

# 液化石油气储罐快速降压过程的初步模型

林文胜\* 顾安忠 俞永华

(上海交通大学制冷与低温工程研究所)

林文胜 顾安忠等:液化石油气储罐快速降压过程的初步模型,油气储运,2000,19(4) 35~38。

**摘 要** 对液化石油气容器在气相壁上出现裂口后引发的快速降压过程建立了初步模型。分析了液体中气泡生成过程,并按气泡半径是否超过临界半径,分两个阶段分别讨论了气相和液相空间各物理量的变化过程。通过具体计算实例,最终得出了过程中可能发生压力下降然后急剧上升这一现象的结论,并分析了初始温度(初始压力)、初始充注量、热流密度、裂缝面积对于上述物理过程的影响。

**主题词** 液化石油气 储罐 降压 数学模型 计算 分析 方法

## 一、前 言

液化石油气(LPG)通常以加压状态储存在储罐中。当储罐由于某种原因出现裂口时,罐内压力会迅速下降,下降中产生的压力波以声速向液面方向传播。当降压波进入液体后,原来处于饱和状态的液体出现过热,使部分液体变为气泡,导致液体膨胀,液面上升,并向上压缩气相,使气体压力大幅回升,可能引发爆炸。与此同时,液面上升的速度与相应的动能都很大,以此冲击容器的顶部,也可引发容器的爆炸。此类爆炸是由于介质相变引起的物理过程,一般称为蒸气爆炸<sup>[1~3]</sup>。液化石油气的蒸气爆炸曾在国内外发生过多起并造成重大损失。为此,应分析容器蒸气空间的壁面出现裂口时介质的快速降压热力过程,为今后的试验研究及提出预防措施提供一个估计的基础。

## 二、快速降压过程数理模型

将容器做为一直径圆柱体进行研究,对容器顶部突然出现面积为 $S_0$ 的小孔的现象进行初步分析,并对系统做如下假设。

(1)不考虑压力波的传播速度,即系统内介质在任一时刻各点压力相等;

(2)不考虑热流传播速度,气相空间和液相空间内各点分别具有相同的温度;

(3)假设LPG只包含纯净的丙烷;

(4)气相空间的气体为理想气体。

整个分析过程分为两个阶段。在第一阶段,气泡半径小于临界半径,可以不考虑气泡的运动。在第二阶段,气泡半径大于临界半径,必须考虑气泡的运动。这样划分是因为小于临界半径的气泡核还不是稳定的气泡,自身随时可能消亡;而气泡半径大于临界半径后则会生长成较大的气泡,这时气泡的运动就不能忽略了。

### 1、液相气泡生成过程

一般液体内部都包含一定量的气泡核,只要气泡核的半径大于某一临界半径 $R_c$ ,当液体过热时就会生长成较大的气泡。临界半径为:

$$R_c = 2\sigma/p_1 \quad (1)$$

当降压波传播到液体空间内时,原有的气泡将增大。气泡增大的机理受力学和传热两种因素支配。单纯的力学原因可从求解气泡的动量方程中得到解释。在简化计算中,气泡半径随时间 $t$ 的变化规律可用式(2)求解<sup>[1,2]</sup>:

\* 200030,上海市(20)华山路1954号;电话:(021)62932602。

$$R_{in} = 1.0929 \sqrt{\Delta p / \rho_l t} \quad (2)$$

传热原因是由于液体压力下降后,过热的液体向气泡传输热量与质量,进而促进气泡增大。目前关于过热液体向气泡的传热过程尚未有成熟的模型,因而常把包围气泡的液体作为半无穷大物体,按非稳态导热计算得到简化的模型:

$$R_l = 2 \Delta T \sqrt{3 \rho_l c_{pl} k t} / \rho_v r \quad (3)$$

式中  $r$ ——蒸发潜热。

液体过热度达到一定的极限后,液体内会产生新的气泡,其生长率从式(4)中求得<sup>[4]</sup>:

$$J = N \sqrt{2 \sigma / \pi M B} \exp(-16 \pi \sigma^3 / 3 k T \Delta p^2) \quad (4)$$

式中  $\sigma$ ——液体表面张力;

$N$ ——阿伏加德罗常数,  $N = 6.023 \times 10^{23}$  mol;

$k$ ——玻尔兹曼常数,  $k = 1.380 \times 10^{-23}$  J/K;

$M$ ——单个分子质量;

$B$ ——常数。

## 2、 第一阶段

### (1)气相空间

这一阶段实际持续的时间很短,此时压降还很小,气泡尚未生成,液相蒸发可忽略,气相的质量变化为:

$$\dot{m}_v = dm_v/dt = -\rho_v S_0 v \quad (5)$$

式中  $v$ ——气体流出速度,可取为气相中的声速。

$$v = \sqrt{dp/d\rho} = \sqrt{kRT} \quad (6)$$

假定在气相空间由外界传入的热流为  $q_v$ ,则气相的能量变化为:

$$dQ_v/dt = q_v - \dot{m}_v h_v = m_v c_{pv} dT_v/dt \quad (7)$$

在此阶段,可以认为液相没有气体进入气相,则气相体积  $V_v$  和液相体积  $V_l$  均不变。气体密度和压力则在不断变化:

$$\rho_v = m_v/V_v \quad (8)$$

$$p_v = \rho_v RT_v \quad (9)$$

### (2)液相空间

液相的质量变化  $dm_l/dt=0$ ,能量变化为:

$$q_l = dQ_l/dt = m_l c_{pl} dT_l/dt \quad (10)$$

此阶段液体密度不变,液体压力  $p_l = p_v$ 。

## 3、 第二阶段

### (1)气相空间

当气泡半径大于  $R_c$  时,过程进入第二阶段。此时气泡的运动不能忽略,但假定气泡为均匀分布。气

相的质量变化为:

$$\dot{m}_v = dm_v/dt = -\rho_v S_0 v + \dot{m}_{lv} \quad (11)$$

式中  $\dot{m}_{lv}$ ——从液相传入气相的质量流率<sup>[5]</sup>。

$$\dot{m}_{lv} = \rho_{vs} u_b \alpha A \quad (12)$$

式中  $\rho_{vs}$ ——饱和蒸气密度;

$\alpha$ ——空隙率;

$A$ ——筒体横截面积;

$c$ ——系数,取 1.40~1.53。

气泡离开液面的速度:

$$u_b = c [g \sigma (\rho_l - \rho_v) / \rho_l]^{0.25} \quad (13)$$

气相能量变化:

$$\begin{aligned} dQ_v/dt &= q_v - \dot{m}_v h_v + \dot{m}_{lv} h_v \\ &= m_v c_{pv} dT_v/dt \end{aligned} \quad (14)$$

### (2)液相空间

液相的质量变化为:

$$dm_l/dt = \dot{m}_{lv} \quad (15)$$

液相质量由两部分组成:

$$m_l = \alpha \rho_{vs} V_l + (1 - \alpha) \rho_l V_l \quad (16)$$

液相能量变化:

$$\begin{aligned} dQ_l/dt &= q_l - \dot{m}_{lv} h_v \\ &= m_l c_{pl} dT_l/dt \end{aligned} \quad (17)$$

液相体积变化:

$$dV_l/dt = 4 \pi R^3 J / 3 - u_b A \quad (18)$$

## 三、计算结果及分析

在建立了 LPG 容器快速降压热力过程的数学模型后,用一个典型算例进行定量说明。在典型算例中,初始条件为:初始温度  $T_0 = 293$  K,初始压力  $P_0 = 835706$  Pa ( $P_0$  为  $T_0$  温度下的饱和压力),气相热流  $q_v = 0$  W/m<sup>2</sup>,裂缝面积  $A = 100$  mm<sup>2</sup>,充注量  $x = 65\%$ 。容器为一个高 1 m、直径 20 cm 的圆柱体。

### 1、 容器内压力

图 1 表示容器内压力随时间的响应过程。从图 1 可以看出,在过程中压力下降到某一值后突然反弹,并且这一下降至反弹的过程有几个反复。当压力跃升到一个最大值后,虽然下降过程中也有反弹,但总的下降趋势不变。

造成突然反弹的原因是压力下降,过热度增大,有大量气泡产生。压力的增加来自两个方面,从液相进入气相的气体量超过从裂口流出的气体量,使气体质量增加;液面上升使气体体积减小。另外也存在

使压力降低的因素,即由于液体气化消耗能量,液体温度降低,过热度减小,对应饱和压力与气相压力之差亦减小,使气泡生成率下降,因此直至从液相进入气相的气体少于从裂口流出的气体量。两方面因素交替占据主导地位,故压力时增时减。虽然降压趋势最终占据上风,但出现的压力峰值则表明了这一过程的危险性。

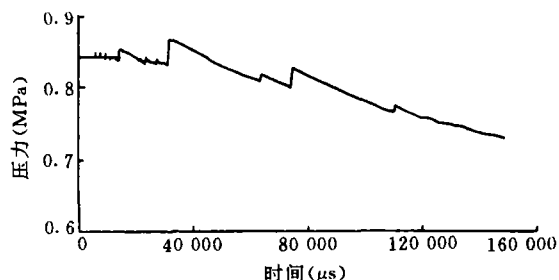


图1 压力随时间的响应曲线

## 2、液相空隙率

图2是液体内空隙率随时间的响应曲线。将图1和图2对照,可以清楚地看到,在空隙率出现激增的地方也恰好是压力发生反弹的地方。

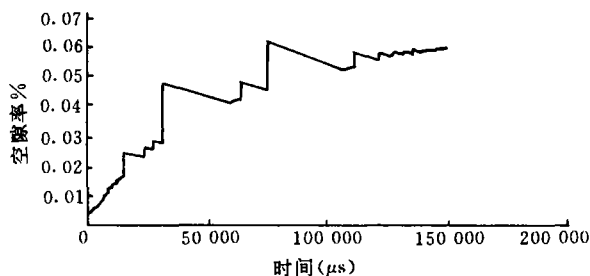


图2 空隙率变化过程

## 3、液面高度

图3是液面高度随时间的响应曲线。它的变化和空隙率的变化相互关联,反映了液相体积的变化。若将空隙率同液面高度的关系用图示出,可发现两者为近似线性关系。

## 4、液相温度

图4是液相温度随时间的响应曲线。由于设定热流为零,而过热的液体一直向气泡传输热量和质量,从而使气泡增大,因此液相温度一直下降。

## 5、初始条件的影响

计算表明,当初始温度(压力)降低后,将不会出现明显的压力跳跃,只是在过程的开端有一个微小

的上升,然后就一直下降。当初始温度(压力)升高后,压力跳跃很剧烈,并且可能出现因液面急剧上升而达到容器顶部的现象。当然,此时容器肯定会发生爆炸。可见,初始压力越高,产生的压力波动越大,可能产生的破坏也越大。

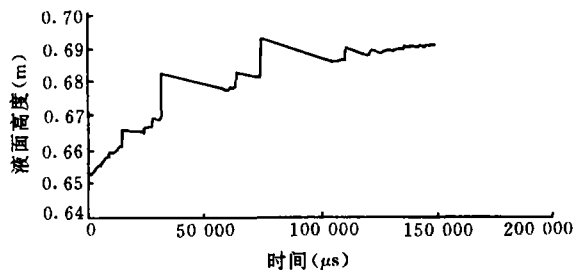


图3 液面高度变化过程

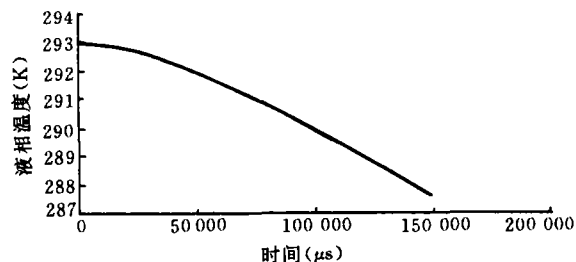


图4 液相温度变化过程

裂口面积的尺寸影响了裂口的排气流量,也间接影响了排气速度。计算表明,裂口面积越大,压力的波动越大,可能产生的破坏也越大。

通过比较,可以发现充注量越大,压力的波动越大,可能产生的破坏也越大。热流的存在使液相温度的下降过程变缓,如果热流足够大,液相温度还可能增大。显然,这是压力增加的因素,因而热流的存在将增大容器发生破坏的可能性。

## 四、结 论

(1)对处于饱和状态的LPG容器在气相壁上出现裂口后引发的快速降压过程提出了比较完整的物理数学模型。

(2)通过大量试算发现,LPG容器在出现裂口后可能出现压力下降然后急剧上升的现象,并可能引发蒸气爆炸。

(3)分析了初始温度(初始压力)、初始充注量、热流密度、裂缝面积对于上述物理过程的影响,并得出了一些趋势性的结论,对LPG的安全储存有一定

机械设备

## 气动旋转式吹灰器系统的技术应用

陈江波\*

(中石化管道储运公司胜利输油公司东营首站)

陈江波:气动旋转式吹灰器系统的技术应用,油气储运,2000,19(4) 38~40。

**摘 要** 介绍了气动旋转式吹灰器和 CKQ-Ⅱ 型吹灰控制器的结构、控制原理及在热媒炉上的应用,与电动吹灰器相比,气动旋转式吹灰器具有自动化程度高、吹灰器和控制器自成系统、可实现无人职守、控制过程稳定可靠、吹灰效果理想、操作灵活、维修方便等优点。可在各种加热炉、锅炉的吹扫系统中应用。

**主题词** 吹灰器 控制器 热效率 气动 应用

在加热炉运行过程中,排烟热损失是加热炉各项热损失中最重要的一项,降低排烟热损失(主要是降低排烟温度)是提高炉效的重要途径。东黄输油管道沿线 3 座输油泵站(即东营、寿光和丈岭)采用的是美国燃料工程公司(CE-NATCO)引进的热媒加热炉,其对流段的结构如图 1 所示。热媒管束表面和烟道内的积灰随着点炉时间的延长而增多,特别是改烧渣油后,积灰情况更加严重,影响了热媒与烟气之间的换热,大量的热随着高温烟气排入大气,炉效严重下降;同时积灰增加了烟气流动的阻力,使得运行条件日渐恶化,故热媒炉在运行期间定时吹灰就

非常必要。

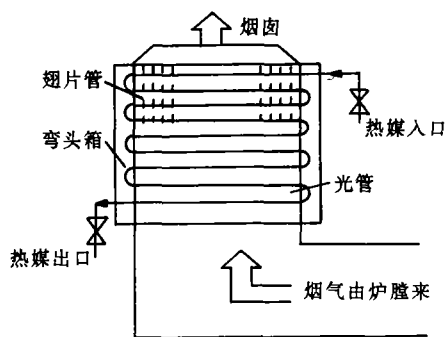


图 1 CE-NATCO 热媒炉对流段结构图

指导意义。

(4) 由于本模型是初步的和试探性的,因此更精细的模型有待进一步的试验和研究。

### 参 考 文 献

- 1, Venart, K. E. S. Sollows, K. Sumathipala, K. *et al*: Boiling liquid compressed bubble explosions experiments/models. ASME FED, 1993.
- 2, Yu, C. M. Venart, J. E. S. : The boiling liquid collapsed bubble explosion (BLCBE); a preliminary model, Journal of Hazardous Materials, 1996.

- 3, Chen, H-J. Lin, M-H. Chao, F-Y. : Thermal response model and thermal risk analysis for LPG storage, Journal of Chinese Institute of Chemical Engineers, 1998, 29(1).
- 4, Blander, M. Katz, J. L. : Bubble nucleation in liquids [J], AIChE Journal, 1975, 21 (5).
- 5, Sheppard, C. M. : Disengagement predictions via drift flux correlation vertical, horizontal and spherical vessels, In Journal of 26 th Annual Loss Prevention Symposium, New Orleans, USA, 1992.

(收稿日期:1999-10-18)

编辑:刘春阳