

某涂料生产车间苯暴露的蒙特卡罗方法评价

Assessment on benzene exposure level of certain paint workshop using Monte Carlo method

王阳¹, 刘茂¹, 黄德寅²

WANG Yang, LIU Mao, HUANG De-yin

(1. 南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300074; 2. 天津渤海化工集团劳动卫生研究所, 天津 300051)

摘要: 利用蒙特卡罗方法, 依据双区域模型对某涂料生产车间内的苯暴露情况进行模拟预测, 得到空气中苯浓度值的概率分布图, 并将模拟结果与现场实测数据进行对比, 以验证数学模拟方法的准确性。结果显示, 由本文数学模型预测得到投料罐附近空气中苯浓度值为 4.15~48.73 mg/m³, 均值为 17.58 mg/m³。现场实测浓度值为 1.63~54.30 mg/m³, 均值为 14.61 mg/m³。本方法可以比较准确地预测工作环境中有害物质的暴露水平。

关键词: 苯; 暴露评价; 双区域模型; 蒙特卡罗

中图分类号: R135.2 **文献标识码:** B

文章编号: 1002-221X(2010)02-0141-03

目前我国接触职业危害人数、职业病患者累计病例数均居世界首位, 职业病危害形势十分严峻^[1]。其中, 苯是一种确认的人类致癌物, 它在工业生产中的应用日益广泛, 所导致的职业危害已引起社会各界的广泛关注。但我国在职业健康方面的研究多停留在职业病的调查、诊断、治疗阶段, 对职业暴露有害因素的定量评价研究方法较少, 不利于工人职业性伤害的控制和预防。

暴露评价是对人群实际或可能暴露于某有害物质的强度、频率和持续时间进行测量、估算或预测的过程, 是进行风险评价的定量依据^[2-4]。其目的是估测社会总体人群或不同亚群(如接触某化学物的职业人群)接触有害因素的程度或可能程度, 为职业性有害因素的评价尤其是剂量-反应评价和风险描述提供可靠的暴露数据^[5-6]。本文依据双区域模型利用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法对某涂料生产车间内的苯职业暴露状况进行数学模拟, 将模拟结果与现场实际监测数据进行对比, 为进一步估算暴露人群的健康风险提供定量依据。

1 对象

本文中研究的案例场景为某涂料化工有限公司涂料生产车间。涂料生产过程中使用的原辅料主要为树脂、有机溶剂、颜料及填充剂等, 树脂和有机溶剂中含有少量的苯。生产工艺过程可做到自动控制, 基本为密闭化生产, 只在投料时需人工辅助操作, 且操作时设备呈半敞开状态, 不能保证完全密闭, 加之苯的易挥发性, 所以在生产车间空气中存在一定

浓度的苯蒸气。涂料车间作业工人共 21 人, 每天工作 8 h 投料时间约为 2 h 接触方式主要为呼吸道吸入。

2 方法

2.1 数学模型

双区域模型将房间分为近区和远区两个区域^[7-9], 如图 1 所示。近区域中包含排放源和暴露工人的呼吸带, 房间内的其余空间即为远区域。在双区域模型中, 假设每个区域内的空气充分混合, 两个区域之间仅有有限的气体交换, 污染物稳定产生。房间对远区的通风量为 Q 区域间的气流速率(β)取决于近区的几何形状和风速(v)。研究案例中的暴露情况与模型假设类似, 故本文中认为其符合双区域模型。

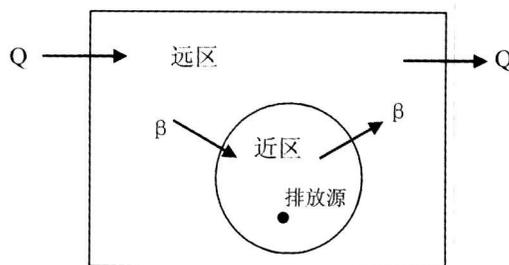


图 1 双区域模型图

当向中和罐中注入原料时, 含苯蒸气从罐顶部空间中溢出。对于恒定的填充速率, 假设苯蒸气释放率也近似是恒定的。蒸气从投料口释放到包含工人呼吸区的近区域环境中, 进入近区域的气流取决于当时风速。

从投料口排出的苯质量释放率(G)是顶部空气中苯浓度(C_{HS})与投料罐的填充速率(F)的乘积^[7], 即

$$G = C_{HS} \times F \quad (1)$$

假设投料罐上没有通风管, 则蒸气无法从通风管排出, 而只能从填充口溢出。投料罐的体积约为 8 m³, 填料过程持续约 2 h 则得到填充速率 $F = (8 \text{ m}^3) / (120 \text{ min}) = 0.067 \text{ m}^3 / \text{min}$

首先, 考虑顶部空气中的苯浓度。由于顶部液体飞溅, 我们可以认为顶部空气内苯蒸气几乎饱和。在这种情况下, 饱和和顶部空间中的苯浓度可用理想气体定律关系来估算^[9]:

$$C_{HS} (\text{mg/m}^3) = \frac{X_m P_v MW \times 1000}{0.0623 T_k} \quad (2)$$

其中, X_m 是溶剂中苯的摩尔分数, P_v 是温度为 T_k (开尔文温度)时苯的蒸气压(mm Hg), MW 是苯的分子量(78 g/mol), $0.0623 \text{ mm Hg} \cdot \text{m}^3 / (\text{mol} \cdot \text{K})$ 是理想气体定律常数。苯的摩尔分数取决于苯在有机溶剂中的体积百分比(% V/V),

收稿日期: 2009-07-06 修回日期: 2009-11-10

作者简介: 王阳(1983-), 女, 硕士, 研究方向: 职业健康风险评估。

苯和有机溶剂的液体密度及溶剂的分子量。假设有机溶剂的液体密度为 0.87 g/ml 溶剂的分子量近似为 92 g/mol

$$X_m = \frac{\text{溶剂中苯的摩尔数}}{\text{溶剂的摩尔数}} = \frac{(\text{溶剂中苯质量} / \text{苯分子量})}{(\text{溶剂中苯质量} / \text{苯分子量} + \text{溶剂质量} / \text{溶剂分子量})} \quad (3)$$

纯苯的 P_v 值随温度变化^[9]:

$$P_v(\text{mm Hg}) = 10^{(6.90565 - (1211.033) / (T + 220.79))} \quad (4)$$

其中, T 是摄氏温度。

根据双区域模型, 车间内的苯环境浓度为

$$C_{NF} = \frac{G}{Q} + \frac{G}{\beta} \quad (5)$$

$$C_{FF} = \frac{G}{Q} \quad (6)$$

气流进出近区域的体积速率 β 为 $\beta = \frac{1}{2} FSA \times s$ (7)

其中, FSA 为近区域的自由面表面积 (自由面即空气可以自由通过的表面); s 为近区域边界的随机风速。

假设工作人员投料时在距填料口“臂长”的距离内, 臂长为 0.76 m 则工作人员的呼吸区也距投料口约 0.76 m 假设近区域是一个以中和罐投料口为中心的半球形, 半径为 1 m 则可以得到 $FSA = 2\pi r^2 = 6.28 \text{ m}^2$ 。

2.2 Monte Carlo 模拟

由于模型中各输入参数的取值有较大的变化性, 难以用单个值表示。如果利用传统方法, 用各参数的均值计算得到单个剂量值, 所得结果不够准确, 存在较大不确定性。因此, 本文采用 Monte Carlo 模拟方法, 得出苯浓度的分布范围以减小评价结果的不确定性^[10]。

蒙特卡罗方法的基本原理及思想是, 当所要求解的问题是某种事件出现的概率, 或者是某个随机变量的期望值时, 它们可以通过某种“试验”的方法, 得到这种事件出现的频率, 或者这个随机变量的平均值, 并用它们作为问题的解^[11]。由此可见, 应用蒙特卡罗模拟方法包括以下步骤:

- (1) 定义各输入变量的统计分布;
- (2) 从这些分布中随机取样;
- (3) 运行模型, 使用随机选取的参数进行多次模拟;
- (4) 对输出结果进行统计分析, 产生累积概率分布 (CDF), 得到比较合理的结果。

本文的双区域模型中有 4 个输入参数, 即温度 (T)、风速 (s)、原料中苯含量、车间的通风量 (Q)。通过对现场相关测量数据进行统计分析, 可以得到各参数的取值分布如表 1 所示。本文利用 Crystal Ball 软件进行 Monte Carlo 模拟, 并对各变量进行敏感度分析, 了解其对车间内苯浓度值的影响程度^[10]。

表 1 各输入参数的取值

参数	取值分布
苯含量	Uniform [1%, 4%]
T	Max Extreme [21.49, 2.19]
s	Lognormal [20.23, 9.64]
Q	Uniform [120, 200]

2.3 环境监测方法

本次监测按照 GBZ/T160.42-2007《工作场所空气中有毒物质测定 芳香烃类化合物》, 使用低流量气体采样器, 按照 GBZ159-2004《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》, 依工艺流程对涂料生产线作业工人的工作地点连续 3 d 进行了长时间、短时间定点采样监测。采样点为填料罐旁 (近区域内)。采样结果为工作地点的瞬时浓度值。

3 结果

3.1 近区域苯浓度值的模拟结果

将温度、体积百分比、风速和通风量的取值分布输入相应的单元格, 利用 Crystal Ball 软件进行 10 000 次随机抽样试验, 得到 C_{NF} 的概率分布图和统计分析结果, 及浓度值对各输入量的敏感度分析。

由图 2 和表 2 可知, 根据数学模型预测得到近区域空气内苯浓度的最小值为 4.15 mg/m³, 最大值为 48.73 mg/m³, 均值为 17.58 mg/m³。

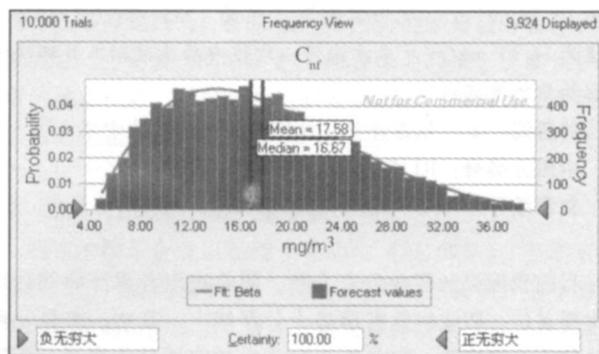


图 2 近区域内苯浓度值 C_{NF} 的概率分布图

表 2 近区域苯浓度值 C_{NF} 的统计分析结果

结果	预测值
均值	17.58 mg/m ³
中间值	16.67 mg/m ³
标准差	7.47
最小值	4.15 mg/m ³
最大值	48.73 mg/m ³

由敏感度分析可知, C_{NF} 对 4 个输入量的敏感度排序依次为苯体积百分比 73.3%, 风速 24.1%, 温度 1.8%, 通风量 0.7%。其中, 风速和通风量的敏感度为负值, 说明其对环境中苯浓度有反方向的影响, 即风速越大, 环境中苯浓度越小。

3.2 监测数据

对涂料车间内苯环境浓度的现场监测数据进行统计分析, 得到其均值为 14.61 mg/m³, 标准差为 15.42, 最小值 1.63 mg/m³, 最大值 54.30 mg/m³。

3.3 实测值与模拟值的对比分析

如表 3 和图 3 所示, 模拟数据样本中的最小值大于实测数据样本数据最小值, 差距为 2.52 mg/m³, 最大值小于实测数据样本中的最大值, 差距为 5.57 mg/m³。模拟浓度值的均值比实测值的均值高 2.97 mg/m³。模拟浓度值整体比实测浓度值偏大, 模拟结果基本符合实际监测数据, 可以近似反映工作环境中的苯浓度值范围。

表 3 实测浓度值与模拟浓度值的数理统计结果对比表

结果	实测浓度值	模拟浓度值
样本量	18	10 000
均值	14.61 mg/m ³	17.58 mg/m ³
标准差	15.42	7.47
最小值	1.63 mg/m ³	4.15 mg/m ³
最大值	54.30 mg/m ³	48.73 mg/m ³

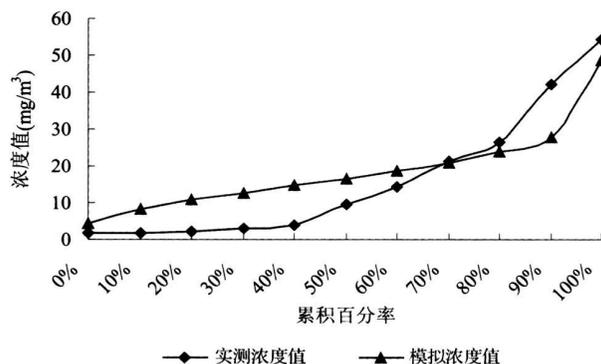


图 3 实测浓度值与模拟浓度累积百分率对比图

4 结论

暴露评价是职业健康风险评估程序中的重要内容，为健康风险的评估提供了定量数据。通过暴露评价，不仅可以估计人群现有的暴露状况，也可以预测新型化学物质进入环境后可能造成的暴露水平，为预防和控制职业性伤害的发生提供有利依据。

本文运用 CrystalBall 软件，依据双区域模型对车间内的苯浓度值进行 Monte Carlo 模拟预测，并将模拟结果与实际监测数据进行对比。结果显示，基于数学模型和 Monte Carlo 模拟得到的苯浓度值基本符合实际监测数据范围，验证了本文

方法的准确性。

参考文献:

[1] 赵露. 我国职业病的现状及调控策略的社会学思考 [J]. 职业卫生与应急救援, 2006 24 (4): 183-184.

[2] National Academy of Sciences. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process [R]. Washington DC: National Academy Press, 1983.

[3] U S Environmental Protection Agency. Draft Final Guidelines for Carcinogen Risk Assessment [R]. EPA/630/P-03/001A NCEA-F-0644A 2003.

[4] U S Environmental Protection Agency. Guidelines for Exposure Assessment [R]. FRL-4129-5 1992.

[5] 王阳, 刘茂. 基于剂量反应模型的苯职业暴露健康风险定量评价方法研究 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2008 26 (2): 77-80.

[6] 王阳, 刘茂. 基于生理毒代动力学模型和剂量反应模型的苯暴露健康风险评估方法 [J]. 中国工业医学杂志, 2009 22 (1): 34-37.

[7] Nicas M. Mathematical modeling to estimate air contaminant exposure [J]. 2006 1-29.

[8] Nicas M, Plisko M J, Spencer J W. Estimating benzene exposure at a solvent parts [J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2006 3: 284-291.

[9] Nicas M. Using mathematical models to estimate exposure to workplace air contaminants [J]. Chemical Health & Safety 2003 14-21.

[10] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources [J]. Science of the Total Environment 2006 366: 112-123.

[11] 朱本任. 蒙特卡罗方法引论 [M]. 济南: 山东大学出版社, 1987: 49-60.

轿车制造企业职业病危害现状调查

Investigation on current situation of occupational hazards in carriage production enterprises

李晓然, 李刚, 张秋玲, 王承刚, 温海梁, 周桂侠, 宋小和, 戴雪松, 盖永健, 孙玉兰

LIXiao ran, LIGang, ZHANG Qiu ling, WANG Cheng gang, WEN Hai liang, ZHOU Gui xia

SONG Xiao he, DAIXue song, GAI Yong jian, SUN Yu lan

(辽宁省职业病防治院, 辽宁 沈阳 110005)

摘要: 按国家职业卫生相关法规、标准和规范, 对 4 家轿车制造企业进行职业病危害的识别、检测与评价。被调查企业粉尘检测点合格率为 100%, 化学物质检测点合格率为 99.7%, 噪声检测点合格率为 89.7%, 紫外辐射检测点合格率为 100%, 手传振动检测点合格率为 91.5%, 高温检测点合格率为 50%。提示轿车制造企业的粉尘、化学物质已得到有效控制, 应对物理因素开展进一步的防控, 切实采取个人防护等综合干预措施, 消除和减少职业病危害因素的影响。

关键词: 轿车制造企业; 职业病危害; 评价

中图分类号: R135 **文献标识码:** B

文章编号: 1002-221X(2010)02-0143-04

轿车制造业已成为我国汽车工业的重要支柱产业之一, 为国家经济的快速发展作出贡献的同时, 还存在着许多职业病危害因素, 威胁劳动者的健康。为了解和控制轿车制造业的职业病危害, 预防职业病发生, 对 4 家轿车制造企业的职业病危害现状进行调查与分析。

1 内容与与方法

1.1 内容

收稿日期: 2009-08-31; 修回日期: 2009-11-19

作者简介: 李晓然 (1976-), 男, 主管医师, 研究方向: 职业卫生。