

# 基于一种改进的高斯模型研究 危险气体短时泄漏后扩散规律

江鸿宾<sup>1</sup>, 邓顺熙<sup>1</sup>, 郭庆妮<sup>1</sup>, 王 龙<sup>2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院 陕西 西安 710064; 2. 兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 有害气体短时间泄漏在生产生活中比较常见。安全阀、限压阀, 或储气罐、输气管道的突然泄漏都可能导致有害物质短时间释放。然而, 目前主流的分别适用于瞬时排放和连续排放的高斯烟团模型和高斯烟羽扩散模型, 由于没有考虑实际的泄漏时间、开始泄漏时刻以及暴露时间这些必要参数, 而并不适用以上这些情况。基于一种改进的高斯扩散模型, 以甲烷为例, 动态模拟了大气稳定性和泄漏时间对地面甲烷浓度的影响。旨在为天然气管线风险评估提供参考资料, 预测危险气体可能造成的后果(影响的范围和程度), 并给决策部门针对突发事件提供技术支持和理论依据。

关键词: 改进; 高斯扩散模型; 短时间排放

中图分类号: X511

在天然气、液化石油气等石油化工行业中, 由于操作失误或其他原因可能导致上述物质发生短时间泄漏, 并对周围居民和环境造成极大的危害<sup>[1]</sup>。日常生活中, 由此类易燃易爆物质泄漏造成惨重损失的案例在国内外屡见不鲜<sup>[2]</sup>。因此, 为了避免此类事故的发生, 有必要进行相应的风险评估工作。

目前用于风险评估的模型有很多, 其中, 高斯烟团模型和烟羽模型由于简单高效和方法成熟而被广泛运用, 但高斯烟团模型和烟羽模型一般只适用于瞬时泄漏和连续泄漏的情形<sup>[3-4]</sup>, 而多数情况下, 泄漏源的泄漏时间一般介于瞬时和连续之间, 并非单纯的瞬时泄漏或连续泄漏<sup>[5]</sup>, 因此研究泄漏源发生短时间泄漏后污染气体的扩散规律来模拟实际泄漏源泄漏情况, 模拟结果将更真实可信。

基于高斯扩散模型的理论推导, 研究在不同泄漏时间和大气稳定度下, 发生短时泄漏后的污染气体扩散规律, 并进行实例分析, 模拟结果可为有关部门提供技术支持和理论依据。

## 1 模型理论依据及推导过程

高斯烟团的扩散公式为<sup>[6]</sup>:

$$dC = \frac{dM}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\left[\frac{(x - \bar{u}t)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]\right\} \left\{\exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向扩散标准差;  $\bar{u}$  为平均风速  $m/s$ ;  $dM$  为在  $dt$  内释放气体的总质量  $g$ ;  $H$

为有效源高(排放高度与抬升高度之和);  $m$ ;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为空间点各方向的坐标  $m$ ; 其中  $\bar{u}t$  为气体在时间  $t$  内的向下游传输的距离, 标准差  $\sigma$  是关于  $\bar{u}t$  的函数。

假定短时排放源释放的烟片是由无数个首尾相接的小烟团叠加后的结果, 则一段时间内泄漏源释放气体的质量为:

$$dM = q(t) dt \quad (0 \leq t \leq t_r) \quad (2)$$

式中:  $t$  为任一烟团释放的时间  $s$ ;  $t_r$  为烟团释放的总时间  $s$ ;  $q(t)$  为其释放率  $g/s$ 。

将(2)式代入(1)式并积分可得某一时刻, 污染物在扩散空间一点的浓度为:

$$C = \int_0^{t_r} \frac{q(t)}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\left[\frac{[x - \bar{u}(t-t)]^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]\right\} \left\{\exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} dt \quad (3)$$

假定  $q(t)$  为常数  $q$ ,  $\sigma_i$  只与  $\bar{u}t$  相关, 则(3)式可以转换为:

$$C = \frac{1}{2} \chi \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{2}\sigma_x}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{x - \bar{u}t}{\sqrt{2}\sigma_x}\right] \right\} \quad (t \leq t_r) \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{2} \chi \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{x - \bar{u}(t-t_r)}{\sqrt{2}\sigma_x}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{x - \bar{u}t}{\sqrt{2}\sigma_x}\right] \right\} \quad (t > t_r) \quad (5)$$

$$\chi = \frac{q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (6)$$

其中:  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\eta^2) d\eta$

式中:  $\text{erf}(x)$  为误差函数;  $\chi$  为连续排放源浓度分布公式。

## 2 模型扩散标准差的计算

表1 用 Klug 方法计算大气扩散标准差时所需参数

系数	大气稳定度					
	A	B	C	D	E	F
$R_y$	0.469	0.306	0.230	0.219	0.237	0.273
$r_y$	0.903	0.885	0.855	0.764	0.691	0.594
$R_z$	0.017	0.072	0.076	0.140	0.217	0.262
$r_z$	1.380	1.021	0.879	0.727	0.610	0.500

注:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为 x、y、z 方向扩散标准差。且  $\sigma_y(x) = R_y x^y$ 、 $\sigma_x(x) = \sigma_y(x)$  和  $\sigma_z(x) = R_z x^z$ 。

## 3 算例及模拟结果

有学者研究表明: 在标况下, 甲烷最低爆炸体积百分比为 0.46, 最高爆炸体积百分比为 1.64, 则当环境温度为 25℃, 气压为 100kPa 时, 甲烷可发生爆炸的质量浓度上下限分别为  $117.59 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $32.98 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

以甲烷泄漏为例, 当甲烷发生短时泄漏后, 对于不同的大气稳定度和泄漏时间, 研究其地面浓度、爆炸阈值地面等值线和假设敏感点浓度随时间变化的规律。

### 3.1 大气稳定度对下风向浓度、爆炸区域的影响

假定甲烷泄漏率为 30000g/s、泄漏时间为 120s、泄漏地点周围平均风速为 2m/s、风向沿 x 轴正向, 甲烷泄漏后有效高度为 3m、对于大气稳定度分别为 A、D 和 F 时, 分别模拟 20s、120s、180s 和 240s 时下风向地面浓度、爆炸阈值地面等值线及地面轴向浓度图, 结果如图 1 所示。

由图 1(a) 可以看出: 同一时刻, 大气稳定度从 A 到 F 稳定度逐渐增加, 垂直方向湍流运动逐渐减弱, 地面甲烷浓度逐渐上升。

在图 1(b) 中, 内圈等值线值为甲烷爆炸上限等值线 (UEL), 外圈等值线值为爆炸下限等值线 (LEL), LEL 之外的区域, 因甲烷浓度太低而不能发生爆炸; UEL 之内的区域, 则因甲烷浓度太高而不能发生爆炸。两条等值线之间的区域则是爆炸可能发生区域, 可以看出: 大气越稳定, 下风向可能发生爆炸的区域越大, 可能发生爆炸的时间越长。

在图 1(c) 中, 20s 时, F 稳定度条件下 x 轴甲烷浓度小于 D 稳定度时甲烷浓度, 这是由于甲烷烟团释放有一定的有效高度 (3m), 相对于 D 稳定度, F 稳定度大气湍流幅度较小, 在 20s 时, 只有较少烟团

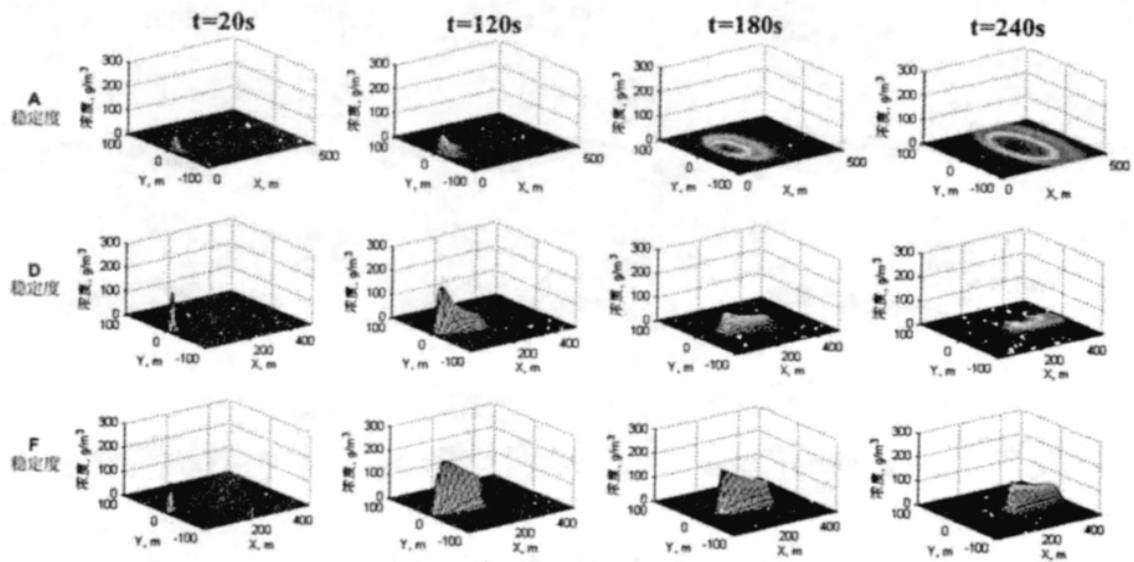
使用 Klug (1969)<sup>[7]</sup> 的方法计算扩散标准差  $\delta$ 。计算参数和计算方法 (见表 1)。其中, A、B、C、D、E 和 F 分别代表大气稳定度为极不稳定、中等程度不稳定、弱不稳定、中性条件、弱稳定和中等程度稳定。

垂直扩散到地面, 因此浓度较低; 120s 时, A 稳定度条件下的地面浓度总体要比低于 D 大气稳定度下的地面浓度, 这是因为 A 稳定度下, 甲烷扩散速度较快, 地面浓度迅速降低。可以看出, 大气稳定度越高, X 轴浓度峰值右侧的甲烷浓度曲线越陡峭。这说明泄漏事故发生地点气象条件越稳定, 事故下风向区域甲烷浓度升高的越突然, 迅速成为爆炸高危险区域的可能性越高。

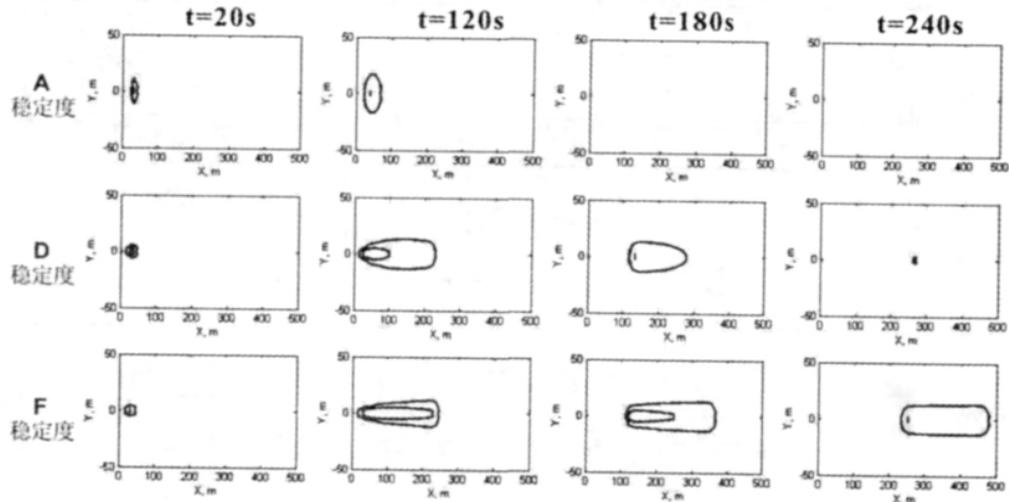
### 3.2 泄漏时间对污染气体地面浓度的影响

假定甲烷泄漏率为 30000g/s、泄漏地点周围平均风速为 2m/s、风向沿 x 轴正向, 甲烷泄漏后有效高度为 3m, 且大气稳定度为 D, 当泄露时间分别为 10、120 和 1200s 时, 模拟 20s、120s、180s 和 240s 时下风向地面浓度、爆炸阈值地面等值线及地面轴向浓度图, 结果如图 2 所示。

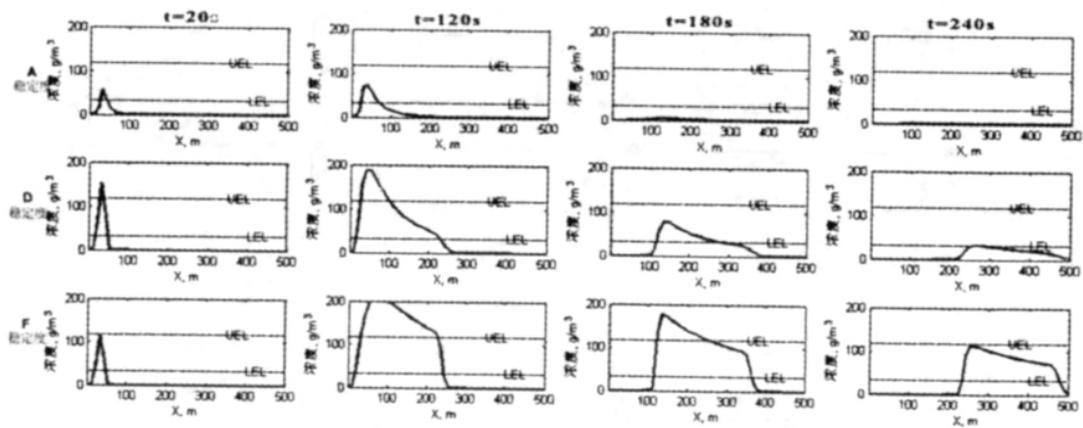
在图 2 中, 当甲烷泄漏时间仅为 10s 时, 地面浓度在 140s 后迅速降低为 0, 可能发生爆炸的区域迅速消失; 当泄漏时间为 120s 时, 20s 后泄漏源还在继续泄漏, 浓度因此会持续上升, 可能发生爆炸的区域面积会逐间增大。到 140s 时, 由于泄漏已经停止, 之前释放的烟团汇聚形成一个较大的烟片 (介于烟团和烟羽之间), 在风的作用下, 向下风向移动, 同时向四周扩散, 浓度逐渐降低, 可能发生爆炸的区域逐渐减小; 当泄漏时间为 1200s 时, 20、120 和 1200s 时泄漏源都还在继续泄漏, 因此下风向地面浓度和可能爆炸区域都还有继续升高和增大的空间。可以看出, 甲烷泄漏时间越短, 短时扩散模型越类似于烟团模型, 下风向地面浓度和可能发生爆炸的区域都会经历一个先增大后减小的过程; 泄漏时间越长, 短时扩散模型越类似于烟羽模型, 下风向地面浓度和可能发生爆炸的区域达到最大值后会基本保持不变。



(a) 甲烷短时泄漏后,不同稳定度下地面浓度分布

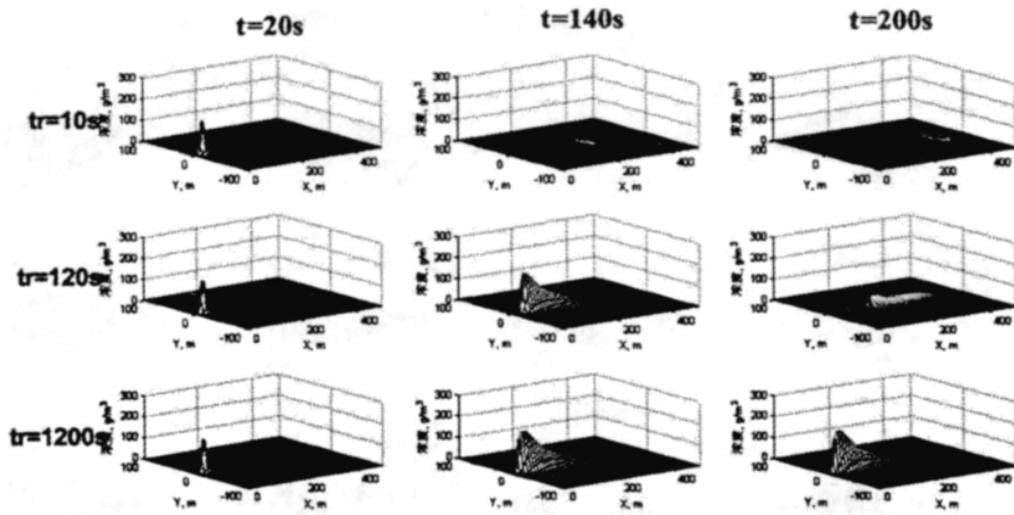


(b) 爆炸阈值地面等值线

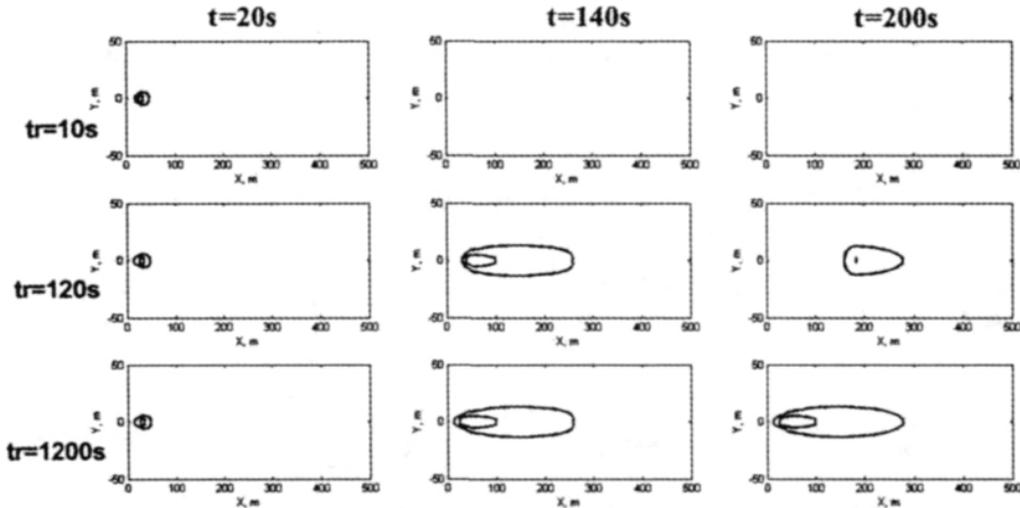


(c) 地面轴向浓度分布

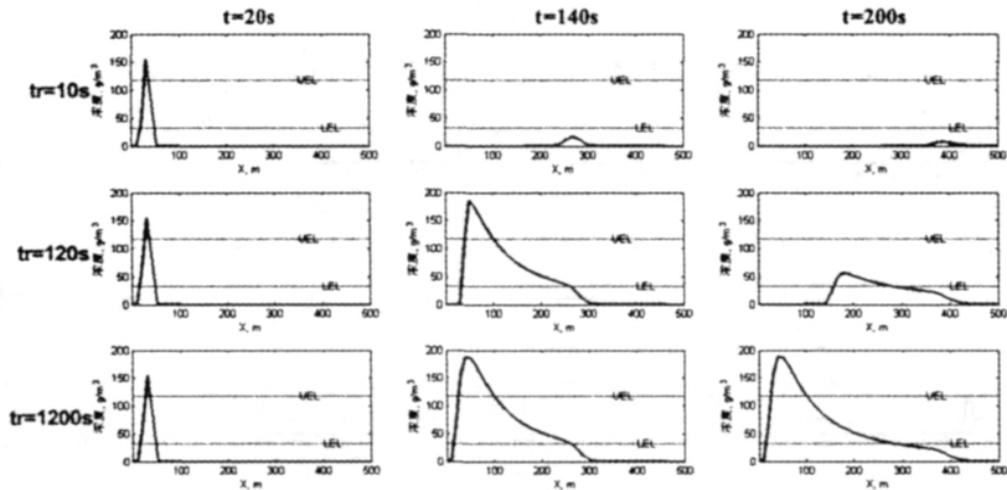
图 1 大气稳定度对下风向浓度及危险区域的影响



(a) 甲烷泄漏不同时间后地面浓度分布



(b) 爆炸阈值地面等值线



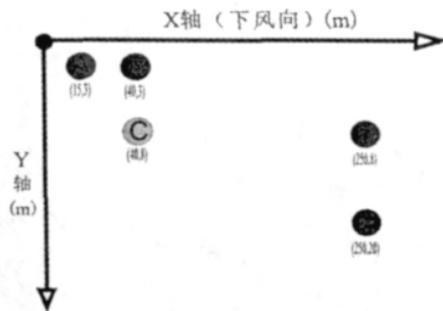
(c) 地面轴向浓度分布

图2 泄漏时间对污染气体地面浓度的影响

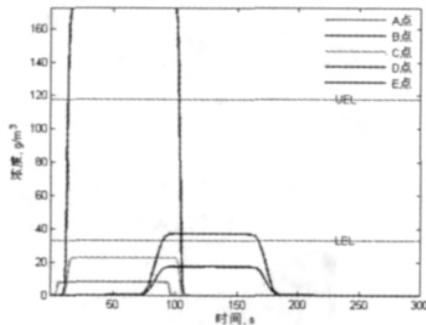
### 3.3 敏感点爆炸可能性及风险评估算例

泄漏事故发生后,对于敏感点我们重点关注其所经历的最大浓度和可能发生爆炸的时间范围,以便群众及时高效的撤离危险区域。

假设距泄漏源下风向有 A、B、C、D 和 E 5 个敏感点,与泄漏源的位置关系见图 3(a)。假定条件如下:甲烷泄漏率为 50000g/s、泄漏地点周围平均风速为 3m/s、风向沿 x 轴正向、甲烷泄漏后有效高度为 3m、泄漏时间为 90s,且大气稳定度为 D,计算结果如图 3(b) 所示。



(a) A、B、C、D 和 E 点位置分布



(b) 各点甲烷浓度随时间变化

图 3 泄漏源的位置关系及计算结果

从图 3(b) 可以看出: A、C 和 E 敏感点的甲烷浓度最大值小于甲烷爆炸下限(LEL),因此不会发生爆炸。B 点在 12s 附近甲烷浓度迅速增加,超出了甲烷爆炸浓度上限值,在 110s 时浓度瞬时降低到  $0\text{g}/\text{m}^3$ ,因此几乎不可能发生爆炸。D 点有可能发生爆炸,可能发生爆炸的时间段为泄漏发生后 97s 到 180s 之间。

A 点距离泄漏源虽然很近,但是地面浓度却很低,这是因为泄漏源泄漏的甲烷经过抬升后有效高度为 3m,释放的烟团落不到 A 点,因此泄漏源到 A 点之间的区域可称为“爆炸盲区”,不会有发生爆炸的危险;B 点平行于 A 点,但距泄漏源较远,泄漏源释放的烟团在此陆续降落到地面,因此甲烷浓度较大;C 点和 B 点平行于 Y 轴,C 点相对 B 点离 X 轴

的距离只增加了 5m,但甲烷地面浓度却远低于 B 点(低于爆炸下限)。由此看出,风对甲烷地面浓度的迁移变化作用远远大于甲烷自由扩散。

## 4 结论

大气稳定度对下风向甲烷地面浓度的影响为:大气越稳定,甲烷越不易扩散,地面浓度聚集的越高,可能发生爆炸的区域越大,可能发生爆炸的时间越长,事故下风向区域甲烷浓度升高的越突然,迅速成为爆炸高危险区域的可能性越高。

泄漏时间对下风向甲烷地面浓度的影响为:甲烷泄漏时间越短,短时扩散模型越类似于烟团模型,下风向地面浓度和可能发生爆炸的区域都将经历一个先增大后减小的过程;泄漏时间越长,短时扩散模型越类似于烟羽模型,下风向地面浓度和可能发生爆炸的区域达到最大值后会基本保持不变。

假设敏感点爆炸可能性分析结果:A、C 和 E 敏感点发生爆炸的可能性最小,B 点次之,D 点最大,D 点可能发生爆炸的区间段为泄漏发生后 97s 到 180s。

### 参考文献:

- [1] 张子波,李自力,李毅,等.用修正的高斯模型计算天然气稳态扩散[J].石油天然气学报,2010,32(2):369-371.
- [2] 丁信伟,王淑兰,徐国庆.可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述[J].化学工业与工程,1999,16(2):118-122.
- [3] 郑杨炜,谢殿荣,何衍兴,等.基于 MA TLAB 的液氨泄漏环境风险分析[J].安全与环境工程,2010,17(1):41-50.
- [4] 李世威,王建强,曾俊伟.一种改进的放射性气体扩散高斯预估模型算法[J].计算机应用研究,2012,29(1):123-126.
- [5] HE Ning, WU Zongzhi, ZHENG Wei. Simulation of an Improved Gaussian Model for Hazard Gas Diffusion [J]. JOURNAL OF BASIC SCIENCE AND ENGINEERING, 2010, 18(4): 571-579.
- [6] E. PALAZZI, M. DE FAVERI, G. FUMAROLA and G. FERRAILOLO. DIFFUSION FROM A STEADY SOURCE OF SHORT DURATION [J]. Atmospheric environment, 1982, 16(12): 2785-2790.
- [7] Klug W. A method for determining diffusion conditons from synoptic observations [J]. Staub Reinhalt Luft, 1969, 29: 14-20.