

苯槽罐车泄漏场景模拟及风险分析

孙浩, 王小金, 苏艳贞, 董婉婉

(洛阳理工学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:为评价苯在运输过程中发生泄漏的灾害后果,采用事故后果模拟软件 ALOHA 分析苯槽罐车泄漏扩散范围和毒性区域,分析苯泄漏被点燃后火灾热辐射及冲击波超压的影响范围,使用人体脆弱性模型计算灾害区域内致死概率及个人风险值,结合 Google Earth、Surfer 软件绘制事故影响区域图。

关键词:苯;苯槽罐车;泄漏扩散;泄漏场景;事故后果;ALOHA 软件;事故场景模拟;风险分析

中图分类号:X327

文献标识码:A

doi:10.13681/j.cnki.cn41-1282/tv.2021.02.008

0 引言

苯是一种重要的化工材料,具有易挥发、易燃易爆、有毒有害的理化特点。苯一旦发生泄漏,就容易造成人群中中毒和现场火灾、爆炸等事故。苯槽罐车是运输苯类危险化学品的主要工具,近年来,罐车泄漏事故数量呈上升趋势,且在处理此类事故时缺少现场操作规程和应急决策办法。事故后果模拟软件(Areal Locations of Hazardous Atmospheres, 简称 ALOHA)是由美国环境保护署、化学制品突发事件和预备办公室等机构共同开发的,该软件集成了流体力学及多种扩散数学模型,可用于化学品泄漏辅助应急分析。笔者试运用 ALOHA 软件对苯槽罐车泄漏后果进行模拟并进行风险分析,以期消防救援及事故处理提供帮助。

1 苯泄漏事故特点

1.1 毒性强、危害大

苯是一种碳氢化合物,在常温常压下,是一种无色透明的液体,并带有强烈芳香气味^[1],沸点为 80.1℃,易挥发,其蒸气比空气重,能沿风向扩散到下游低洼处并聚集。苯具有很强的毒性,可通过呼吸道及消化道进入人体,对中枢神经产生损害,引起急性中毒;长期接触苯类危害物品,可损伤人体造血系统,导致造血功能紊乱,引发白血病^[2];皮肤接触苯后,会导致脱脂、皲裂等炎症的发生。目前,国内外权威机构将苯

确定为致癌物质,是引起职业性肿瘤的物质之一^[3]。

1.2 点燃后释放毒素

苯闪点为 10~12℃,燃点为 56.2℃,热值为 4×10^7 J/kg,属于闪点易燃液体^[1]。苯被点燃后,会迅速猛烈地燃烧,并放出大量的热量。苯在燃烧过程中,通常为不完全燃烧,会产生一氧化碳等有毒有害物质,造成人员伤亡。

1.3 灭火后的污水易污染环境

处置苯火灾事故时,常用水冷却、泡沫灭火,产生的污水中含大量有毒有害物质。污水经地表流入江湖、河流中,易造成环境污染^[4]。

1.4 易引发爆炸事故

苯发生泄漏后,汽化速度快,如果没有被点燃,能迅速扩散到空气中,与空气形成爆炸性混合物^[1]。苯在空气中的爆炸极限为 1.4%~8.0%,点火能仅为 0.2 mJ,遇明火、电火花等热源,就可能会导致火灾和爆炸的危险。

2 事故模拟

2.1 参数模拟

某焦化厂运输苯的槽罐车发生交通事故(槽罐车参数如表 1 所示),槽罐车侧翻,罐体与护栏发生剧烈摩擦,罐体结构发生破裂,导致苯连续泄漏,泄漏裂缝为有限孔(孔直径约为 15 cm),泄漏过程中未发生扩展。此次泄漏点的下风口处有村庄和工厂,所以泄漏

表 1 苯槽罐车参数

Tab.1 Parameters of Benzene tank truck

罐车型号	储存介质	规格/m ³	核定载重/t	罐内压力/MPa	充装系数	直径/m	泄漏口直径/cm	加温范围
G60K	苯	60	52	0.15	0.9	2.8	8	不加热

收稿日期:2021-01-13

作者简介:孙浩(1990-),男,河南周口人,助教,硕士,主要从事高校安全工程专业的教学与研究工作。

点为环境敏感点。本文应用 ALOHA 软件对苯槽罐车泄
漏后的扩散场景(毒气蒸气云)、火灾场景(闪火、喷射

火、火球或池火)和爆炸场景(蒸气云爆炸)进行模拟,
事故环境参数如表 2 所示。

表 2 苯储罐基本模拟参数

Tab.2 Basic simulation parameters of Benzene tank

参数	数值
模拟物质	苯
风速、风向	风速为 3 m/s, 风向为 N。
空气温度和湿度	29 °C, 50%。
罐车情况	横卧罐车, 长为 10.41 m, 直径为 2.8 m, 容积为 60 m ³ , 实际储存量为 54 m ³ 。
泄漏口	等效为直径为 15 cm 的小孔, 罐车侧边, 距罐底 40 cm。

2.2 ALOHA 事故后果模拟

根据苯槽罐车泄漏的情况, 本文对泄漏后未点燃
(扩散场景)、泄漏后点燃发生火灾(火灾场景)和泄
漏后延时点燃发生蒸气云爆炸(爆炸场景)3 种灾害场
景进行模拟。泄漏后未点燃场景是模拟发生泄漏事
故后 60 min 时苯蒸气扩散的范围及毒害区域; 泄
漏后点燃发生火灾场景是模拟泄漏后苯发生火球燃
烧释放热量造成的热辐射区域; 泄漏后延时点燃发
生蒸气云爆炸场景是模拟泄漏后在泄漏点附近形
成蒸气云团, 经点燃后发生蒸气云爆炸的冲击波超
压区域。经过 ALOHA 软件模拟, 得到毒气泄漏扩
散区域图(如图 1 所示)、火球燃烧热辐射区域图
(如图 2 所示)、蒸气云爆炸冲击波区域图(如图 3
所示)。

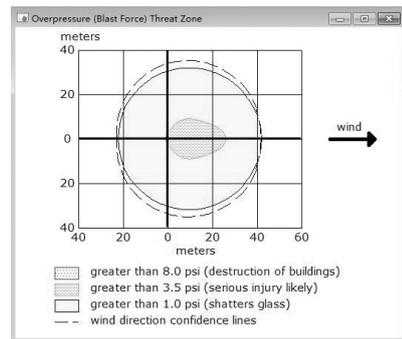


图 3 蒸气云爆炸冲击波区域图

Fig.3 Shock wave area of vapor cloud explosion

根据事故统计和模拟结果, 可以得到 3 种事故
场景发生的概率及在不同标准下的影响范围, 如
表 3 所示。其中, 急性暴露指导水平 (Acute Exposure
Guideline Levels, 简称 AEGL) 是美国环保署制定
的 3 种表述人体暴露在毒性气体中的后果浓度, 每
个 AEGL 由 5 个时间周期 (10 min、30 min、60 min、4 h、
8 h) 构成^[5]。本文结合实际场景和人员疏散时间,
选择泄漏 60 min 周期进行分析。AEGL-1 为不会
对人体造成伤害的最大容许浓度; AEGL-2 为可能
会对

表 3 苯槽罐车泄漏事故风险因素和后果

Tab.3 Risk factor and consequence of leakage accident of Benzene tank truck

事故类型	发生概率 / $\times 10^{-6}$	划分标准	影响范围 (下风向距离)/m
人中毒	3	AEGL-1	900
		AEGL-2	180
		AEGL-3	50
蒸气云爆炸	5	1.0 psi	45
		2.0 psi	27
		3.0 psi	5
火球	5	2.0 kw/sqm	600
		5.0 kw/sqm	400
		10.0 kw/sqm	250

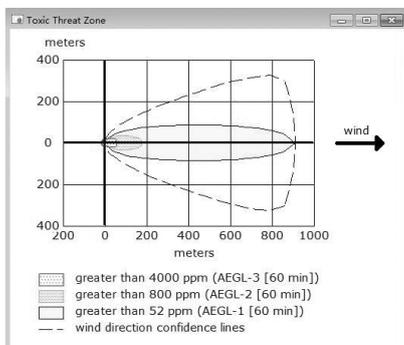


图 1 苯泄漏扩散区域图

Fig.1 Area of Benzene leakage and diffusion

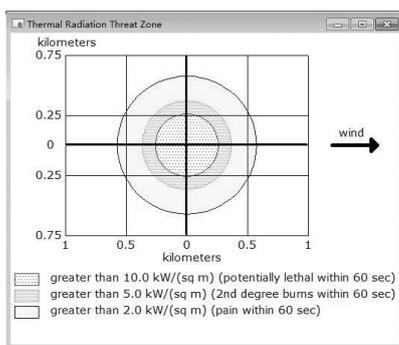


图 2 燃烧热辐射区域图

Fig.2 Area of burning thermal radiation

人体造成不可恢复伤害的浓度阔限值;AEGL-3 为造成人体死亡的阔限值;蒸气云爆炸产生的冲击波超压分为 1.0 psi (约 6.895 kPa, 玻璃破碎)、2.0 psi (约 24.132 kPa, 人体严重损害)和 3.0 psi (约 55.158 kPa, 建筑物破坏)3 个标准;燃烧产生的热辐射分为 2.0 kw/sqm (暴露 60 s 会感觉疼痛)、5.0 kw/sqm (暴露 60 s 二度烧伤)和 10.0 kw/sqm (暴露 60 s 潜在致死损害)3 个标准。

结合地理信息系统(GIS),将模拟结果分别应用于 Google Earth 中,得到毒气泄漏扩散区域(如 4 图所示)、火球燃烧热辐射区域(如图 5 所示)、蒸气云爆炸冲击波区域(如图 6 所示)。

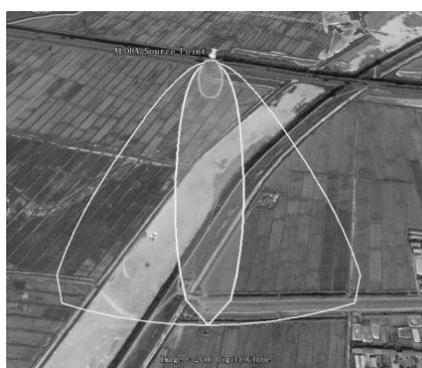


图 4 苯泄漏扩散区域图

Fig.4 Area of Benzene leakage and diffusion

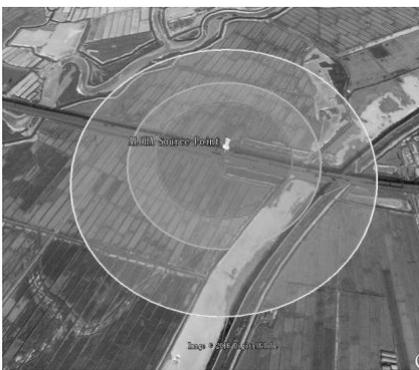


图 5 燃烧热辐射区域图

Fig.5 Area of burning thermal radiation



图 6 蒸气云爆炸冲击波区域图

Fig.6 Explosive shock wave area of vapor cloud explosion

3 计算个人风险值

3.1 个体致死概率计算方法

根据苯泄漏事故后果模拟结果,计算出场景中某一位置的毒物浓度、热辐射强度、冲击波超压值,进而计算出致死剂量值、概率变量值。概率变量值 Y 与个体致死概率 d_i 之间的关系如式(1)所示^[6-7]。

$$d_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(\frac{-u^2}{2}\right) du \quad (1)$$

式中: Y 为概率变量,服从正态分布,其值可通过概率数学模型(表 4)获得。

表 4 人体脆弱性模型

Tab.4 Human vulnerability model

脆弱性影响因子	概率数学模型	剂量
毒物泄漏扩散	$Y=a+b\ln D$	$D=C^n t_e$
热辐射	$Y=-37.23+2.56\ln D$	$D=I^{1.33} t_e$
冲击波超压	$Y=5.13+1.37\ln D$	$D=P_s$

注: D 为致死剂量; C 为毒物浓度,ppm; I 为辐射强度, W/m^2 ; P_s 为静态超压峰值,Pa; t_e 为暴露时间,s; a, b, n 为各事故类型的常数。

3.2 个人风险值的计算

单一危险源下的个人风险值可由此事故发生的概率与该位置下的致死概率求得,如式(2)所示。多种危险源下个人风险值可用式(3)求得^[8-10]。

$$IR(x, y) = fd(x, y) \quad (2)$$

$$IR(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} d_{ij}(x, y) \quad (3)$$

式中: $IR(x, y)$ 为坐标 (x, y) 下的个人风险值; f_{ij} 为坐标 (x, y) 下第 i 个危险中第 j 个事故发生的概率; $d_{ij}(x, y)$ 为坐标 (x, y) 下第 i 个危险中第 j 个事故致死概率。

为便于风险值计算,应对事故区域进行网格化处理。根据影响范围的大小,将事故区域划分为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的正方形网格。先分别计算苯槽罐车泄漏 3 种事故场景下网格中心点的暴露剂量值,然后对各事故风险值进行求和。应用美国 Golden Software 公司开发的一款以绘制三维图和等高线为主的 Surfer 软件,绘制出个人风险等值线。结合 Google Earth,将个人风险值分别显示在地图上,结果如图 7~图 9 所示。

4 风险分析及应急处理

4.1 风险分析

通过模拟计算得到个人风险值后,应通过合理的风险判别指标对风险水平进行评估,并根据评估的结果对事故进行风险控制。目前,我国尚未有权威部门制订个人风险判别指标,国际上通常使用英国 HSE 确定的 ALARP 准则对风险进行判别^[11]。



图7 苯泄漏扩散的个人风险值等高线

Fig.7 Personal risk value contour of Benzene leakage and diffusion

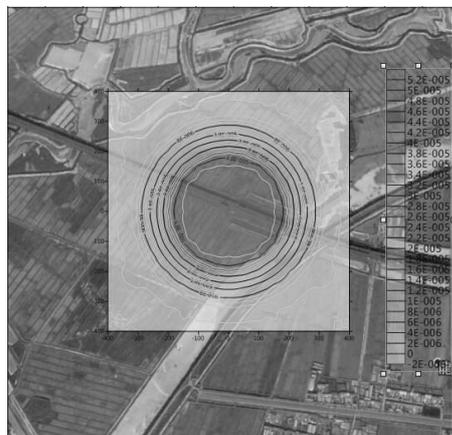


图8 燃烧热辐射个人风险值等高线

Fig.8 Personal risk value contour of burning thermal radiation

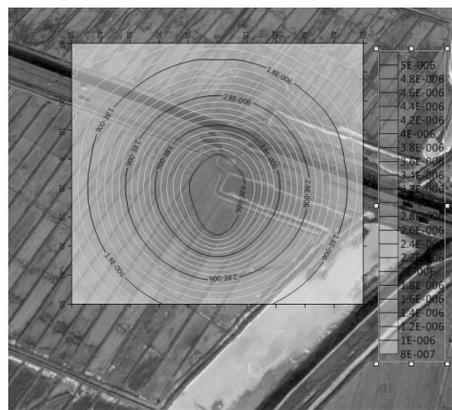


图9 蒸气云爆炸个人风险值等高线

Fig.9 Personal risk value contour of vapor cloud explosion

ALARP 准则将风险划分为风险不可接受区 ($IR \geq 10^{-4}$)、风险可接受区 ($10^{-6} \leq IR < 10^{-4}$) 和风险可忽略区 ($IR < 10^{-6}$) 3个区域,如图 10 所示。通过对苯槽罐车泄漏 3 种事故场景的个人风险值计算叠加可知:事故中心附近的个人风险值最高,量级为 10^{-5} ,属于风险可接受范围。因此,不必在此段道路附近设置

相应的防护装置,但应制订详细的事故应急响应措施。

4.2 应急处理

虽然在此路段发生苯槽罐车泄漏事故的个人风险值在可接受的范围内,但当苯浓度达到 AEGL-1 或冲击波超压达到 1.0 psi 或热辐射强度达到 2 kw/sqm 时,暴露在此影响区域中的人体会明显感到刺激和不适;当苯浓度达到 AEGL-2 或冲击波超压达到 2.0 psi 或热辐射强度达到 5 kw/sqm 时,将严重或永久影响人体健康;苯浓度超过 AEGL-3 或冲击波超压达到 3.0 psi 或热辐射强度达到 10 kw/sqm 时,会造成生命威胁甚至导致死亡。此外,苯对人体的影响不仅与浓度还与接触时间密切相关。苯在空气中的浓度与人体接触时间对人体健康的急性危害如表 5 所示。

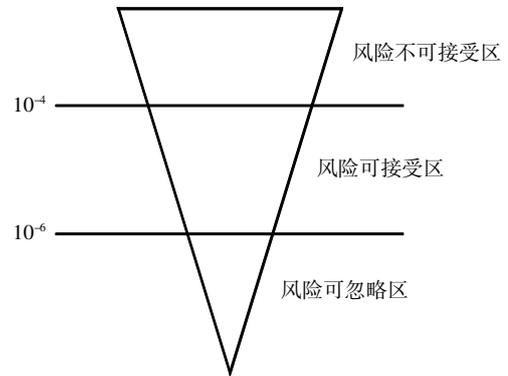


图10 英国 HSE 的 ALARP 准则

Fig.10 ALARP criterion of Britain HSE

表 5 不同浓度不同接触时间下苯对人体的影响

Tab.5 Effect of Benzene on human body under different concentration and exposure time

空气中苯的浓度 / (g/m ³)	接触时间/h	急性影响
0.16~0.48	5	头疼、乏力、疲劳
1.6	1	一般中毒症状
4.8	1	严重中毒症状
24	0.5	生命危险
61~64	0.08~0.17	死亡

在泄漏事故发生后、未能采取有效控制措施前,毒性区域将向下游扩散,浓度逐步趋于稳定。因此,在事故发生后,需要立即组织专业人员对事故下游区域的人员进行紧急疏散和撤离。此外,为了防止苯蒸气爆炸,应该对附近可能发生点燃的热源进行控制,封闭事故段双向车道,并且组织人员向上风口疏散。

5 结语

本文在分析苯泄漏事故特点的基础上,建立了

苯槽罐车道路运输过程中泄漏扩散事故场景、火球热辐射事故场景和蒸气云爆炸事故场景,并运用ALOHA软件对3种事故场景进行模拟,然后结合Google Earth软件和GIS技术对三种事故场景进行分析,运用人体脆弱性数学模型计算致死概率及个人风险值,最后使用Surfer软件,绘制出个人风险值等高线。分析结果基本能够客观反映出苯槽罐车泄漏的毒性扩散、火球热辐射和冲击波超压影响范围和区域,能够反映出事故路段的风险大小,为苯槽罐车泄漏事故应急救援及敏感地区道路防护提供依据和参考。但文中3种场景及相关数学模型均建立在理想状态的基础上,苯槽罐车运输过程中发生泄漏事故还需要考虑地形地貌、周围植被、下游地区环境、地面阻力等多种因素的影响,故其风险区域还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 俞勇.轻苯罐车泄漏大气扩散模拟分析和探讨[J].资源节约与环保,2013(6):146-147.
- [2] 罗盛,黄小艳,胡倩,等.慢性苯中毒患者造血抑制与ICBP90表达的相关性[J].中华劳动卫生职业病杂志,2012(8):571-574.
- [3] 熊敏如.职业病误诊误治与防范对策[M].长沙:中南大学出版社,2004:111-121.
- [4] 赵英程,田玉敏.苯储罐事故后果模拟计算与分析[J].安全与环境学报,2013,13(2):191-195.
- [5] 周亚飞,刘茂.化工园区重大事故风险分析[J].防灾减灾工程学报,2011,31(1):68-74.
- [6] Lee K W. A methodology for assessing risk from released hydrocarbon in an enclosed area [J].Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2002 (15): 11-17.
- [7] Strickland J A, Foureman G L. US EPAS acute reference exposure methodology tor acute Inhalation eposures [J].The Science of the Total Environment, 2002,288:51-63.
- [8] Jonkmana S N,van Gelder P H A J M,Vrijling J K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage [J]. Journal of Hazardous Materials,2003,99:142-153.
- [9] Faisal I K,Abbasi S A. Risk analysis of a typical chemical industry using ORA procedure [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2001 (14): 43-59.
- [10] 陈国华,张静,张晖,等.区域风险评价方法研究[J].中国安全科学学报,2006(6):112-117.
- [11] 任涛.苯罐区火灾爆炸模拟及安全措施[J].安防科技,2011(8):52-54.

[责任编辑 杨明庆]

Scene Simulation and Risk Analysis on Leakage of Benzene Tank Truck

Sun Hao, Wang Xiaojin, Su Yanzhen, Dong Wanwan

(Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: In order to evaluate the disaster consequence of benzene leakage during transportation, the accident consequence simulation software ALOHA is used to analyze the diffusion range and toxic area of benzene tank truck leakage. The influence range of fire thermal radiation and shock wave overpressure is analyzed after the benzene ignition. The human vulnerability model is used to calculate the lethal probability and personal risk value in the disaster area. With Google Earth and Surfer software, the map of accident affected area is drawn.

Key Words: Benzene; Benzene tank truck; leakage and diffusion; leakage scene; accident consequence; ALOHA software; accident scene simulation; risk analysis