

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0215

火场条件下相邻汽油罐油蒸汽泄漏及爆炸规律*

任少云, 夏登友

(中国人民警察大学消防指挥系, 河北 廊坊 065000)

摘要: 油库发生火灾时, 临近的油罐内汽油受热形成油蒸汽从呼吸阀泄出, 泄漏的油蒸汽与空气混合易点燃, 易引起燃烧爆炸事故。本文中以容积为 5 000 m³($\varnothing 22 \text{ m} \times 13 \text{ m}$) 的汽油罐泄漏油蒸汽为研究对象, 以数值模拟为研究方法, 研究了汽油蒸汽泄漏及爆炸规律。研究发现: 在距地面高 1 m 的平面上, 当无风且呼吸阀泄漏油蒸汽速率为 0.25 m/s 时, 距该罐中心 50 m 以外就可视作安全区域; 当呼吸阀泄漏的油蒸汽速率为 0.25 m/s 时, 风速达到 5.0 m/s 及以上, 不易积聚成爆炸油蒸汽; 当无风时, 呼吸阀泄漏油蒸汽的速率增大 1 个量级, 油蒸汽积聚达到爆炸下限 1/2 所需时间缩短 2 个量级; 当风速为 3.0 m/s、呼吸阀泄漏油蒸汽速率为 0.25 m/s、泄漏时间为 200 s、着火点距罐壁 1 m 时, 距点火源距离增大 1 个量级, 超压峰值下降 1~2 个量级。

关键词: 汽油蒸汽; 泄漏; 爆炸; 火场; 油库

中图分类号: O389; X915.5

国标学科代码: 1303599

文献标志码: A

汽油储备基地不断投入建设, 给工业生产和人类生活带来极大便利。基地内的油罐主要分为固定顶和浮顶两类。由于浮顶罐的顶盖紧贴油面, 油罐内油品吸热挥发的油蒸汽较少。但由于浮顶罐工艺复杂、投资大, 而固定顶罐设计简单、维护方便, 因此固定顶油罐广泛应用于我国油库区。由于固定顶罐内部存在一定的气相空间, 油库发生火灾时, 会导致临近未着火的固定顶罐内汽油吸热形成大量油蒸汽。对油蒸汽爆炸的研究已取得了大量成果。Zhang 等^[1] 研究发现汽油-空气混合物二次爆炸现象, 主要影响因素是油蒸汽和氧气浓度; Qi 等^[2] 在 2 L 容器内实验研究了通风口尺寸和油蒸汽浓度对油气爆炸的影响, 研究发现油蒸汽浓度影响火焰传播速度; Du 等^[3] 实验研究发现当火源温度为定值时, 湿度是影响爆炸的关键因素; 任少云^[4] 研究了容器长径比对液化石油气主要成分丙烷-空气爆炸规律的影响; Li 等^[5] 研究了半封闭管道 ($L/D=10$, $V=10 \text{ L}$) 内的障碍物填充率对油蒸汽-空气爆炸规律的影响; Du 等^[6] 研究了非预混氮气对油蒸汽-空气爆炸的抑制作用。这些文献主要研究密闭空间内油蒸汽爆炸规律及相关影响因素。任海亮^[7] 研究发现固定顶油罐受热后内部压力上升, 正常工作的呼吸阀向罐外泄出油蒸汽, 以减缓罐内压力。然而在已有研究中, 泄漏到罐外的汽油蒸汽浓度分布规律没有定量研究, 浓度分布对爆炸传播规律是否有影响关注较少。当空气中汽油蒸汽爆炸浓度达到爆炸下限的 1/2^[8] 时, 现场应急处置人员需要设定警戒线。应急处置人员通常采用浓度检测仪测量汽油蒸汽浓度, 在取样过程中, 当气流进入取样探针中形成的扰动会使样品组分发生变化, 无法准确代表混合气体浓度, 影响取样的准确性。采用数值方法模拟油蒸汽扩散过程, 得到泄漏油蒸汽浓度分布, 并节约成本、不具有危险性。因此采用数值模型, 研究火场固定顶汽油罐泄漏油蒸汽扩散特征和爆炸规律具有可行性和必要性, 对于应急处置具有重要指导作用。由于容积为 5 000 m³ 的固定顶油罐在油库中较普遍, 因此在数值模拟中选择容积为 5 000 m³ 的固定顶油罐受热泄漏的油蒸汽为研究对象。

1 数值模型和验证

气体混合和爆炸过程涉及的数学模型主要有混合物模型、湍流模型和组分输运方程。利用 Fluent 软件, 采用有限元方法离散偏微分方程。

* 收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-19

基金项目: 武警学院国家自然科学基金培育项目 (ZKJJPY201621); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0800609)

第一作者: 任少云 (1978—), 女, 博士, 副教授, syren2016@126.com。

1.1 数值模型

1.1.1 混合物模型

混合物模型控制方程主要包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。Mixture 模型用于模拟两种气混合。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad \rho = \sum_{e=1}^n \alpha_e \rho_e, \quad \mathbf{v} = \frac{\sum_{e=1}^n \alpha_e \rho_e \mathbf{v}_e}{\rho} \quad (1)$$

式中: ρ 为混合物密度, t 为时间, \mathbf{v} 为混合物速度, ∇ 为矢量微分算子, n 为相数, α_e 为第 e 相的体积分, ρ_e 为第 e 相的密度, \mathbf{v}_e 为第 e 相的速度^[9]。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{v} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left[\sum_{e=1}^n \alpha_e \rho_e (\mathbf{v}_e - \mathbf{v})(\mathbf{v}_e - \mathbf{v}) \right] \right\} \quad (2)$$

式中: p 为静压; μ 为混合物黏度, $\mu = \sum_{e=1}^n \alpha_e \mu_e$, μ_e 为第 e 相黏度^[9]; 上标 T 表示矩阵转置, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{F} 为外部体积力。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{e=1}^n \alpha_e \rho_e E_e \right) + \nabla \cdot \sum_{e=1}^n [\alpha_e \rho_e (\rho_e E_e + p)] = \nabla \cdot [(b_1 + b_2) \nabla T] + S \quad (3)$$

式中: E_e 为第 e 相的能量, b_1 为导热系数, b_2 为紊流热传导率 (根据使用的紊流模型定义), T 为温度, S 为体积热源^[9]。

相对速度^[9] 被定义为第二种气体 (p) 相对于主气体 (q) 的速度:

$$\mathbf{v}_{pq} = \frac{\tau_p (\rho_p - \rho)}{f \rho_p} \mathbf{a}_p, \quad \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q}, \quad f = \begin{cases} 1 + 0.15 R^{0.687} & R \leq 1000 \\ 0.0183 R & R > 1000 \end{cases}, \quad \mathbf{a}_p = \mathbf{g} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \quad (4)$$

式中: τ_p 为第二种气体释放时间, ρ_p 为第二种气体的密度, f 为拉拽函数, \mathbf{a}_p 为第二种气体的加速度, d_p 为第二种气体的直径, μ_q 为主气体的黏度, R 为雷诺数。

1.1.2 湍流模型

湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$ 模型:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\xi}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_1 + G_2 - \rho \varepsilon - K + S_1, \quad \xi = 0.09 \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\xi}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_1 + C_3 G_2) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_2 \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能, ε 为湍流动能耗散率, u_i 为速度在第 i 方向的分量, ζ 为湍动黏度, σ_ε 和 σ_k 分别为 k 和 ε 对应的 Prandtl 数 ($\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$), G_1 为由层流速度梯度而产生的湍动能, G_2 为由浮力产生的湍动能, K 为在可压缩湍流中扩散产生的波动, S_1 和 S_2 分别为自定义源项, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, C_3 与浮力有关 (当主流方向与重力方向平行时 $C_3=1$, 当主流方向与重力方向垂直时 $C_3=0$)^[9-10]。

1.1.3 组分输运方程

Fluent 通过第 i 种物质的对流扩散方程预估每种物质的质量分数 Y_i , 组分输运守恒方程的通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + W_i \quad (7)$$

式中: Y_i 为第 i 种物质组分的质量分数, \mathbf{J}_i 为物质 i 的扩散通量, W_i 为化学反应的净产生速率^[9]。

1.2 数值模型验证

张玉洁^[11]实验研究了空旷室内 CO₂ 气体扩散规律, 实验时将高压压缩、纯度为 99.9% 的 CO₂ 气体通过煤气软管形成地面释放源, 释放流量通过气体节流阀控制, 泄漏扩散实验参数: 泄漏源高度, 0 m; 泄漏流量, 10 L/min; 泄漏时间, 20 min; 风速, 0 m/s; 环境温度, 常温; 环境压力, 常压; 监测点高度为 0 m, 水平距泄漏源分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 m。

本文中采用相同的边界条件和初始值验证气体扩散模型的准确性。计算域的长和宽均为 5 m, 高为 3 m; 中心泄漏源直径为 1 cm; 网格划分采用六面体非结构化网格, 尺寸为 0.1 m×0.1 m×0.1 m, 网格数为 75 000。

采用 CO₂ 泄漏扩散实验测试初始条件和边界条件^[11]进行数值模拟, 计算得到了距地面 0 m、距泄漏口的水平距离分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 m 处的气体体积分数, 如图 1 所示。图 1 同时展示了张玉洁^[11]实验数据, 对比数值模拟数据与实验数据^[11], 二者体积分数分布变化趋势较吻合。当距泄漏口的水平距离为 0.5 m 时, 数值模拟数据与实验数据^[11]吻合度较好。当距泄漏口的水平距离为 1.0、1.5 和 2.0 m 时, 实验数据^[11]波动较大, 数值模拟的数据稳步上升。这主要是由于实际过程中, 气体存在黏性, 在气体混合过程中黏性力降低气体运动速度; 模拟过程中地面假定为光滑无摩擦, 而实际地面有粗糙度。因此导致数值模拟得到的数据与实验数据^[11]有一定偏差, 但是变化趋势是吻合的, 证明数值模型具有一定可靠性、合理性。

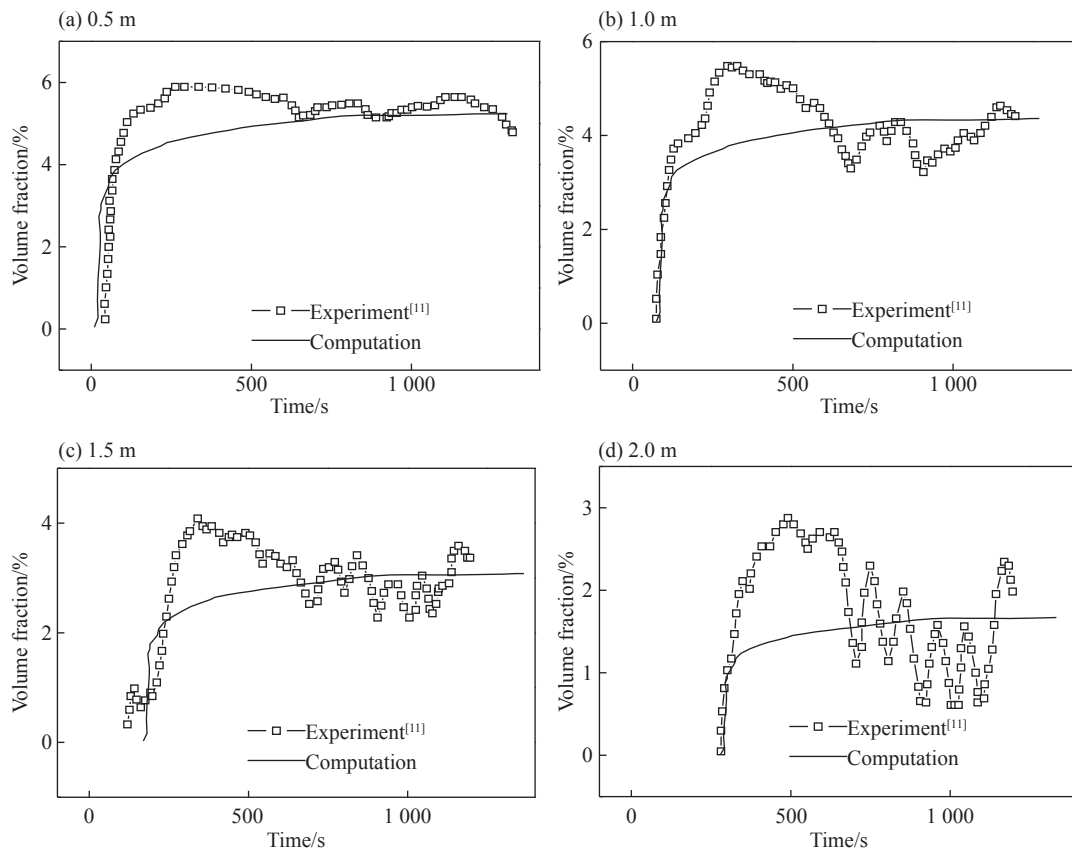


图 1 水平向不同距离的体积分数值模拟与实验结果对比 (泄漏流量为 10 L/min)

Fig. 1 Volume fraction comparisons between the calculating results and the experimental values at different locations with different distances from the horizontal direction to the tank center (leakage flow is 10 L/min)

2 结 果

计算域 (图 2) 长、宽和高分别为 1 000、1 000 和 50 m, 其中固定顶汽油罐容积为 5 000 m³, 直径为

22 m, 油罐顶部泄漏油蒸汽的呼吸阀的直径为 0.25 m。油罐底面中心坐标为 (0 m, 0 m, 0 m)。由于汽油成分为 $C_5 \sim C_{12}$, 本文数值计算中选定 C_5H_{12} (戊烷) 作为油蒸汽的替代气体, 主要是考虑了 C_5H_{12} 相较于其他碳值更大的烃类气体沸点最低, 其爆炸极限与汽油的爆炸极限也较接近^[11], C_5H_{12} 爆炸下限为 1.4%^[11]。设定环境温度为 310 K, 环境压力为 101 kPa。假设气体为理想气体, 地面光滑、绝热。进风面为速度入口, 其余边界为压力出口。

汽油蒸汽密度大于空气密度, 其与空气混合时会沉降在地面附近, 在距离地面高度 1 m 内应急救援人员便于实施扑救行动, 因此距离地面 1 m 以下的区域风险较大。所以, 本文中主要监测距地面高 1 m 的水平面内的油蒸汽体积分数和爆炸超压值。在距地面高 1 m 的水平面内, 沿 X 轴方向距罐中心 11、15、20、50、100、200、300 和 400 m 处分别设监测点, 监测点坐标分别为 $S_1(11 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$, $S_2(15 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$, $S_3(20 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$, $S_4(50 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$, $S_5(100 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$, $S_6(200 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$, $S_7(300 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$, $S_8(400 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 。

2.1 固定顶汽油罐泄漏油蒸汽体积分数分布规律

2.1.1 扩散距离对油蒸汽体积分数分布的影响

设定风速为 0 m/s, 呼吸阀泄漏油蒸汽速率为 0.25 m/s。图 3 展示了油罐外不同监测点油蒸汽体积分数-泄漏时间曲线。随着泄漏时间增长, 空气中油蒸汽逐渐向四周扩散。

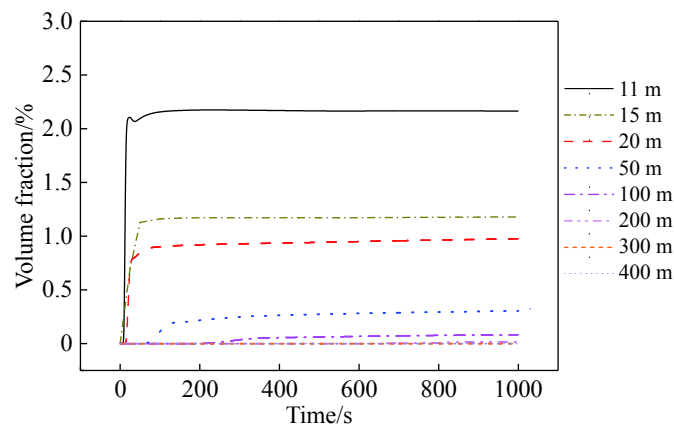


图 3 水平方向不同位置泄漏的油蒸汽体积分数-时间曲线 (监测点距地面高 1 m)

Fig. 3 Volume fraction-time curves of leaked gasoline vapor at the different monitoring points with different distances from the horizontal direction to the the tank center and 1 m above the ground

由于油蒸汽密度大于空气密度, 因此距罐最近的监测点 S_1 处油蒸汽体积分数迅速上升。11 s 时监测点 S_1 处油蒸汽体积分数达到爆炸下限 1/2; 13 s 时该处油蒸汽体积分数达到爆炸下限。监测点 S_2 和 S_3 分别水平距离罐中心 15 和 20 m, 油蒸汽体积分数分别在 30 和 51 s 后达到爆炸下限 1/2。监测点 S_4 水平距离罐中心 50 m, 该点油蒸汽体积分数到达爆炸下限 1/2 的时间为 7 700 s, 比监测点 $S_1 \sim S_3$ 油蒸汽体积分数到达爆炸下限 1/2 的时间长 2 个量级。根据我国应急处置的能力, 7 700 s^[8] 时间内能够完成油罐火灾的接警处置工作, 因此距罐中心 50 m 以外就可视作安全区域。监测点 $S_5 \sim S_8$ 分别水平距离罐中心 100、200、300 和 400 m, 都可视作处于安全区域。

2.1.2 风速对油蒸汽体积分数分布的影响

为了考查风速对油蒸汽体积分数分布的影响, 设定风速分别为 0、1.5、3.0、5.0 和 7.0 m/s, 呼吸阀泄漏油蒸汽速率为 0.25 m/s。监测点 S_3 在油罐下风方向, 水平距罐中心 20 m, 距地面高 1 m。

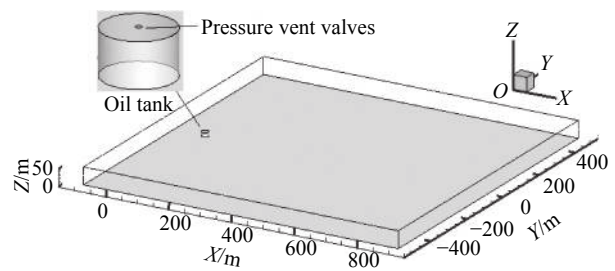


图 2 计算域

Fig. 2 Computational domain

图4展示了风速从0 m/s增大到7.0 m/s,监测点 S_3 的油蒸汽体积分数分布时间曲线。风速为0 m/s时,25 s时油蒸汽体积分数迅速上升到0.8%,然后缓慢上升。当风速为1.5 m/s时,油蒸汽体积分数先剧烈波动,然后在190 s时保持平稳,稳定在0.77%。当风速为3.0 m/s时,190 s时监测点 S_3 的油蒸汽体积分数稳定在0.67%。当风速为5.0 m/s,125 s时监测点 S_3 的油蒸汽体积分数基本稳定在0%。当风速为7.0 m/s时,96 s时监测点 S_3 的油蒸汽体积分数基本稳定在0%。由此可见,当呼吸阀泄漏油蒸汽的速率为0.25 m/s时,若风速小于5.0 m/s,呼吸阀泄漏的油蒸汽易积聚达到爆炸下限1/2(0.7%),应急处置人员应设置警戒^[8];若风速达到5.0 m/s及以上,呼吸阀泄漏的油蒸汽不易积聚成爆炸油蒸汽,应急处置人员可以靠近设置阵地。

2.1.3 油蒸汽泄漏速率对油蒸汽体积分数分布的影响

5 000 m³的油罐呼吸阀的通气量要求最大能达到0.15 m³/s^[12],呼吸阀的直径一般为0.25 m,其泄漏速率最大为3.00 m/s。为了考查油罐呼吸阀油蒸汽泄漏速率变化对油蒸汽体积分数分布的影响,设定泄漏速率分别为0.10、0.25、0.50、0.75和1.00 m/s,风速为0 m/s。监测点 S_3 在油罐下风方向,水平距罐中心20 m,距地面1 m。

图5展示了当油蒸汽泄漏速率从0.10 m/s增大到1.00 m/s时,监测点 S_3 的油蒸汽体积分数分布时间曲线。油蒸汽泄漏速率为0.10 m/s时,泄漏40 s时油蒸汽体积分数迅速上升到0.4%;40 s后油蒸汽缓慢上升,油蒸汽易积聚,达到爆炸下限1/2所需时间为5 700 s。泄漏速率为0.25 m/s,泄漏23 s时油蒸汽体积分数达到0.7%,达到爆炸下限1/2,然后缓慢上升。泄漏速率为0.50 m/s,泄漏17 s时油蒸汽体积分数达到0.7%,达到爆炸下限1/2;泄漏60 s时,油蒸汽体积分数达到1.4%,达到爆炸极限。泄漏速率为0.75 m/s,泄漏14 s时油蒸汽体积分数达到0.7%,达到爆炸下限1/2;泄漏18 s时,油蒸汽体积分数达到1.4%,达到爆炸极限。泄漏速率为1.00 m/s,泄漏12 s时油蒸汽体积分数达到0.7%,达到爆炸下限1/2;泄漏15 s时,油蒸汽体积分数达到1.4%,达到爆炸极限。由此可见,泄漏速率越高,达到爆炸下限1/2与达到爆炸极限的时间相差越短。

泄漏速率为0.10 m/s时,呼吸阀泄漏的油蒸汽易积聚,达到爆炸下限1/2所需时间为5 700 s;泄漏速率为1.00 m/s时,油蒸汽易积聚,达到爆炸下限1/2所需时间仅为12 s。呼吸阀泄漏的油蒸汽速率增高1个量级,积聚成爆炸油蒸汽下限1/2所需的时间缩短2个量级。

2.2 油蒸汽爆炸压力场和温度场

2.2.1 爆炸压力和温度的时空分布

为了考查固定顶油罐呼吸阀泄漏的油蒸汽爆炸规律,设定风速为3.0 m/s,呼吸阀泄漏油蒸汽速率为0.25 m/s,已泄漏200 s。着火点坐标为(12 m, 0 m, 1 m),点火半径为5 mm,点火温度为2 000 K。

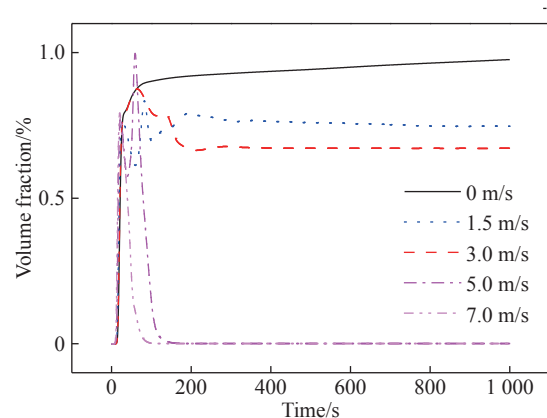


图4 风速对泄漏油蒸汽体积分数分布的影响(监测点 S_3 沿水平方向距罐中心20 m,距地面高1 m)

Fig. 4 Volume fraction-time curves of leaked gasoline vapor at different wind speeds (the monitoring point S_3 is 20 m from the horizontal direction to the tank center, 1 m above the ground)

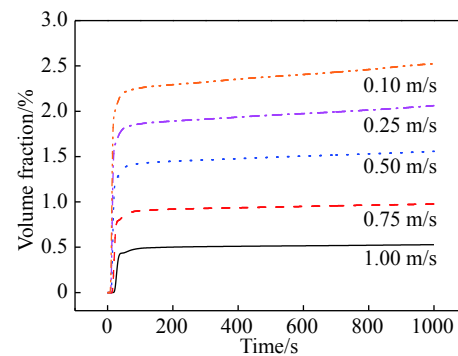


图5 不同泄漏速率条件下油蒸汽体积分数-时间曲线(监测点 S_3 沿水平方向距罐中心20 m,距地面高1 m)

Fig. 5 Volume fraction-time curves of gasoline vapor at different leakage speeds (the monitoring point S_3 is 20 m from the horizontal direction to the tank center, 1 m above the ground)

在距地面高 1 m 的水平面内设监测点 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_5 ，其沿 X 轴方向分别距罐中心 11、15、20、50、100 m。

监测点 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_5 的超压-时间和温度-时间曲线如图 6 所示。监测点 S_1 (距罐心 11 m) 水平距着火点 1 m，超压峰值为 17.8 kPa，温度峰值达到 2 389 K。监测点 S_2 (距罐心 15 m) 水平距着火点 3 m，其超压峰值和温度峰值与监测点 S_1 的较接近，分别为 16.7 kPa 和 2 345 K，表明距着火点 3 m 内爆炸压力和温度差异不明显。监测点 S_3 (距罐心 20 m) 水平距着火点 8 m，超压峰值为 10.1 kPa，温度峰值达到 2 217 K，到达温度峰值时间为 0.36 s，相比较监测点 S_1 和 S_2 ，压力峰值下降 1/2，到达温度峰值时间延迟 3 倍。监测点 S_4 (距罐心 50 m) 水平距着火点 38 m，超压峰值为 2 kPa，温度无明显变化。监测点 S_5 (距罐心 100 m) 水平距着火点 88 m，超压峰值为 0.2 kPa，温度也无明显变化。距点火源距离增大 1 个量级，超压峰值下降 1~2 个量级，温度急剧下降。这是因为监测点水平方向距泄漏源越远，参与燃烧的可燃油蒸汽越少，燃烧产物的膨胀推动速度越低，超压波也随之降低；并且由于周围环境吸收热量，火焰温度下降至常温。

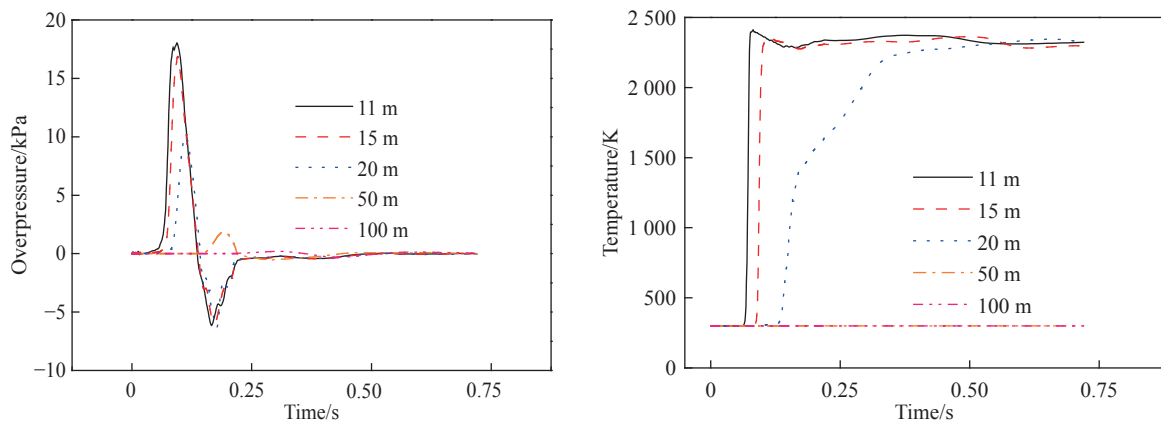


图 6 水平方向不同位置油蒸汽爆炸超压-时间和温度-时间曲线(监测点距地面高 1 m)

Fig. 6 Gasoline vapor explosion overpressure-time and temperature-time curves at the different monitoring points with the different distances from the horizontal direction to the tank center (the monitoring points are 1 m above the ground)

2.2.2 不同水平位置点火对爆炸压力场和温度场的影响

选择距地面高 1 m 的水平面内，考查不同水平位置点火对油蒸汽爆炸规律的影响。沿 X 轴方向距罐中心 12、15、20 m 处分别设着火点，着火点坐标为 $I_1(12 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 、 $I_2(15 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 、 $I_3(20 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})$ ；其他条件与 2.2.1 节中一致。点火爆炸后压力和温度的监测点 S_2 设在油罐下风方向，水平距罐中心 15 m，距地面高 1 m。

由 2.1 节中数值计算得到着火点 I_1 、 I_2 和 I_3 的油蒸汽体积分数分别为 2.50%、1.46%、0.12%。图 7 显示了不同水平位置点火时监测点 S_2 的爆炸压力场和温度场时间曲线。着火点 I_1 水平方向距罐中心 12 m，离罐较近，油蒸汽体积分数较高，达到爆炸当量体积分数。在 I_1 点火爆炸后，超压峰值达到 17 kPa，温度达到 2 300 K。着火点 I_2 水平方向距罐中心 15 m，该处油蒸汽体积分数达到爆炸下限。在 I_2 点火爆炸后，超压峰值达到 0.4 kPa，爆炸超压较低，温度达到 2 000 K。这是由于 I_2 点油蒸汽体积分数只达到爆炸下限，可燃性混合气体虽发生化学反应，但参与反应的可燃物较少，压力上升不明显。着火点 I_3 水平方向距罐中心 20 m，该处油蒸汽体积分数为 0.12%，低于爆炸下限 1/2。在 I_3 点火爆炸后，温度和压力时间曲线显示没有发生化学反应，高温火花熄灭，压力没有波动。这是因为着火点在水平方向距离泄漏源较远，参与燃烧的可燃油蒸汽较少，没有发生燃烧。

2.2.3 不同高度点火对爆炸压力场和温度场的影响

为了考查不同高度点火对油蒸汽爆炸规律的影响，在水平距罐心 12 m 远的位置，距地面分别为

0.5、1.0、1.5、2.0 m 处设着火点, 着火点坐标为 $I_4(12\text{ m}, 0\text{ m}, 0.5\text{ m})$, $I_5(12\text{ m}, 0\text{ m}, 1\text{ m})$, $I_6(12\text{ m}, 0\text{ m}, 1.5\text{ m})$ 和 $I_7(12\text{ m}, 0\text{ m}, 2\text{ m})$; 其他条件与 2.2.1 节中一致。由 2.1 节中数值计算得到着火点 I_4 、 I_5 、 I_6 和 I_7 的油蒸汽体积分数分别为 3.8%、2.5%、2.2%、2.0%。点火爆炸后压力和温度的监测点 S_2 设在油罐下风方向, 水平距罐中心 15 m, 距地面 1 m。

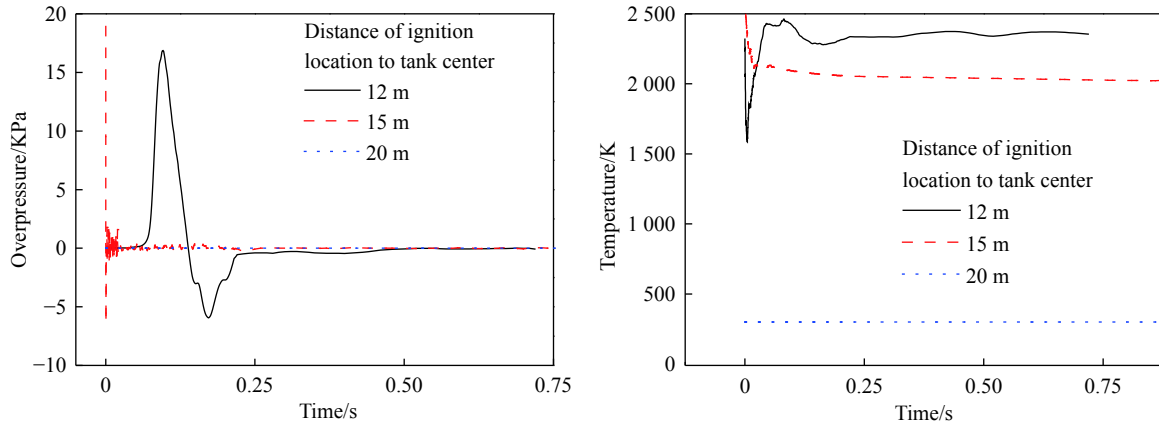


图 7 不同水平位置点火时爆炸压力-时间和温度-时间曲线(监测点沿水平方向距罐中心 15 m, 距地面高 1 m)
 Fig. 7 Explosion overpressure-time and temperature-time curves with different ignition locations along the horizontal direction (the monitoring point is 15 m from the horizontal direction to the tank center, 1 m above the ground)

图 8 展示了不同高度点火时监测点 S_2 的爆炸压力场和温度场时间曲线。着火点 I_4 (距地面高 0.5 m) 油蒸汽体积分数为 3.8%(高于当量体积分数), 在该处点火爆炸后, 超压峰值达到 7 kPa, 温度在 0.15 s 达到 2 300 K。着火点 I_5 (距地面高 1 m) 油蒸汽体积分数为 2.5%(当量体积分数), 在该处点火爆炸后, 超压峰值达到 17 kPa, 温度在 0.11 s 达到 2 300 K。着火点 I_6 (距地面高 1.5 m) 油蒸汽体积分数为 2.2%, 在该处点火爆炸后, 超压峰值达到 5 kPa, 温度在 0.17 s 达到 2 300 K。着火点 I_7 (距离地面高 2 m) 油蒸汽体积分数为 2%, 在该处点火爆炸后, 超压峰值达到 4 kPa, 温度在 0.18 s 达到 2 300 K。着火点 I_4 处油蒸汽体积分数高于当量体积分数, I_6 和 I_7 处油蒸汽体积分数低于当量体积分数, 因此爆炸超压峰值均低于着火点 I_5 处的峰值, 到达峰值温度的时间也迟于着火点 I_5 处到达峰值温度的时间。这是因为油蒸汽密度比空气密度大, 油蒸汽下沉, 在距地面高 1 m 位置的油蒸汽体积分数接近当量体积分数, 爆炸超压峰值最高; 靠近地面的油蒸汽体积分数大于当量体积分数, 参与燃烧的氧气较少; 高于 1 m 处的油蒸汽体积分数低于当量体积分数, 参与燃烧的油蒸汽较少。

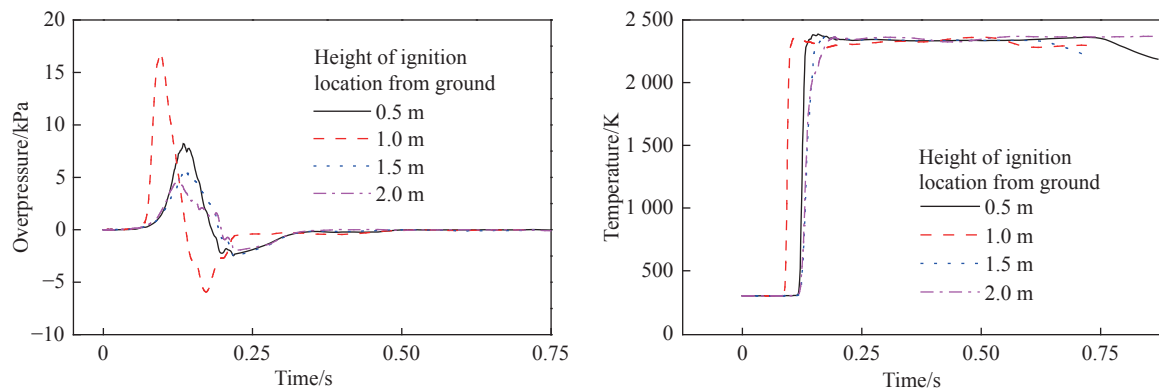


图 8 不同高度点火时爆炸压力-时间和温度-时间曲线(监测点 S_2 沿水平方向距罐中心 15 m, 距地面高 1 m)
 Fig. 8 Explosion overpressure-time and temperature-time curves with different ignition locations along the vertical direction (the monitoring point S_2 is 15 m from the horizontal direction to the tank center, 1 m above the ground)

3 讨 论

图 9 展示了在距地面高 1 m 的位置, 当风速为 0 m/s 时, 泄漏的油蒸汽体积分数达到爆炸下限 1/2(0.7%) 的时间和扩散距离的关系。

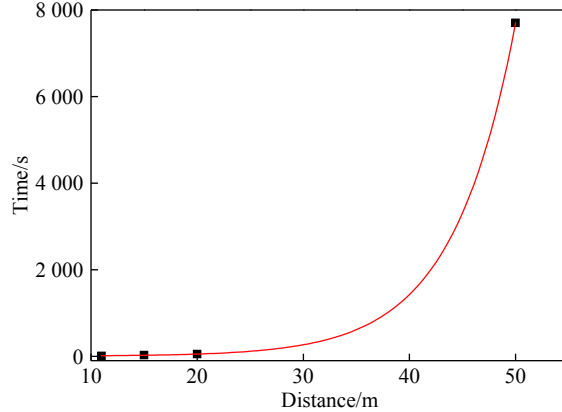


图 9 泄漏的油蒸汽体积分数达到爆炸下限 1/2 的时间随扩散距离的变化 (监测点距地面高 1 m)

Fig. 9 Variation of the time to reach 1/2 of the lower flammable limit with the diffusion distance to the tank center in the horizontal direction (the monitoring point is 1 m above the ground)

图 9 展示了随着扩散距离增大, 油蒸汽体积分数达到爆炸下限 1/2 的时间呈指数上升:

$$y = 1.66 \exp(x/5.92) + 3.9 \tag{8}$$

式中: x 为距罐心距离, m; y 为泄漏油蒸汽体积分数达到爆炸下限 1/2 的时间, s。

油库火灾中冷却未着火油罐时, 要求水流能扫射到罐壁, 直流水枪射程为 17 m, 消防水炮射程一般为 48~80 m。选取 17、48 和 80 m 临界值作为计算依据, 采用拟合函数 (8) 求得 3 种距离所在位置达到爆炸下限 1/2 的时间分别为 0.5、30、20 455 min。当应急处置人员到达现场后, 询问 5 000 m³ 固定顶油罐泄漏油蒸汽时间后, 根据上述计算结果选择不同射程的水枪或水炮, 就可在安全区域设置冷却阵地。

探讨固定顶油罐呼吸阀泄漏油蒸汽爆炸压力场变化规律, 是为了应急处置过程中能够避免爆炸造成人员的伤亡和救援设备的损坏。图 10 展示了当风速为 3.0 m/s、呼吸阀泄漏油蒸汽速率为 0.25 m/s、泄漏 200 s 时, 在距地面高 1 m、水平距罐心 12 m 位置点火后的超压峰值与压力波传播距离的关系, 拟合公式为:

$$y = 19.3 \exp(-x/12) + 0.37 \tag{9}$$

式中: x 为距着火点的距离, m; y 为超压峰值, kPa。

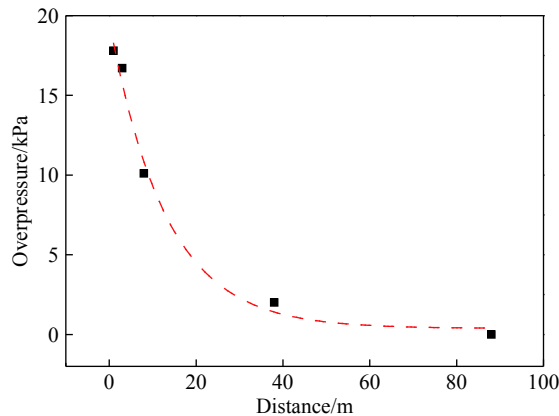


图 10 压力波传播距离对超压峰值的影响 (距地面高 1 m)

Fig. 10 Influence of distance from the ignition point on peak overpressure (1 m above the ground)

人员在冲击波超压作用下将受到不同程度的伤害。因此明确不同的超压伤害、破坏距离, 可为冲击波作用范围评估与安全防护距离设计提供参考依据。不同超压作用条件下的人员伤害和建筑破坏作用如表 1^[13] 所示。

表 1 不同超压作用条件下的人员伤害和建筑破坏作用

Table 1 Personnel injury and building destruction under different overpressure conditions

$\Delta p/\text{kPa}$	伤害情况	破坏作用
5~6	无伤害	门、窗玻璃部分破碎
6~15	无伤害	压面的门窗玻璃大部分破碎
15~19.6	无伤害	窗框损坏
19.6~29.4	人体受到轻微损伤	墙裂缝

选取 6、15、19.6 kPa 临界值作为计算依据, 在图 10 的基础上, 采用拟合公式 (9) 求得 3 种超压所在位置与爆炸中心的距离分别为 15、3.5、0.1 m。因此, 在火灾条件下, 当汽油罐泄漏的油蒸汽体积分数达到爆炸极限体积分数时, 多个应急救援小组进入泄漏区域则应避免携带火源, 且小组之间至少应保持 15 m 的距离, 避免造成多小组同时受伤。

4 结 论

以 5 000 m³ 固定顶汽油罐 ($\varnothing 22 \text{ m} \times 13 \text{ m}$) 泄漏油蒸汽为研究对象, 探索不同条件下油蒸汽泄漏扩散过程和爆炸过程。主要结论如下:

(1) 当无风且呼吸阀泄漏油蒸汽速率为 0.25 m/s 时, 距罐中心 50 m 以外可视作安全区域。

(2) 当呼吸阀泄漏的油蒸汽速率为 0.25 m/s 且风速达到 5 m/s 及以上时, 不易积聚成爆炸蒸汽。当无风时, 呼吸阀泄漏的油蒸汽速率增高 1 个量级 (由 0.10 m/s 增高到 1.00 m/s), 积聚成爆炸油蒸汽下限 1/2 所需时间缩短 2 个量级 (由 5 700 s 到 12 s)。

(3) 当风速为 3 m/s、呼吸阀泄漏油蒸汽速率为 0.25 m/s、泄漏时间为 200 s, 且着火点距罐壁 1 m 远时, 距着火点的水平距离增大 1 个量级, 超压峰值下降 1~2 个量级, 温度急剧下降。

本文可为火灾环境下油气泄漏爆炸危险性辨识、爆炸事故预防和爆炸事故原因研判提供科学依据。

参考文献:

- [1] ZHANG Peili, LI Jianxiang, GUO Yanbo, et al. The secondary explosion phenomenon of gasoline-air mixture in a confined tunnel [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 64(1): 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/64/1/012008.
- [2] QI Sheng, DU Yang, WANG Shemao, et al. The effect of vent size and concentration in vented gasoline-air explosions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 44: 88-94. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.08.005.
- [3] DU Yang, ZHANG Peili, OU Yihong. Effects of humidity, temperature and slow oxidation reactions on the occurrence of gasoline-air explosions [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2013, 23(3): 226-238.
- [4] 任少云. 爆炸下限临界浓度丙烷-空气混合过程及可燃性研究 [J]. *高压物理学报*, 2017, 31(5): 629-636. DOI: 10.11858/gywlb.2017.05.017.
REN Shaoyun. The mixing and explosion process of propane-air at lower flammable limit in confined vessel [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(5): 629-636. DOI: 10.11858/gywlb.2017.05.017.
- [5] LI Guoqing, DU Yang, WANG Shimao, et al. Large eddy simulation and experimental study on vented gasoline-air mixture explosions in a semi-confined obstructed pipe [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 339: 131-142. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.06.018.
- [6] DU Yang, ZHANG Peili, ZHOU Yi, et al. Suppressions of gasoline-air mixture explosion by non-premixed nitrogen in a

- closed tunnel [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 31: 113–120. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.07.012.
- [7] 任海亮. 火灾情况下固定顶油罐物理性爆炸研究 [D]. 廊坊: 中国人民武装警察部队学院, 2014: 26–36.
REN Hailiang. Research on physical explosion of fixed-roof tanks under fire condition [D]. Langfang: The Chinese People's Armed Police Force Academy, 2014: 26–36.
- [8] 李建华. 灭火战术 [M]. 北京: 群众出版社, 2004: 323–325.
- [9] Fluent Inc. Fluent 6.3 user's guide [M/CD]. Fluent Inc., 2006: 1628–1641.
- [10] 王福军. 计算流体力学分析 CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7–13.
- [11] 张玉洁. 油气及有毒性气体泄漏扩散危险性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015: 24–26.
ZHANG Yujie. Study on the leakage and diffusion dangers of oil gas and toxic gases [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015: 24–26.
- [12] 王晓程. 常低压储罐呼吸阀呼吸量计算与设置 [J]. *天津化工*, 2016, 30(6): 56–58.
WANG Xiaocheng. Breather valve calculation and setup for atmospheric and low-pressure storage tanks [J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2016, 30(6): 56–58.
- [13] 傅智敏, 黄金印, 臧娜. 爆炸冲击波伤害破坏作用定量分析 [J]. *消防科学与技术*, 2009, 28(6): 390–395.
FU Zhimin, HUANG Jinyin, ZANG Na. Quantitative analysis for consequence of explosion shock wave [J]. *Fire Science and Technology*, 2009, 28(6): 390–395.

Gasoline vapor leakage and explosion law of an oil tank adjacent to fire

REN Shaoyun, XIA Dengyou

(Department of Fire Commanding, China People's Police University, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: When the oil depot is in fire, a large amount of gasoline vapor is formed by the heat absorption of oil in an adjacent gasoline tank with a fixed top. The gasoline vapor is ignited after mixing with air, which is likely to cause combustion and explosion accidents. In this paper, the gasoline vapor leaked from a tank of 5 000 m³ (∅22 m×13 m) is taken as the research object, the law of gas vapor leakage and explosion is researched by numerical simulation. It is found that the area beyond 50 m away from the tank center is safe at 1 m above the ground if there is no wind and the gasoline vapor leakage velocity is 0.25 m/s. It is not easy to accumulate into the flammable gasoline vapor as the gasoline vapor leakage velocity from the breathing valve is 0.25 m/s, and the wind speed reaches 5.0 m/s and above. As there is no wind and the gasoline vapor leakage velocity from the breathing valve is increased by 1 order of magnitude, the time to half of the lower flammability limit is reduced by 2 orders of magnitude. When the wind speed is 3.0 m/s, the gasoline vapor leaking velocity is 0.25 m/s, and the leakage time is 200 s, the peak overpressure is reduced by 1–2 orders of magnitude if the distance to the ignition source is increased by 1 order of magnitude.

Keywords: gasoline vapor; leakage; explosion; fire; oil depot

(责任编辑 张凌云)