

基于温度梯度的印刷机邻域 VOCs 的监测方法

武淑琴^{1,2}, 王仪明^{1,2}, 柴承文^{1,2}, 贾志慧^{1,2}, 田贝^{1,2}

(1.北京印刷学院, 北京 102600; 2.数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京 102600)

摘要: **目的** 在研究温度梯度对印刷机邻域 VOCs 特征参数影响的基础上, 提出监测印刷机邻域 VOCs 的方案, 达到有效控制印刷机邻域 VOCs 的目的。**方法** 通过建立气流扩散过程的分子动力学模型, 分析气体在边界条件下的扩散速度、质量浓度等参数变化特征。采用 Fluent 软件, 模拟温度场、气流场等边界条件, 对胶印机邻域 VOCs 气体扩散特征进行仿真分析。结合胶印印刷过程中 VOCs 的扩散机理及现场操作环境, 检测并分析 VOCs 的扩散特征。**结果** 温度梯度对 VOCs 排放速度、质量浓度等特征参数的变化有较大影响, 理论分析与实验结果相吻合。**结论** 在理论研究的基础上, 提出了印刷过程中 VOCs 的监测及排放控制方法, 为包装印刷行业 VOCs 的治理提供依据。

关键词: 温度场; 气流场; 分子动力学; VOCs 监测; 印刷机邻域

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)01-0081-06

Method to Monitor the VOCs around the Printing Press Based on the Temperature Gradient

WU Shu-qin^{1,2}, WANG Yi-ming^{1,2}, CHAI Cheng-wen^{1,2}, JIA Zhi-hui^{1,2}, TIAN-bei^{1,2}

(1.Beijing Key Laboratory of Digital Printing Equipment, Beijing 102600, China;

2.Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to propose the plan to monitor the VOCs around the printing press on the basis of studying the influence of temperature gradient on the characteristic parameters of VOCs around the printing press, so as to effectively control the VOCs. By establishing the molecular dynamic model of the air flow diffusion process, the characteristics of the gas parameters, such as the diffusion rate and concentration in the boundary conditions were analyzed. The Fluent software was used to simulate such boundary conditions as temperature field and air flow field, and to analyze the simulation of the gas diffusion characteristics of VOCs around the printing press during the offset printing. Combined with the diffusion mechanism of VOCs in printing process and the field operation environment, the VOCs diffusion characteristics were detected and analyzed. The result showed that the temperature gradient had a great influence on the change of such characteristic parameters as VOCs emission rate and concentration, and the theoretical analysis was in agreement with the experimental results. Based on the theoretical research, the method to monitor and control the emission of VOCs in the printing process is proposed, which provides the basis for the management of VOCs in the package printing industry.

KEY WORDS: temperature field; air flow field; molecular dynamics; VOCs monitoring; printing press neighborhood

印刷行业虽然未被列入大气污染联防联控的重点行业, 但是被列为了挥发性有机物排放的重点治理行业, 主要因为挥发性有机化合物 VOCs 是形成雾霾

的主要原因之一。VOCs 排放约占印刷业有毒物质总排放量的 98%~99%。印刷包装行业 VOCs 主要排放环节包括印刷、烘干、复合及清洗。国内外的学者、

收稿日期: 2016-07-15

基金项目: 北京市教委科技计划重点项目暨北京市自然科学基金重点项目 B 类 (KZ201510015016); 绿色印刷与出版技术协同创新中心项目; 北京印刷学院科技类项目校级重点研究项目 (Ea201504)

作者简介: 武淑琴 (1973—), 女, 硕士, 北京印刷学院副教授, 主要研究方向为印刷机械检测及故障诊断。

通讯作者: 王仪明 (1965—), 男, 博士, 北京印刷学院教授, 主要研究方向为印刷机械检测及故障诊断。

专家对印刷机邻域气体扩散及分布进行了一些研究。日本采用在印刷机周围布点,连续监测了印刷过程中 VOCs 气体的挥发^[1]。诺维萨德大学的 Kiurski^[2]等采用了回归模型定量分析,得出印刷厂室内气体之间具有相互关联性。美国伊利诺伊大学的 Wadden^[3]等对 3 家胶印工厂采用气象色谱法采样分析,得出胶印过程 VOC 组分及其散发速率。香港大学的 Leung^[4]等采用 CFD 软件分析车间内 VOCs 气体对工人身体的影响。美国罗切斯特理工学院对印刷行业环境可持续发展做了大量的研究。Li^[5]等研究了凹版包装印刷的可持续发展,表明能源、材料的成本和效益以及技术的变化将影响其可持续发展的战略方向。Rothenberg^[6]等采用试验方法研究了印刷行业对大气污染的演进。Kadam^[7]等进行了平版印刷和数字印刷工艺环境方面的比较研究。英国利兹大学的 Moger^[8]研究了印刷行业对环境的影响,表明未来的环境发展会由高成本的绿色印刷来延续。广东环境保护工程职业学院的蔡宗平^[9]等对 7 家印刷企业进行了现场采样及实验,研究了印刷行业 VOCs 的排放特征。华南理工大学杨杨^[10]等分析了珠江三角洲印刷行业 VOCs 组分排放清单及关键活性组分。中国科学院生态环境研究中心的王海林^[11]等利用 AHP 层次分析模型,推断出活性碳纤维是印刷业最佳的实用处理技术。西安工程大学的狄育慧^[12]等研究了印刷车间风速及温度分布规律。华北电力大学的张玮^[13]进行了高大空间室内污染物控制的数值模拟与研究。汕头大学许鹏^[14]等研究了凹版印刷 VOCs 废气的净化治理联用工艺。清华大学环境学院的席劲瑛^[15]等研究了不同行业点源产生 VOCs 气体的特征。这些关于印刷 VOCs 的研究主要集中在源头控制与末端治理,尚缺少对印刷工艺过程 VOCs 扩散特征的研究。研究考虑印刷机邻域温度场的变化,分析印刷过程 VOCs 扩散特征,提出一种合适的方法,为印刷过程中 VOCs 的治理提供依据。

1 印刷机邻域 VOCs 的扩散特性

1.1 扩散方程

根据流体系统的质量守恒定律,印刷机邻域的 VOCs 扩散过程中,每种组分都遵守质量守恒定律。对于印刷车间的流体系统,组分质量守恒定律可表述为,车间内某种气体组分质量对时间的变化率等于通过车间空间系统界面的净扩散流量与由反应产生的生成率之和,可表示为:

$$\frac{\partial(\rho m_l)}{\partial t} + \text{div}(\rho v m_l + J_l) = S_l \quad (1)$$

式中: l 为气体组分; t 为扩散时间; m_l 为组分 l

的质量; $\frac{\partial(\rho m_l)}{\partial t}$ 为单位体积内组分 l 的质量变化率; J_l 为气体扩散通量($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$),由 Fick 定律给出; S_l 为单位体积内组分 l 的生成率; $\rho v m_l$ 为组分 l 的对流流量密度。

根据气体雷诺数气体流动状态分为层流与湍流,因此分析室内气体多应用湍流模型。气体扩散领域应用最多的湍流模型是 $k-\varepsilon$ 模型。 $k-\varepsilon$ 模型基于涡流粘滞度理论进行方程闭合,具有比较广泛的适用性,在气体扩散计算中能够得到较精确的结果。雷诺应力的涡粘性模型为:

$$\tau_{ij} = -\rho \bar{u} u_j = 2\mu(\mathbf{S}_{ij} - \mathbf{S}_{nn} \delta_{ij}/3) - 2\rho k \delta_{ij}/3 \quad (2)$$

式中: τ_{ij} 为雷诺应力的涡粘性; \bar{u} 为平均速度; u_j 为 j 方向的速度; μ_t 为涡粘性; \mathbf{S}_{nn} 为矩阵对角线上(当 $i=j=n$ 时)的平均速度应变率张量; μ 为粘性系数; \mathbf{S}_{ij} 为平均速度应变率张量; i, j 为矩阵的行列数; ρ 为流体密度; k 为湍动能; δ_{ij} 为克罗内克算子。涡粘性定义为湍动能 k 和涡流耗散率 ε 的函数:

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (3)$$

式中: c_μ 为常数 0.09; f_μ 为近壁衰减函数。

湍流运动方程可表示为湍流能量输运方程和能量耗散输运方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{ij} \mathbf{S}_{ij} - \rho \varepsilon + \varphi_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \mathbf{S}_{ij} - c_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \phi_\varepsilon \quad (5)$$

式中: x_j 为 j 方向的距离; σ_k 为常数 1.0; φ_k 和 φ_ε 为壁面项; σ_ε 为常数 1.3; $c_{\varepsilon 1}$ 为常数 1.45; $c_{\varepsilon 2}$ 为常数 1.92; f_2 为近壁衰减函数; ϕ_ε 为壁面项。式(4)~(5)中的右端项分别表示生成项、耗散项和壁面项。

1.2 扩散质量浓度

根据著名的菲克扩散定律,在含有 2 种或以上的组分的流体内部,如果存在组分质量浓度梯度,则每种组分都有向低质量浓度方向的转移,以减弱这种质量浓度不均匀的趋势。在单位时间内,通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散物质流量与该截面处的质量浓度梯度成正比:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (6)$$

式中: J 为扩散通量; D 为扩散系数; C 为扩散物质的质量浓度; x 为扩散方向距离; 负号表示通量的方向与质量浓度梯度方向相反。

由 $PV=mRT$ 及 $C=m/V$ 可得, $C=P/(RT)$, 代入式 (6) 可得:

$$J = -\frac{D}{R} \left[\frac{1}{T} \frac{\partial P}{\partial x} + P \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad (7)$$

令 $u = \frac{1}{T}$, 则 $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{T} \right) = \frac{\partial u}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$, 而 $\frac{\partial u}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \cdot$

$\left(\frac{1}{T} \right) = -\frac{1}{T^2}$, 则

$$J = -\frac{D}{RT} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{P}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 印刷车间气体扩散状态与温度梯度及压力梯度有关。

2 印刷机邻域 VOCs 扩散特性仿真

采用 Fluent 软件, 以胶印机为例, 对印刷机邻域的 VOCs 扩散特征进行仿真。

2.1 建立印刷车间模型

建立一个 $22\text{ m} \times 8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的印刷车间模型, 见图 1。印刷车间两侧设有排(进)风口, 尺寸均为 $1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$, 和地面的距离分别为 4 和 0.4 m, 门尺寸为 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。车间顶部的排(进)风口尺寸为 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 。印刷车间内印刷机模型的尺寸为 $10.1\text{ m} \times 2.2\text{ m} \times 2.25\text{ m}$ 。

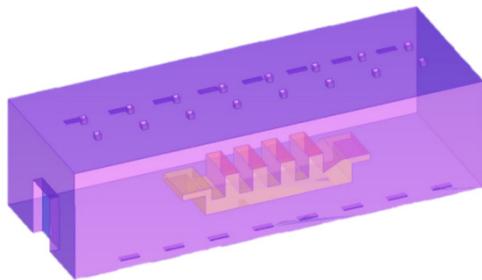


图 1 印刷车间模型
Fig.1 The model of a printing room

印刷车间内气流因素复杂, 通风情况尤为重要。模拟车间通风情况为低温送风空调系统^[10-12], 见图 2。为了接近实际印刷机邻域气体的扩散情况, 分 3 部分给定印刷机邻域的参数, 即印刷机组上方、印刷

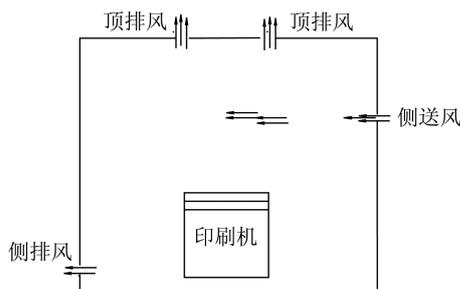


图 2 车间通风口位置示意
Fig.2 Schematic diagram of workshop vent position

机组侧面及印刷色组。具体边界条件: 车间门的尺寸为 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$; 进风速度为 2 m/s ; $1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的侧排风口风速为 5.5 m/s ; $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的顶部排风口风速为 6 m/s ; 印刷机大小为 $10.1\text{ m} \times 2.2\text{ m} \times 2.25\text{ m}$; 机器平均温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 甲苯的扩散速率为 $160.5\text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.2 仿真分析

将印刷车间仿真模型导入 ICEM 前端处理器进行网格划分后, 导入 Fluent 软件, 设置边界条件, 给定残差步, 观察残差曲线的变化, 直到残差曲线收敛, 得到印刷车间胶印机邻域气体的温度场云图、质量分数分布云图等。在印刷机邻域温度场云图及质量分数分布云图上, 分别在 $y=2.5\text{ m}$ 的位置以平行于 xOz 平面的截面截取云图, 得到印刷机邻域 VOC 高度方向, 即纵向温度场云图及质量分数分布云图, 见图 3。

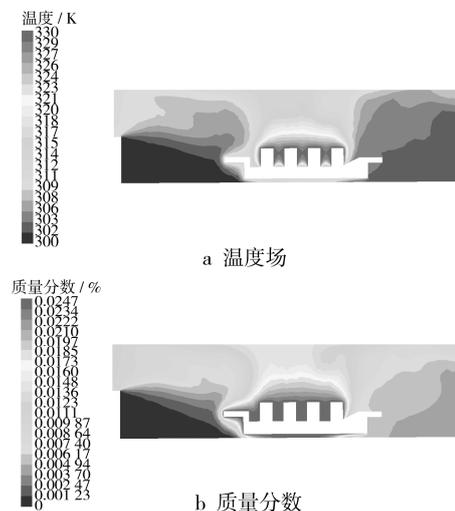


图 3 车间纵向 VOCs 温度场及质量分数分布云图
Fig.3 Vertical VOCs temperature field and concentration field

由图 3a 可以看出, 在印刷机邻域的高度方向上, 车间内温度出现分层, 车间内顶部温度高于接近地面的部分, 印刷车间内温度偏低, 印刷机周围温度相对高于车间内其他空间的温度。印刷机 4 个机组周围的温度达到最高。由图 3b 可以看出, 在高度方向上, 除了印刷机周围, 车间其他空间的 VOCs 含量较少。印刷机周边 VOCs 质量分数较高, 印刷机组之间及收纸台上下 VOCs 质量分数最高。车间内整体 VOCs 质量分数分布出现分层, 印刷机上方车间顶部 VOCs 质量分数高于印刷机前后靠近门及两侧通风口处的空间。印刷机邻域远离印刷机的颜色分层逐渐变浅, 表明印刷机周边 VOCs 含量呈等值线形式分布, 并随距离增加含量降低。

在胶印机邻域温度场及质量分数分布云图上, 分别在 $z=1.5\text{ m}$ 的位置以平行于 xOy 平面的截面截取云图, 得到印刷机邻域 VOCs 水平方向, 即横向温度场梯度及质量分数分布云图, 见图 4。

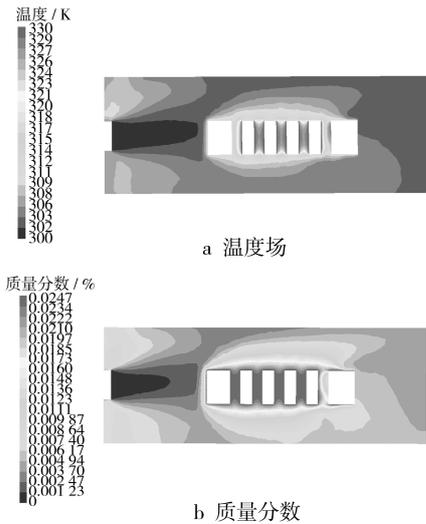


图4 车间横向 VOCs 温度场及质量分数分布云图
Fig.4 Horizontal VOCs temperature field and concentration field

由图 4a 可以看出,在印刷机邻域的水平方向上,机组之间的温度最高,水平方向上印刷机周边温度呈梯度形式向外扩散,随着距离的增加,颜色变浅,温度降低。靠近车间内四周墙壁的地方温度较低,尤其是有通风口的墙壁位置温度达到最低。由图 4b 可以看出,车间内水平方向上除了印刷机周边整体 VOCs 含量较少外,水平方向印刷机周边 VOCs 质量分数较高,印刷机组之间 VOCs 质量分数达到最高。车间内整体 VOCs 质量分数的分布出现分层,车间中部印刷机周围 VOCs 质量分数高于靠近门及两侧通风口处。印刷机邻域颜色分层逐渐变浅,表明印刷机周边水平方向上 VOCs 含量呈等值线形式分布,并随距离的增加,含量降低。

在速度场云图的 $x=-3\text{ m}$ 位置以平行于 yOz 平面的截平面截取云图,得到速度场横截面云图,见图 5。可以看出远离印刷机邻域的 VOCs 扩散较快,靠近印刷机邻域的气体扩散较慢。同时也可以看出气流流动出现了漩涡, VOCs 由车间顶部排风口和左侧墙上出风口排出,气流流动方式有助于 VOCs 排出。

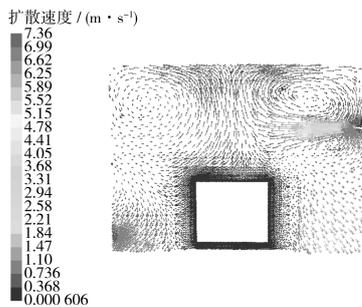


图5 纵向 VOCs 速度场分布
Fig.5 Vertical VOCs velocity field

VOCs 散点分布情况见图 6,可以看出印刷机邻

域 VOCs 的扩散情况。由图 6a 可知,在印刷车间高度方向上,随着扩散距离的增加,污染物质量浓度降低,到 5 m 时趋于稳定,此时接近车间顶部排风口。由图 6b 可以看出,在车间水平方向上四周 VOCs 的扩散情况,随着扩散距离的增加, VOCs 质量浓度降低,左右扩散 2 m 后趋于稳定,此时接近两侧的排(进)风口。

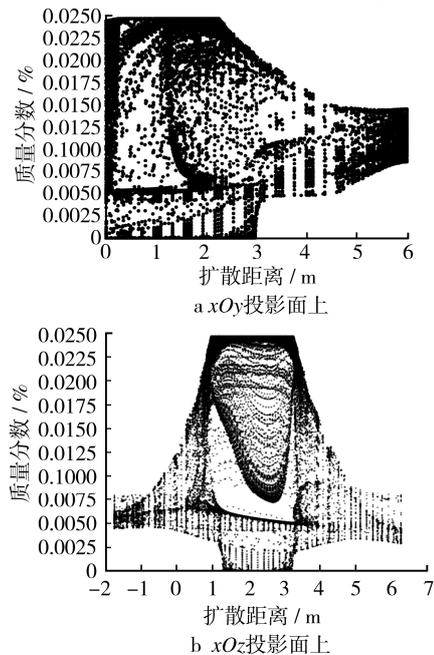


图6 VOCs 散点分布情况
Fig.6 Scatter distribution of VOCs

由上述模拟结果得出,印刷机周边气体扩散呈等值线梯度形式分布,随着距离的增加,质量浓度减少。结合现场操场环境、工人适合的作业情况以及便于仪器布点的监测,提出界定应距离印刷机高 2 m、横向 2 m 左右进行布点检测相对合理,同时根据各个截面污染物含量分布等值线图,沿直线方向上的气体质量浓度是不均匀分布的,中间气体的质量浓度值相对高于两侧,提出进行印刷机邻域 VOC 监测试验时,可采用非均匀曲线阵列布点检测的方案。

3 印刷机邻域 VOCs 扩散实验分析

3.1 测点分布方案

以某印刷车间里的一台四色胶印机为测试对象,结合模拟分析结果得知印刷机邻域 2 m 内为最佳检测范围。现场测点分布方案见图 7,有 3 种测点分布方案。第 1 种方案为定点测点分布,共有 3 个测点,色组上方 0.5 m 处 (A 点),操作处踏板上方 (B 点)、收纸台前面 (C 点),如图 7a;第 2 种方案根据气体在印刷机周围的分布特征,采用非均匀阵列测点分布,在胶印机机组上方和操作侧沿曲线各分布 5 个测

点, 如图 7b; 第 3 种测点分布方案根据印刷机工作时操作人员经常活动的区域, 采用在印刷机的机组上方和操作侧, 沿直线各均匀分布 5 个测点, 即均匀阵列测点分布, 如图 7c。

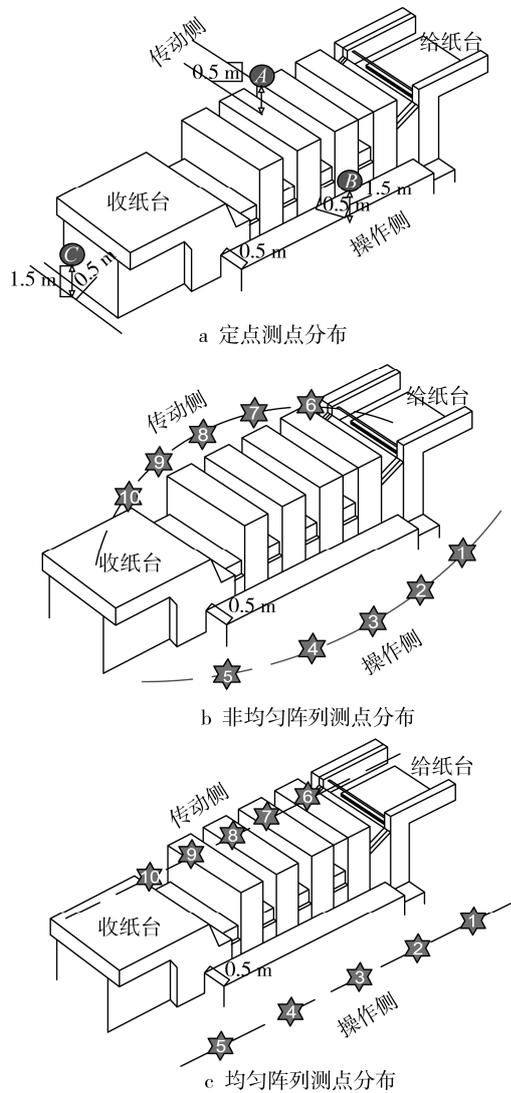


图 7 胶印机邻域 VOCs 测点分布方案

Fig.7 Distribution of VOCs measurement points of offset press

3.2 实验结果

车间温度为 25 ℃, 相对湿度控制在 40%, 打开排气扇, 并打开空调通风。VOCs 检测仪的气体种类选为胶印印刷过程排放 VOCs 的主要成分——乙酸乙酯, 对印刷机邻域的 3 种布点方案分别进行测试。首先按照定点测点分布方案, 分别测试印刷机邻域的 A, B, C 3 点的气体, 检测时间为 40 min, 得到检测时间内各测点 VOCs 质量浓度变化曲线, 见图 8。

由图 8 可知, 印刷机组上方的气体质量浓度变化较大, 是 VOCs 的主要扩散区域, 印刷机组操作侧气体质量浓度变化较平缓, 是 VOCs 扩散的第 2 个主要区域, 收纸台前, 气体质量浓度变化较小, VOCs 扩散较少。

使用多台检测仪对方案 2 和方案 3 中的测点进行同时监测, 每个测点的监测时间为 40 min。对测试结果

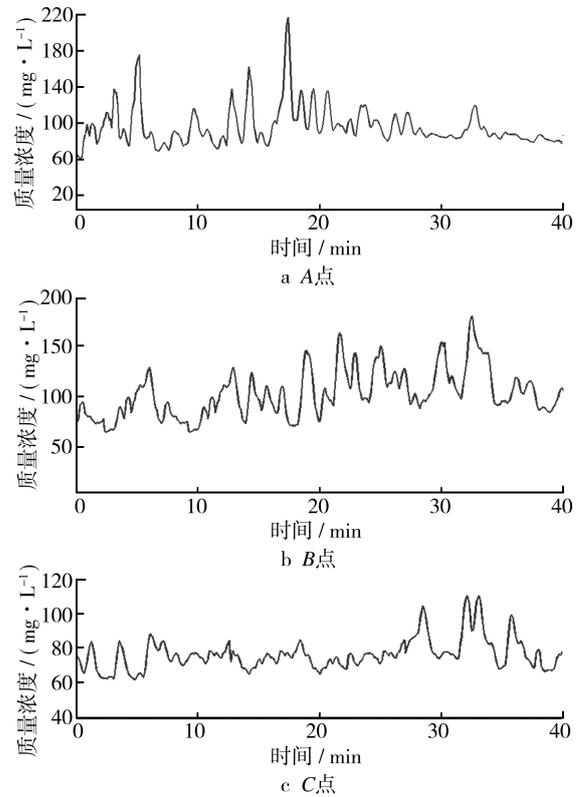


图 8 各测点 VOCs 质量浓度变化曲线

Fig.8 VOCs concentration change curve of each measuring point

果进行处理, 非均匀曲线布点和均匀直线布点 2 种布点方案的测试结果对比曲线见图 9。

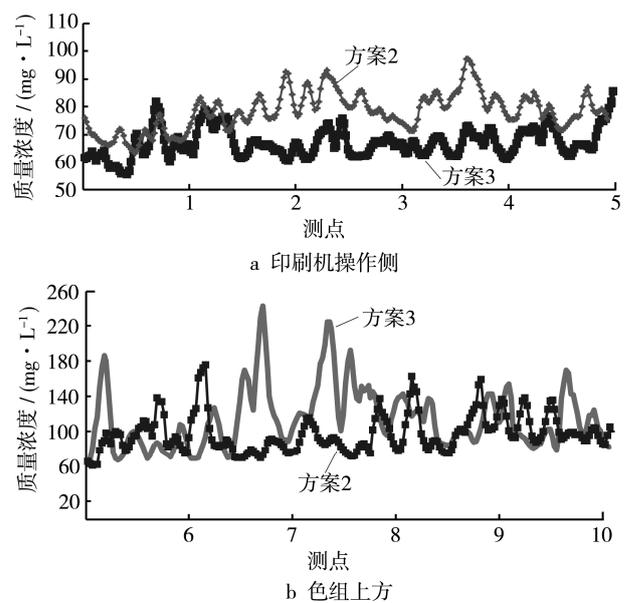


图 9 非均匀曲线布点和均匀直线布点方案测试结果对比
Fig.9 The comparison about the testing results of non uniform curve and uniform linear distribution

由图 9 可以看出, 印刷机操作侧 VOCs 排放质量浓度大于印刷机组上方, 表明印刷机排放出的 VOCs

主要向四周和上方扩散,向四周扩散的质量浓度要大于向上方的扩散。同时也可以看出,采用直线式均匀布点监测的方案,测得的中间测点2,3,4,7,8,9附近的气体质量浓度值相对高于两侧测点1,5,6,10测点附近,随着测点位置的改变,气体质量浓度变化比较明显;采用非均匀曲线阵列布点的监测方案,测点的气体质量浓度随测点位置改变的变化缓慢,曲线比较平缓。结果表明印机邻域范围内的气体呈波浪形梯度式分布,与仿真分析得出的印刷机邻域范围内气体扩散呈等值线梯度分布相符。

4 结语

以胶印机为例,通过气体分子动力学理论分析印刷机邻域的气体扩散特征,结果表明印刷机邻域气体的扩散与气体的质量浓度梯度、温度梯度及压力梯度有关。借助Fluent流场仿真软件,模拟印刷车间气流场、温度场等边界条件下,印刷机邻域气体扩散特征,表明印刷机邻域气体扩散呈等值线梯度式分布,并随距离的改变,温度、气体质量浓度发生变化,并据此界定印刷机邻域VOCs的监测范围,提出在印刷机邻域范围内采取非均匀阵列布点的监测方法。结合印刷生产工艺,采用不同的布点检查方案,使用多台仪器同时采集,进行现场测试实验。实验结果表明,印刷机侧面及上方是VOCs扩散的主要区域,且印刷机侧面的气体扩散质量浓度大于机器上方。印刷机非均匀阵列布点检测方案能够很好地体现印刷过程中气体的扩散情况,验证了印刷机邻域气体质量浓度呈波浪式分布,且气体扩散易受温度的影响。印刷过程VOCs监测及排放控制可以采用非均匀曲线布点的方法,可确定合理的监测及控制位置,为包装印刷行业VOCs的治理提供依据。

参考文献:

- [1] 劳动安全卫生委员会. 2013年度胶印印刷工厂的作业环境调查报告书[R]. 东京: 日本印刷产业联合会, 2014.
Work Safety and Health Committee. Operating Environment Survey Report about Offset Printing Plant in 2013[R]. Tokyo: Japan Printing Industry Federation, 2014.
- [2] KIURSKI J, MARIC B, AKSENTIJEVIC S, et al. Indoor Air Quality Investigation from Screen Printing Industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(2): 224—231.
- [3] WADDEN R, SCHEFF P. Determination of VOC Emission Rates and Compositions for Offset Printing[J]. Air & Waste Management Association, 2012(5): 547—555.
- [4] LEUNGI M, LIU C H, CHAN A S. Occupational Exposure to Volatile Organic Compounds and Mitigation by Push-Pull Local Exhaust Ventilation in Printing Plants[J]. Journal of Occupational Health, 2005, 47(6): 540—547.
- [5] LI A, CHUNG R. Sustainability in Gravure Packaging Printing[R]. New York: A Research Monograph of the Printing Industry Center at RIT, 2010.
- [6] ROTHENBERG S, BECKER M. The Evolution of Experimental Environmental Programs in the Printing Industry[R]. New York: A Research Monograph of the Printing Industry Center at RIT, 2003.
- [7] KADAM S R, EVANS M A, ROTHENBERG S. A Comparative Study of the Environmental Aspects of Lithographic and Digital Printing Processes[R]. New York: A Research Monograph of the Printing Industry Center at RIT, 2005.
- [8] MOGER T C. An Environmental Review of the Printing Industry[J]. Earth & Environment, 2006(2): 343—381.
- [9] 蔡宗平, 蔡慧华. 印刷行业VOCs排放特征研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 166—172.
CAI Zong-ping, CAI Hui-hua. Study on Characteristics of VOCs Emission from Printing Industry[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(8): 166—172.
- [10] 杨杨, 杨静, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲印刷行业VOCs组分排放清单及关键活性组分[J]. 环境科学研究, 2013, 6(3): 326—333.
YANG Yang, YANG Jing, YIN Sha-sha, et al. Speciated VOCs Emission Inventory and Key Species from Printing Industry in the Pearl River Delta Region[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 6(3): 326—333.
- [11] 王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 等. 包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2503—2507.
WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, et al. Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2503—2507.
- [12] 狄育慧, 郑治中, 周林园, 等. 印刷车间风速及温度分布规律研究[J]. 轻工机械, 2015, 33(6): 92—96.
DI Yu-hui, ZHENG Zhi-zhong, ZHOU Lin-yuan, et al. Research on Regularities of Wind Speed and Temperature Distribution in Printing Workshop[J]. Light Industry Machinery, 2015, 33(6): 92—96.
- [13] 张玮. 高大空间室内污染物控制的数值模拟与研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
ZHANG Wei. Numerical Simulation of Indoor Contaminant and Control in Large Space Building[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [14] 许鹏, 陈芳园, 黄清明, 等. 凹版印刷VOCs废气的净化治理联用工艺[J]. 轻工机械, 2009, 27(3): 107—111.
XU Peng, CHEN Fang-yuan, HUANG Qing-ming, et al. Application of Combined Treatment Process for Purification of VOCs in Gravure Printing[J]. Light Industry Machinery, 2009, 27(3): 107—111.
- [15] 席劲瑛, 胡洪营, 武俊良, 等. 不同行业点源产生VOCs气体的特征分析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(2): 134—138.
XI Jin-ying, HU Hong-ying, WU Jun-liang, et al. Characteristics of VOCs Emitted from Point Sources in Different Industrial Sectors[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(2): 134—138.