

苯乙烯生产工艺中主要职业病危害风险分析

黄德寅¹, 刘茂², 薄亚莉¹, 陈会祥¹

(1 天津渤海化工集团公司劳动卫生研究所, 天津 300054; 2 南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071)

苯乙烯生产工艺过程中存在苯、甲苯、乙苯、苯乙烯、氢氧化钾、甲醇等多种有毒化学物质, 从事苯乙烯生产作业工人在正常生产的巡检、分析采样、设备停车检修等操作时可存在职业病危害因素的暴露。且因工艺过程使用大量苯作为主要原料之一, 存在事故泄漏并发生急性苯中毒的可能。因此, 在苯乙烯生产工艺过程中既存在苯等有毒物质长期低水平职业暴露情况下的健康风险, 也存在突发急性中毒职业病危害事故的风险。

我们在对某化工厂苯乙烯生产装置新建项目职业病危害预评价工作中, 根据建设项目职业病危害特点, 对其存在的有毒物质职业暴露健康风险和急性苯中毒事故风险, 采用风险矩阵为基础的定性及半定量的方法并运用急性中毒事故定量风险方法进行了风险分析。

1 对象与方法

1.1 对象

某化工厂进行新建苯乙烯装置工程, 设计年产苯乙烯 50 万 t。拟采用传统工艺乙苯催化脱氢生产苯乙烯, 即乙烯和过量的苯在烷基化催化剂作用下经烷基化反应生成中间产品乙苯和极少量的多乙苯, 并根据巴杰尔的经典苯乙烯技术, 乙苯在铁系氧化物等催化剂作用下, 在约 600℃气相状态下脱氢生成苯乙烯。在苯乙烯生产工艺过程中主要产生和存在苯、苯乙烯、甲苯、甲醇、乙苯、氢氧化钾等有毒物质。苯乙烯工艺使用大量的苯作为原料, 若苯输送管道等发生事故, 可造成苯大量泄漏, 在事故状态下, 一旦发生泄漏存在接触大量苯蒸气的可能, 极易造成人员苯急性中毒, 甚至死亡。

生产工艺在高度自动化控制系统控制下连续进行, 生产装置劳动定员 56 人。

1.2 方法

1.2.1 风险矩阵半定量分析方法 采用风险矩阵半定量分析技术有毒物质职业暴露健康风险评估。

主要程序: 首先进行危害等级 (HR) 及暴露等级 (ER) 的评价, 然后通过公式 $Risk = \sqrt{HR \times ER}$ 计算风险水平^[1,2]。将风险划分为 5 个等级, 即可忽略风险、低风险、中等风险、高风险、极高风险。风险级别矩阵图见图 1。

1.2.2 苯急性中毒职业病危害事故的定量风险分析 本文主要以该建设项目苯乙烯装置建成投产后, 在苯乙烯生产工艺技术参数下的苯输送管道典型泄漏等情况下对作业人员可能造成的急性苯中毒事故为例, 对急性苯中毒突发事故进行定量风险分析。主要从假设事故场景苯急性中毒伤害范围、扩散的浓度

分布及急性中毒事故概率等方面进行定量分析与评价。

HR \ ER	1	2	3	4	5
1	1 可忽略	1.4 可忽略	1.7 低	2 低	2.2 低
2	1.4 可忽略	1.7 低	2.4 低	2.8 中	3.2 中
3	1.7 低	2.4 低	3 中	3.5 高	3.9 高
4	2 低	2.8 中	3.5 高	4 高	4.5 极高
5	2.2 低	3.2 中	3.9 高	4.5 极高	5 极高

图 1 风险级别矩阵图

苯泄漏后初期形成重气云, 实际上泄漏初期形成的重气云在扩散过程中, 随着空气的不断卷入, 密度越来越小, 越来越接近于空气的密度, 最终会转变为非重气云。计算转变点与泄漏源的距离 x_f 、 x_y 及转变点处苯浓度 C_f , 重气云扩散到下风向距离处的危险物质浓度 $\leq C_f$ 时应用重气云扩散模型^[3]: $C = C_0 \left(\frac{x}{V_0} \right)^{-1.5}$; $\geq C_f$ 时泄漏源下风向某点 (x, y

z) 在 t 时刻的苯浓度应用高斯扩散模型^[3]:

$$C_{xyzt} = \frac{2Q}{(\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} + \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2} \right) \right]$$

急性中毒事故概率主要采用事故泄漏概率和引起苯急性中毒死亡的概率的耦合来计算。急性中毒死亡的概率通过概率变量 Y 进行计算:

概率变量 $Y = A + B \ln(C \cdot t)$

概率变量 Y 和概率 (或百分数) P 的关系用下面方程进行概率变量向百分数的转化:

$$P = 50 \left[1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \operatorname{erf} \left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

2 结果

2.1 工作场所有毒物质职业暴露健康风险分析

2.1.1 有毒化学物质危害等级 美国政府工业卫生学者协会 (ACGIH) 根据化学物质固有的毒性、致癌、致突变和致畸等特性, 并根据化学物质的急性毒性、刺激性、腐蚀性等将其可能造成的危害程度分成不同的等级, 并确定危害等级 HR 见表 1。

2.1.2 有毒化学物质暴露等级 在工程分析、职业病危害因素识别分析和拟采取职业病危害防护措施分析的基础上, 依

据理化性质、暴露方式、接触时间、接触频率、防护措施等，目有毒化学物质的暴露等级。详见表 2
结合国内同类生产工艺职业暴露的相关资料，确定该建设项

表 1 有毒化学物质危害等级

	苯	乙苯	甲苯	苯乙烯	氢氧化钾	甲醇
LD_{50}/LC_{50}	小鼠吸入 LC_{50} 51.0 g/m ³ , 4 h	大鼠吸入 LC_{50} 19.7 mg/L, 4 h	大鼠吸入 LC_{50} 30.4 mg/L, 4 h	大鼠吸入 LC_{50} 26.0 mg/L, 4 h	大鼠经口 LD_{50} 273 mg/kg	大鼠吸入 LC_{50} 83.8 mg/L, 4 h
ACGIH 分级及是否高毒或高腐蚀等	A1 高毒物质	—	A4	A4	强碱、高腐蚀	—
危害等级 HR	5	3	2	2	5	2

表 2 有毒化学物质暴露等级

有毒物质名称	暴露因素及暴露指数 (E)						暴露等级 ER
	蒸气压力 (mm Hg)	OT/OEL 比值	危害控制措施及是否岗前培训	E/OEL 比值	每周使用量	每周累计暴露时间	
苯	74.8	0.75	直接由界区罐区管道输送, 工艺密闭, DCS 自动控制, 装置区拟设置淋浴洗眼器, 拟进行岗前培训	0.18	1 962 t	10.5 h	2.67
乙苯	—	0.09	生产装置露天布置, 拟设置洗眼器, 工艺密闭, DCS 自动控制, 拟进行岗前培训	0.002 4	2 650 t	10.5 h	1.58
甲苯	21.8	0.16	工艺密闭, 拟设置洗眼器, DCS 自动控制, 拟进行岗前培训	0.005 3	2 25 t	10.5 h	2.08
苯乙烯	4.47	0.004	工艺密闭, DCS 自动控制, 拟进行岗前培训	0.005 3	2 500 t	10.5 h	1.76
氢氧化钾	—	—	工艺密闭, 自动控制, 拟进行岗前培训	0.000 4	35 kg	10.5 h	1.60
甲醇	97.0	0.52	工艺密闭, 自动控制, 拟进行岗前培训	0.007	12.53 kg	10.5 h	1.9

注: OT——Odour threshold 气体的嗅闻 (mg/m³); E——根据类比资料预测的平均每周工作时间的有毒物质暴露量 (mg/m³)

2.1.3 风险等级评估, 见表 3

表 3 有毒化学物质可致职业病危害的风险等级

有害化学物质	苯	乙苯	甲苯	苯乙烯	氢氧化钾	甲醇
风险级别	3.5	2.2	2.0	1.9	2.8	2.0
风险等级	高风险	低风险	低风险	低风险	中等风险	低风险

根据上述结果, 该建设项目生产过程苯职业病危害的风险在高风险水平。结合工程分析、职业病危害因素识别分析和拟采取职业病危害防护措施分析等内容, 认为苯属高毒物品, 且用量较大, 在拟采用工艺设备等条件下类比资料显示工作场所短时间苯暴露水平较高, 职业卫生管理措施尤其是高毒作业操作规程及高毒作业场所的管理措施存在缺陷, 因此综合分析确定该建设项目为职业病危害严重建设项目。根据风险管理理论, 应立即采取切实可行且有效的预防措施, 以减少并控制这种风险, 并通过对作业场所空气中苯浓度进行日常监测、加强管理、加强健康监护等措施, 降低苯职业病危害风险水平。

氢氧化钾存在职业病危害的风险在中等风险水平, 可通

过对作业工人加强职业卫生教育, 让工人清楚认知氢氧化钾的危害, 完善洗眼器、淋洗器服务半径设计, 进行日常监测等措施, 控制并减少其职业病危害风险水平。

其他化学因素如乙苯、甲苯、苯乙烯、甲醇等造成职业病危害的风险在低风险等级水平, 对此也不能忽略其造成职业病危害的可能, 可通过进行定期监测、加强管理以使其职业病危害处于低风险水平。

2.2 突发苯急性中毒职业病危害事故风险评估

2.2.1 苯泄漏事故扩散定量计算 根据建设项目建设地点气象站近 30 年气象资料统计, 当地全年大气稳定度以 D 类最多, 占 45.0%; 历年平均风速为 4.6m/s, 年平均温度为 12℃。因此将上述发生频率最高的气象条件假设为发生苯泄漏事故时的气象条件。

假设事故场景 (主要考虑发生概率最高的事故情况, 未考虑概率小的极端事故): 在苯输送管道破裂的事故状态下, 假设裂口直径为管道直径的 20%, 苯泄漏 10 min, 估算泄漏量约为 Q=326.92 kg, 计算结果见表 4

表 4 苯泄漏扩散计算结果

X (m)	重气云扩散范围							非重气云扩散范围			
	10	20	50	100	150	200	230	250	300	400	500
C (g/m ³)	1 472.71	520.68	131.72	46.57	25.35	16.47	13.35	3.01	1.11	0.29	0.12

2.2.2 苯泄漏扩散急性中毒危害区域计算结果 包括急性中毒伤害范围确定准则 (即毒性评价指标) 和毒性物质扩散的

浓度分布两个方面。苯的急性毒性指标按照《化学物质毒性全书》^[4]对人的急性毒性危险浓度进行分析: 浓度为 61 000

mg/m^3 时, 人持续吸入 $5 \sim 10 \text{ min}$ 致死, 浓度为 $1600 \text{ mg}/\text{m}^3$ 时, 会发生一般中毒症状, 会留有后遗症。苯泄漏后扩散影响区域浓度取职业接触限值 PC-STEL $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ 进行分析, 定量计算结果见表 5。

表 5 苯泄漏扩散急性中毒危害区域计算结果

浓度阈值 (mg/m^3)	下风向最大扩散距离 (m)	时间 (s)
61 000	83.53	18.16
1 600	279.66	60.80
10	988.45	214.88

2.2.3 苯泄漏的事故后果概率定量分析 根据生产组织和劳动定员, 并依据该项目总平面布置图, 对苯泄漏扩散范围内的死亡人数和影响人数进行估算, 可以得到苯泄漏扩散事故后果表 (未考虑交接班时发生事故的特殊情况)。见表 6。

表 6 输送管道中苯泄漏事故后果概率

泄漏时间 (min)	泄漏量 (kg)	事故概率	急性中毒概率	事故死亡风险概率	影响范围 (m)	后果 (死亡人数)
5	163.46	10^{-3}	1%	1.00×10^{-5}	66.30	5
10	326.92	10^{-3}	1%	1.00×10^{-5}	83.53	8
15	490.38	10^{-3}	1%	1.00×10^{-5}	95.71	10

3 结论与讨论

3.1 职业暴露健康风险和急性中毒事故风险是职业危害风险主要组成部分

职业危害风险可分为健康风险与事故风险两种, 尤其在大型石油化工等企业, 既存在正常工况下的职业暴露健康风险, 也因其工艺特性存在突发泄漏的急性中毒事故风险。健康风险所研究的职业危害是相对缓慢的、隐匿的、长期的, 影响程度不易度量。而职业病危害急性事故风险通常是在危险化学品泄漏的情况下发生的, 事故的发生往往出乎人们的预料, 常在意想不到的时间、地点发生, 并且在短时间内迅速出现急性中毒甚至伤亡, 产生严重后果。

本文针对苯乙烯生产工艺职业病危害的特点, 对生产工艺过程主要有毒物质职业暴露健康风险和突发苯泄漏中毒事故风险采用不同的方法分别进行了分析。风险分析的结果说明所采用的方法是可行的, 其结果也是合理的。

3.2 风险分析可以指导工人风险管理

风险管理是评估和控制暴露和风险源的过程, 决策者可根据评估结果从中选择最优方案和管理对策, 其目标是将风险降低到可接受的水平。

我国的《建设项目职业病危害分类管理办法》(卫生部 49 号令)规定, 国家对职业病危害建设项目实行分类管理, 并要求职业卫生服务机构应当根据风险评估结果进行综合分析, 对建设项目的职业病危害进行分类。本文应用的职业暴露健康风险分级方法就是综合考虑了有毒物质的潜在危害、暴露人数、暴露频率、暴露时间、国内同类企业生产工艺过程职业暴露的相关资料、流行病学资料、职业病防护措施等, 对建设项目主要职业病危害因素可致的职业暴露健康风险进行风险预测, 评估其职业病危害的风险等级, 然后依据不同的风险等级确定建设项目职业病危害类别, 提出应实施的综合分级管理措施。

实施对职业病危害建设项目分类管理 实际上就是要对工厂进行风险管理。本文应用职业暴露健康风险分级方法得出的评估结果进行建设项目的职业病危害分类, 方法容易掌握, 实用性强, 易于推行, 其得出的建设项目职业病危害分类结果也是科学合理的, 与卫生部 49 号令中的有关要求是相吻合的。根据评估的风险等级, 从工程技术措施、职业卫生管理措施和操作规程、应急救援预案、健康监测策略、职业卫生培训等方面确定优先风险控制技术与对策, 决定相应风险的防控措施优先级, 以采取有效的防护控制措施。可以科学地、有序地、连续地指导工厂对职业病危害分类进行风险管理。

3.3 急性中毒事故的风险分析可以指导应急救援及应急管理

有毒物质泄漏是工业生产过程一种常见事故, 本文利用定量风险分析方法, 估测苯泄漏扩散的危害范围和事故后果, 从而为可能发生的事故进行充分的预测预警, 其扩散模型的计算结果可以从理论上指导应急救援行动中警戒区域的确定, 可以根据有毒气体的扩散范围及后果确定现场控制和伤病员救治的方案; 还可以指导突发事故下的人员疏散与避难; 有毒气体急性中毒事故的定量分析结果可以指导应急预案的编制, 为企业制定应急救援预案提供科学依据; 也可以作为发生紧急情况时的应急救援行动、选择人员疏散逃生路线的参考^[5]。

急性中毒事故风险分析是对中毒事故出现的概率及其后果进行预测及评价。事故风险概率包括泄漏事故危害程度及急性中毒死亡概率, 主要分析职业病危害不确定性的问题。通过风险分析确定出事故产生的后果及发生的概率, 并按照可接受风险水平采取必要的防范与应急措施, 使风险降低到可接受水平的过程, 将有利于化工厂生产全过程的风险应急管理。

3.4 风险分析作为职业病危害评价的方法是非常必要的

风险分析方法与类比法及检查表法等传统评价方法相比较, 其突出的作用是可以给出较清晰的定量或半定量的结果, 其意义在于通过风险识别找出职业病危害风险源, 是对职业暴露健康风险等级及突发性事故风险概率、事故发生后果的预测和评价, 并为采取何种对策以便减少危害影响提供依据。

因此, 风险分析属于职业危害风险评价体系中一个重要组成部分, 风险分析方法作为职业病危害评价方法是非常必要的, 在职业病危害评价中引入风险分析方法不是增加另外一个评价体系, 而是方法的增加和提升, 可以极大程度地提高整个职业病危害评价的水平。

参考文献:

- [1] 黄德寅, 管树立, 陈会祥, 等. 有毒物质职业暴露健康风险评估 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2007, 25 (8): 512.
- [2] A Semi-Quantitative Method to Assess Occupational Exposure to Harmful Chemicals. Ministry of Manpower Occupational Safety and Health Division Singapore [Z]. 2005.
- [3] 黄德寅, 刘茂, 王丽, 等. 风险分析在急性中毒职业病危害事故预防评价中的应用 [J]. 中国工业医学杂志, 2007, 25 (3): 200-202.
- [4] 夏元洵. 化学物质毒性全书 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1991: 327-333.
- [5] 黄德寅, 刘茂, 管树立, 等. 急性中毒职业病危害事故现场应急救援的研究 [J]. 职业卫生与应急救援, 2007, 25 (1): 20-23.