



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201912088

中图分类号 X511

文献标识码 A

郑华春, 党小庆, 李世杰, 等. 印刷过程 VOCs 废气收集方式选择与优化[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2786-2795.
ZHENG Huachun, DANG Xiaoqing, LI Shijie, et al. Selection and optimization of VOCs exhaust gas collection method in printing process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2786-2795.

印刷过程 VOCs 废气收集方式选择与优化

郑华春, 党小庆*, 李世杰, 曹利, 谭晓煜, 徐佳

西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055

第一作者: 郑华春(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 大气污染控制。E-mail: 844180433@qq.com

*通信作者: 党小庆(1964—), 男, 博士, 教授。研究方向: 大气污染控制。E-mail: dangxq@163.com

摘要 为提高印刷过程中 VOCs 废气的收集效率和合理控制废气净化系统规模, 对废气收集方式进行了选择与优化, 采用现场测试和数值模拟相结合的方法, 对平版印刷过程中 VOCs 扩散模式进行分析, 采用数值模拟方法对常用的外部接收罩、半密闭罩和密闭罩等 3 种收集方式的效果进行了估算并与实验数据进行了比较。结果表明: 由数值模拟得到的 VOCs 浓度分布趋势与现场测试结果基本一致; 密闭罩和半密闭罩达到 90% 以上收集效率时的最小控制风量分别为 $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; 外部接收罩在最大设计风量 ($1\ 280 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 下, 收集效率仅为 80%; 考虑到印刷过程操作条件的限制, 在外部接收罩的基础上, 增设垂直挡板和三角形格栅, 对其进行结构优化, 当控制风量为 $640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 外部接收罩收集效率由优化前的 70% 提高到 91%。

关键词 印刷过程; VOCs 废气; 收集方式; 收集效率; 控制风量

挥发性有机物 (VOCs) 是 $\text{PM}_{2.5}$ 、臭氧等大气污染物的重要前体物之一。为促进环境空气质量持续改善, 国家和部分地方政府对印刷、设备涂装等重点行业提出了明确的 VOCs 控制目标^[1-2]。VOCs 的有效控制与净化设备性能密切相关, 也与废气的收集效率有直接关系, 故相关大气污染物控制标准规定收集效率和净化效率都不得小于 90%^[3]。现有企业都设有废气净化系统, 但现场监测发现, 部分企业净化系统废气收集效率低, 存在无组织排放量大, 车间劳动卫生条件较差等问题^[4]。

VOCs 废气的收集效率与废气的成分、排放特征、车间通风方式、集气罩结构形式等密切相关^[5-9]。景盛翱等^[10]基于 VOCs 主要排放行业, 选择 11 家代表性企业, 实测研究了 VOCs 治理现状和排放组成特征。武淑琴等^[11]采用数值模拟方法, 对胶印印刷过程中 VOCs 气体扩散特征进行了仿真分析。刘秋新等^[12]利用数值模拟方法进行了通风过程模拟, 结果表明局部通风优于全面通风。这些研究为合理设计 VOCs 废气收集系统以及提高收集效率提供了参考。但 VOCs 废气的收集方式作为收集系统的重要组成部分, 对其收集效率有更为直接的影响。HUANG 等^[13]通过实验研究提出, 增加排气罩的容纳量有助于去除瞬态高温污染物。邢金城等^[14]通过实验和数值模拟相结合的方法, 研究了条缝式排风罩不同影响因素对排风量的影响。然而, 目前关于 VOCs 废气收集系统中集气罩形式对收集效率影响的研究仍然较少。

收稿日期: 2019-12-14; 录用日期: 2020-03-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0212204); 陕西省重点研发计划 (2018ZDCXL-SF-02-04)

本研究以平版印刷为例, 采用数值模拟方法, 研究印刷过程中 VOCs 废气扩散模式, 通过现场实测验证数值模拟结果的准确性, 并采用数值模拟方法对常用的外部接收罩、半密闭罩和密闭罩等 3 种收集方式进行比较, 给出收集效率不小于 90% 时不同集气罩的控制风量。同时根据企业生产工艺特点, 对外部接收罩内部结构进行优化, 得到收集效率不小于 90% 时的最小设计风量, 从而减小废气净化系统规模。本研究对某平版印刷车间现有废气净化系统进行了分析和改造, 可为印刷企业废气净化系统改造提供参考。

1 印刷工艺过程及现有 VOCs 废气收集系统概述

平版印刷过程主要工序有调墨、制版、印刷、印后覆膜、上光等, 印刷过程 VOCs 废气主要来源于印刷环节油墨有机溶剂挥发产生的 VOCs 废气^[15]。平版印刷产品种类多、批量小, 为方便操作, 按经验, VOCs 废气收集常用局部集气罩方式, 但由于缺乏有机溶剂挥发量及其扩散模式等设计资料, 不能确定集气罩结构和设计排风量是否能满足收集效率不小于 90% 的设计要求。本研究以某平版印刷过程为例, 通过研究不同集气罩形式对单个印刷机滚轴面产生 VOCs 废气的控制效果, 进而对集气罩结构形式进行优化。平版印刷过程示意图如图 1 所示。

该平版印刷车间单条印刷机示意图如图 2 所示。为控制印刷过程 VOCs 排放量, 根据相关地方排放标准和工业通风设计手册^[16-17], 须在印刷机工作时的主要污染物控制面——顶部印刷机滚轴面增设废气收集装置。现有收集系统集气罩尺寸参数如图 2 所示, 集气罩平均罩口风速设为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 控制风量为 $1\ 280 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。

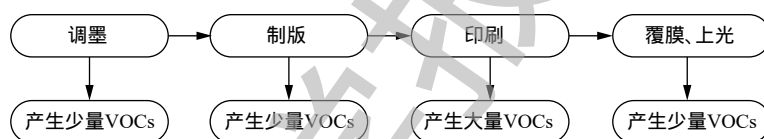


图 1 平版印刷过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the lithographic process

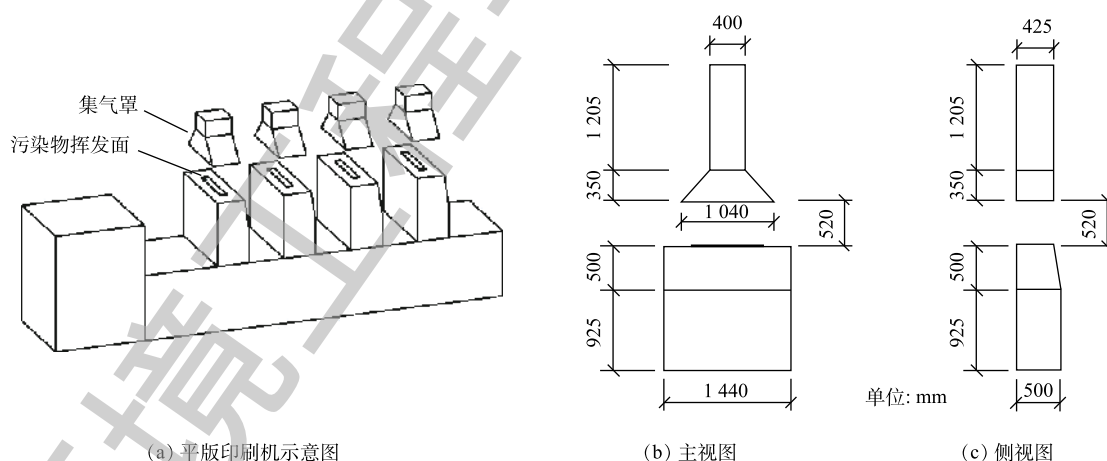


图 2 平版印刷机示意图及外部接收罩设计参数

Fig. 2 Schematic diagram of lithographic printing machine and design parameters of external receiving hood

2 数值模拟与现场测试方法

2.1 数值模拟

根据某平版印刷车间内污染物挥发面与排风罩的相对位置和尺寸, 计算区域取 $L\times W\times H=4 \text{ m}\times 4 \text{ m}\times 3.5 \text{ m}$, 其中污染物挥发面为 $L\times W=0.8 \text{ m}\times 0.1 \text{ m}$, 集气罩的罩口尺寸为 $L\times W=1.04 \text{ m}\times 0.425 \text{ m}$, 其

底边与污染物挥发面垂直距离为 0.52 m, 计算模型及不同集气罩设计参数如图 3 所示。网格采用结构化网格和非结构化网格相联合方式进行划分, 收集系统管道及集气罩模型比较规则, 采用结构化网格, 其他区域采用混合网格, 经网格质量检查满足计算要求。

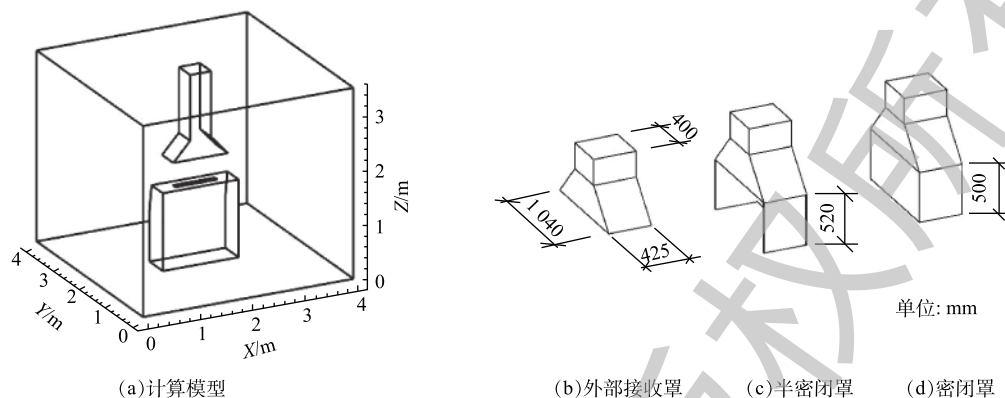


图 3 计算模型及不同集气罩设计参数

Fig. 3 Calculation model and design parameters of different gas collecting hood

印刷过程中受产品类型、油墨类型及印刷工艺影响, 不同产品在印刷过程中扩散过程均有不同。甲苯为印刷车间污染物代表性组分, 其相对分子质量为 92, 大于空气的相对分子质量, 因此, 以甲苯为模拟对象, 代表印刷过程中产生的 VOCs。为简化模拟过程并增加模拟结果的通用性, 做出以下假设: 甲苯挥发速率不随时间发生变化; 模拟过程中没有温度的变化, 甲苯气体温度为 300 K, 同环境空气温度相同; 气体流动不可压缩, 压力场均视为准稳态。在对 VOCs 气体浓度分布进行数值模拟的过程中选择控制方程^[18-19], 质量守恒方程见式 (1), 动量守恒方程见式 (2), 组分输运方程见式 (3)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

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

式中: ρ 为气体密度; t 为时间; u_x 、 u_y 、 u_z 、 u_i 、 u_j 为速度矢量的分量; x_i 、 x_j 为坐标分量; p 为静压; τ_{ij} 为应力张量; ρg_i 为 i 方向上的重力体积力; F_i 为 i 方向上的外部体积力; c 为组分的浓度; Γ 为空间内任一点污染物扩散系数, 为简化计算, 一般认为 3 个方向上的扩散系数相同, 对于双组分气体混合物, 组分扩散系数用麦克斯韦-吉利兰经验式^[20]估算, 计算得甲苯在空气中的扩散系数为 $6.97 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $S(x, y, z)$ 为源项, 即任意一点的污染物的释放强度。

数值模拟边界条件的设置参数见表 1。控制方程的数值解法采用有限体积法, 求解的差分格式采用一阶迎风格式; 计算时选择分离求解器, 采用 SIMPLE 算法; 湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。模型四周为自然进风口, 集气罩上

表 1 边界条件设置

Table 1 Boundary condition setting

边界名称	边界类型	参数设置
自然进风口	压力进口	—
管道出口	速度出口	$v=0.26 \sim 2.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
污染物挥发面	质量流量进口	$q_m=3.47 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
印刷机表面	绝热壁面	—
集气罩及管道表面	绝热壁面	—

部相接管道的出口为气流出口。印刷过程中油墨使用量为 $0.5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ，油墨中有机溶剂质量占比为 25%，以最大有机溶剂挥发量计算得污染物挥发速率为 $3.47\times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 现场测试

为了解静风条件下 VOCs 扩散过程，须对印刷机附近 VOCs 浓度进行现场测试分析。测点分布方案如图 4 所示，共 3 个测点，1 点位于 $Y=2 \text{ m}$ 截面上距印刷机中心线 1.2 m 处，高度为 1.7 m ；2 点位于 1 点下方 0.7 m 处；3 点位于 2 点下方 0.5 m 处。以非甲烷总烃代表 VOCs^[21]，采用气袋法采样，采样流量为 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ，采样时间为 10 min ，检测分析方法采用气相色谱法^[22-23]。

3 结果分析与讨论

3.1 静风条件下 VOCs 扩散模式分析

对收集系统风量为 0 时甲苯在计算模型内自然挥发进行数值模拟，1 h 后， $Y=2 \text{ m}$ 截面上甲苯浓度分布趋势如图 4 所示。截面上甲苯浓度左右基本对称，由于甲苯的相对分子质量比空气大，甲苯在挥发后会向下沉积，导致下部浓度较大，上部浓度较小，甲苯浓度在高度上逐层分布的特点十分明显。

现场测试结果显示，1、2、3 点非甲烷总烃浓度分别为 1.60 、 2.13 和 $2.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在空间上，随着高度的增加，非甲烷总烃浓度逐渐减小，浓度分布趋势与数值模拟结果基本一致，表明数值模拟分析结果可以作为集气罩选择和集气罩设计参数优化的分析依据。

3.2 不同集气罩形式下甲苯浓度场及气流速度场分布

印刷车间原收集系统在 2 种不同工况下的数值模拟结果如图 5 所示。由于收集系统的抽吸作用，空气从四周进风口进入，向外部接收罩汇聚，外部接收罩吸入气流的同时将有害气体吸入罩内。当收集风量为 $640 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时，由于集气罩罩口风速较小，由印刷机挥发面挥发出来的甲苯气体逐渐向车间下部沉积，集气罩未能有效地将甲苯气体抽吸进废气收集系统，部分甲苯气体跟随空气扩散到车间顶部。当收集风量为 $1280 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时，随着罩口风速的增大，气流在计算区域内分布更加均匀，涡旋明显减少，速度等值线向外扩展，截面上甲苯高浓度区域面积明显减小，甲苯无组织逸散明显减少。

废气收集系统的收集效率由式 (4) 计算得出。

$$\eta = \frac{QC}{q_m} \times 100\% \quad (4)$$

式中： η 为废气收集系统的收集效率； Q 为集气罩罩口风量， $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ； C 为集气罩罩口 VOCs 气体平均浓度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； q_m 为 VOCs 挥发面挥发速率， $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

外部接收罩收集效率与收集风量的关系如图 6 所示。收集风量由 $320 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 提高至 $640 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时，收集效率增长速度较快，由 15% 提高至 70%。在收集风量为 $640 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的基础上增大收集系统控制风量，随着收集风量的增大，收集效率的增长速度逐渐减小，当收集风量为 $960 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时，外部接收罩收集效率达到最大值 80%，仍未达到 VOCs 收集相关标准中要求的 90%。

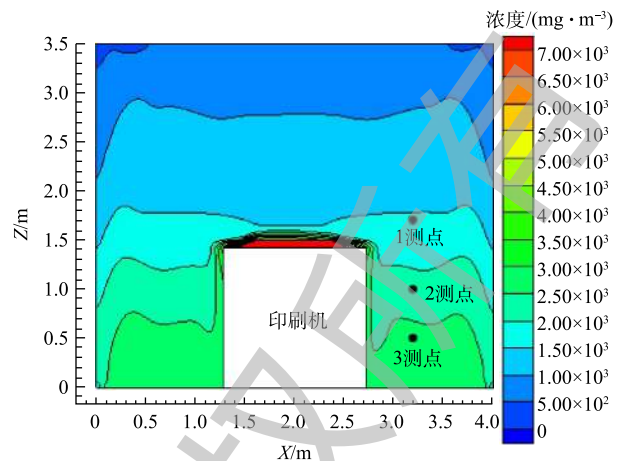


图 4 静风条件下甲苯浓度分布趋势

Fig. 4 Trend of toluene concentration distribution under windless conditions

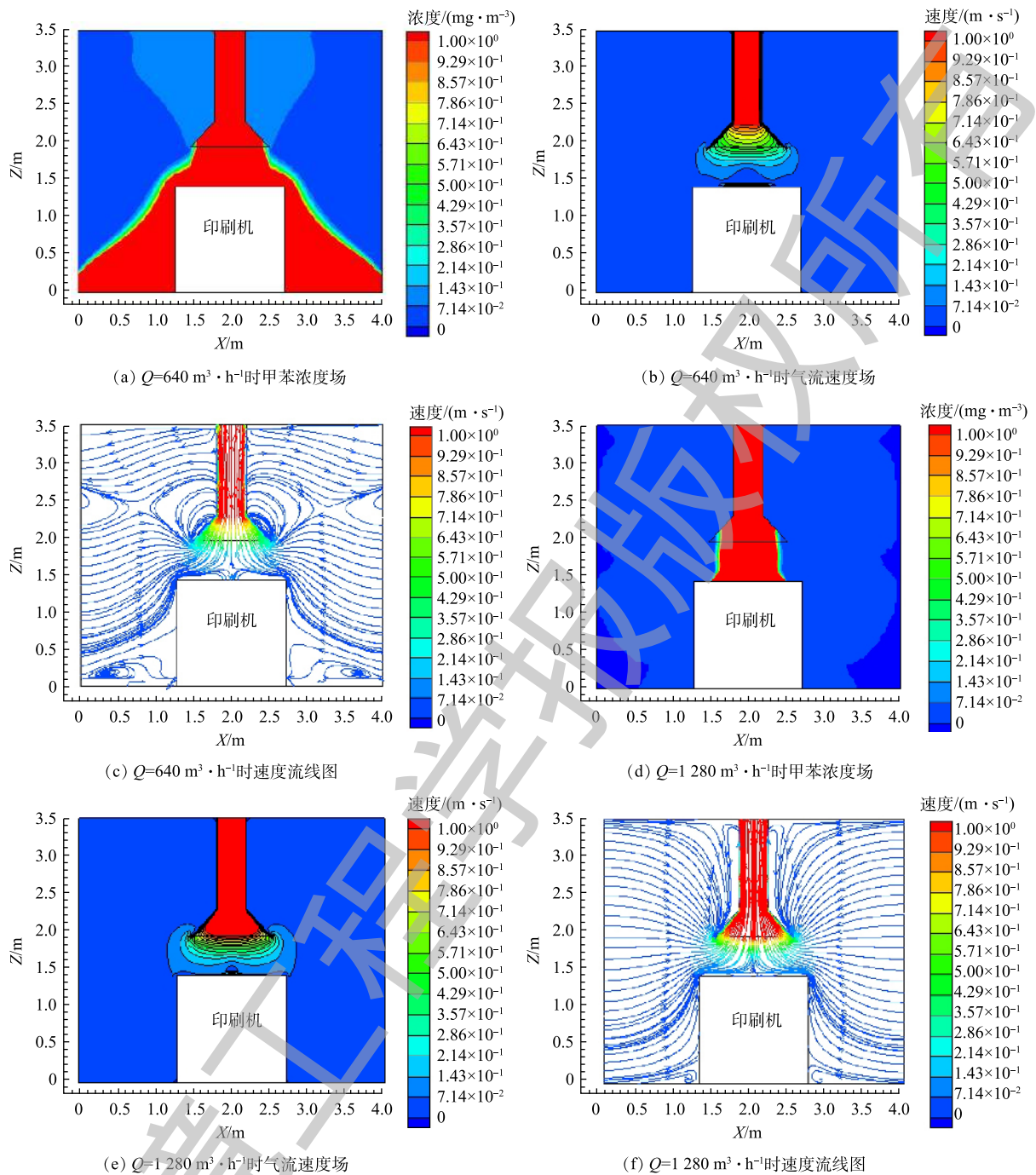


图5 外部接收罩不同风量下甲苯浓度场及气流速度场

Fig. 5 Toluene concentration field and air velocity field for external receiving hood at different air volumes

在实验中发现, 通过提高外部接收罩平均罩口风速的方法, 并不能在规范要求的控制风速内达到90%的收集效率, 因此, 须考虑半密闭罩和密闭罩2种收集方式对收集系统收集效率的影响。通过数值模拟, 对2种集气罩形式下后处理结果进行了分析, 图7为收集风量为 $320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时半密闭罩形式下甲苯浓度场及气流速度场, 图8为收集风量为 $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时密闭罩形式下甲苯浓度场及气流速度场。

当采用半密闭罩时, 甲苯无组织排放量相对外部接收罩明显减小, 随着罩口风速的增大, 集

气罩内部甲苯高浓度区域面积逐渐减小。由于集气罩三面围挡，甲苯在集气罩进风口的对立面下处产生堆积。收集风量为 $320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时，集气罩收集效率达到 96% 以上。

当采用密闭罩时，集气罩与污染物截面设置 0.02 m 条缝，以保证集气罩内部微负压，条缝处有少部分甲苯逸散。收集风量为 $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时，集气罩收集效率已能达到 99% 以上。

不同集气罩下收集效率与收集风量的关系如图 9 所示。分析以上 3 种收集方式数值模拟结果，相比于外部接收罩，密闭罩和半密闭罩

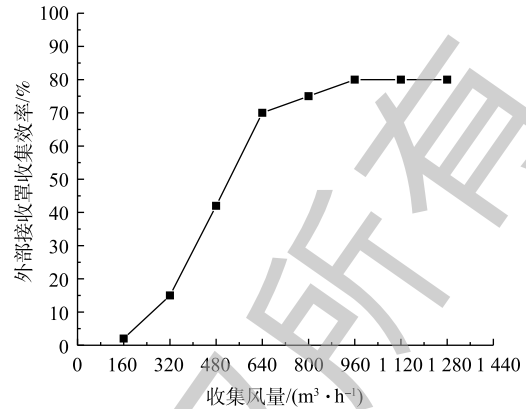
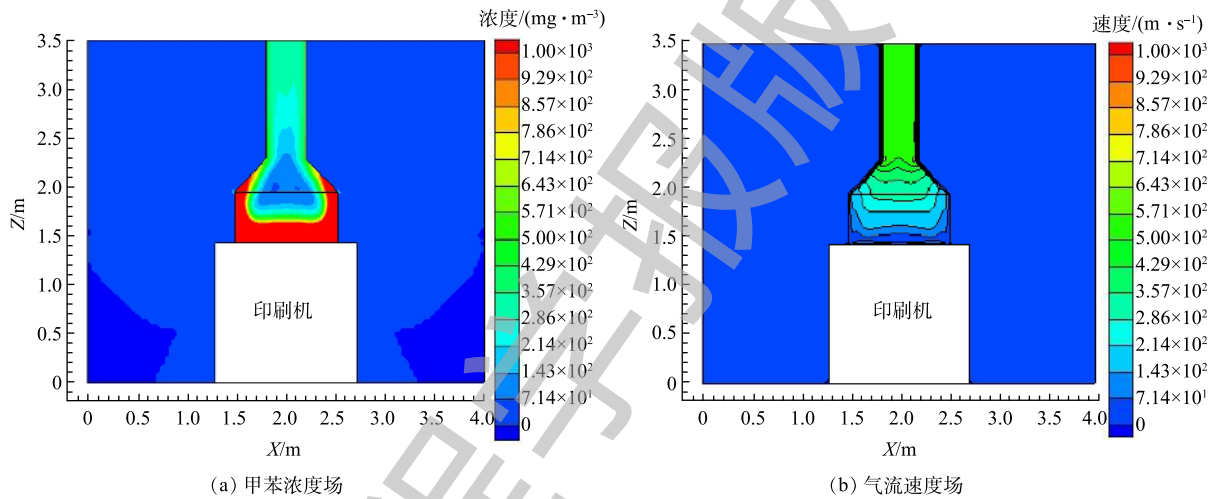


图 6 外部接收罩收集效率与收集风量的关系

Fig. 6 Relationship between collection efficiency of external receiving hood and collected air volume

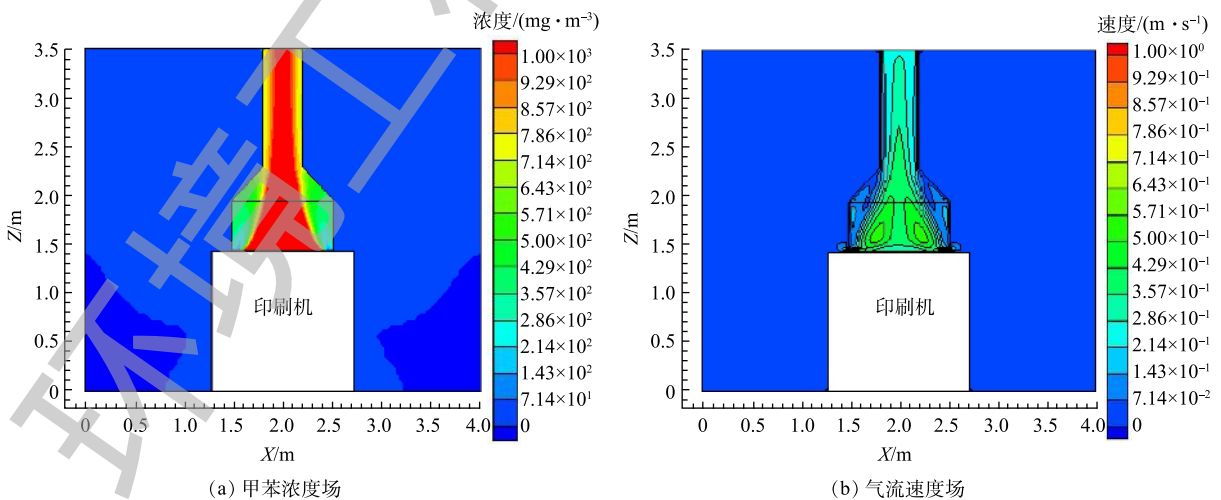


(a) 甲苯浓度场

(b) 气流速度场

图 7 半密闭罩收集风量为 $320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时甲苯浓度场及气流速度场

Fig. 7 Toluene concentration field and air velocity field for semi-closed hood at air volume of $320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



(a) 甲苯浓度场

(b) 气流速度场

图 8 密闭罩收集风量为 $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时甲苯浓度场及气流速度场

Fig. 8 Toluene concentration field and air velocity field for closed hood at air volume of $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

在很小的控制风量下就能达到 90% 的收集效率。但在实际印刷工作中，密闭罩和半密闭罩并不适用于须不断添加油墨、换版等的平版印刷生产过程。因此，在参考半密闭罩和密闭罩结构优势的情况下，通过增加垂直挡板和三角形格栅对外部接收罩进行结构优化。

3.3 VOCs 废气收集系统集气罩的结构优化

根据半密闭罩、密闭罩的结构特点，采取在外部接收罩罩口下侧增加三面垂直挡板进行优化的方式，集气罩结构优化如图 10 所示。挡板高度分别为 100、200、300 和 400 mm。

以收集风量为 $640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 作为目标控制风量，当收集风量为 $640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时，随着挡板高度的增加，污染物所在平面上控制风速逐渐增大，挡板内部污染物浓度逐渐增大，收集效率逐渐提高。当挡板高度为 400 mm 时，收集效率提高至 87%，结合现场印刷过程操作要求，在污染物挥发面与挡板底部预留 200 mm 以上操作空间，将挡板高度定为 300 mm，此时，收集系统收集效率为 85%。挡板高度 $d=300 \text{ mm}$ 时模拟结果如图 11 所示，收集效率与挡板高度的关系如图 12 所示。

在增加三面垂直挡板对外部接收罩进行优化的同时，采用增加三角形格栅的方式减小收集系统控制风量，提高收集系统收集效率。格栅截面是边长为 80 mm 的等边三角形，长度与集气罩罩口长度相同，将格栅数量设为 4~8 个，考察格栅数量对收集系统收集效率的影响。格栅优化示意图如图 13 所示，收集效率与格栅数量的关系如图 14 所示。

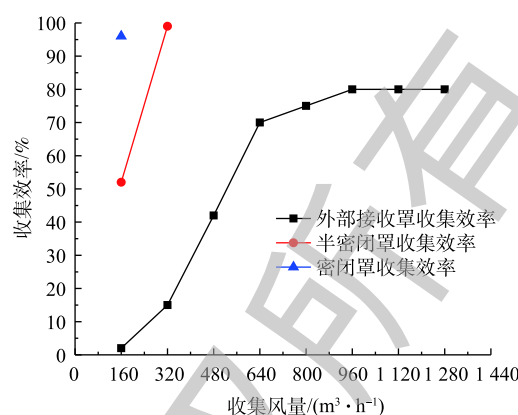


图 9 不同集气罩下收集效率与收集风量的关系

Fig. 9 Relationship between collection efficiency and collected air volume for different air hoods

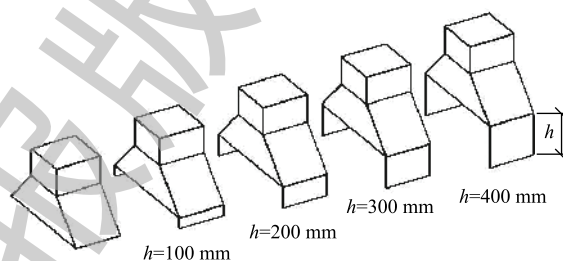


图 10 不同高度挡板优化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of baffle optimization with different heights

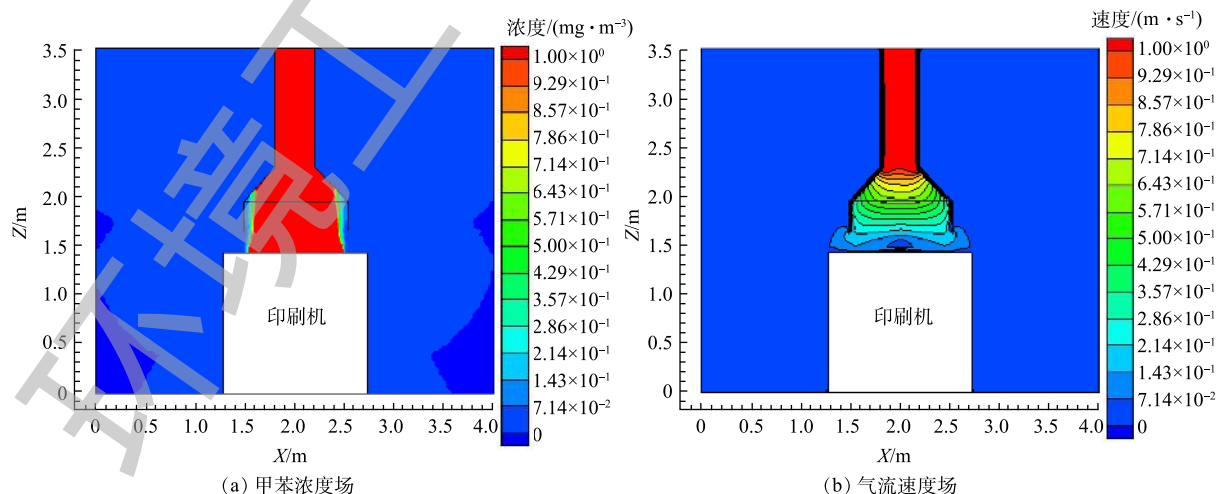


图 11 $d=300 \text{ mm}$ 时甲苯浓度场及气流速度场

Fig. 11 Toluene concentration field and air velocity field at $d=300 \text{ mm}$

当格栅数量为 4 个和 5 个时，由于格栅并不能起到扩大污染面控制面积的作用，反而使收集系统的收集效率下降为 80%。当格栅数量为 6 个时，收集效率提高至 91%。综合考虑增加三面围挡和三角形格栅对外部接收罩进行结构优化，优化后的集气罩结构如图 15 所示，数值模拟结果如图 16 所示。当收集风量为 $640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时，相比于外部接收罩结构优化前，由于垂直挡板和三角形格栅的作用，集气罩吸入的无效气流减少，集气罩罩口面气流分布更加均匀，污染物挥发面控制风速明

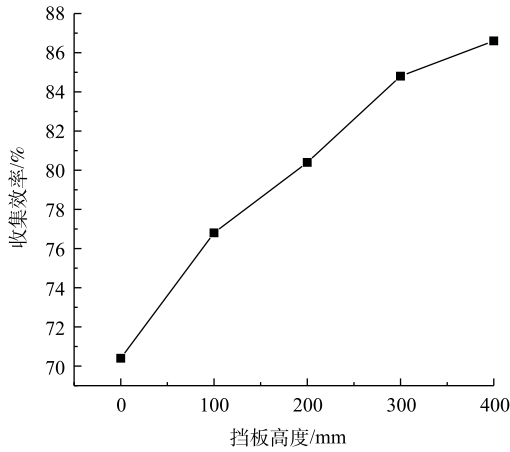


图 12 不同挡板高度下的收集效率

Fig. 12 Collection efficiency at different baffle heights

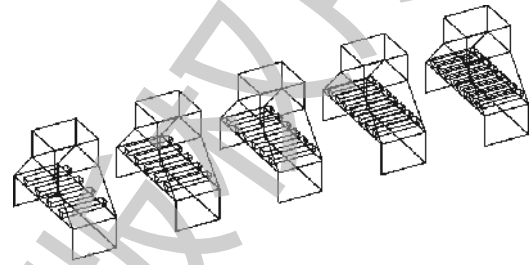


图 13 不同数量的格栅优化示意图

Fig. 13 Schematic diagram of grid optimization with different numbers

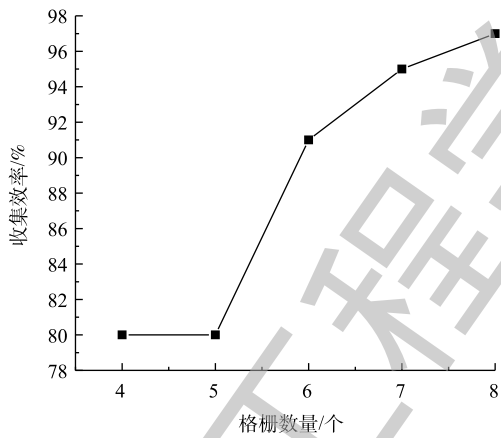


图 14 不同格栅数量下的收集效率

Fig. 14 Collection efficiency at the different number of grids

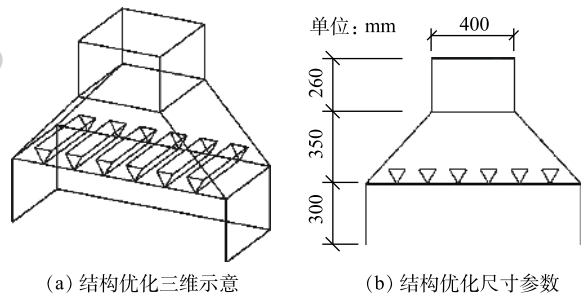


图 15 外部接收罩结构优化示意图

Fig. 15 Schematic diagram of structural optimization of external receiving hood

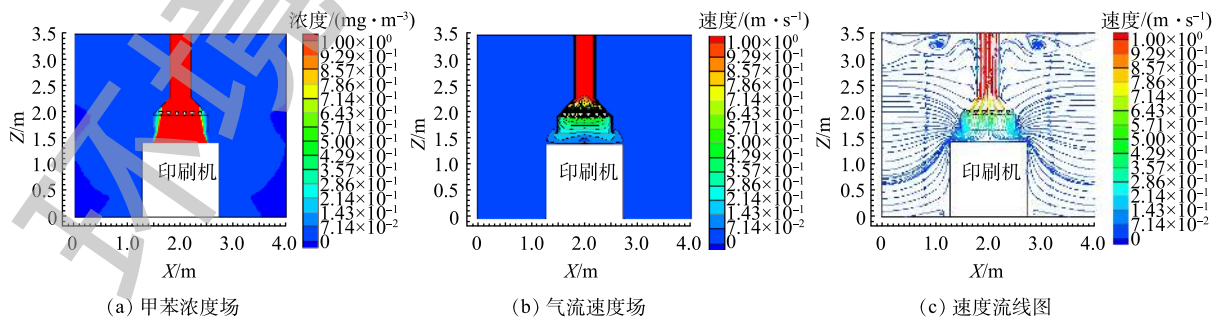


图 16 外部接收罩优化后收集风量为 $640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时甲苯浓度场及气流速度场

Fig. 16 Toluene concentration field and air velocity field for the optimized external receiving hood at air volume of $640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

显增大,提高了集气罩的控制效果,使得甲苯无组织排放量明显减少,集气罩收集效率由70%提高到91%。

4 结论

1)以甲苯为模拟对象并代表印刷过程产生的VOCs,在静风条件下,由底部向上,甲苯浓度呈现出越来越低的分布趋势,模拟结果与现场实测VOCs浓度分布趋势基本一致,数值模拟分析结果可以作为集气罩选择和集气罩设计参数优化的参考依据。

2)对外部接收罩、半密闭罩和密闭罩等3种收集方式的比较结果表明:密闭罩和半密闭罩收集效率达到90%以上时,所需控制风量分别为 $160\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $320\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$;外部接收罩在收集风量为 $1\ 280\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时,收集效率仅为80%。这是因为外部接收罩罩口与污染物挥发面距离相对较远,收集风量很大时,挥发面控制风速仍然较小,难以对VOCs废气进行有效收集。

3)考虑现场操作条件,采用增加三面高度为300 mm的垂直挡板和6个边长为80 mm的三角形格栅的方法,对外部接收罩进行结构优化;当收集风量为 $640\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时,集气罩收集效率由优化前的70%提高到91%,外部接收罩的优化方法可以为收集系统集气罩技术改造提供参考。

参考文献

- [1] 生态环境部. “十三五”挥发性有机物污染防治工作方案:环大气[2017]121号[Z]. 北京, 2017.
- [2] 国务院. 打赢蓝天保卫战三年行动计划:国发[2018]22号[Z]. 北京, 2018.
- [3] 生态环境部. 挥发性有机物无组织排放控制标准:GB 37822-2019[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2019.
- [4] 窦德星,于宏兵,张艳芳,等. 包装印刷业VOCs污染特征分析[J]. 化工环保, 2019, 39(3): 342-348.
- [5] 王迪,赵文娟,张玮琦,等. 溶剂使用源挥发性有机物排放特征与污染控制对策[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1687-1695.
- [6] WADDEN R, SCHEFF P. Determination of VOC emission rates and compositions for offset printing[J]. Air & Waste Management Association, 2012, 5: 547-555.
- [7] 马增亮. 印刷VOCs散发传质分析[J]. 洁净与空调技术, 2016(3): 76-80.
- [8] 周林园,狄育慧,赵伟,等. 印刷车间气流组织方案探讨[J]. 制冷与空调, 2015, 29(1): 38-43.
- [9] 申健,杨长青,高小攀,等. 一种新型组合式风口分层空调气流组织形式研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(8): 83-89.
- [10] 景盛翱,王红丽,朱海林,等. 典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3090-3095.
- [11] 武淑琴,王仪明,柴承文,等. 基于温度梯度的印刷机邻域VOCs的监测方法[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 81-86.
- [12] 刘秋新,吴炯,杨树. 印刷车间VOCs废气控制的研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(6): 67-70.
- [13] 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.
- [14] 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, 41(2): 88-92.

- [15] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源VOCs排放的源头追踪和行业特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 48-55.
- [16] 陕西省质量技术监督局. 陕西省挥发性有机物排放控制标准: DB61/T 1061-2017[S]. 西安: 陕西人民出版社, 2017.
- [17] 托尔戈弗尼科夫. 工业通风设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [18] 王福军. 计算流体力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [19] 张孟威, 康德梦. 环境问题的数学解法及计算机应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [20] 管国锋, 赵汝溥. 化工原理[M]. 4版. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [21] 刘文武, 方莉, 郭秀锐, 等. 京津冀地区典型印刷企业VOCs排放特征及臭氧生成潜势分析[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 3942-3948.
- [22] 生态环境部. 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法: HJ 732-2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [23] 生态环境部. 固定污染源废气 总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法: HJ 38-2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.

(本文编辑: 郑晓梅)

Selection and optimization of VOCs exhaust gas collection method in printing process

ZHENG Huachun, DANG Xiaoqing*, LI Shijie, CAO Li, TAN Xiaoyu, XU Jia

Key Laboratory of Environmental Engineering of Shaanxi Province, School of Environment & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China

*Corresponding author, E-mail: dangxq@163.com

Abstract In order to improve the collection efficiency of the VOCs exhaust gas and reasonably control the scale of the exhaust gas purification system during the printing process, the exhaust gas collection method was selected and optimized. The VOCs diffusion pattern during lithography was analyzed by a combination of on-site testing and numerical simulation. And the numerical simulation was used to compare the experimental results of three commonly used collection methods: external receiving hood, semi-closed hood and closed hood. The results showed that the VOCs concentration distribution trend obtained from numerical simulation was basically consistent with the on-site measurements. When the collection efficiencies of the closed hood and semi-closed hood reached above 90%, their minimum control air volumes were $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and $320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, respectively, while the collection efficiency of the external receiving hood was only 80% at the maximum air volume of $1\ 280 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. In consideration of the limitation of the operating conditions during the printing process, vertical baffles and triangular grilles were added to the external receiving hood for its structure optimization. At the control air volume of $640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, the collection efficiency of the external receiving hood increased from 70% before optimization to 91%.

Keywords printing process; VOCs exhaust gas; collection method; collection efficiency; control air volume