

文章编号: 1000-8241 (2011) 04-0308-04

立式储罐液体泄漏过程的模拟实验

周超 王志荣

(南京工业大学城市建设与安全工程学院, 江苏南京 210009)

周超等. 立式储罐液体泄漏过程的模拟实验. 油气储运, 2011, 30(4): 308-311.

摘要: 以液体储罐的孔洞泄漏模式为研究对象, 设定泄漏时压力保持不变, 建立液体泄漏模型。通过实验模拟圆柱形立式储罐液体的泄漏过程, 分析泄漏量、质量泄漏速率和液面高度与泄漏时间的关系。结果表明: 单孔泄漏时, 随着泄漏时间的延长, 液面高度降低, 泄漏量增加, 质量泄漏速率降低, 且液体泄漏量、液面高度和质量泄漏速率的变化速率随泄漏时间的延长逐渐减小; 泄漏量和质量泄漏速率的实验值与理论计算值相近; 当量泄漏面积相等时, 两个小孔同时泄漏的泄漏量近似等于单孔泄漏量。研究结果可为危险性液体储罐泄漏事故的应急救援和事故后果的定量分析提供依据。

关键词: 立式储罐; 液体泄漏; 泄漏系数; 当量面积; 模拟实验

中图分类号: TE821

文献标识码: A

在化工生产、储存过程中, 危险性液体储罐泄漏是导致爆炸、火灾和中毒事故的主要原因之一^[1]。频繁发生的恶性泄漏爆炸事故所带来的严重后果超过了事故本身, 严重地影响化工行业的健康发展, 威胁公众的人身安全^[2-4]。在液体储罐泄漏研究方面, Daniel 等^[5]针对不同泄漏物质的存储状态、存储容器和泄漏形式, 给出了相应的泄漏源模型。由于通过大型现场试验研究储罐液体泄漏规律的周期长, 耗费多, 且危险性较大, 因此以往的研究主要侧重于理论分析^[6-8]。

对常见的立式常压储罐液体泄漏过程进行模拟实验研究, 分析泄漏发生、发展的动态过程, 提供物质的泄漏速率、泄漏量等定量化信息, 可为事故后果的定量分析和事故应急救援提供基础数据和科学依据^[9]。

1 液体泄漏模型和泄漏系数

1.1 液体泄漏模型

以液体储罐的孔洞泄漏模式为研究对象, 设定泄漏时压力保持不变, 泄漏介质为液体, 不发生两相流, 且液体稳定, 罐体不受外力作用。

小孔(面积为 A) 位于液面以下 h_L 处, 储罐内液体表面的表压为 p_g , 外界表压为 0, 液体流速为 0, 则储罐的瞬时质量流量:

$$Q_m = \rho u A = \rho A C_0 \sqrt{2(p_g - p) / \rho + 2 g h_L} \quad (1)$$

式中: Q_m 为液体质量泄漏速率, kg/s; C_0 为液体泄漏系数; A 为裂口面积, m^2 ; ρ 为泄漏液体的密度, kg/m^3 ; p_g 为容器内的介质压力, Pa; p 为环境压力, Pa; h_L 为裂口之上的液面高度, m。

常压液体储罐的内外压一致, 因此有: $p_g - p = 0$, 于是上式可变为:

$$Q_m = \rho u A = \rho A C_0 \sqrt{2 g h_L} \quad (2)$$

随着储罐逐渐变空, 液体高度减小, 泄漏速率和储罐中液体的质量流量也随之减少。假设液体表面的表压 p_g 为常数, 对于恒定截面积为 A_L 、初始高度为 h_{L0} 的储罐, 在 t 时刻, 储罐的质量流量:

$$Q_m = \rho C_0 A_L \sqrt{2(p_g - p) / \rho + 2 g h_{L0}} - \rho g C_0^2 A^2 t / A_L \quad (3)$$

式(3)等号右边第1项是 $h_L = h_{L0}$ 时储罐的初始质量流量^[5]。在 t 时刻, 储罐泄漏孔之上的液面高度:

$$h_L = h_{L0} - \frac{C_0 A t}{A_L} \sqrt{2 g h_{L0}} + \frac{g}{2} \left(\frac{C_0 A}{A_L} t \right)^2 \quad (4)$$

由式(2)、式(4)可得, t 时刻泄漏的液体质量:

$$m = \rho A C_0 t \sqrt{2 g h_{L0}} + \frac{1}{2} \rho g C_0^2 A^2 t^2 / A_L \quad (5)$$

1.2 泄漏系数

若泄漏容器的裂口规则, 且裂口尺寸及与泄漏物质有关的热力学、物理化学性质和参数已知, 则可根据

流体力学中的有关方程式计算泄漏量;若裂口不规则,则可采取等效尺寸代替;若泄漏过程中存在压力变化等情况,则往往采用经验公式计算^[10]。

以下假设液体泄漏口为规则形状,泄漏过程无压力变化开展实验研究。储罐的泄漏孔洞形状不同,其泄漏系数也不同(表1)。

表1 常压立式储罐液体泄漏系数

雷诺数	圆形(多边形)	三角形	长方形
> 100	0.65	0.60	0.55
≤ 100	0.50	0.45	0.40

2 实验部分

2.1 实验装置

在模拟实验中,圆柱形立式储罐高为1 m,直径为0.3 m。罐体开有6个圆形泄漏孔(表2),其中3号孔的面积为1号孔与2号孔的面积之和,6号孔的面积为4号孔与5号孔的面积之和。罐顶开有小孔,保证罐内压力不变。用于泄漏实验的液体通过所开的孔洞注入,实验过程中未用的孔洞用橡胶塞塞住。

表2 储罐液体泄漏系数

序号	直径/cm	距罐体底面高度/cm
1号孔	1.00	0
2号孔	2.00	0
3号孔	2.24	0
4号孔	1.00	50
5号孔	2.00	50
6号孔	2.24	50

2.2 实验内容

2.2.1 实验介质

考虑到安全、环保及费用问题,由于水在20℃时的粘度与工业上常见危险性液体的粘度相近,因此选用水代替危险性液体作为实验介质。

2.2.2 实验过程

模拟储罐的充装系数为80%,即液面初始高度为80 cm。实验步骤:分别针对每个单孔进行泄漏实验,每隔5 s收集1次泄漏液体,并称量其质量,同时测量液位下降的高度,计算液体泄漏的瞬时速率,研究罐体存在不同直径孔洞情况下的液体泄漏规律,并将实验得出的泄漏系数与理论值进行比较;分别测量同一高度上,两个小孔同时发生泄漏时的总泄漏量和瞬时泄漏速率,并与当量面积的大孔泄漏情况进行比较。

3 实验结果与分析

3.1 液体泄漏基本规律

分析液体泄漏量、液面高度和质量泄漏速率随时间的变化情况(图1、图2和图3),随着泄漏时间的延长,罐内液面高度降低,泄漏量增加,质量泄漏速率降低,且液体泄漏量、液面高度和质量泄漏速率的变化速率随泄漏时间的延长逐渐减小。因此,液体储罐一旦发生泄漏,应立即进行有效堵漏,防止液体快速泄漏。

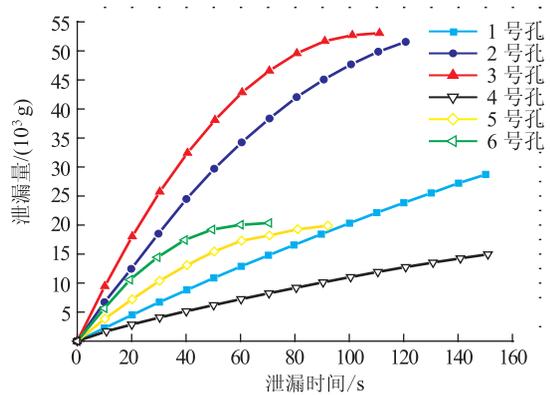


图1 液体储罐不同泄漏孔泄漏量随时间的变化

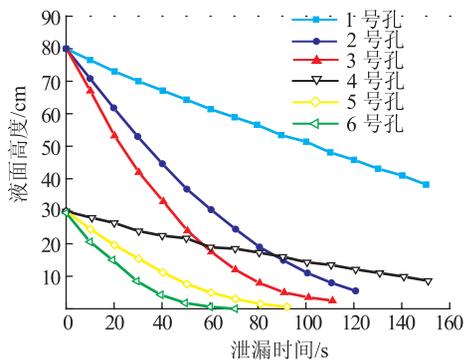


图2 液体储罐不同泄漏孔泄漏液面高度随时间的变化

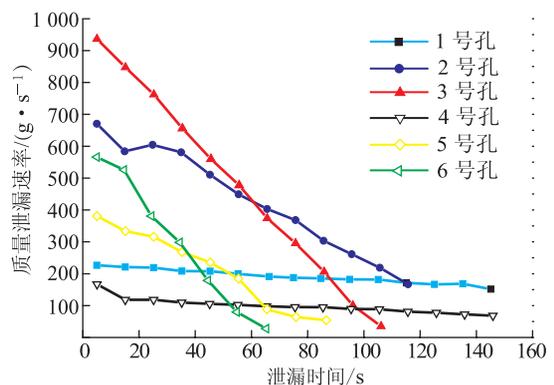
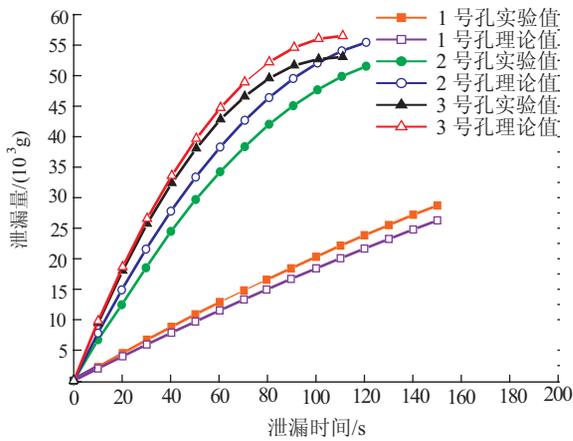


图3 液体储罐不同孔泄漏质量泄漏速率随时间的变化

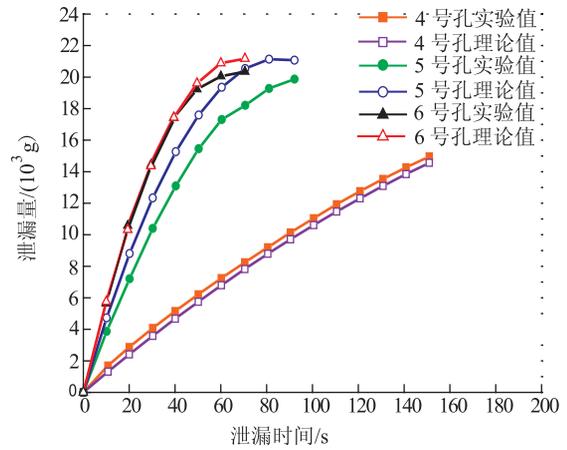
3.2 实验值与理论值的比较

将由模拟立式液体储罐获得的泄漏量和质量泄漏

速率的实验值与理论计算值进行比较,结果表明二者差异很小(图4、图5)。

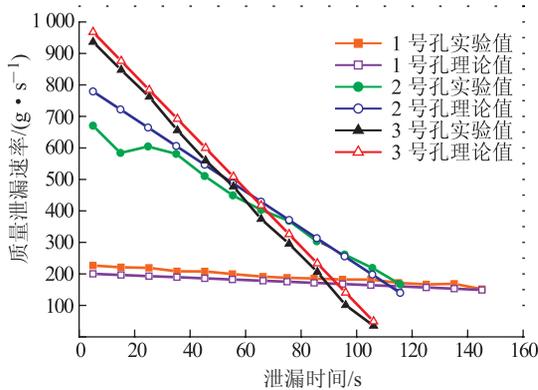


(a) 1~3号孔

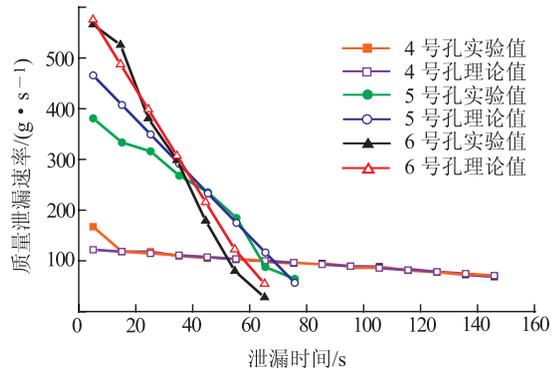


(b) 4~6号孔

图4 液体储罐不同泄漏孔泄漏量的实验值与理论值的比较



(a) 1~3号孔



(b) 4~6号孔

图5 液体储罐不同泄漏孔质量泄漏速率的实验值与理论值的比较

3.3 泄漏系数的校核

根据式(3),计算实验中不同泄漏孔在泄漏过程中的泄漏系数值(表3)。由雷诺数的计算结果可知,实验过程中不同泄漏孔泄漏时的雷诺数均大于100。对泄漏系数的实验值和理论计算值进行比较,发现实验值比理论计算值偏大,说明理论模型中液体泄漏系数的取值相对保守。

表3 液体储罐不同泄漏孔的泄漏系数

	1号孔	2号孔	3号孔	4号孔	5号孔	6号孔
实验值	0.78	0.75	0.67	0.79	0.64	0.68
理论值	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65

3.4 当量面积泄漏情况的比较

考察液体储罐不同高度上两个小孔同时泄漏与当

量面积大孔单独泄漏两种情况下,泄漏量随时间的变化(图6),结果表明:相同泄漏时间两个小孔的泄漏量与当量面积大孔的泄漏量近似相等。

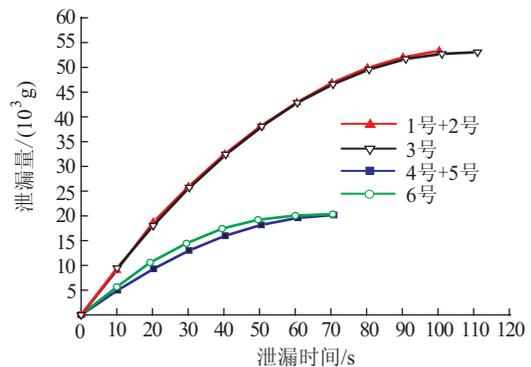


图6 当量面积相等时泄漏量的比较

4 结论

(1) 液体储罐泄漏时,随着泄漏时间的延长,泄漏量、质量泄漏速率、液面高度的变化速率逐渐减小。

(2) 液体储罐的泄漏量、质量泄漏速率的实验值与理论计算值接近;液体泄漏系数的实验值比理论计算值偏大,说明理论模型中液体泄漏系数的取值相对保守。

(3) 当量泄漏面积相等时,两个小孔同时泄漏的泄漏量近似等于单孔的泄漏量。

参考文献:

- [1] 王岩. 容器设备破裂泄漏危险性研究[J]. 武警学院学报, 2008, 24(6): 23-26.
- [2] Pan Xuhai, Jiang Juncheng, Wang Zhirong. Numerical analysis of diffusion process of flammable and toxic gases discharging accident[C]. Progress in Safety Science and Technology, Beijing 2000.
- [3] 潘旭海, 蒋军成. 重(特)大泄漏事故统计分析 & 事故模式研究[J]. 化学工业与工程, 2002, 19(3): 248-252.
- [4] 张瑞华, 陈国华, 张文海, 等. 油库储罐泄漏危险程度定量模拟

评价应用研究[J]. 油气储运, 2004, 23(10): 4-7.

- [5] Daniel A Crowl, Joseph F Louvar. Chemical process safety-fundamentals with application[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1990: 109-113.
- [6] 潘越, 郭敬博. 国外大型浮顶储罐泄漏性实验技术探讨[J]. 石油工程建设, 2009, 35(5): 64-65.
- [7] 潘旭海, 蒋军成. 事故泄漏源模型研究 & 分析[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(1): 105-110.
- [8] 宋贤生, 刘全桢, 官宏. 外浮顶储罐系统泄漏源模型研究 & 分析[J]. 石油化工安全环保技术, 2009, 25(2): 26-30.
- [9] 宇德明. 易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评估[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000: 18-20.
- [10] 蒋军成. 事故调查 & 分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 216.

(收稿日期: 2010-08-19)

基金项目: 江苏省自然科学基金项目“受限空间危险性气体泄漏扩散过程及其动力学机理研究”, BK2007587。

作者简介: 周超, 在读硕士生, 1986年生, 2008年毕业于南京工业大学安全工程专业, 现主要从事工业装置与设备安全性研究。
电话: 13915999493; Email: zhouchao_311@126.com

(上接第315页)

金属油罐存在明显的罐顶太阳能效应。阳光照射后, 罐顶温度逐渐由 22 °C 升高至 54 °C, 太阳落后, 温度由 37 °C 降至 26 °C, 且 20:00 至次日 6:00 温差仅为 4 °C。罐壁全天温差不超过 2 °C。油品温度在 24 h 内基本不变, 仅随环境温度而变化。

由于油气空间温度变化主要受油罐顶部太阳辐射的影响, 罐壁全天温差不大, 因此可以采用在罐顶涂刷高效能的太阳反射涂料(罐壁仍为普通涂料)或铺设反射隔热板的方法, 降低立式固定顶金属油罐内油品的“小呼吸”蒸发损耗。

参考文献:

- [1] 孙晓春. 塔里木油田固定顶储罐油气损耗特点分析[J]. 石油规划设计, 2004, 15(4): 31-33.

- [2] 张灯贵, 王英波, 鲍时付, 等. 原油库的油品损耗及其控制[J]. 油气储运, 2005, 24(3): 46-48.
- [3] 华敏, 潘旭海. 太阳辐射对纯液体蒸发行为影响的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2007, 33(5): 1-3.
- [4] 郭光臣, 董文兰, 张志廉. 油库设计 & 管理[M]. 山东: 石油大学出版社, 1991: 277-287.
- [5] 童仲轩. 高效太阳热反射涂料降低油品蒸发损耗的研究[J]. 石油商技, 2004, 22(5): 35-39.

(收稿日期: 2009-12-30)

作者简介: 杨宏伟, 讲师, 1974年生, 1994年毕业于南京航空航天大学材料科学与工程系, 现主要从事油品分析及复合材料性能研究 & 应用方面的工作。

电话: 13852443866; Email: yhw7167@163.com