

多源重气泄漏扩散模拟研究

朱红亚^{1,2}, 陈昊东¹, 王青松¹, 孙金华¹

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230026;

2. 公安部天津消防研究所, 天津 300381)

摘要: 由于重气效应的存在, 重气的泄漏和扩散的危险性较之轻气更为严重. 在单源 SLAB 模型的基础上发展了多源重气扩散模型, 并对单源和多源重气在连续泄漏和瞬时泄漏两种泄漏模式下的扩散都进行了模拟研究. 以氯气泄漏为研究算例, 计算得到了相应条件下风向的时均浓度分布情况, 结合毒性标准给出了不同毒性水平下的事故后果影响范围, 从而可以为应急救援和疏散决策制定提供理论指导.

关键词: 重气扩散; SLAB 模型; 多源; 连续泄漏; 瞬时泄漏

中图分类号: X511 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.08.010

引用格式: Zhu Hongya, Chen Haodong, Wang Qingsong, et al. Simulation research on leakage and dispersion of multi-source heavy gas[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(8): 697-703.

朱红亚, 陈昊东, 王青松, 等. 多源重气泄漏扩散模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(8): 697-703.

Simulation research on leakage and dispersion of multi-source heavy gas

ZHU Hongya^{1,2}, CHEN Haodong¹, WANG Qingsong¹, SUN Jinhua¹

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Tianjin Fire Research Institute, Tianjin 300381, China)

Abstract: The risk from the leakage and dispersion of heavy gas is much more serious than that of light gas due to the existence of heavy gas effect. A multi-source dispersion model of heavy gas was developed on the basis of a single SLAB model. And the dispersion behaviors of single and multi-source heavy gas at the mode of continuous and instantaneous leakage were simulated. Then, with a case study of chlorine, the downwind time-averaged concentration distribution under corresponding conditions was calculated. Further, combined with the toxicity criteria, the accident-affected areas at different toxic levels were presented to provide theoretical guidance for emergency rescue and evacuation decision-making.

Key words: heavy gas dispersion; SLAB model; multi-source; continuous leakage; instantaneous leakage

收稿日期: 2013-10-25; 修回日期: 2014-02-18

基金项目: “十二五”科技支撑计划(2011BAK07B01, 2012BAK13B01)资助.

作者简介: 朱红亚, 女, 1985年生, 博士. 研究方向: 气体泄漏和扩散. E-mail: Lizzy705@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 孙金华, 博士/教授. E-mail: sunjh@ustc.edu.cn

0 引言

随着现代石油化工行业的快速发展,在生产、使用、运输、贮存过程中涉及大量的易燃易爆、有毒有害气体,由于各种原因导致的重大事故性泄漏频繁发生. 据统计,在因有毒气体泄漏所造成的人员伤亡中,重气泄漏的比例约为 90%,造成了高达 99.05% 的人员伤亡^[1-2]. 重气泄漏事故发生后,由于重气效应的存在,重气将向地面方向沉降并沿地表进行扩散,这给生活在地面上的人们带来了更为严重的危害. 因此,重气泄漏扩散问题一直是国内外众多学者关心及研究的热点.

为了快速准确地预测重气泄漏扩散后浓度的时空分布情况及影响区域范围,前人开展了大量的研究. 在早期阶段,即 20 世纪 70 年代至 20 世纪末期间,主要以现场大规模试验研究为主,积累了大量的原始基础数据,著名的现场试验有 Burro, Coyote, Maplin sands, Thorney Island, Desert Tortoise, Goldfish 等^[3]. 随着低速风洞物理模拟及计算机的发展,实验室研究和数值模拟研究逐渐成为重气扩散研究的重要手段,在此基础上建立了众多的重气扩散模型^[4-7]. 然而,前人的研究多集中在单源重气泄漏扩散问题,而对于时常发生的多源重气泄漏扩散的研究存在着严重缺失.

因此,本文致力于实现多源重气泄漏扩散的模拟计算. 在对现有广泛应用的重气扩散模型的评估中发现,SLAB 模型计算速度快,其模拟结果具有国际认可的高度准确性和可靠性,已经被应用于美国环保署的应急平台,颇具开发应用价值. 因而本文对 SLAB 模型开展了研究,对它的有效性进行了验证,在此基础上发展了多源重气扩散模型,预测得到了多源重气泄漏扩散的事故后果.

1 SLAB 模型理论和方法

1.1 SLAB 物理数学模型及计算方法

SLAB 模型是 1990 年在美国能源署的组织支持下由美国加州大学劳伦斯利弗莫尔国家实验室研发的,适用于计算重气扩散的浅层模型. 这一模型是在 1982 年 Zeman^[8]提出的重气云中存在空气卷吸及重力扩散概念的基础上进一步研究得到的,经历了 1983 年 Morgan 等^[9]的最早版本和 1985 年 Emark 等^[10]的稳态版本这两个阶段. 目前 SLAB 模型可以模拟计算 4 种泄漏源类型:地面蒸发池、高架

的水平喷射、高架的垂直喷射和瞬时泄漏.

1.1.1 连续泄漏稳态烟羽模型

SLAB 的稳态烟羽模型是基于稳态侧风向质量、动量、能量和组分平均守恒方程组建立的,并在模型中应用了空气卷吸的概念来计算重气云与周围大气的湍流混合作用. SLAB 稳态烟羽扩散的物理模型机制如图 1 所示.

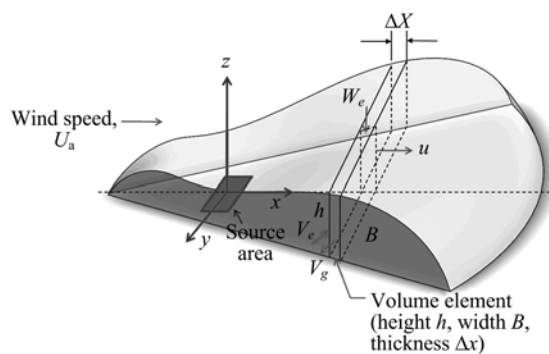


图 1 SLAB 稳态烟羽扩散模型示意图

Fig. 1 The schematic of SLAB steady state plume dispersion model

通过求解各守恒方程、气云尺度方程及气体状态方程,可以得到烟羽的三维体积浓度分布 $C(x, y, z)$.

$$C(x, y, z) = 2 \cdot B \cdot h \cdot C(x) \cdot C_1(y, b, \beta) \cdot C_2(z, Z_e, \sigma) \quad (1)$$

其中,

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{y+b}{\sqrt{2} \cdot \beta} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{y-b}{\sqrt{2} \cdot \beta} \right\} \right] \quad (2)$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2 \quad (3)$$

$$C_2(z, Z_e, \sigma) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \left[\exp \left\{ -\frac{(z-Z_e)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z+Z_e)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right\} \right] \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} h^2/12, & Z_e > h/2 \\ (h-Z_e)^2/3, & Z_e \leq h/2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, B/m 和 h/m 为气云半宽和高度; b/m 为气云半宽参数; Z_e/m 为气云高度参数; erf 为误差函数; \exp 为指数函数; $C_1(y, b, \beta)/10^{-6}$ 为水平侧风向浓度轮廓函数; $C_2(z, Z_e, \sigma)/10^{-6}$ 为垂直浓度轮廓函数(下文单位同).

1.1.2 瞬时泄漏烟团模型

SLAB 的瞬时烟团模型也是基于质量、动量、能量和组分的空间平均守恒方程组建立的,烟团模型的物理模型机制如图 2 所示. 气云以烟团形式进行

处理,此时的独立变量为烟团质量中心在下风向的移动时间 t . 守恒方程组中同时也包含了求解烟团质量中心在下风向位置 X_c 、烟团长度参数 B_x 和 b_x 、烟团宽度参数 B_y 和 b_y 的方程组.

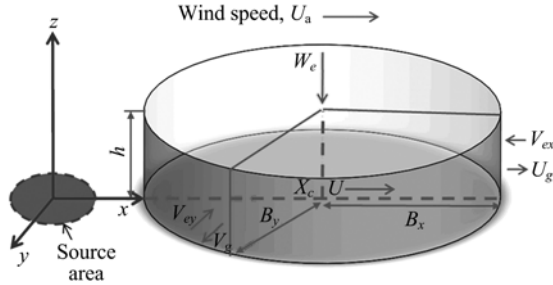


图 2 SLAB 瞬时烟团扩散模型示意图

Fig. 2 The schematic of SLAB instantaneous puff dispersion model

推导得到的烟团的三维、瞬时体积浓度值 $C(x, y, z, t)$ 可以表示为

$$C(x, y, z, t) = 4 \cdot B_x \cdot B_y \cdot h \cdot C(t) \cdot$$

$$C_1(x - X_c, b_x, \beta_x) \cdot C_1(y, b_y, \beta_y) \cdot C_2(z, Z_c, \sigma)$$

(6)

式中,侧风向浓度 $C_1(y, b_y, \beta_y)$ 和垂直方向浓度 $C_2(z, Z_c, \sigma)$ 的轮廓函数同样可由式(2)~(5)给出,此时 b_y, β_y, Z_c 和 σ 为 t 的函数而非 x 的函数. 式(6)中另一个增加的下风向上烟团浓度分布的轮廓函数 $C_1(x - X_c, b_x, \beta_x)$, 与侧风向轮廓函数 $C_1(y, b_y, \beta_y)$ 具有相同的形式,只是以 $x - X_c(t), b_x(t)$ 和 $\beta_x(t)$ 分别代替原函数形式中的 $y, b_y(t)$ 和 $\beta_y(t)$.

1. 1. 3 SLAB 模型计算方法

SLAB 模型的计算方法如图 3 所示. 通过求解烟羽或烟团重气扩散模型的时均守恒方程组,可以计算出空间平均的气云特性,如质量浓度、体积浓度、密度、温度、下风向速度、气云尺寸等. 在烟羽模型的守恒方程组中做了稳态假设($\partial/\partial t=0$)并在侧风向上对方程进行了平均,而烟团模型的守恒方程组则是在三个空间方向上都进行了平均. 然后计算在气云变化作用下的气云有效宽度,并在浓度轮廓函数中使用这一有效宽度计算出时均浓度随时间的变化,最终 SLAB 模型计算所得到的浓度为时间、空间上的时均浓度值.

2 SLAB 模型的有效性验证

国外对重气泄漏的研究进行了大规模的现场试验,包括连续泄漏和瞬时泄漏,涉及众多的危险有害

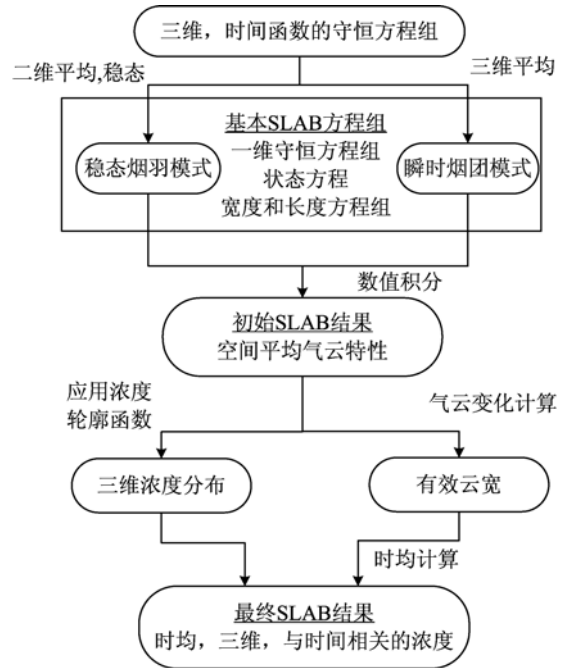


图 3 SLAB 模型计算方法

Fig. 3 The computational method of SLAB model

物质,如 LNG, LPG, SO_2 , N_2O_4 , Freon 等. 由英国健康安全局(HSE)开展的著名的 Thorney Island 试验^[11],进行了多种不同条件下的重气泄漏扩散试验,试验规模大且数据较为完备,被人们广泛选取作为重气扩散模型有效性验证的对比试验.

本文即选取 Thorney Island Phase1 的试验数据与 SLAB 模型模拟预测得到的结果进行对比验证. 在 Thorney Island Phase1 试验中,泄漏物质均为 Freon 和 N_2 的气体混合物,通过改变 N_2 在混合物中的比例来配比得到不同密度的混合物. 容器为 1 个 $2\ 000\ m^3$ 体积的储罐,在开展连续泄漏试验时,气体通过管道以一定的控制速率释放到达地面,垂直方向上的动量为 0;而在开展瞬时泄漏时,则装载着不同泄漏量的混合气体容器边缘瞬间发生破裂. 分别选取连续泄漏试验 Trial 047 和瞬时泄漏试验 Trial 019 作为对比,试验条件如表 1 所列.

表 1 Thorney Island Phase1 试验条件

Tab. 1 The test condition of Thorney Island Phase1

泄漏类型	试验序号	风速 ^a /($m \cdot s^{-1}$)	稳定度 分级 ^b	泄漏体积 / m^3	初始相对密度
连续泄漏	047	1.5	F	2000	2.05
瞬时泄漏	019	6.4	D/E	2100	2.12

【注】 a 风速对应为 10 m 高度处的风速值;b 稳定度等级遵循 PGT 分类准则.

通过 SLAB 模型对上述两个试验进行模拟计算. 由于 Thorney Island 试验中采用的是 Freon 和 N_2 的气体混合物来配比实现不同密度的重气, 这样即无法通过选用任何一种气体得到与试验完全一致的情况. 因此在使用 SLAB 模型进行模拟计算时, 以 Freon 的基本性质作为输入参数, 但改变它的分子量以便与试验中混合气体的密度相对应, 温度根据试验环境温度设置为等温条件, 其他参数设置同试验实际情况. SLAB 模拟预测得到的下风向地面浓度与试验观测浓度对比如图 4 和图 5 所示.

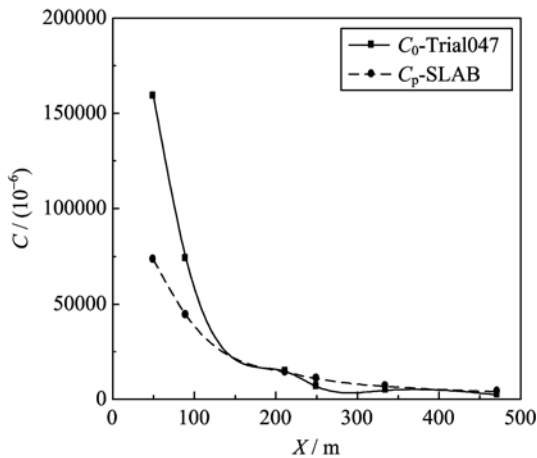


图 4 重气连续泄漏 SLAB 模型预测浓度与试验观测浓度值对比

Fig. 4 Comparison of concentration predictions and observations for continuous leakage

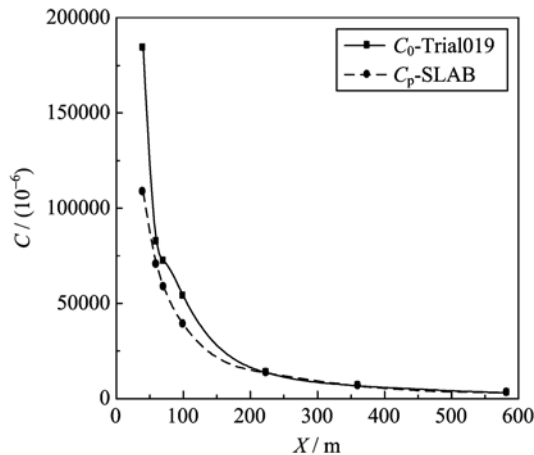


图 5 重气瞬时泄漏 SLAB 模型预测浓度与试验观测浓度值对比

Fig. 5 Comparison of concentration predictions and observations for instantaneous leakage

图中, C_0 为试验观测得到的浓度值, C_p 为 SLAB 模型模拟预测得到的浓度值. 从图 4 和图 5

中可以观察到, SLAB 模型的预测值与试验观测值基本吻合得较好, 且随着下风向距离的增大, 这一吻合程度逐渐增加, 两者的浓度值近乎完全一致. 同时还可以发现, SLAB 模型的预测值较试验观测到的浓度值小, 也就是说 SLAB 模型低估了气体扩散的后果, 在实际应用中宜乘以一个安全系数.

通过 SLAB 模型与试验的对比, 有效地验证了 SLAB 模型的准确性和可靠性. 此外, 统计学提供了一个评估模型性能的直观的科学的方法^[12-14]. 对比的标准有分数偏差 FB、几何平均偏差 MG、归一化均方误差 NMSE、几何变异量 VG、一个 2 因子分数 FAC2, 这些统计对比标准定义如下:

$$FB = \frac{(\overline{C_0} - \overline{C_p})}{0.5(\overline{C_0} + \overline{C_p})} \quad (7)$$

$$MG = \exp(\ln \overline{C_0} - \ln \overline{C_p}) \quad (8)$$

$$NMSE = \frac{(\overline{C_0} - \overline{C_p})^2}{\overline{C_0} \overline{C_p}} \quad (9)$$

$$VG = \exp[\overline{(\ln C_0 - \ln C_p)^2}] \quad (10)$$

$$FAC2: 0.5 \leq \frac{C_p}{C_0} \leq 2.0 \quad (11)$$

其中 2 因子分数 FAC2 指的是浓度预测值和观测值的偏差为 2 倍内, 即预测值的范围为观测值的 50%~200% 之间. 只有在浓度预测值和观测值偏差不大, 即 2 因子范围内时, FB 和 NMSE 的值才是最合乎情理的. 而当浓度预测值与观测值差别较大时, MG 和 VG 的对比更为合适. 一个完美的模型, 具有如下理想化的性能: $MG = VG = FAC2 = 1$, $FB = NMSE = 0$. 而在扩散模型中, 当评估模型与试验观测值对比得到的上述统计参量在一个可接受的值范围内时, 则认为这一模型是可以接受的^[13].

在图 4 和图 5 中, 观察到泄漏源近场范围内 SLAB 模型的预测值与试验值有所出入. 经过调查研究发现, 其他模型包括 SLAB 模型在泄漏源近场范围内的预测都出现这一情况, 这一范围内的比较可能是失真的, 容易让人误入歧途^[5]. 这是因为, 在地表上浅层气云中的峰值浓度由于非常贴近地表, 可能无法被布置在地面桅杆上的浓度传感器充分地探测到, 这样采样解析度不充分就可能带来偏差. 此时再将模型模拟得到的浓度值与这些观测值对比, 可能会得出不适当的结论. 因此, 本文中将这些可能会导致误差的试验值排除在外, 对下风向大于 200 m 之外的所有试验观测值和模型预测值进行统计参量的对比分析, 结果如表 2 所列.

表 2 SLAB 模型预测结果偏差分析
Tab. 2 The bias analysis of prediction results from SLAB model

泄漏类型	统计参量				
	FB	NMSE	MG	VG	FAC2
连续泄漏	-0.229	0.099	0.719	1.170	1.422
瞬时泄漏	0.006	0.0016	1.000	1.000	1.000

根据表 2 的统计分析结果可知,SLAB 模型模拟连续泄漏与瞬时泄漏得到的预测值都较为准确。FB 与 NMSE 值都很接近 0, MG, VG 和 FAC2 值接近于 1, 尤其是瞬时泄漏时, 这三者的值都已经等于 1. 这一统计分析结果表明, SLAB 模型是一个性能优异的重气扩散模型. 因此, 应用 SLAB 模型对重气扩散进行模拟是可行且值得推广的.

3 重气泄漏扩散的模拟研究

3.1 单源重气泄漏扩散的模拟研究

以事故性泄漏中发生频率和危害严重程度都极大的有毒氯气作为重气的典型代表进行模拟计算. 氯气的理化性质参数参见表 3. 分别计算了一个单源连续泄漏和瞬时泄漏的算例. 在连续泄漏中, 泄漏速率为 2.0 kg/s, 环境风速为 5.5 m/s, 大气稳定度根据 Pasquill 定律为 C 级(轻微不稳定), 环境温度为 20 °C, 空气相对湿度为 60%, 地面粗糙度为 0.05 m. 在瞬时泄漏中, 泄漏总质量为 1 000.0 kg, 环境风速为 4.0 m/s, 其余参数同上.

表 3 氯气理化性质^[15]

Tab. 3 Physicochemical property of chlorine^[15]

参数	氯气(Cl ₂)
分子摩尔质量/(kg · mol ⁻¹)	0.070 906
常压比热容/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	498.10
沸点温度/K	239.10
蒸发热/(J · kg ⁻¹)	287 840.00
液体比热容/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	926.30
液态密度/(kg · m ⁻³)	1 574.00
饱和度压强常数 1	1 978.34
饱和度压强常数 2	-27.01

应用 SLAB 模型计算单源连续泄漏和瞬时泄漏下风向浓度的时均分布情况, 与氯气的毒性标准相结合就可以得到事故后果的影响范围. 本文所采用的氯气毒性标准为美国 ERPG 的规定: 对人体造成轻度、中度、重度伤害的阈值分别对应为 ERPG-1 (3 mg/m³), ERPG-2 (9 mg/m³), ERPG-3 (58 mg/m³);

此外, 本文中根据氯气对人体的影响另外设定了一个阈值为 300 mg/m³, 在这一浓度下人们将遭受致命性的损害或死亡. 这样就可以将氯气的影响区域范围划分为轻危区、中危区、重危区和致死区.

在单源连续泄漏和瞬时泄漏计算示例中, 下风向地面上 (Z=0) 的时均浓度等值线分布如图 6 和图 7 所示. 从内到外的危害程度依次递减, 根据图可以确定不同毒性水平下的下风向、侧风向最大影响距离及区域面积, 从而可以为应急救援和疏散决策制定提供有力的理论指导.

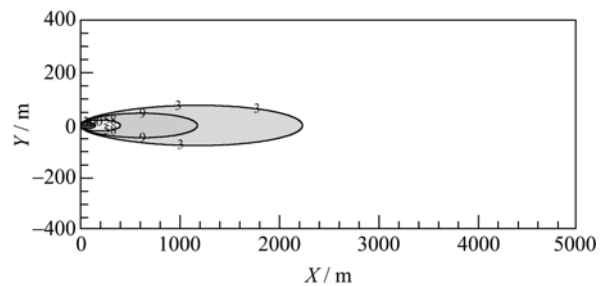


图 6 单源连续泄漏下风向地面上时均浓度分布

Fig. 6 The downwind time-averaged concentration distribution on the ground for single continuous leakage

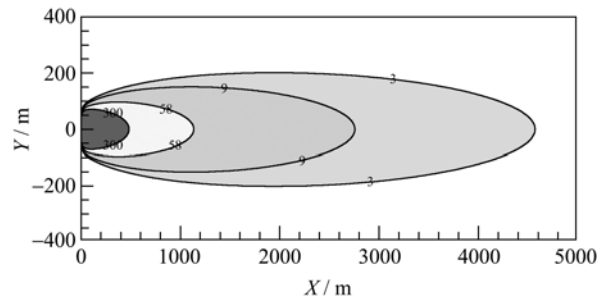


图 7 单源瞬时泄漏下风向地面上时均浓度分布

Fig. 7 The downwind time-averaged concentration distribution on the ground for single instantaneous leakage

3.2 多源重气泄漏扩散的模拟研究

当有多个重气源发生泄漏时, 下风向区域的时均浓度分布情况将是多个重气泄漏源共同作用的结果. 而 SLAB 模型只能模拟计算单个重气泄漏源的扩散, 本文即在 SLAB 模型的基础上发展了多源重气泄漏扩散模型.

如图 8 所示, 以下风向为 X 轴正方向, 侧风向为 Y 轴, 建立全局坐标系, 确立全局坐标系中各个重气泄漏源的坐标位置. 分别对各个重气泄漏源的扩散进行模拟计算, 求出各自的时均浓度分布情况, 对下风向的影响范围, 以及在全局坐标中的影响范

围. 对比各泄漏源的影响范围确定全局坐标中的最大范围, 对计算域内的网格重新进行划分. 应用 Lagrange 插值方法分别将各个重气泄漏源的时均浓度分布情况插值到重新定义的全局坐标系中. 最后在全局坐标系中对各重气泄漏源的时均浓度进行叠加计算, 求得最终在多个重气泄漏源共同作用下的空间时均浓度分布情况.

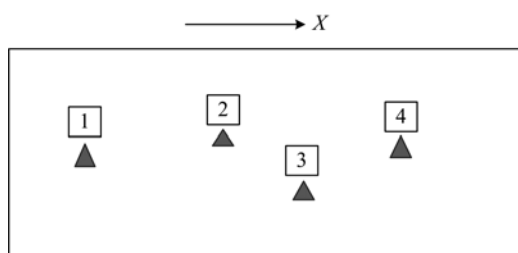


图 8 多源重气泄漏示意图

Fig. 8 The schematic of dense gas leakage from multi-source

应用 SLAB 模型发展的多源重气泄漏扩散模型, 可以根据需要设定各个重气泄漏源的参数及全局坐标系中的相应位置, 但通常认为各个泄漏源的气象环境参数是相同的. 下面分别给出一个连续泄漏和瞬时泄漏的多源重气扩散的模拟计算示例.

连续泄漏中, 假设有 7 个泄漏源, 在全局坐标系中的位置分别为 $(0, 0)$, $(200, -50)$, $(200, 100)$, $(500, -150)$, $(500, 50)$, $(800, 150)$ 和 $(1000, -100)$ (单位均为 m, 下同). 各泄漏源的泄漏速率为 2.0 kg/s , 环境风速为 2.5 m/s , 大气稳定度为 F (极稳定), 环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 空气相对湿度为 60% , 地形粗糙度为 0.05 m . 应用多源重气扩散模型计算得到的下风向时均浓度分布情况如图 9 所示. 瞬时泄漏中, 假设有 4 个泄漏源, 在全局坐标系中的位置分别

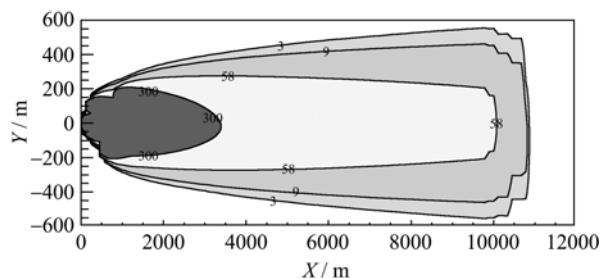


图 9 多源连续泄漏下风向地面上时均浓度分布

Fig. 9 The downwind time-averaged concentration distribution on the ground for continuous leakage from multi-source

为 $(250, 100)$, $(0, -100)$, $(1000, 150)$ 和 $(500, -150)$. 各泄漏源瞬时泄漏总质量为 $1\ 000.0 \text{ kg}$, 大气稳定度为 D (中性), 其他参数同上. 模拟计算得到的多源瞬时泄漏下风向时均浓度分布情况如图 10 所示.

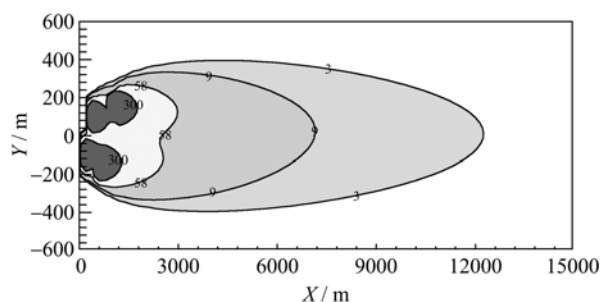


图 10 多源瞬时泄漏下风向地面上时均浓度分布

Fig. 10 The downwind time-averaged concentration distribution on the ground for instantaneous leakage from multi-source

因此, 发展了多源重气扩散模型后, 就可以快速有效地对各种原因所致的多源重气泄漏事故进行模拟计算, 预测得到在多个重气源共同作用下的下风向时均浓度分布情况, 及各不同毒性水平区域的事故后果影响范围.

4 结论

通过将 SLAB 模型模拟预测结果与 Thorney Island 现场试验观测结果进行对比, 研究表明两者基本吻合, SLAB 模型是一个准确的、可靠的、性能优异的模型. 但 SLAB 模型模拟预测得到的结果偏低, 低估了重气泄漏扩散的事故后果, 在实际应用中宜乘以一个安全系数.

同时, 本文在 SLAB 模型的基础上发展了多源重气扩散模型, 对单源和多源重气在连续泄漏和瞬时泄漏两种泄漏模式下的扩散都进行了模拟研究, 以氯气为例给出了模拟计算示例. 计算得到了相应条件下下风向的时均浓度分布情况, 结合毒性标准给出了不同毒性水平下的事故后果影响范围, 从而可以为应急救援和疏散决策制定提供理论指导.

参考文献 (References)

- [1] 石祥. 大量有毒重气泄漏扩散事故危害评价浅析[C]// 第十届中国科协年会论文集(一). 北京: 中国科学技术协会学会学术部, 2008.

- [2] Zhu Hongping, Luo Aimin, Li Runqiu. Research on the consequence assessment system of heavy gas leakage accidents [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(5):119-124.
朱红萍, 罗艾民, 李润求. 重气泄漏扩散事故后果评估系统研究 [J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(5): 119-124.
- [3] Ermak D L, Chapman R, Goldwire H C, et al. Heavy Gas Dispersion Test Summary Report[R]. 1989.
- [4] Duijm N J, Carissimo B, Mercer A, et al. Development and test of an evaluation protocol for heavy gas dispersion models[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 56(3): 273-285.
- [5] Hanna S R, Strimaitis D G, Chang J C. Hazard Response Modeling Uncertainty (A Quantitative Method). Volume 2. Evaluation of Commonly Used Hazardous Gas Dispersion Models[R]. 1993.
- [6] Havens J A, Spicer T O. Development of an atmospheric dispersion model for heavier-than-air-gas mixtures, volume 1[R]. 1985.
- [7] Mohan M, Panwar T S, Singh M P. Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(16): 2 075-2 087.
- [8] Zeman O. The dynamics and modeling of heavier-than-air, cold gas releases[J]. Atmospheric Environment, 1982, 16(4): 741-751.
- [9] Morgan D L, Jr, Morris L K, Ermak D L. SLAB: A Time-Dependent Computer Model for the Dispersion of Heavy Gases Released in the Atmosphere [R]. 1983.
- [10] Ermak D L, Chan S T. A study of heavy gas effects on the atmospheric dispersion of dense gases [M]//Air Pollution Modeling and Its Application V. Springer US, 1986: 723-742.
- [11] McQuaid J. Heavy gas dispersion trials at Thorney Island[C]//Proceedings of A Symposium Held at the University of Sheffield. Great Britain: Elsevier Publishing Company, 1985.
- [12] Hanna S R, Chang J C, Strimaitis D G. Hazardous gas model evaluation with field observations [J]. Atmospheric Environment Part A- General Topics, 1993, 27(15): 2 265-2 285.
- [13] Chang J C, Hanna S R. Air quality model performance evaluation[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2004, 87: 167-196.
- [14] Demael E, Carissimo B. Comparative evaluation of an Eulerian CFD and Gaussian plume models based on prairie grass dispersion experiment [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(3): 888-900.
- [15] Ermak D L. User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases [R]. Lawrence Livermore Laboratory, 1990.