

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.122



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



循环风系统控制环境内污染物蓄积计算及数值模拟研究

潘武轩^{1,2}, 张慧杰¹, 宋高举², 宋翀芳¹, 雷勇刚¹, 刘晓志¹

(1. 太原理工大学土木工程学院, 太原 030024; 2. 机械工业第六设计研究院有限公司, 郑州 450007)

摘要: 循环风系统可以充分利用空气的再输运能力, 减小实时排放总量, 因其节能减排特性而成为工业通风的重要选择。但循环风系统控制环境内存在污染物蓄积现象, 目前针对受控环境污染物蓄积及循环风比例的精确控制研究尚不完善。改进循环风系统控制环境内污染物蓄积实时计算方法, 基于铸造工业污染物散发的间歇性, 提出不同工艺条件下循环风比例计算方法, 动态调节循环风比例范围; 通过 CFD 离散相模型 (DPM) 对受控环境内的污染物时空分布进行深入研究。结果表明, 不同时刻模拟计算结果与理论计算值平均误差在 15% 以内, 具有良好的一致性; 循环风系统能有效降低新风量和除尘系统实时排放总量; 循环风系统控制环境内污染物蓄积存在浓度上限, 上限值由污染源源强、循环风比例、除尘器对污染物的过滤效率计算确定。此外, 通过受控环境内不同循环风比例下污染物浓度变化的动态特性, 选取合适的循环风比例, 在节能的基础上, 对于减少循环风系统控制环境内污染物蓄积至关重要。

关键词: 循环风系统; 污染物蓄积; 循环风比例; 理论计算; 数值模拟

中图分类号: TU834.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Calculation and numerical simulation of pollutant accumulation in the controlled environment by circulating air system

PAN Wuxuan^{1,2}, ZHANG Huijie¹, SONG Gaoju², SONG Chongfang¹,
LEI Yonggang¹, LIU Xiaozhi¹

(1. School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China; 2. The Sixth Design and Research Institute of Machinery Industry Co., Ltd, Zhengzhou 450007, P. R. China)

Abstract: The circulating air system can make full use of the re-transportation capacity of the air and reduce the total real-time emissions, which has become an important choice for industrial ventilation due to its energy-saving and emission reduction characteristics. However, there is a phenomenon of pollutant accumulation in the controlled environment of the circulating air system, and the research on the precise control of the accumulation

收稿日期: 2024-09-23

基金项目: 国家十三五重点研发计划项目 (2018YFC0705305-5); 山西省基础研究计划 (202203021212246)

作者简介: 潘武轩 (1990-), 女, 博士, 主要从事建筑室内外环境控制研究, E-mail: wuxuanpan@tyut.edu.com。

宋高举 (通信作者), 男, 教授级高工, E-mail: 13838135839@163.com。

Received: 2024-09-23

Foundation items: the National 13th Five-Year Plan for R & D Projects (No. 2018YFC0705305-5); the Applied Basic Research Programs of Shanxi Province (No. 202203021212246)

Author brief: PAN Wuxuan (1990-), PhD, main research interests: indoor and outdoor environmental control of buildings, E-mail: wuxuanpan@tyut.edu.com.

SONG Gaoju (corresponding author), professor level senior engineer, E-mail: 13838135839@163.com.

of pollutants in the controlled environment and the proportion of circulating air is not perfect. In this study, a real-time calculation method for controlling pollutant accumulation in the environment by circulating air system was developed. Based on the intermittency of pollutant emission in the foundry industry, a method for calculating the proportion of circulating air under different process conditions was proposed, and the proportion range of circulating air was dynamically adjusted. The spatiotemporal distribution of pollutants in a controlled environment was studied by CFD discrete phase model (DPM). The results show that the average error between the simulation results and the theoretical calculated values at different times is within 15%, which is in good agreement. The circulating air system can effectively reduce the fresh air volume and the total real-time emission of the dust removal system; The upper limit of the concentration of pollutants in the environment controlled by the circulating air system is determined by the calculation of the intensity of the pollution source, the proportion of circulating air, and the filtration efficiency of the dust collector. In addition, through the dynamic characteristics of pollutant concentration changes under different circulating air ratios in the controlled environment, it is very important to select the appropriate circulating air ratio, which is very important to reduce the pollutant accumulation in the environment controlled by the circulating air system on the basis of energy saving.

Keywords: circulating air system; pollutant accumulation; proportion of circulating air; theoretical calculations; numerical simulation

2021年,中国实施了《铸造工业大气污染物排放标准》(GB 39726—2020),与以往工业标准对工业污染物的粗放型排放要求不同,新的排放要求对铸造工业污染物的控制提出了更高的要求,例如,将熔炼炉颗粒物排放限值从 150 mg/m^3 ^[1]降低至 40 mg/m^3 ^[2]。对于铸造工业各工艺产生的大量粉尘和挥发性气体等^[3],因其间歇性、低浓度排放的特点,节能处理具有一定的挑战性。目前主要采用全面通风^[4]或设置局部排风罩^[5]来改善工业建筑环境内的空气质量。全面通风往往能耗巨大;局部排风罩是控制工业建筑中污染物的有效手段,学者们针对排风罩的改进做了大量研究^[6-8]。但以上传统的通风方式并不能完全解决粉尘问题,往往出现经济和能源代价高的问题。与此同时,被排放至大气中的烟气,对大气环境也会造成一定负担。

铸造工业污染物散发具有间歇性,Litomisky^[9]指出,大多数工业排放过程是间歇性的(通常不到50%的时间),并提出了一种按需集中通风系统以减少排风量。Leszczynski等^[10]意识到工业气动系统的复杂性和过尺度,提出了一个通过废气的积累和再利用来优化系统能源效率的框架。这为改善室内空气质量、提高能源利用效率,减少能源消耗带来了新的可能性。循环风系统循环利用一部分排风的输运能力,同时有效降低污染物实时排放总量,从而实现节能减排。杨攀^[11]通过现场实施可控循环通风技术,大大降低了巷道尤其是距工作面30 m范围内工人比较集中巷道的粉尘浓度,改善了工作面生产环境,降低了尘肺病发病率。兰陈超^[12]等

以某铸造清理车间为研究对象,提出可控循环风净化技术,采用CFD数值计算方法分析得出通风效率近似的情况下,无循环风系统的能耗是循环风系统的8倍。这些研究表明,循环风技术在改善工业建筑室内空气质量,减小通风能耗方面具有潜力。

在循环风系统的进一步研究中,Liu等^[13]提出了一种多终端排风通风系统动态排风需求计算新方法,讨论了排气时间、循环时间、机器数量、工人数量和操作时间等因素对工艺的影响。但只探讨了工艺特点与排气循环时间的特点,而针对循环风系统的特性如循环风量等要素、循环风系统的除尘效果的研究尚未提及。丁佰权^[14]研究了送风速度、角度等不同参数对除尘效果的影响,并通过CFD模拟方法给出了最优方案。该研究仅关注气流组织对循环风系统的影响,未涉及循环风量精确控制污染物浓度及最优方案的研究。Zeng等^[15]针对炼胶过程污染物排放的特点,提出了一种新型的循环通风系统,并对循环通风系统的循环风量、再循环风射流角和排风量进行了CFD仿真优化,提高了循环系统的污染物捕获效率。但该研究对其他工艺的适用性有待验证,循环风系统精确控制尚无高效统一的计算方法。以上研究针对工业除尘中循环风速等变量对捕获效率的影响展开了系统实验和分析,试图通过优化循环风系统的相关参数来提高除尘效能。然而,在使用循环风系统的过程中,还应考虑受控环境内污染物浓度会随着时间积累,污染物蓄积问题仍然尚待评估。张雅静^[16]注意到循环风系统可能会带来的污染物蓄积,对系统的长期运行和

除尘效果造成负面影响,提出须重视铸造车间循环风系统中出现的 NO 和 CO 积聚问题,然而该研究并未对循环风系统污染物蓄积浓度提出具体的计算方法。章基法^[17]在优化循环风系统的过程中,注意到循环风量的调节,以确保系统运行在最佳状态下并通过 CFD 模拟对比不同比例循环风量下的粉尘浓度,确定了最佳循环风量,但尚未给出普适的计算方法。

综上所述,现有循环风的相关研究大多局限于对已有循环风的除尘效率进行改进提高,而在工艺生产中循环风往往存在污染物蓄积现象,对于受控环境污染物蓄积及循环风比例的计算方法尚无定论。对此,笔者针对受控环境内污染物蓄积的实时计算方法开展理论及数值模拟研究;根据不同工艺散发特性,计算循环风比例、受控环境污染物浓度时空分布等,以期受控环境污染物控制及循环风系统的安全运行提供科学依据。

1 污染物蓄积理论计算模型

为分析循环风控制环境内污染物蓄积速率及与循环风比例之间的关系,假设污染物连续稳定地从污染源散发,排风口污染物浓度是受控环境内污染物平均浓度的 n 倍,送排风气流的温度相差不大,忽略室内外空气密度差异,基于受控环境污染物质量守恒原理,建立受控环境污染物质量守恒微分方程,如式(1)所示。

循环风系统示意图如图 1 所示,其中 L 为局部排风罩风量, m^3/s ; α 为循环风比例; y 为受控环境内污染物浓度, mg/m^3 ; y_0 为受控环境外污染物浓度, mg/m^3 ; τ 为时间, s ; x 为污染源源强, mg/s ; n 为排风处的污染物浓度与室内平均浓度的比值,排风处的污染物浓度通过现场测量出风管测点处的平均浓度得到,室内平均浓度可通过计算一段时间内释放一定源强的污染物总质量除以整个受控环境体积得到; η 为除尘器除尘效率,产品说明书或技术资料

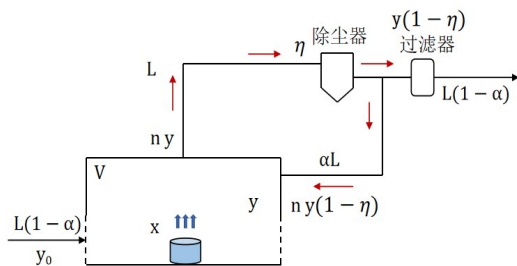


图1 受控环境污染物浓度计算用循环风系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the circulating air system for the calculation of the concentration of controlled environmental pollutants

中声明的除尘器效率; V 为受控环境空间体积, m^3 ; 受控空间补风量为 $L(1-\alpha)$, m^3/s ; 循环风量为 αL , m^3/s 。

1) 受控环境污染物质量守恒微分方程

$$L(1-\alpha)y_0d\tau + xd\tau + nL\alpha y(1-\eta)d\tau - nLyd\tau = Vdy \quad (1)$$

2) 假设受控环境外污染物浓度为 0, 初始时刻受控环境污染物浓度为 0, 求解式(1)可得受控环境污染物实时浓度

$$y(\tau) = \frac{x}{Ln[1-\alpha(1-\eta)]} \left(1 - e^{-\frac{Ln}{V}[1-\alpha(1-\eta)]\tau} \right) \quad (2)$$

3) 当时间趋于无穷时, 获得受控环境污染物蓄积浓度上限为

$$y_\infty = \frac{x}{Ln[1-\alpha(1-\eta)]} \quad (3)$$

即受控环境污染物浓度上限 y_∞ 的影响因素包括: 污染源源强 x 、局部排风罩风量 L 、循环风比例 α 、除尘器对污染物的过滤效率 η ; n 由受控环境的几何形状尺寸、排风罩特性及气流组织确定。

2 数值模拟

2.1 物理模型及网格划分

采用的物理模型如图 2 所示, 该捕集罩模型计算域尺寸长 (X) $\times$ 宽 (Y) $\times$ 高 (Z) = $0.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.23 \text{ m}$ 。其中捕集罩排风口面积 $0.4 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.04 \text{ m}^2$, 排风风速 0.18 m/s , 排风量为 $0.0072 \text{ m}^3/\text{s}$, 两个回风口单个面积 $0.05 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} = 0.02 \text{ m}^2$, 总送风面积 0.04 m^2 , 送风风速 0.05 m/s , 总循环风量 $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 。房间下部设有两个自然补风口, 尺寸分别为 $0.08 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。

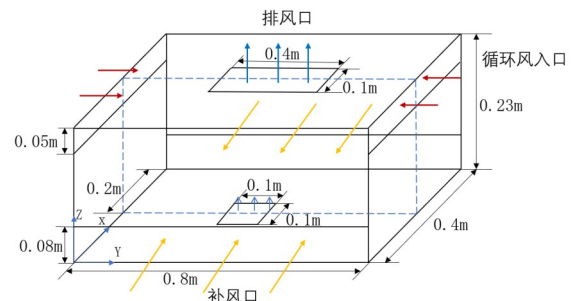


图2 物理模型

Fig.2 Physical model

污染面源位于房间地面中部, 颗粒由长 (X) $\times$ 宽 (Y) = $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.01 \text{ m}^2$ 的正方形出口释放, 研究设置的颗粒质量流量为 5 mg/s , 释放速度为 0.03 m/s 。其中颗粒为车间常见的无烟煤颗粒, 颗粒粒径为 $10 \mu\text{m}$, 密度为 $\rho = 1550 \text{ kg}/\text{m}^3$, 比热容

$C_p=1680 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 导热系数为 $\lambda=0.33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

采用 ICEMCFD (The Integrated Computer Engineering and Manufacturing code for Computational Fluid Dynamics) 进行物理模型建模, 并进行六面体结构化网格划分。为了减少网格质量对模拟结果的影响, 对网格数量为 22 113、32 480、48 048、57 456、86 856 时污染物散发方向点 $x(0.2, 0.4, 0.13)$ 处的速度值进行比对。如图 3 所示, 当网格数量为 48 048 时, 点 x 处的速度值与网格数量 57 456、86 856 处的速度值差距较小, 在 5% 以内, 可以认为网格数量大于等于 48 048 时的模拟值与网格数量无关, 因此选择数量为 48 048 的网格, 网格质量均在 0.95 以上, 符合计算要求。

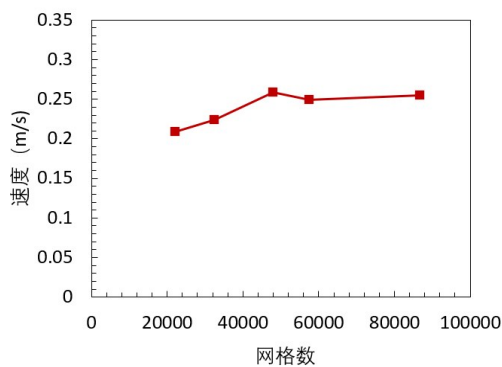


图3 网格数量不同时点 $x(0.2, 0.4, 0.13)$ 的速度值

Fig.3 The velocity value of the point $x(0.2, 0.4, 0.13)$ for the number of grids

2.2 数值模型及边界条件

根据工艺散发特点对捕集罩内进行了边界条件设定: 送风口和排风口均设置为速度入口, 环境温度为 300 K, 污染源温度为 673 K, 释放颗粒质量流量为 5 mg/s, 循环风送风风速为 0~0.108 m/s, 排风罩排风风速为 0.18 m/s, 自然补风边界条件设置为压力入口, 其余边界均设置为壁面。

在解决房间内部流体流动的问题方面, 目前常用的数学模型包括标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型等^[18]。Ben Ramoul 等^[19]采用 3 种 RANS 湍流模型 (Standard $k-\epsilon$ 模型、Realizable $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型) 对建筑物周围的流动特性和污染物扩散进行数值研究, 将数值计算结果与风洞实验结果进行比较发现, 采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型计算得到的速度、流场和湍流运动强度的结果与实验测量结果吻合最好, 因此, 选择 RNG $k-\epsilon$ 模型。采用相间耦合的随机游走模型预测由流体湍流引起的颗粒扩散行为^[20]。经计算, 任意工况下颗粒体积百分数均小于 10^{-6} 。据两相流划分形式, 模拟流体视作稀疏两相流, 忽略颗粒间的相互作用^[21]。此外, 考虑到颗粒与气流之间存在动量和热量的传递, 因此选择双向耦合方法

求解各个时刻离散相和连续相之间的动量和热量交换^[22]。

压力速度耦合采用 Coupled 算法^[23], 时间步长设置为 0.1 s。由于空气温度较高, 其密度、比热容、热导率和黏度会随着温度的变化而变化, 所以对这些参数进行线性差分设置。使用 UDF (User-Defined Functions, 用户自定义函数) 来实现循环风系统中将出口颗粒物经过滤后赋值给回风口, 重新进入室内, 从而省去了污染物通过出口排出后经过滤器再次回到房间的环节, 降低了数值模拟情况的复杂性。

3 结果与讨论

3.1 颗粒输运模型的验证

为了验证采用的颗粒输运模型的合理性, 对 Chen 等^[24]的实验工况进行数值模拟, 并将模拟结果与实验数据进行比较。物理模型如图 4 所示, 该模型室长宽高分别为 $x=0.8 \text{ m}$ 、 $y=0.4 \text{ m}$ 、 $z=0.4 \text{ m}$, 进出口尺寸均为 $0.04 \text{ m} \times 0.04 \text{ m}$, 测试线在房间中部 xz 截面 $y=0.2 \text{ m}$ 上, 分别为 $x=0.2 \text{ m}$ 、 $x=0.4 \text{ m}$ 、 $x=0.6 \text{ m}$ 。以入口处粒子浓度为基准, 对粒子浓度进行无量纲化处理, 即入口处粒子浓度无量纲值 $c^*=1$ 。进口送风风速为 0.225 m/s, 粒子从入口注射, 粒径为 $10 \mu\text{m}$, 密度为 $1400 \text{ kg}/\text{m}^3$, 质量流量为 $2.9288 \times 10^{-10} \text{ kg}/\text{s}$ 。

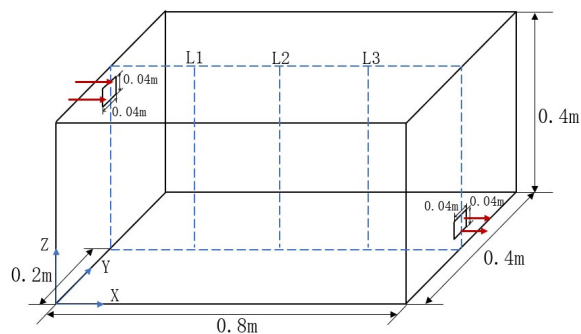


图4 Chen 所用的物理模型

Fig.4 The physical model used by Chen

不同位置 x 坐标轴方向的速度模拟值与实验结果对比如图 5 所示。由图 5 可知, 不同位置处模拟结果与实验结果基本吻合, 平均误差为 13.7%。不同位置颗粒物无量纲浓度 c^* 模拟值与实验结果的对比如图 6 所示, 模拟结果与实验测量平均误差为 22.06%, 靠近顶部壁面及进风口高度模拟结果与实验测量误差相对较大, 相较于模型室其他地方, 顶部靠近入口水平射流速度大, 颗粒物浓度梯度较大, 空间变化显著, 再考虑测量误差等, 认为该模拟结果可接受。由图 5、图 6 可见, 数值模拟结果与 Chen 等^[24]

的实验数据基本吻合,说明采用的数值模拟方法可以准确预测受控环境内的气固两相流过程。

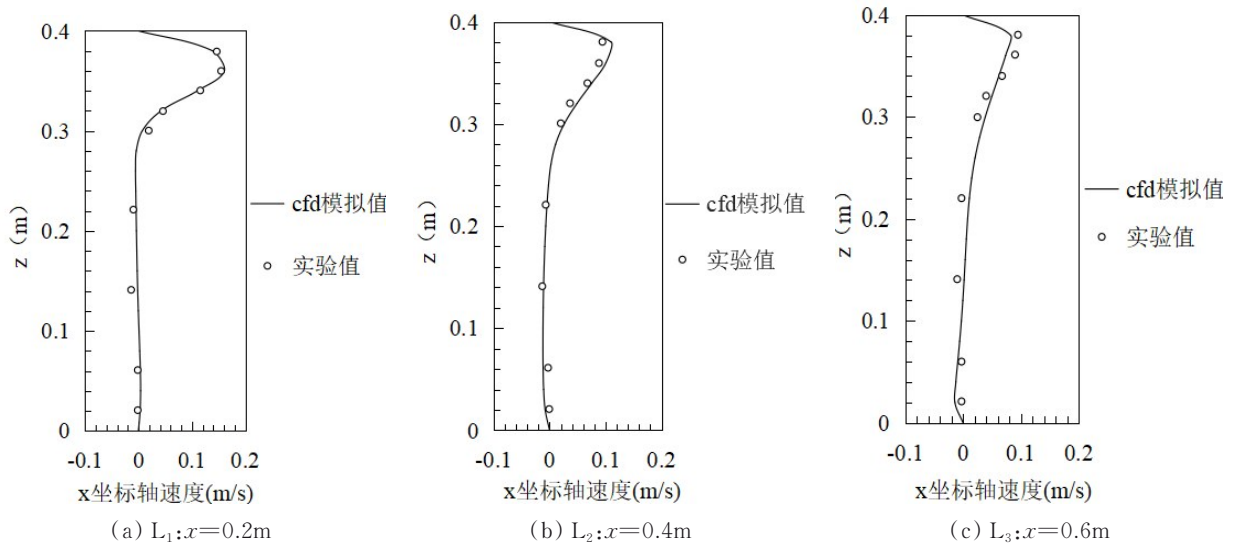


图5 不同测试线的x坐标轴方向的速度模拟值与实验结果的比对

Fig.5 Comparison of the simulated velocity values in the x-axis direction of different test lines with the experimental results

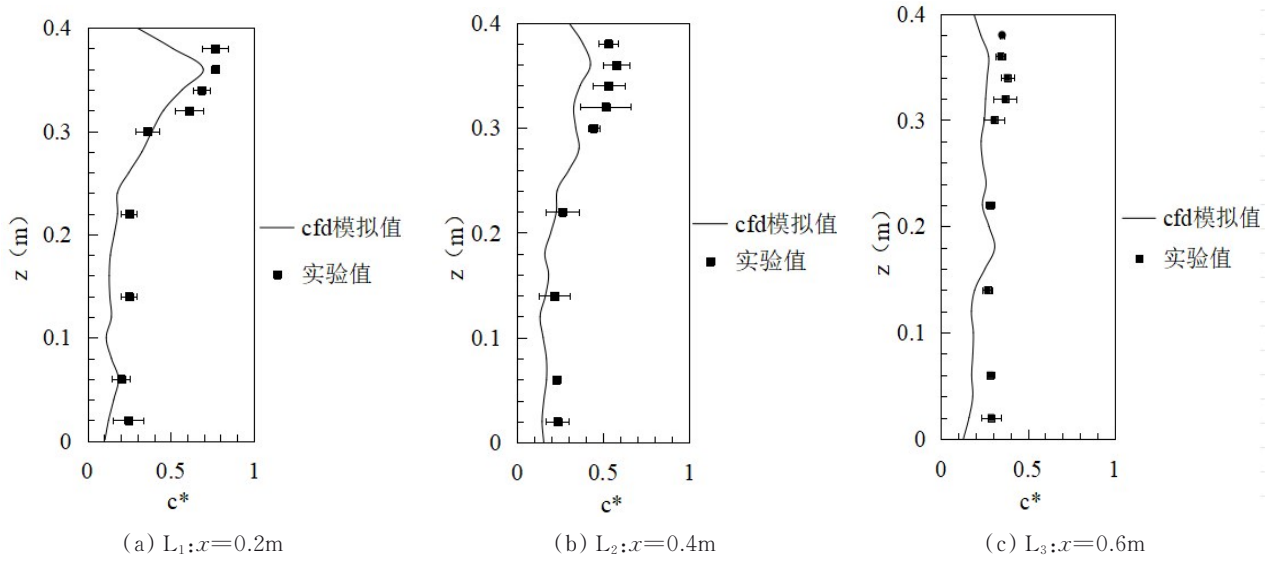


图6 不同测试线的颗粒物无量纲浓度 c^* 模拟值与实验结果的比对

Fig.6 Comparison of the simulated value of the dimensionless concentration of particulate matter c^* with the experimental results of different test lines

3.2 理论计算模型与数值计算结果对比

1) 理论计算值与数值模拟结果对比

针对图2循环风系统及受控环境模型,数值模拟选取循环风比例 α 为27.8%的工况,将 $\alpha=27.8\%$ 代入式(2)计算获得不同时刻受控环境理论浓度值,对比结果如图7所示。由图7可知,随颗粒物释放时间增加,受控环境内颗粒物浓度逐渐增大,并逐渐趋于恒定,即存在污染物蓄积上限。该工况下,颗粒物释放4s时受控环境内颗粒物平均浓度达到了相对稳定,体平均浓度为 130.44 mg/m^3 。不同时刻模拟计算结果与理论计算值平均误差在15%以内,故数值模拟与理论计算模型计算结果具

有良好的一致性。

2) 循环风系统优势

无循环风时,含尘气流直接排至除尘系统,控制环境补风全部来自图2所示的补风口。当受控环境使用循环风系统后,排风罩排风量的15%、27.8%、45%、60%作为循环风经循环风入口再次进入室内,新风使用量显著降低,节省的新风量等于循环风量;且能充分利用循环风的输运能力。能耗方面,循环风系统将一部分排风重新利用,减少新风量,节省该部分冬季供暖能耗 $Q=\alpha Q_0$;同时有效降低了实时排放总量 $L_P=(1-\alpha)L$,降低除尘设备容量,减少初投资。

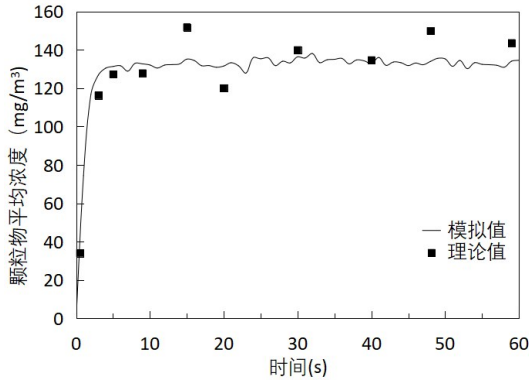


图7 $\alpha=27.8\%$ 时,不同时间内受控环境的颗粒物平均浓度
模拟值与理论计算值

Fig.7 Simulated and theoretically calculated values of the average concentration of particulate matter in the controlled environment at different times at $\alpha=27.8\%$

图8为颗粒物释放60 s时,不同循环风比例下受控环境内颗粒物的平均浓度。随着循环风比例的增大,节省的新风量相应增多,同时污染物实时排放总量减小。由图8可知,受控环境污染物浓度逐渐增加。15%比例的循环风与不使用循环风(即0%)相比节省了15%的排放量和新风量,污染物平均浓度增加1.66%;循环风比例为27.8%时与不使用循环风相比节省了27.8%的排放量和新风量,污染物平均浓度增加5.5%;45%比例的循环风与不使用循环风相比节省了45%的排放量和新风量,污染物平均浓度增加了12.08%,60%比例的循环风与不使用循环风相比污染物平均浓度增加了28.58%。故循环风系统可以有效降低新风量和除尘系统实时排放增量,但受控环境内污染物浓度有所增加,且随循环风比例增大,污染物蓄积程度增加;但存在污染物蓄积上限,浓度上限值可由式(3)计算获得。

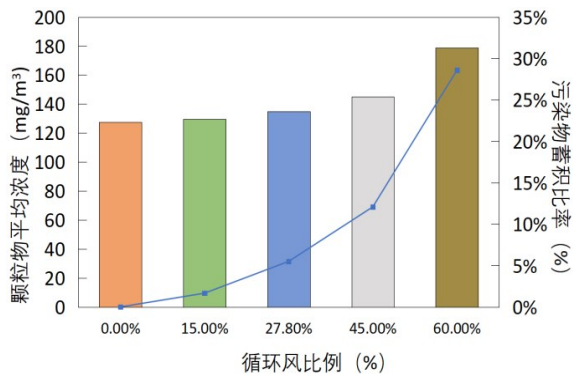


图8 颗粒物释放60 s不同循环风比例下,受控环境内的颗粒物平均浓度的变化

Fig.8 Changes in the average concentration of particulate matter in a controlled environment under different circulating air ratios for 60 seconds

3.3 受控环境污染物质时空分布

图9和图10分别为不同循环风比例下,颗粒物释放30 s时,室内中部 $y=0.2\text{m}$ 截面的浓度场和速度场。

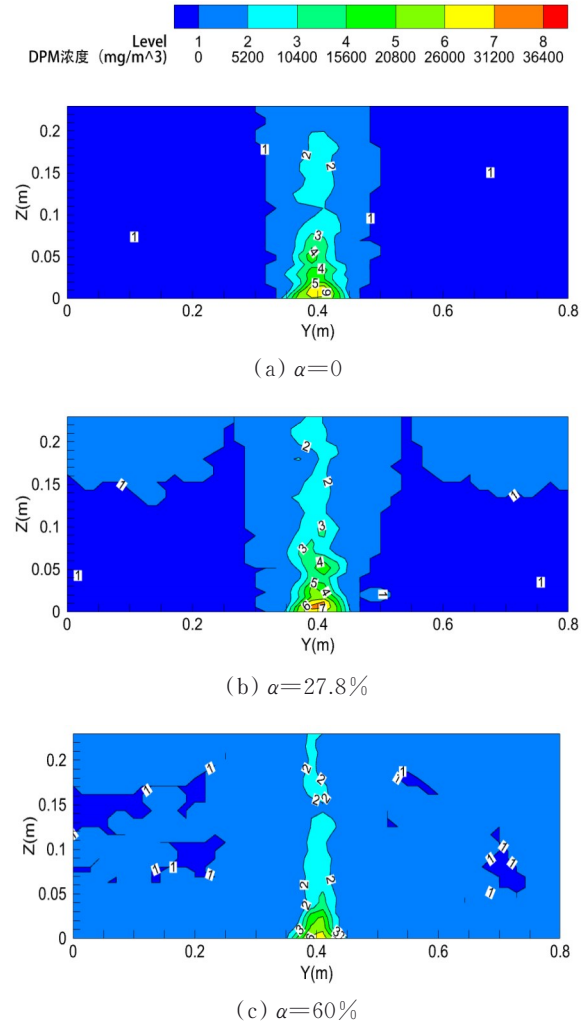


图9 不同循环风比例下, $y=0.2\text{m}$ 平面污染物浓度分布
Fig.9 Concentration distribution of pollutants in the plane of $y=0.2\text{m}$ under different circulating air ratios

将污染物浓度从小到大均匀划分为8个等级,如图9所示。图9(a)为无循环风,室内自然补风时,污染物浓度分布主要集中在房间中部。图9(b)为增加循环风比例至27.8%,污染源附近污染区域明显增大。长期暴露于高浓度颗粒污染物中会对人体呼吸系统造成严重损害^[25],合适的循环风比例范围对减少工作人员呼吸区颗粒浓度、保障人体健康至关重要。循环风比例增加到60%时,如图9(c)所示,污染物浓度在Level 2以下的区域范围增大,几乎分布整个空间;循环风比例为60%时较27.8%时受控环境平均浓度增加30.36%,污染物蓄积情况加剧。故在使用循环风系统的过程中,需控制循环风比例,在减小补风量、能耗和实时排放总量的

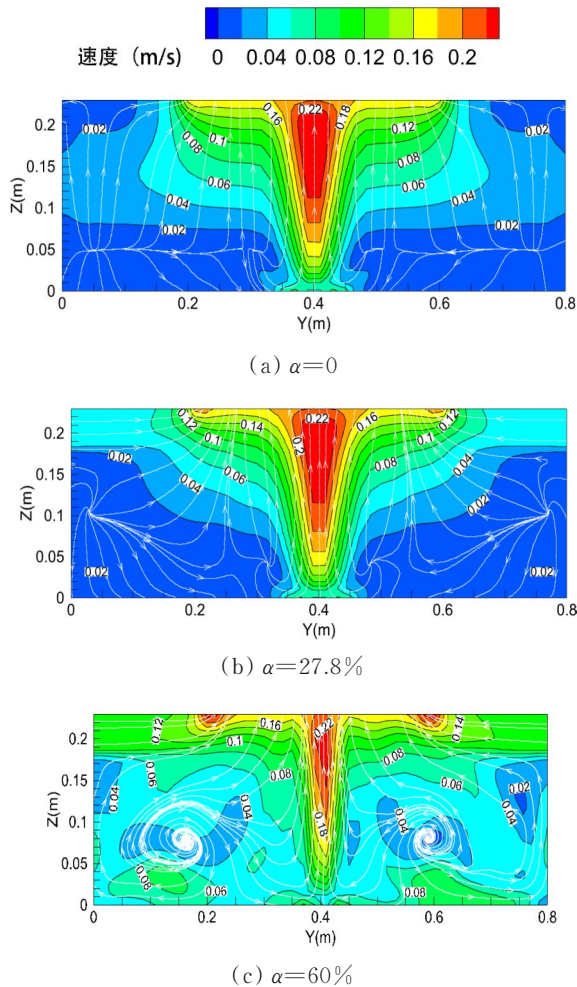


图 10 不同循环风比例下, $y=0.2\text{m}$ 平面速度流场分布(白色带箭头实线为速度流线)

Fig.10 Velocity flow field distribution in the plane of $y=0.2\text{m}$ under different circulating air ratios

同时,有效控制受控环境内污染物的蓄积,对循环风系统的推广使用至关重要。

图 10 所示白色实线为 $y=0.2\text{m}$ 界面流场的流线,箭头方向代表速度方向;黑色实线为该平面速度等值线,图中标明了部分等值线数值。由图 10 (a)可知,无循环风时,全部由补风口补风,以 0.05m 为界,以上位置流场流速向上,以下区域流速向下。随着循环风比例的增大,循环风入口风速越来越大,补风口风量越来越小,受控环境流场流线发生变化,逐渐有涡流产生。当循环风比例为 $\alpha=27.8\%$ 时,受控环境流场如图 10(b)所示,流动方向分界线倾斜并向上移动。当循环风比例为 $\alpha=60\%$ 时,形成对称的大尺度涡旋,如图 10(c)所示,涡旋中心与补风口高度相近,涡旋中心干扰污染物的排出。故在使用循环风系统的过程中,选取合适的循环风比例,对于减少受控环境内污染物蓄积至关重要。

图 11 为不同循环风比例下,受控环境内颗粒物

平均浓度随时间的变化。随着循环风比例的增加,污染物的实时平均浓度也在增大。循环风比例一定时,随颗粒物释放时间的增加,受控环境内颗粒物浓度也逐渐增大,并逐渐趋于恒定,即污染物蓄积存在浓度上限。循环风比例为 0% 和 15% 、 27.8% 的颗粒物平均浓度没有显著差距,这说明循环风比例在一定范围内,没有造成明显的污染物蓄积,同时有效降低了实时排放量,减少新风量。

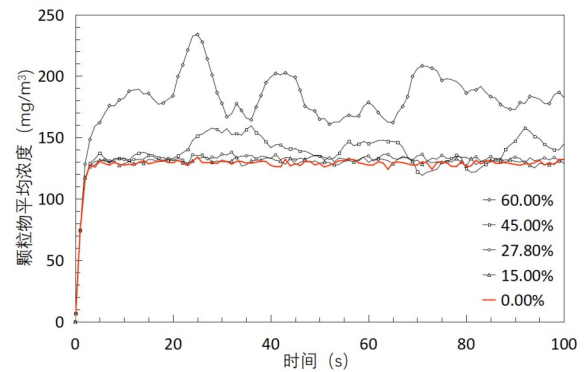


图 11 不同循环风比例下,受控环境内的颗粒物平均浓度随时间的变化

Fig.11 Variation of the average concentration of particulate matter in the controlled environment over time under different circulating air ratios

当颗粒物释放 60s 时,相比 15% 比例的循环风与 0 比例的循环风,污染物平均浓度增加了 1.66% ; 27.8% 比例的循环风与 15% 比例循环风相比污染物平均浓度增加了 3.91% ; 45% 比例的循环风与 27.8% 比例循环风相比污染物平均浓度增加了 6.95% ; 60% 比例的循环风与 45% 比例循环风相比污染物平均浓度增加了 18.78% 。即随着循环风比例的增大,污染物蓄积程度加剧。因此,合理控制循环风比例对受控环境的通风效果至关重要。

3.4 循环风比例控制方法

不同工艺污染物散发强度不同,受控环境污染物浓度限值不同,循环风比例的控制也应随工艺而异。铸造包含破碎、熔炼、造型制芯、浇铸、落砂等工序。各典型工艺生产过程产生的颗粒物浓度会受到多种因素的影响,包括但不限于铸造工艺、金属种类、燃料类型、炉内温度、燃烧效率等。因此,应根据具体工艺及污染源散发特性计算循环风比例。

《工业企业设计卫生标准》(GBZ 1—2010)中规定,烟气经净化后污染物浓度小于其职业接触限值的 30% 时方可循环使用。如表 1 所示, NO 和 CO 浓度低于 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $9\text{mg}/\text{m}^3$ 时才能循环至净化间。此时 NO 及 CO 浓度满足污染物排放标准且低于接触限值,但不满足循环要求,且随着时间的推移,

NO 和 CO 蓄积必然会对车间内操作人员的身体健康造成极大危害。

表 1 某铸造清理车间散发的粉尘和有害气体浓度及对应的接触限值

Table 1 Concentrations of dust and harmful gases emitted by a foundry cleaning workshop and the corresponding exposure limits

污染物	质量分数 (mg/m ³)	OELs	
		PC-TWA/(mg/m ³)	PC-STEL/(mg/m ³)
粉尘	20	8	
氮氧化物	0.215	5	10
一氧化碳	7.6	20	30

根据铸造工业的典型生产工艺及颗粒物的生产量与排放限值^[2],假设某铸造厂房主要生产铸铁产品,包括原料预处理、熔炼、浇铸、砂型制造等生产过程,污染源每秒产生大约 100 mg 的颗粒物。即源强为 100 mg/s。结合该车间要求的污染物浓度接触限值,若粉尘的最高允许浓度为 10 mg/m³,即要求浓度上限值 $y_{\infty} = \frac{x}{Ln[1 - \alpha(1 - \eta)]} = \frac{100}{12[1 - 0.2\alpha]} \leq 10$ 。假设现场排风口颗粒物浓度是整体车间平均浓度的 3 倍,除尘器效率为 80%,局部排风罩风量为 4 m³/s,代入式 3 可得 $\alpha \leq 83.33\%$,即循环风比例需控制在小于等于 83.33% 时,颗粒物浓度不超限。

类似地,在实际采用循环风系统,存在一定污染源情况的工业厂房中,可通过以上步骤对不同工艺过程,满足现场环境需求的循环风比例进行精准控制,确定循环风比例调控范围。

4 结论

循环风系统可以充分利用循环风的输运能力,降低新风负荷,减少实时排放量,降低除尘设备容量和初投资,节能增效减排,具有很好的环境效益和经济效益。发展了循环风系统控制下污染物蓄积浓度及循环风比例控制计算模型,并通过数值模拟获悉了受控环境内污染物的时空分布,得到以下结论:

1)发展了受控环境用循环风系统污染物浓度实时计算模型;通过理论公式可以计算出不同时刻不同工况下受控环境内污染物实时平均浓度;循环风系统受控环境内污染物蓄积存在浓度上限,上限值由污染源源强、循环风比例、除尘器对污染物的过滤效率确定。

2)采用数值模拟方法获得了受控环境污染物

的时空分布及流场特性;数值模拟结果与理论计算模型具有较好的一致性;随着循环风比例增加,污染物高浓度区域向全部空间扩散,污染物蓄积程度加剧,但存在污染物蓄积上限。选取合适的循环风比例,对于减少受控环境内污染物蓄积及保障控制环境通风效果至关重要。

3)获得了不同工艺下,循环风比例计算方法。根据铸造行业相关卫生标准中有害物允许接触限值浓度,确定所需循环风比例调控范围;并给出了计算示例。

参考文献

- [1] 工业炉窑大气污染物排放标准: GB 9078—1996 [S]. 北京: 国家环境保护局, 1996.
Emission standard of air pollutants for industrial kiln and furnace: GB 9078—1996 [S]. Beijing: State Bureau of Environment Protection, 1996. (in Chinese)
- [2] 铸造工业大气污染物排放标准: GB 39726—2020 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
Emission standard of air pollutants for foundry industry: GB 39726—2020 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020. (in Chinese)
- [3] 王婷婷, 张一心, 周长波, 等. 我国铸造业大气污染治理现状与对策研究[J]. 环境保护科学, 2021, 47(6): 81-86.
WANG T T, ZHANG Y X, ZHOU C B, et al. Research on current situation and countermeasures of air pollution control of foundry industry in China [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(6): 81-86. (in Chinese)
- [4] 魏冠琼. 含油雾工业厂房通风策略的研究[D]. 天津: 天津大学, 2019: 4-5.
WEI G Q. Study on ventilation strategy of oil mist industrial workshop [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019: 4-5 (in Chinese).
- [5] ZHANG J, WANG J, GAO J, et al. Exhaust hood performance and its improvement technologies in industrial buildings: A literature review [J]. Building Simulation, 2024, 17(1): 23-40.
- [6] 王萌. 涡旋侧吸排风罩的流场特性及污染物捕集效果研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019: 60-64.
WANG M. Study on flow field characteristics and pollutant capture effect of vortex side suction exhaust hood [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019: 60-64 (in Chinese).
- [7] 谢春波, 权梦凡, 曹智翔, 等. 平行流送风对侧吸排风罩烟气捕集效率的提升[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 101-109.
XIE C B, QUAN M F, CAO Z X, et al. Improvement

- of fume capture efficiency of side suction hood with parallel-flow supply air [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(10): 101-109. (in Chinese)
- [8] 许艳娜. 焊接工位局部排风罩的性能优化及评价指标研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023: 28-31.
XU Y N. Study on performance optimization and evaluation index of local exhaust hood at welding station [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2023: 28-31. (in Chinese)
- [9] LITOMISKY A. Exhaust ventilation energy saving in car manufacturing and other industries [J]. *Energy Engineering*, 2007, 104(3): 54-80.
- [10] LESZCZYNSKI J S, GRYBOS D. Compensation for the complexity and over-scaling in industrial pneumatic systems by the accumulation and reuse of exhaust air [J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 1130-1141.
- [11] 杨攀. 可控循环通风应用及局部通风安全性研究[J]. *山东煤炭科技*, 2019, 37(2): 91-93.
YANG P. Application of controllable circulation ventilation and safety of local ventilation [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2019, 37(2): 91-93. (in Chinese)
- [12] 兰陈超. 净化循环风与高温热源耦合作用下工业建筑内表面换热特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2022: 38-40.
LAN C C. Study on heat transfer characteristics of internal surface of industrial buildings under the coupling effect of purified circulating air and high temperature heat source [D]. Shanghai: Donghua University, 2022: 38-40 (in Chinese).
- [13] LIU G D, GAO J, ZENG L J, et al. On-demand ventilation and energy conservation of industrial exhaust systems based on stochastic modeling [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 223: 110158.
- [14] 丁佰权. 铸造清理环境净化除尘工程设计及分析[D]. 上海: 东华大学, 2020: 33-37.
DING B Q. Design and analysis of casting cleaning environment purification and dust removal engineering [D] Shanghai: Donghua University, 2020: 33-37.
- [15] ZENG L J, LIU G D, GAO J, et al. A circulating ventilation system to concentrate pollutants and reduce exhaust volumes: Case studies with experiments and numerical simulation for the rubber refining process [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 101984.
- [16] 张雅静. 降低铸造车间循环风利用中有害气体积聚的净化机制研究[D]. 上海: 东华大学, 2021: 2-3.
ZHANG Y J. Study on purification mechanism of reducing harmful gas accumulation in circulating air utilization in foundry workshop [D]. Shanghai: Donghua University, 2021: 2-3. (in Chinese).
- [17] 章基法. 基于喷砂工艺可控循环风净化除尘技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2020: 58-61.
ZHANG J F. Study on the technology of controlled circulating air purification and dust removal based on sand blasting process [D]. Shanghai: Donghua University, 2020: 58-61. (in Chinese)
- [18] SHAHEED R, MOHAMMADIAN A, KHEIRKHAH GILDEH H. A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2019, 19(2): 543-568.
- [19] RAMOUL LBEN, KORICHI A, POPA C, et al. Numerical study of flow characteristics and pollutant dispersion using three RANS turbulence closure models [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2019, 19(2): 379-400.
- [20] 韩坤, 庄加玮, 刁永发, 等. 焊接工艺多源散发的高温颗粒污染物扩散特性数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2552-2560.
HAN K, ZHUANG J W, DIAO Y F, et al. Numerical simulation of diffusion characteristics of high-temperature particles generated by multiple pollution sources in welding process [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2552-2560. (in Chinese)
- [21] KARADIMOU D P, MARKATOS N C. Modelling of two-phase, transient airflow and particles distribution in the indoor environment by Large Eddy Simulation [J]. *Journal of Turbulence*, 2016, 17(2): 216-236.
- [22] YANG Y, WANG Y, SONG B B, et al. Transport and control of droplets: A comparison between two types of local ventilation airflows [J]. *Powder Technology*, 2019, 345: 247-259.
- [23] ANSYS fluent help documentation [Z]. ANSYS, Inc., 2024.
- [24] CHEN F Z, YU S C M, LAI A C K. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(2): 357-367.
- [25] 庄加玮, 刁永发, 楚明浩, 等. 可吸入颗粒物在不同阻塞性呼吸道内运动与沉积特性[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(7): 3349-3359.
ZHUANG J W, DIAO Y F, CHU M H, et al. Transport and deposition characteristics of inhalable particulate matters in different obstructive airways [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7): 3349-3359. (in Chinese)