软件 tecplot 完成。

网格划分: 采用 GAMBIT 划分网格, 为了得到好的模拟效果和较快的计算效率, 采用了结构化网格与非结构化网格相结合的划分方法, 对风口及物面边沿附近进行了局部加密, 计算流域为 $16.4 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 模型网格划分为如图 2、图 3 所示。

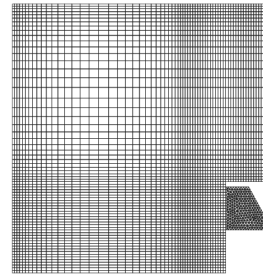


图 2 独立排风罩 $Z = -3.6 \text{ m}$ 截面网格图

Fig. 2 $Z = -3.6 \text{ m}$ section grid of independent exhaust hood

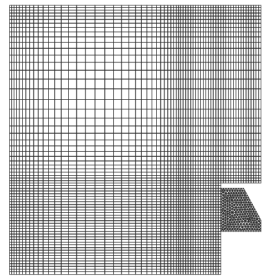


图 3 集成排风罩 $Z = -3.6 \text{ m}$ 截面网格图

Fig. 3 $Z = -3.6 \text{ m}$ section grid of integrated exhaust hood

边界条件: 排风罩罩口设置为等排风速度; 源项面有害气体设置为均匀散发; 顶部、左右侧面及排风罩对面壁面设置为自由出流面, 其它各壁面均设置为无滑移条件。

2 排风罩气流特性与有害气体浓度数值模拟

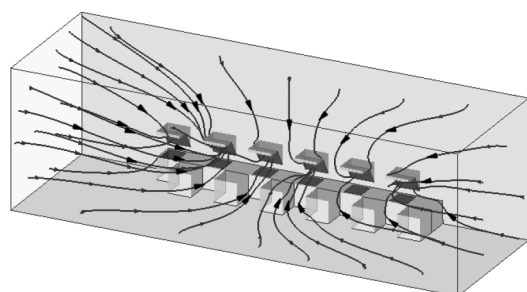
2.1 独立排风罩和集成式排风罩气流特性与有害气体浓度数值分析

在模拟车间多污染源有害气体控制研究时, 根据工艺情况, 选用 CO_2 作为有害气体进行研究, 每个污染源 CO_2 释放量均为 $0.000 1 \text{ kg/s}$; 独立排风罩和集成式排风罩每个罩口排风速度均为 2 m/s 。

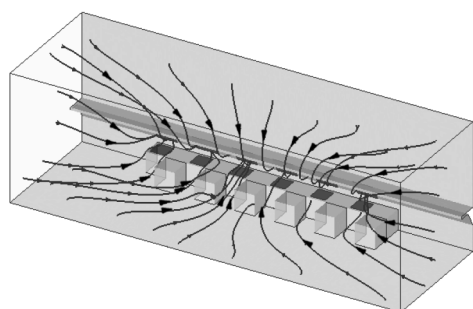
图 4 为独立排风罩和集成式排风罩气流流动特性, 从图 4 中可以看出独立排风罩由于两侧无挡板, 气流从罩口四周进入排风罩罩口, 以每个罩口为中心轴成对称分布, 而集成式排风罩由于有挡板的限制, 气流以工作台为中心成对称分布, 并从罩口前方流入罩内, 使新鲜空气先经过呼吸区, 然后将有害气体带走排出。

图 5 为独立排风罩和集成式排风罩有害气体等值面浓度云图, 由图 5 可知: 独立排风罩中间由于没有挡板的限制, CO_2 会向四周扩散, 而集成式排风罩由于受到挡板的制约, 有害气体无法从挡

板左右向上扩散;独立排风罩和集成式排风罩中间区域受有害气体影响的范围都要大于两侧,这是因为罩口与罩口之间相距较近,罩口附近的气流会相互影响。



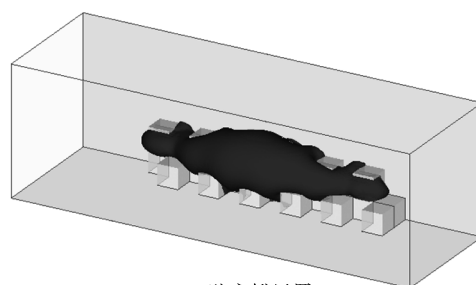
(a)独立排风罩



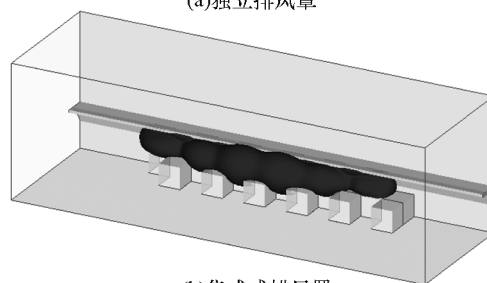
(b)集成式排风罩

图4 流线图

Fig. 4 Streamline diagram



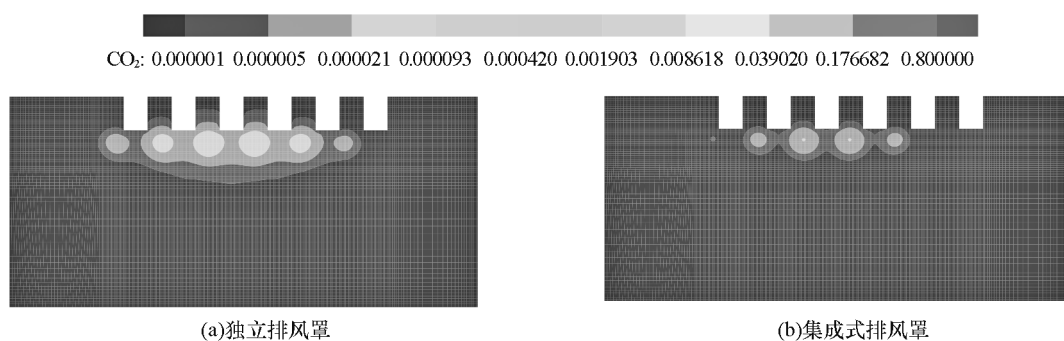
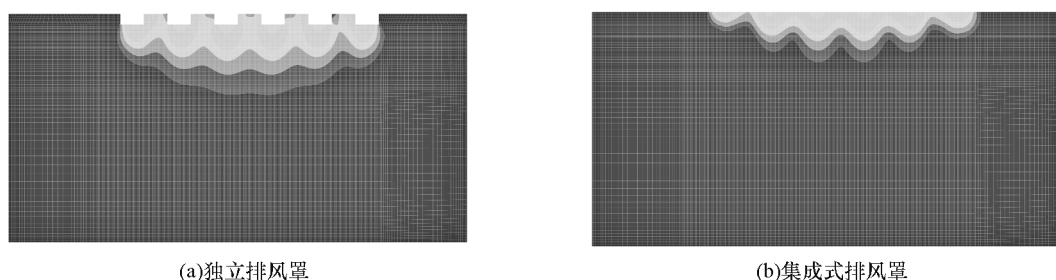
(a)独立排风罩

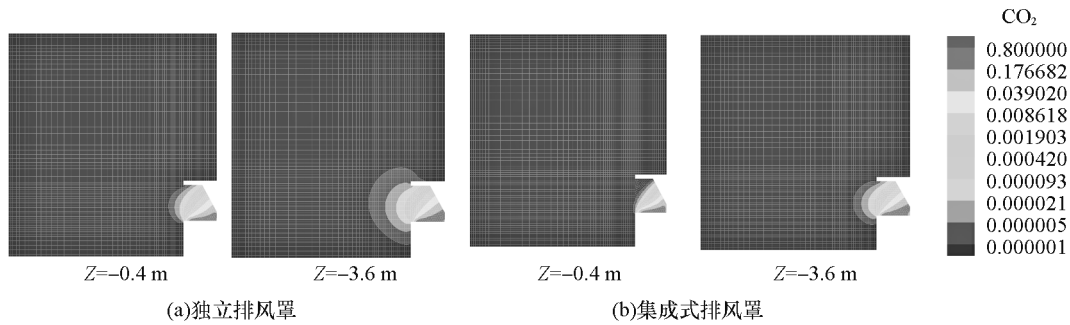


(b)集成式排风罩

图5 CO₂ 浓度为 $1.0 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3$ 时等值面云图Fig. 5 Isosurface cloud map with CO₂ concentration of $1.0 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3$

为了分析排风罩的排风效果及工作区的 CO₂ 浓度,分别截取了不同截面的浓度云图如图6~图8所示;考虑到人们工作时会与工作台之间保持一定的距离并且人的呼吸区距地面大约在1.4 m左右,因此分别截取了 $X=4 \text{ m}$, $Y=1.4 \text{ m}$ 和不同 Z 截面的浓度云图如图6~图8所示。

图6 $X=4$ 截面 CO₂ 浓度 (kmol/m^3) 云图Fig. 6 $X=4 \text{ m}$ section CO₂ concentration (kmol/m^3) cloud map图7 $Y=1.4 \text{ m}$ 截面 CO₂ 浓度 (kmol/m^3) 云图Fig. 7 $Y=1.4 \text{ m}$ section CO₂ concentration (kmol/m^3) cloud map

图8 Z截面 CO_2 浓度 (kmol/m^3) 云图Fig. 8 Z section CO_2 concentration (kmol/m^3) cloud map

由图6~图8可知集成式排风罩的排风效果要优于独立排风罩且排风罩中间区域浓度都要明显高于两侧,当集成式排气罩的中间工作区还存在污染气体时,在左右两边工位的工作区污染气体浓度已为零; CO_2 浓度分布在Y轴方向上为对称分布,而在X轴方向上 CO_2 浓度分布向左偏移,这可能是因为右侧预留有一定长度的工作台,其对气流具有一定的约束作用,从而使X轴方向 CO_2 浓度分布向左偏移,由于Y方向上截取的为 $Y=1.4\text{ m}$ 的截面,其距离工作台较远,受到的约束较小,因此在Y轴方向上 CO_2 浓度为对称分布。

2.2 独立排风罩和集成式排风罩控制点 CO_2 浓度比较

图9为呼吸区不同控制点 CO_2 浓度图,控制点的坐标为($X=4\text{ m}, Y=1.4\text{ m}, Z=-9\sim 1\text{ m}$)从图中可以看出虽然控制点的 CO_2 浓度具有一定的波动性,但总体上呈对称分布,且在相同控制点处集成式排风罩的 CO_2 浓度明显低于独立排风罩的 CO_2 浓度。

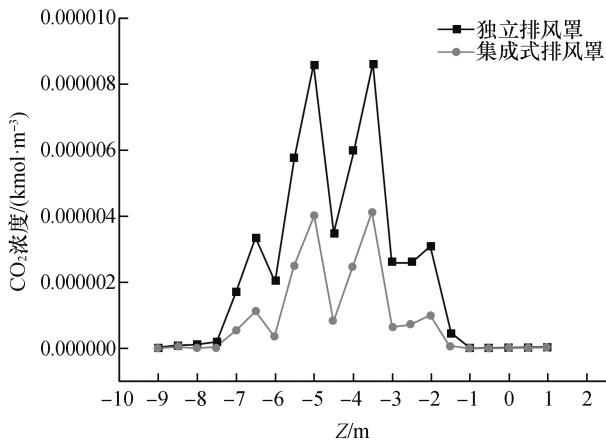
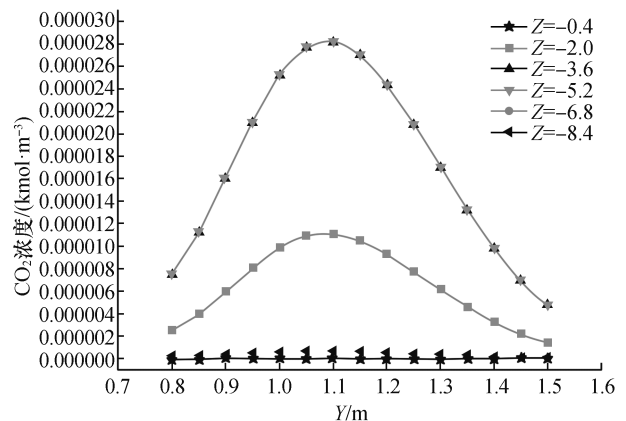
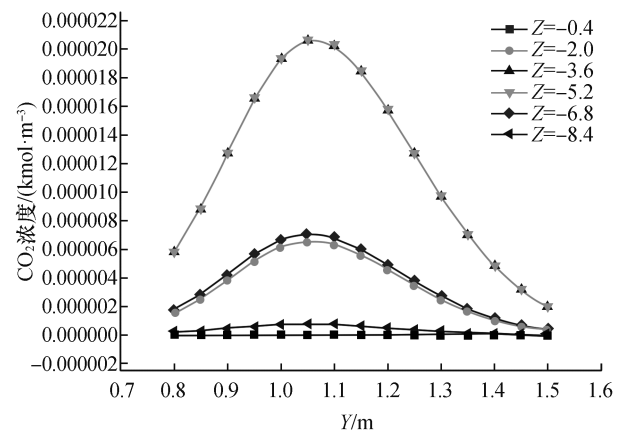
图9 排风罩呼吸区控制点 CO_2 浓度图Fig. 9 Control point CO_2 concentration map of respiratory area of exhaust hood

图10为独立排风罩和集成式排风罩在不同Z截面控制点 CO_2 浓度云图,每个Z截面对应一个工位(1~6)的中心轴截面;由图可知,独立排风罩和集成式排风罩的对称工位(1与6;2与5;3与4工位对称)的控制点 CO_2 浓度分布基本相同。



(a)独立排风罩



(b)集成式排风罩

图10 排风罩不同Z截面控制点 CO_2 浓度图Fig. 10 Control point CO_2 concentration chart of exhaust hood with different Z sections

图11分别为 $Z = -0.4\text{ m}$ 、 -2 m 、 -3.6 m 、 -8.4 m 截面时不同高度的控制点的 CO_2 浓度分布图,控制点的坐标为($X = 4\text{ m}$, $Y = 0.8 \sim 1.5\text{ m}$);由图可知,在同一 Z 截面,随着控制点高度的增加,独立排风罩和集成式排风罩的 CO_2 浓度均先增加后减小,且在 $Y = 1.15\text{ m}$ 处,两者 CO_2 浓度值相差最大;在 $Z = -0.4\text{ m}$ 、 -8.4 m 处(即边缘工位

处),集成式排风罩在 $Y = 1.1\text{ m}$ 以下控制点的 CO_2 浓度反而高于独立排风罩在相同控制点的 CO_2 浓度,但在人的呼吸区($Y = 1.4\text{ m}$),前者 CO_2 浓度相对较低,结合图10,图11可以看出,在中间工位区,后者相同控制点的 CO_2 浓度分布明显低于前者,综合上述分析可以看出集成式排风罩对有害物的控制效果要优于独立排风罩。

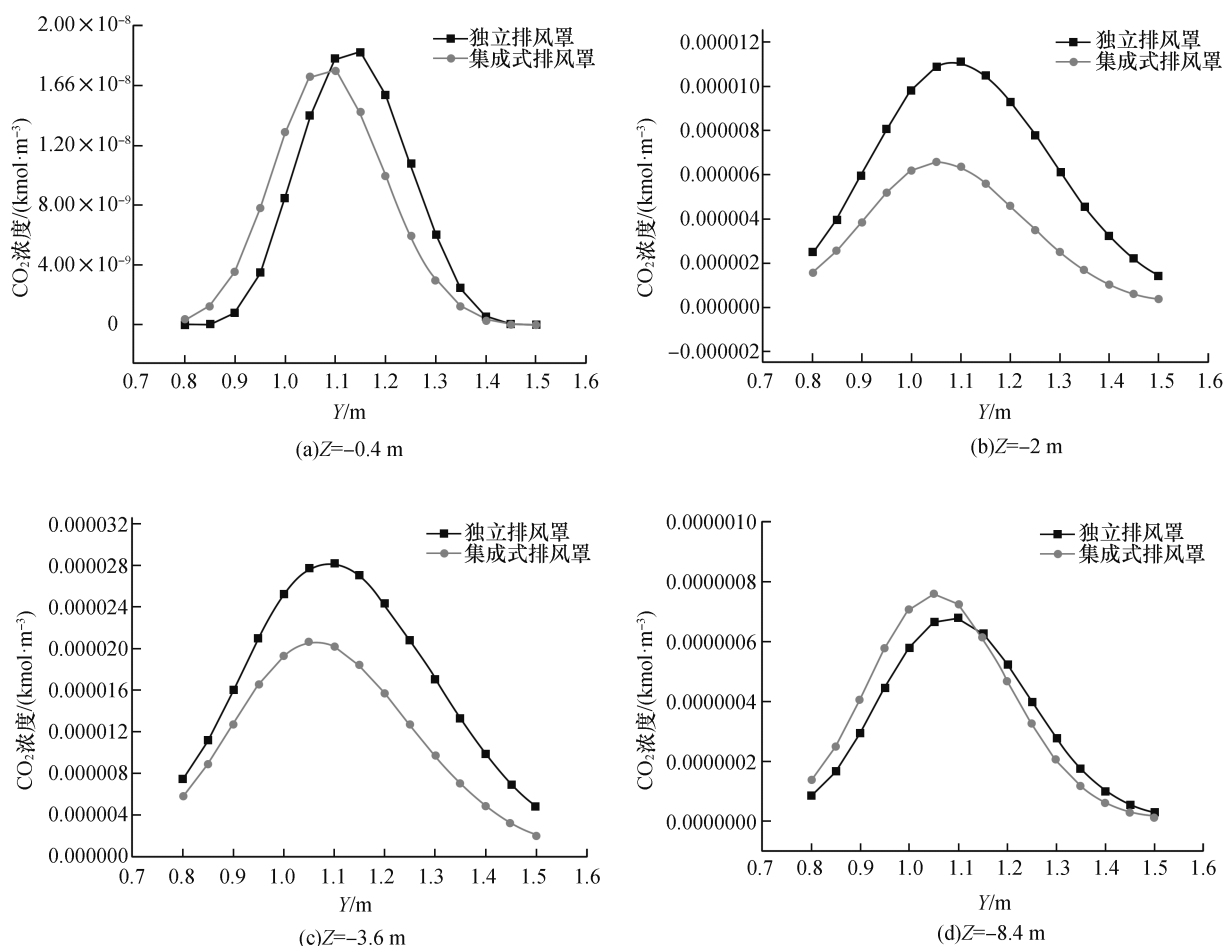


图11 排风罩 Z 截面不同高度控制点 CO_2 浓度图

Fig. 11 Control point CO_2 concentration chart of Z section of different heights

3 结论

1) 独立排风罩是将气流从四周引入罩口,因此独立排风罩的排风气流会受到相邻排风罩气流的影响;集成式排风罩是将气流从前方引入,从而使新鲜空气先进入工位区,有利于人体健康。

2) 独立排风罩和集成式排风罩两侧排风罩对有害气体的控制效果均要优于中间排风罩的控制效果,但在呼吸区($X = 4\text{ m}$, $Y = 1.4\text{ m}$, $Z = 0 \sim -9\text{ m}$)相同控制点处集成式排风罩对有害气体的控制效果要明显优于独立排风罩(即排风效果为:

两侧工位>中间工位,集成排风罩>独立排风罩)。

3) 在同一 Z 截面,集成式排风罩与独立排风罩在 $Y = 1.15\text{ m}$ 高度处的控制点的 CO_2 浓度相差最大。

参考文献:

- [1] 王华男. 电解铝残阳极清理局部排风罩气流场的数值模拟[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2011:1-65.
- [2] KARAISMAIL E, CELIK I, GUFFEY S E. Flow dynamics and contaminant transport in industrial-type enclosing exhaust hoods[J]. Journal of occupational and environmental hygiene, 2013, 10(7): 384-396.

(下转第48页)

$$\text{为: } \begin{cases} d_1^+ = 0.030 \\ d_1^- = 0.058 \end{cases}$$

2.5.3 计算评价对象贴近度

根据公式(9)计算出各方案贴近度 E^+ :

$$E^+ = (0.658, 0.154, 0.874, 0.809)$$

各路线方案的综合优越度为:方案 I 65.8%; 方案 II 15.4%; 方案 III 87.4%, 方案 IV 80.9%。方案的优劣次序为: III > IV > I > II, 方案 III (部分利用 S305 改建) 最优。

根据以上分析,使用变权重理论对各影响因素权重进行计算之后,因素权重根据该因素统计值的不同而发生变化。在影响因素统计值趋于边缘状态时,采用本分析方法能够提高该指标在分析过程中的权重,取得的分析结果更为符合工程实际。

3 结 论

1) 本文探讨了变权重理论的在山区公路路线方案优选中的应用价值,在路线方案进行常权比较的前提下,引入变权计算细化其指标权重,结合 TOPSIS 法建立了更为贴近工程实际的综合评判模型,避免多因素共同作用时理论和实际的偏差造成评判结果不合理。

2) 将该模型用于湖南省某二级公路 A 点至 B 点 4 种路线方案的综合优越度计算,确定路线方案 III 最优。设计人员同样可根据项目等级、地质条件等情况的不同选取最重要的影响指标构建更贴近项目实际情况的分析模型。

参考文献:

- [1] LUQUE R, CASTRO M. Highway geometric design consistency: speed models and local or global assessment

[J]. International journal of civil engineering, 2016, 14 (6): 347-355.

- [2] SADEK S, KAYSI I, BEDRAN M. Geotechnical and environmental considerations in highway layouts: an integrated GIS assessment approach [J]. International journal of applied earth observations & geoinformation, 2000, 2 (3): 190-198.
- [3] KANG M W, JHA M K, SCHONFELD P. Applicability of highway alignment optimization models [J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2012, 21 (1): 257-286.
- [4] 黄淑琴. 公路路线方案的多级综合模糊评价 [J]. 中国公路学报, 1997, 10 (3): 37-44.
- [5] 朱兴琳. 基于可靠度理论的公路路线设计 [J]. 长安大学学报, 2010, 30 (4): 46-50.
- [6] 张驰, 杨坤, 汪双杰, 等. 青藏高原多年冻土区公路智能选线方法 [J]. 交通运输工程学报, 2016, 16 (4): 14-25.
- [7] 李军, 黄海宁, 徐志胜. 基于风险因子概率传递的公路选线经济风险评估 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16 (2): 49-52.
- [8] 户佐安, 蒲政, 包天雯, 等. 基于 TOPSIS 法和灰色理论的交通信息网络布局优选 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16 (3): 38-45.
- [9] WU J, SUN J S, ZHA Y, et al. Ranking approach of cross-efficiency based on improved TOPSIS technique [J]. Journal of systems engineering and electronics, 2011, 22 (4): 604-608.
- [10] 康虔, 王新民, 蒲浩, 等. 基于变权-未确知测度理论的岩溶路基稳定性分析 [J]. 东北大学学报, 2016, 37 (3): 435-439.
- [11] 王新民, 康虔, 秦健春, 等. 层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用 [J]. 中南大学学报, 2013, 44 (6): 2455-2462.

(责任编辑: 扶文静)

(上接第 43 页)

- [3] 杜雅兰, 黄明娟, 周丽铭. 全面通风与局部通风的应用分析 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2014, 4 (3): 143-147.
- [4] 第五徐涛. 多热源作用下侧吸罩流场及捕集效率特性的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016: 1-98.
- [5] HUANG Y, WANG Y, LIU L, et al. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant [J]. Building and environment, 2015, 85: 94-103.
- [6] 邢金城, 李元辰, 凌继红, 等. 高截面单双侧条缝式槽边排风罩排风量的影响因素 [J]. 暖通空调, 2017, 47 (2): 88-92.
- [7] 房俊格. 伴有热污染的气幕上吸罩流场特性分析 [J]. 洁净与空调技术, 2008 (2): 24-28.

- [8] 刘波. 多污染源共同作用对工业建筑室内污染物浓度分布的影响 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015: 1-83.
- [9] 王怡, 刘波, 曹莹雪, 等. 双污染源对室内浓度场分布影响的数值模拟研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2015, 47 (4): 592-597.
- [10] 李聪聪, 曹莹雪, 王怡. 多污染源对工位污染物浓度贡献率的研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36 (11): 31-36.
- [11] HUANG Y Q, WANG Y, LIU L, et al. Performance of constant exhaust ventilation for removal of transient high-temperature contaminated airflows and ventilation-performance comparison between two local exhaust hoods [J]. Energy and buildings, 2017, 154: 207-216.

(责任编辑: 周泉)