

文章编号: 2095—0411 (2013) 03 - 0041 - 04

# 柴油蒸汽云扩散及爆炸风险的实验研究<sup>\*</sup>

王凯全, 王学友, 疏小勇, 顾 涛

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 在研发的液态烃类挥发及扩散实验平台上, 检测了在密闭条件下, 距液面上方 0.4、0.8、1.2m 及 1.6m 处柴油蒸汽云扩散变化规律, 以及温度分别为 30、60、90、120℃ 的柴油蒸汽云易爆敏感区的范围和达到爆炸限的时间。结果表明: 在特定高度处, 蒸汽云扩散稳定时蒸汽云体积分数与柴油温度之间呈对数关系; 液面上方 0.8m 左右为易爆敏感区, 且蒸汽云体积分数达到爆炸限的时间与柴油温度呈指数关系; 柴油温度增高, 饱和蒸汽压及蒸汽云体积分数均增高。研究提供的液态烃类挥发及扩散实验平台, 实现了对柴油泄漏后蒸汽云扩散分布、可爆炸蒸汽云生成的时间及范围的定量分析, 实验结果可为柴油爆炸灾害的预警和控制提供指导。

**关键词:** 柴油温度; 蒸汽云; 饱和蒸汽压; 爆炸; 定量评价

中图分类号: X 932

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2013.03.011

## Experimental Study of Diesel Evaporation and Vapor Cloud Diffusion Concentration

WANG Kai-quan, WANG Xue-you, SHU Xiao-yong, GU Tao

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In the developed experiment platform of liquid hydrocarbon volatilization and diffusion, the change rules of diesel oil steam cloud concentration were measured above the liquid level 0.4, 0.8, 1.2m and 1.6m, in confined conditions. Furthermore, sensitive area of the scope of explosion and the time of explosion limit of the diesel oil were detected under 30, 60, 90℃ and 120℃, respectively. The results show that: at a particular height, the steam cloud density has logarithmic relation to diesel oil temperature. Steam cloud concentration in the 0.8m firstly reaches the explosion limit, and time of forming the explosion limit concentration of steam cloud correlates with diesel oil temperature in index. Saturated vapor pressure and vapor cloud concentrations were elevated with the temperature increasing of diesel oil. This study provides a liquid pool volatile diffusion experiment platform which can quantitatively study the steam cloud diffusion concentration distribution after leakage, the time of forming explosion steam cloud and its range. The experimental results can provide guidance for early-warning and control of the explosion disaster.

**Key words:** diesel oil temperature; saturated vapor pressure; explosion; quantitative evaluation

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013 - 04 - 03

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2011BAK03B08)

作者简介: 王凯全 (1951—) 男, 上海人, 教授, 博士, 主要从事安全科学与工程研究。

蒸气云爆炸 (UVCE) 是由于气体或易于挥发的液体燃料的大量泄漏, 与周围空气混合形成覆盖很大的范围的“预混云”, 在某一有限空间浓度达到爆炸限, 遇火源而导致的爆炸<sup>[1]</sup>。柴油具有流动性、蒸发性、易燃性和易产生积聚静电等特性, 其发生泄漏后产生的危险蒸汽云覆盖面积将大大超过液池面积。即使在泄漏溢流得到有效控制的事故善后处理和恢复阶段, 仍然可能由危险蒸汽云影响区内的引火源导致火灾事故的发生<sup>[2]</sup>, 蒸汽云引起爆炸事故时有发生, 并且后果十分严重<sup>[3]</sup>, 例如 1997 年 7 月 14 日, 印度维萨卡帕特南的港口码头蒸汽云爆炸, 并导致火灾, 50 余人丧生, 事故损失 2 360 万美元。2010 年 7 月 16 日, 大连新港附近中石油输油管道破裂, 蒸汽云爆炸起火, 造成 2 条管线和容量为 10 万吨的罐燃烧, 周边 430 km<sup>2</sup> 海域受到污染, 1 名消防队员牺牲。目前, 对液态烃类泄漏蒸汽云爆炸后果的研究较多<sup>[4]</sup>, 而对蒸汽云扩散及爆炸风险的研究甚少。因此, 本文研发了液态烃类挥发及扩散蒸汽云分布一体化的实验平台, 探究柴油蒸汽云分布、形成可爆炸蒸汽云的时间及范围, 从而为液态烃类爆炸灾害的预警和控制工作提供指导。

## 1 实验平台及实验方法

### 1.1 实验平台

图 1 为液态烃类挥发及扩散蒸汽云分布一体化的实验平台。在封闭的预混塔 6 底部设隔温层 3, 隔温层上放置恒温炉 4, 恒温炉由控温装置 5 控制

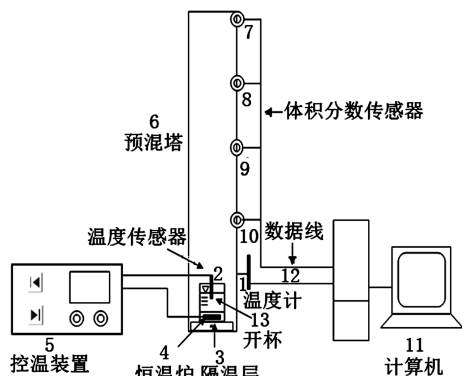


图 1 试验平台示意图

Fig. 1 Sketch map of test platform

其温度, 开杯 13 放置在恒温炉上, 液态烃类放置于开杯内使其处于恒定的温度, 在预混塔侧面安装传感器 7、8、9、10、温度传感器 2 以及温度计 1, 配备时钟记录装置运行时间, 配备计算机 11 和数

据线路 12 连续记录和处理测定的数据。为保证实验的安全, 装置附近严禁明火并设静电接地, 同时此装置要处于通风性较好的环境中。

### 1.2 实验方法

在开杯内盛放一定量的零号柴油, 将隔温层、恒温炉、开杯依次放入预混塔底部, 将传感器 7、8、9、10 分别调至距液面上方 1.6、1.2、0.8、0.4 m 处, 密封预混塔, 启动控温装置。当开杯内的油温达到并恒定在设定温度时, 时钟开始记录实验时间, 传感器持续检测距液面不同高度的蒸汽云体积分数, 温度计测环境温度, 相关检测数据用计算机进行处理。

## 2 实验结果

### 2.1 蒸汽云扩散变化趋势

在环境温度为 11℃ 下进行实验, 持续 1 h, 柴油温度分别设定为 30、60、90、120℃。通过与仪表连接的电脑上的相关软件, 记录了预混塔侧面 4 个不同高度处每隔 1 min 的实时体积分数读数, 并以此绘制出各传感器处柴油体积分数变化趋势图, 如图 2。

由图 2 可知, 距液面特定高度处, 蒸汽云体积分数随柴油温度的变化而变化, 总体趋势相似。由图 2 可知, 距液面上方 0.4 m 处, 柴油温度为 120℃ 和 90℃ 时, 蒸汽云体积分数在实验开始后迅速增加, 最终温度为 120、90、60℃ 的柴油分别在 26、58、57 min 左右时分别达到最大体积分数并保持稳定, 30℃ 始终为零。由图 2 (b) 知, 距液面上方 0.8 m 处, 实验开始后, 蒸汽云体积分数随温度的增加而迅速增加, 温度为 30、60、90、120℃ 的柴油分别在 27、35、57、38 min 左右达到最大值并保持稳定。由图 2 (c)、图 2 (d) 可知, 距液面上方分别为 1.2、1.6 m 处, 蒸汽云体积分数随温度增加而变化的趋势相似, 并且温度为 30℃ 时始终为零, 最终距液面上方为 1.2 m 处温度为 60、90、120℃ 的柴油分别在 56、42、23 min 左右蒸汽云体积分数达到最大; 最终距液面上方为 1.6 m 处温度为 60、90、120℃ 的柴油分别在 55、44、35 min 左右蒸汽云体积分数保持恒定, 即达到稳定。

可见, 各高度处, 温度越高, 这个蒸汽云读数的稳定值越高, 即饱和蒸汽压越大。

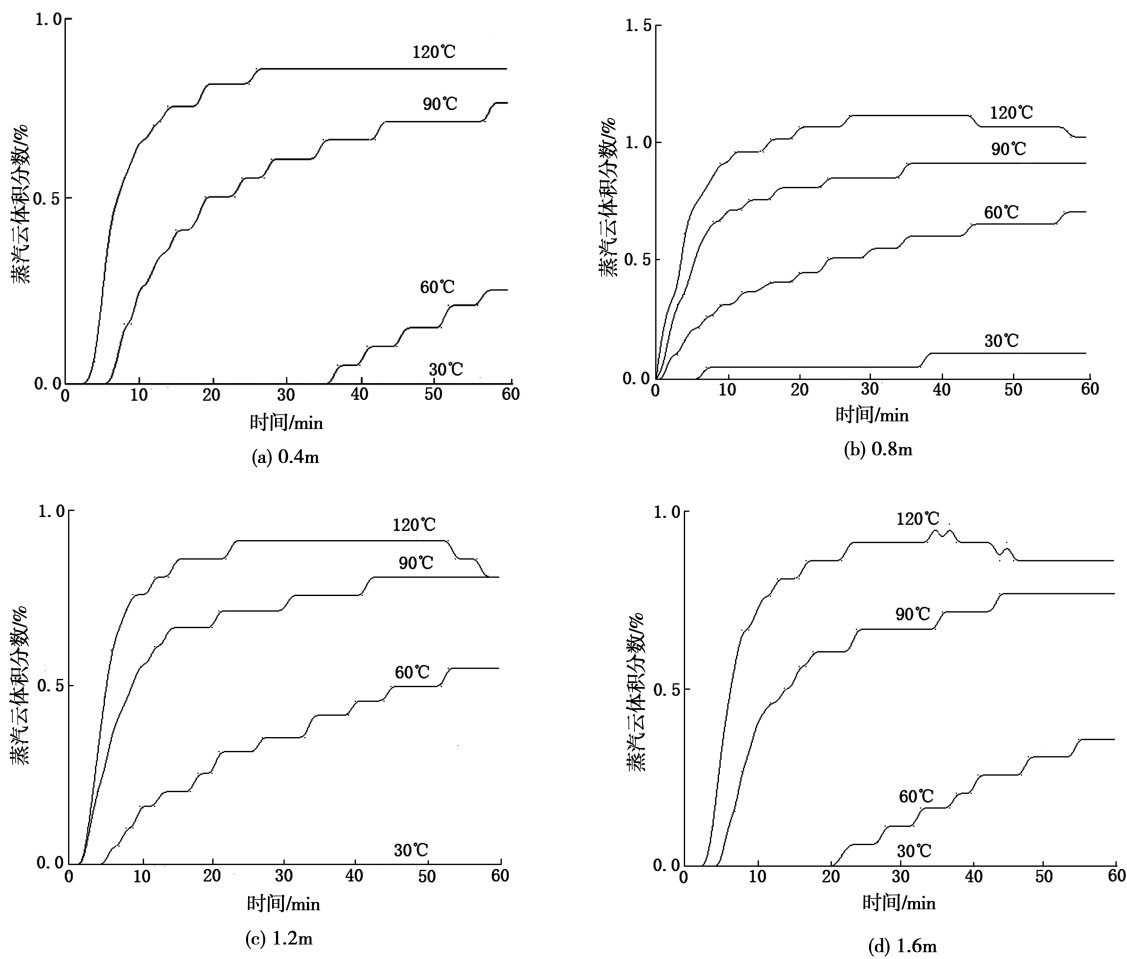


图 2 蒸汽云读数随时间之间的关系

Fig. 2 Relationship between vapor cloud concentration and time

## 2.2 蒸汽云的扩散分布

不同高度处蒸汽云体积分数与柴油温度之间的变化关系如图 3 所示。

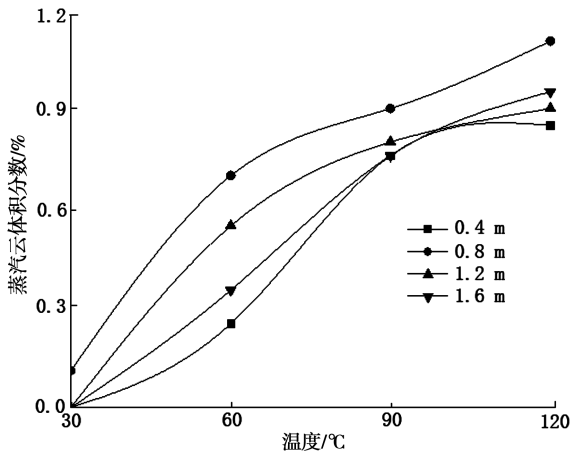


图 3 蒸汽云体积分数与柴油温度之间的关系

Fig. 3 Relationship between vapor cloud concentration and temperature

由图 3 可知, 相对稳定状态时蒸汽云体积分数值与柴油温度呈对数关系:

$$\varphi = A \ln(\theta) + B \quad (1)$$

式中:  $\varphi$ —蒸汽云体积分数, %;  $A, B$ —回归方程特征系数,  $A=0.6713, B=-0.0642$ ; 0.8m 处  $A=0.7329, B=0.2025$ ; 1.2m 处  $A=0.6985, B=0.0384$ ; 1.6m 处  $A=0.6785, B=-0.0403$ ;  $\theta$ —柴油的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。由此可知, 距液面上方 0.8m 处蒸汽云体积分数随着温度的升高而迅速增加, 其次分别距液面上方 1.2、1.6m 处蒸汽云体积分数随温度的增加变化趋势逐渐平缓, 0.4m 处变化缓慢。

当柴油温度为 30、60、90、120 $^{\circ}\text{C}$  时, 距液面上 0.8m 左右处蒸汽云体积分数始终处于最大值, 即 0.8m 左右为易爆敏感区, 此区域蒸汽云体积分数最先达到爆炸限, 如图 4 所示。

由图 4 可见, 距液面上方各高处, 蒸汽云体积分数值随着温度的升高而增加, 并且在 0.8m 处值

最大,当气液两相流达到相对稳定状态(动态平衡)<sup>[5]</sup>以后,均匀向两侧扩散;距液面上方 0.4m 处蒸汽云扩散受环境温度、柴油温度等因素的影响,同时液面距液面上方 0.4m 处之间温差相对较大,发生热传递,进而出现热绕流效应<sup>[6]</sup>,纵向流为主,横向流为辅,进而距液面上方 0.4m 处值最小;由于受湍流<sup>[7-8]</sup>的影响,并且此柴油蒸汽云扩散模型属于热重气云扩散模型<sup>[9]</sup>,故在距液面上方 0.8m 处蒸汽云体积分数最先达到最大值。

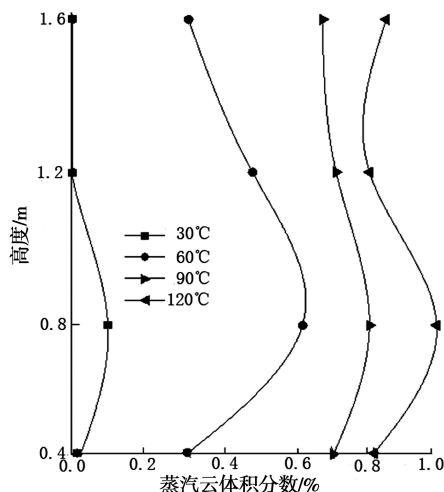


图 4 距液面上方高度与蒸汽云体积分数之间的关系

Fig. 4 Relationship between the height above the diesel and the concentration

柴油爆炸下限为 0.6%,上限为 7.5%<sup>[10]</sup>。0.8m 左右蒸汽云体积分数达到爆炸限的时间与柴油温度的关系曲线,如图 5 所示。

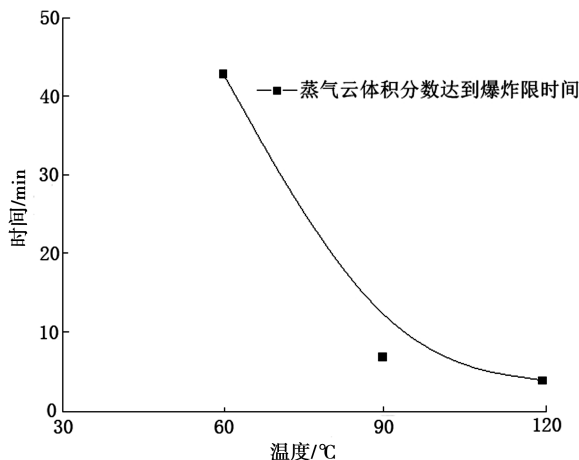


图 5 蒸汽云体积分数达到爆炸限的时间与温度之间的关系

Fig. 5 Relationship between time of reaching the explosion limit and temperature

有图 5 可知,0.8m 处蒸汽云体积分数达到爆炸限的时间与柴油温度呈指数关系:

$$t = A e^{B\theta} \quad (2)$$

式中:  $t$ —蒸汽云达到爆炸限的时间, min;  $A$ ,  $B$ —回归方程特征系数(本实验条件下  $A = 114.36$ ,  $B = -1.18475$ )。

### 3 结 论

通过试验结果可知:①蒸汽云扩散稳定后,蒸汽云体积分数随柴油温度的增加而增加,呈对数关系,并且 0.8m 左右体积分数始终最大,其区域为爆炸敏感区;②预混塔中蒸汽云扩散过程中发生热传递,在距液面 0.8m 和 1.2m 左右现象明显,使此区域蒸汽云体积分数相差较大,发生湍流作用,在 0.8m 处,当气液两相流达到相对稳定状态以后,均匀向两侧扩散;③蒸汽云体积分数达到爆炸限所需要的时间随温度的升高而减少。

从本实验过程及结果来看:①在易爆敏感区 0.8m 左右,可以为油罐区柴油泄漏发生火灾爆炸提供预警和指导作用;②根据柴油温度可以预测蒸汽云达到爆炸限的时间和空间,及时采取降低温度、减小泄漏面等降低蒸汽云体积分数,控制事故发生,该方法经过了试验验证,在理论上是可行的;③在目前还没有较好的方法可以及时预测液体泄漏发生后的蒸汽云体积分数,所以该方法具有良好的发展前景和社会利用价值。

### 参考文献:

- [1] 胡新义. 油库火灾爆炸安全综合评价研究 [J]. 西部探矿工程, 2005, 16 (9): 235 - 237.
- [2] 项小强, 戴联双, 曹涛, 等. 输油管道泄漏液池的蒸汽云扩散模型 [J]. 油气储运, 2011, 30 (5): 334 - 336.
- [3] 张网, 吕东, 王婕. 蒸汽云爆炸后果预测模型的比较研究 [J]. 工业安全与环保, 2010, 36 (4): 48 - 50.
- [4] 甄亮, 狄建华. 码头油品泄漏扩散事故危险危害评价 [J]. 工业安全与环保, 2005, 31 (10): 35 - 37.
- [5] 许世海, 熊云, 刘晓. 液体燃料的性质及应用 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- [6] 过曾远, 布位红, 张冠忠. 流动系统中的热阻力和热绕流现象 [J]. 工程热物理学报, 1985, 6 (2): 160 - 165.
- [7] Daniel A Crowl. 化工过程安全理论及应用 [M]. 蒋军成, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [8] 邵辉, 施志荣, 朱其良, 等. 化工重大泄漏事故扩散过程的模拟研究 [J]. 江苏工业学院学报, 2006, 18 (2): 26 - 29.
- [9] 张兴凯, 王秀杰. 静风环境热重气体行为模式分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1 (5): 8 - 11.
- [10] 张荣, 张晓东. 危险化学品安全技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.