

# 油气化工码头道路上 LPG 罐车 泄漏扩散数值模拟分析

张志斌, 叶继红

(浙江海洋大学, 浙江 舟山 316000)

**摘要:** 本文以油气化工码头内道路为背景, 研究 LPG 运输罐车发生泄漏时 LPG 云团扩散传输机理和演变规律。利用 FLUENT 软件模拟计算在不同泄漏速度、风速工况下 LPG 泄漏扩散过程。研究表明: 泄漏速度增大, 云团扩散的范围越广, 扩散距离越远, 云团浓度越小。风速越大, 气体扩散速度越快, 云团扩散的距离增大当速度大于 5m/s 时, 扩散距离基本不再增加, 云团浓度逐渐降低。

**关键词:** 油气化工码头; LPG 罐车; 泄漏扩散

中图分类号: TE88 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2023) 01—0038—03

LPG 作为清洁能源, 热值高, 且不产生污染物和烟尘, 被广泛应用。LPG 通过油轮运至油气化工码头, 由 LPG 罐车进行转运。LPG 罐车罐体内压较大, 泄漏时 LPG 立即气化并快速扩散。由于 LPG 本身具有易燃、易爆以及有毒等特性, 在运输过程中不慎泄漏, 极易发生火灾爆炸事故, 造成人员伤亡和财产损失。如 2020 年 6·13 温岭 LPG 罐车爆炸事故, 致使 20 人死亡, 175 人送医, 损失高达 9500 万元。

针对 LPG 罐车发生泄漏导致事故的机理、类型、严重程度等方面已有学者进行研究。缪灿亮等<sup>[1]</sup>利用 PHAST 软件来模拟 LPG 储罐泄漏后的事故后果。根据事故后果划分人员死亡、重伤、轻伤半径。俞志东<sup>[2]</sup>运用 PHAST 软件对 LPG 储罐泄漏进行模拟研究, 探讨不同泄漏孔径、季节等对泄漏范围的影响, 并对事故可能造成的后果进行分析。

综上所述, 以油气化工码头内道路为背景, 利用 FLUENT 软件研究 LPG 罐车在公路运输过程中发生泄漏事故及可能导致的后果, 对后期预防和控制 LPG 罐车泄漏扩散及火灾爆炸事故的发生具有重要的理论价值和现实意义。

## 1 LPG 罐车泄漏模拟

### 1.1 模拟软件介绍

20 世纪 80 年代美国 FLUENT 公司开发出商用 CFD 分析软件 FLUENT, 时至今日 FLUENT 是普及最广的 CFD 软件<sup>[3]</sup>。FLUENT 可以模拟二维、二维轴向和三维流动, 计算和分析不同特性的流体流动, 如层流和湍流、可压缩和不可压缩流<sup>[4]</sup>。

### 1.2 LPG 罐车泄漏扩散计算模型

以浙江某油气化工码头道路为例, 根据现场调研, 对所需条件进行简化, 选取区域为长 200m 宽 135m 高 50m 的三维空间为计算域, 其中高速路为双向六车道, 中间由 1.5m 的绿化带隔开, 道路两旁有高宽 0.8m × 0.2m 的护栏。路右侧 50m 位置有长宽为 12m × 8m × 15m 的集装箱堆, 间隔 7m。本文将 LPG 罐车简化成距地面 0.6m 的直径 2.5m 长 13m 的圆柱体储罐 (泄漏口于罐尾距地面 1.65m 直径为 0.05m 的圆孔), 将大货车、小轿车同理进行简化。

利用 ICFM CFD 软件对模型进行非均匀 (四面体) 网格划分, 对泄漏口位置进行网格加密。如图 1 所示。

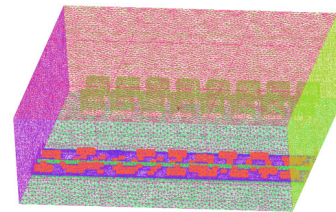


图 1 模型网格划分

计规范: JTS166-2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

[2] 中国机械工业联合会. 供配电系统设计规范: GB50052-2009. 北京: 中国计划出版社, 2010.

[3] 王焯. 智能配电柜在低压配网中的应用 [J]. 电子技术与软件工程. 2017(16).

[4] 黄祖栋. 智能配电监控系统设计 [D]. 广西大学, 2018.

### 1.3 LPG 罐车泄漏控制方程

本文研究 LPG 在给定的条件下的扩散过程。在整个泄漏扩散过程中遵从连续性、能量、动量三大守恒方程，基本控制方程可表示如下<sup>[5]</sup>：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi$$

式中： $\frac{\partial(\phi)}{\partial t}$ 为方程中的瞬时项、 $\frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i}$ 为对流项、 $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)$ 为扩散项、 $S_\phi$ 为源项。 $t$ 为时间,s;  $\rho$ 为气体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $\phi$ 为通量;  $u_i$ 为速度分量,m/s;  $\Gamma$ 为广义扩散系数。

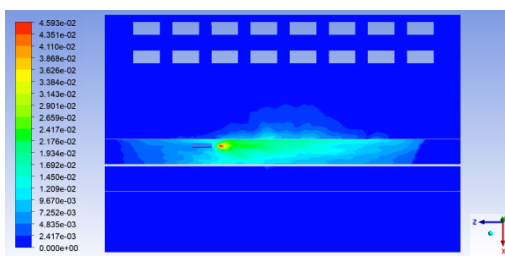
### 1.4 初始条件设定

初始状态下,区域内无LPG。泄漏速度设定为20m/s、30m/s、50m/s; 风沿下风向(-Z方向),速度为0 m/s、3 m/s、5m/s、10 m/s; 环境温度为10℃、20℃、30℃、40℃。LPG 泄漏时属于湍流状态,选用 Realizable k-ε 模型。采用 SIMPLE 计算方法进行模拟计算,步长设为1s,每秒迭代20次,计算10分钟内LPG罐车发生泄漏扩散的过程。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 泄漏速度对 LPG 罐车泄漏扩散影响

图2为不同泄漏速度(20m/s、30 m/s、50m/s)下ZX平面(地面)LPG浓度云图。通过图2从图中看到,LPG从罐车罐体泄漏,随着扩散时间的向前推进,LPG云团沿地面往下风向运动,云团影响的区域在增大,浓度降低。



(c)V=50m/s

图2 ZX平面(地面)LPG云团浓度分布图

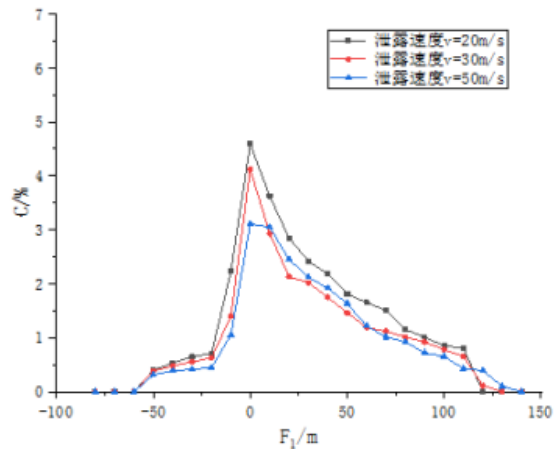
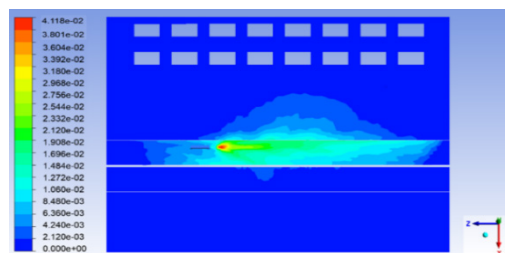


图3 不同泄漏速度下地面沿Z轴上LPG气云浓度变化曲线

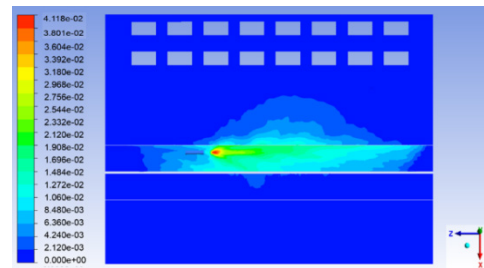
图3为不同泄漏速度条件下,地面沿Z轴上LPG云团的浓度变化曲线。可以看出,泄漏速度为20m/s时最大,约为4.6%,扩散距离约为118m;泄漏速度为50m/s时最小,约为3.1%,扩散距离大于130m。可见,在初始动能和重力作用下,泄漏速度越大,云团最大浓度越小,Z轴方向上扩散的距离越大。

### 2.2 风速对 LPG 罐车泄漏扩散影响

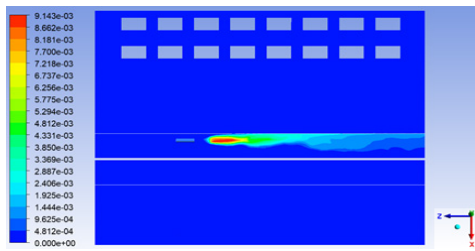
研究风速为0m/s、3 m/s、5 m/s、10 m/s时,以泄漏速度为30m/s,温度为30℃,风向为下风向(-Z方向)进行模拟仿真。图4为无风和有风状态下ZX平面(地面)LPG云团的浓度分布图。



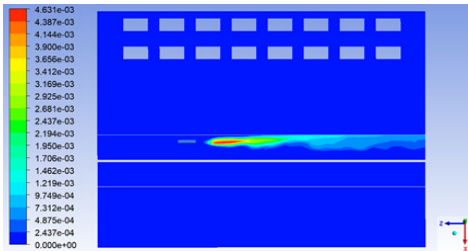
(b)V=30m/s



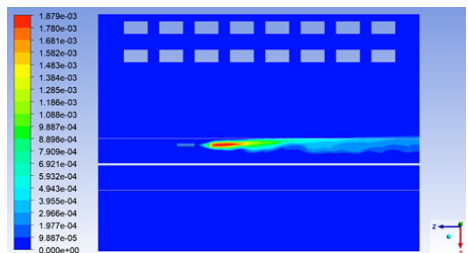
(a) 风速 v=0m/s



(b) 风速  $v=3\text{m/s}$



(c) 风速  $v=5\text{m/s}$



(d) 风速  $v=10\text{m/s}$

图4 ZX平面(地面)LPG云团浓度分布图

通过图4可以看出,无风时,LPG由泄漏口泄漏出来后,向四周进行扩散,距离越远,云团的浓度减小。有风时,泄漏的LPG云团沿下风向扩散。风速增大,LPG扩散速度越快,云团扩散的距离随风速的增加而增大。当风速大于 $5\text{m/s}$ ,云团的扩散距离基本保持不变,这是由于在空气湍流作用下,LPG云团逐渐被转化成非重气,因此扩散范围与距离基本不会发生改变。

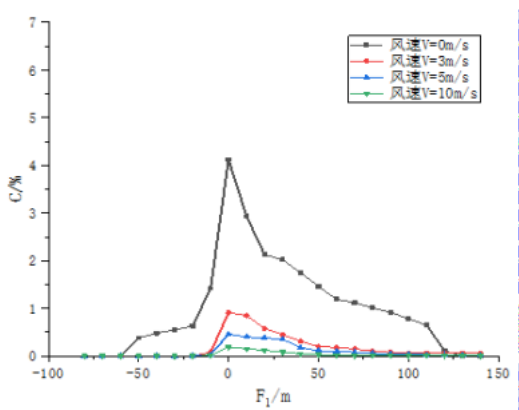


图5 不同风速下地面沿Z轴方向上LPG云团的浓度变化曲线图

图5为不同风速下,地面沿Z轴方向上LPG云团

的浓度变化曲线图。由图5可知,无风时,LPG云团的最大浓度约为 $4.1\%$ ,扩散最远距离约为 $126.3\text{m}$ ;风速为 $3\text{m/s}$ 时最大,云团浓度约为 $0.9\%$ ,扩散最远距离大于 $130\text{m}$ ;风速为 $10\text{m/s}$ 时最小,云团浓度约为 $0.2\%$ ,扩散最远距离大于 $130\text{m}$ 。

### 3 结论

(1) 不同泄漏速度对LPG罐车泄漏扩散的影响。泄漏速度增大会导致LPG云团扩散的范围越广,扩散最远距离大于 $130\text{m}$ 。此外,泄漏速度越小,LPG云团的浓度值也越大。

(2) 不同风速对LPG罐车泄漏扩散的影响。风速越大,气体扩散速度越快,云团浓度越低,云团扩散的距离增大,云团扩散最远距离大于 $130\text{m}$ 。

(3) 不同环境温度对LPG罐车泄漏扩散的影响。随着环境温度的增大,空气活跃度增大,云团从周围空气获得更多的热量,体积增大,密度减小,云团扩散的速率加快导致泄漏扩散范围增大,云团浓度降低,云团扩散最远距离为 $127.2\text{m}$ 。

### 参考文献:

- [1] 缪灿亮,张赛,王思.PHAST软件在LPG储罐泄漏分析中的应用[J].石油化工安全环保技术,2013,29(06):10-13+7.
- [2] 俞志东.LPG球罐泄漏事故后果数值模拟[J].油气储运,2017,36(02):144-148.
- [3] 张凯,王瑞金,王刚.Fluent技术基础与应用实例(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [4] 温正,石良辰,任毅如.FLUENT流体计算应用教程[M],北京:清华大学出版社,2009.
- [5] 于力.受限空间天然气泄漏扩散和爆炸的数值模拟[D].北京:首都经济贸易大学,2011.