

# 池火环境下液化石油气储罐响应规律及影响因素

毕明树 赵博 车威  
大连理工大学化工学院

毕明树等.池火环境下液化石油气储罐响应规律及影响因素.天然气工业,2010,30(10):100-102.

**摘要** 有关液化石油气(LPG)储罐火灾爆炸的研究,国内外研究者对池火环境下 LPG 储罐的热响应规律开展了大量的实验研究和数值模拟工作,但研究结果尚难以给出通用规律。为此,利用 FLUENT 软件建立了池火灾环境下 LPG 储罐热响应模型,以英国 HSE 管理局现场实验的卧式 LPG 储罐为例进行了三维数值模拟,计算结果与实验实测结果吻合较好。数值模拟结果表明:①池火环境下储罐内介质温度分布总体上呈现上部高下部低的趋势,气相及液相区的温度分层明显;②储罐内介质压力上升速率随着充装率的增大而增大;③LPG 储罐失效是由介质温度升高导致的储罐内介质压力升高和气相区壁温升高导致材料强度下降共同引起的。

**关键词** 液化石油气 储罐 池火 数值模拟 热响应 影响因素 充装率

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.10.024

外部高温环境是引发 LPG 储罐爆炸的主要原因。根据火焰对储罐的包围程度和加热的均匀性,可将外部高温环境分为喷射火和池火两种情况。火焰向储罐壁传热的方式为对流和热辐射。池火情况下对流传热系数相对较低,热辐射是主要的传热方式。研究火灾环境下 LPG 储罐内部的热响应规律是分析、控制 LPG 储罐爆炸事故的前提<sup>[1]</sup>。

国内外研究者对池火环境下 LPG 储罐的热响应规律开展了大量的实验研究和数值模拟工作。淮秀兰<sup>[2]</sup>等人将储罐内部划分为蒸汽区、分层区、边界层区、过冷液体区和底部不稳定加热区等 5 个区进行数值模拟,Eulalia Planas-Cuchi<sup>[3]</sup>研究了随时间和空间(周向)变化的池火灾温度和热辐射模型,邢志祥等人利用数值模拟软件 LPGTRS 分析了初始充装率、火焰温度、安全阀、保温层、储罐大小等因素对 LPG 储罐热响应的影响<sup>[4]</sup>。有关这方面的工作仍然是一些特定工况下的研究结果,尚难以给出通用规律。火灾环境下 LPG 储罐火灾爆炸灾害的防治理论与技术仍然是学术界研究的热点。本文拟通过建立合理的物理模型和数学模型,用 FLUENT 软件对池火环境下的 LPG 储

罐热响应规律进行三维数值模拟计算,分析池火环境下 LPG 储罐的热响应规律。

## 1 模拟对象与模型处理

### 1.1 模拟对象

英国 HSE(Health & Safety Executive)管理局进行了 LPG 储罐遭受池火的实验。所用储罐直径为 1 694 mm,体积为 10.25 m<sup>3</sup>,具体参数见表 1。

表 1 实验参数表

参数	数值	参数	数值
储罐外径	1 694 mm	储罐壁厚度	11.58 mm
储罐长度	4 000 mm	内部介质	丙烷
初始温度	7 °C	液相体积率	72%
安全阀开启压力	1.41 MPa	储罐壁材料比热	502.4 J/(kg·K)
储罐壁材料密度	7 818 kg/m <sup>3</sup>	储罐壁材料热导率	54.26 W/(m·K)

### 1.2 网格划分

利用 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 建立了储罐模型和网格划分。根据圆筒形储罐的对称性,取圆

**基金项目** 博士点基金资助课题“液化天然气储罐受热爆炸机制研究”(编号:20090041110037);辽宁省高校重点实验室基金(编号:20060129)。

**作者简介** 毕明树,1962年生,教授,博士生导师,博士;主要从事化工过程机械和安全技术及工程方面的研究工作。地址:(116011)辽宁省大连市英华街 52 号。电话:(0411)84708711。E-mail:bimsh@dut.edu.cn

筒形储罐的 1/4,建立网格,圆筒部分采用非结构化六面体网格,固体区域采用结构化六面体网格,网格数量约 120 000。

### 1.3 边界条件

LPG 储罐受到外部池火作用时,火焰与储罐壁通过对流和热辐射两种方式进行传热,其中热辐射传热是主要的传热方式,对流传热系数很小。壁面的热边界条件选用对流和热辐射混合作用。热辐射温度为火焰温度,对流传热系数<sup>[5]</sup>按下式计算:

$$h_c = 4.6 \times 5.678(2.338/D)^{0.195}$$

式中  $h_c$  为对流传热系数; $D$  为储罐直径,m。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 有效性验证

图 1、2 所示分别为储罐内部压力响应过程和储罐壁温响应过程。由图 1 可见,池火灾作用下,储罐压力上升速度比较慢,原因在于均匀的池火与储罐外壁间的对流换热系数很小,主要依靠热辐射作用传热;在 300 s 左右,储罐内部压力上升至安全阀的开启值 1.41 MPa。图 2 显示储罐最大壁温的上升速度逐渐加快。总体而言,图 1、2 显示的模拟值与实验值基本吻合,压力响应和壁温响应的最大误差分别为 19% 和 14.3% ,

偏差产生的主要原因可能在于简化的火焰辐射模型难以与真实火焰对储罐外壁的加热条件达到完全一致。

图 3、4 分别为气相介质和液相介质的温度响应过程,计算值与实验值吻合较好,最大误差分别为 4.5% 和 4%。其中,气相取距离储罐顶部 50 mm 处的介质温度,液相取距离储罐底部 200 mm 处介质的温度。由图 3 和图 4 对比可知,液相介质的温度升高较气相介质缓慢,300 s 内气相介质和液相介质的温度分别升高了 63 K 和 11 K。原因在于一方面蒸汽的比热容远小于液相的<sup>[2]</sup>;另一方面液相介质过热后会通过相变将热量转化到气相,使得液相介质本身储存的热量较少。

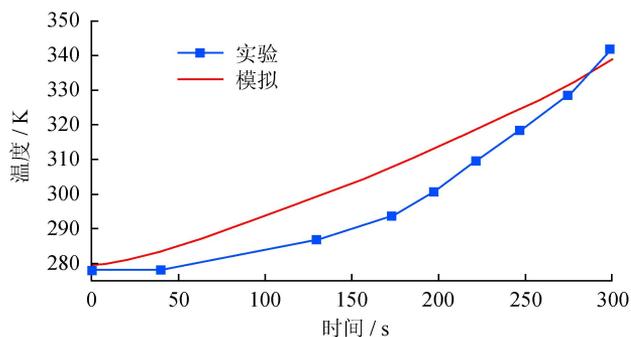


图 3 储罐内气相介质温度图

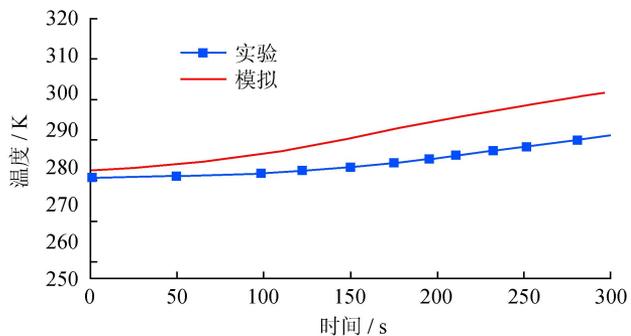


图 4 储罐内液相介质温度图

### 2.2 温度场分布

图 5 所示为储罐内不同高度处介质的温度响应规律。可以看出,池火作用下储罐内部存在热分层现象,温度总体呈现上高下低的趋势。本文所模拟的 LPG 储罐的初始充装率为 72%,对应的气液分界面位于距储罐顶部 540 mm 处。可见,气相温度明显高于液相,且距离液面越远气相温度越高,说明气相除了通过相变吸热外,还通过气相壁面吸收辐射热量;另外,在距离储罐顶部 1 350 mm 以下的液相区,介质温度降低明显,说明过冷液体区与液相分层区<sup>[2]</sup>的分界面可能

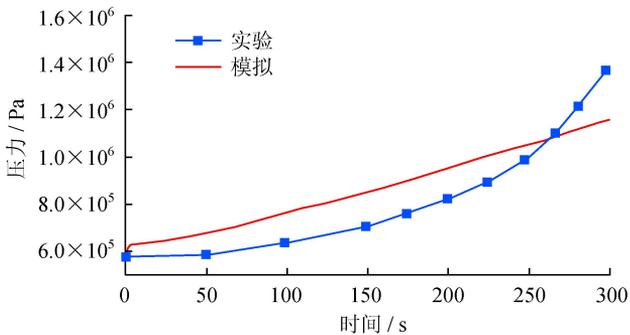


图 1 储罐压力响应图

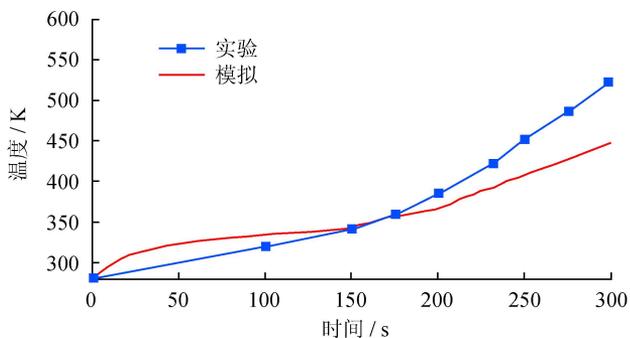


图 2 储罐最大壁温响应图

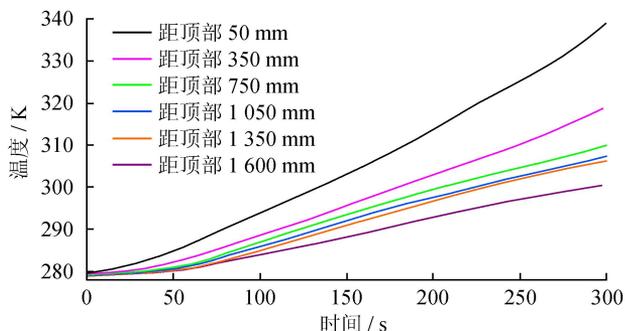


图 5 储罐内部不同高度处介质温度响应图

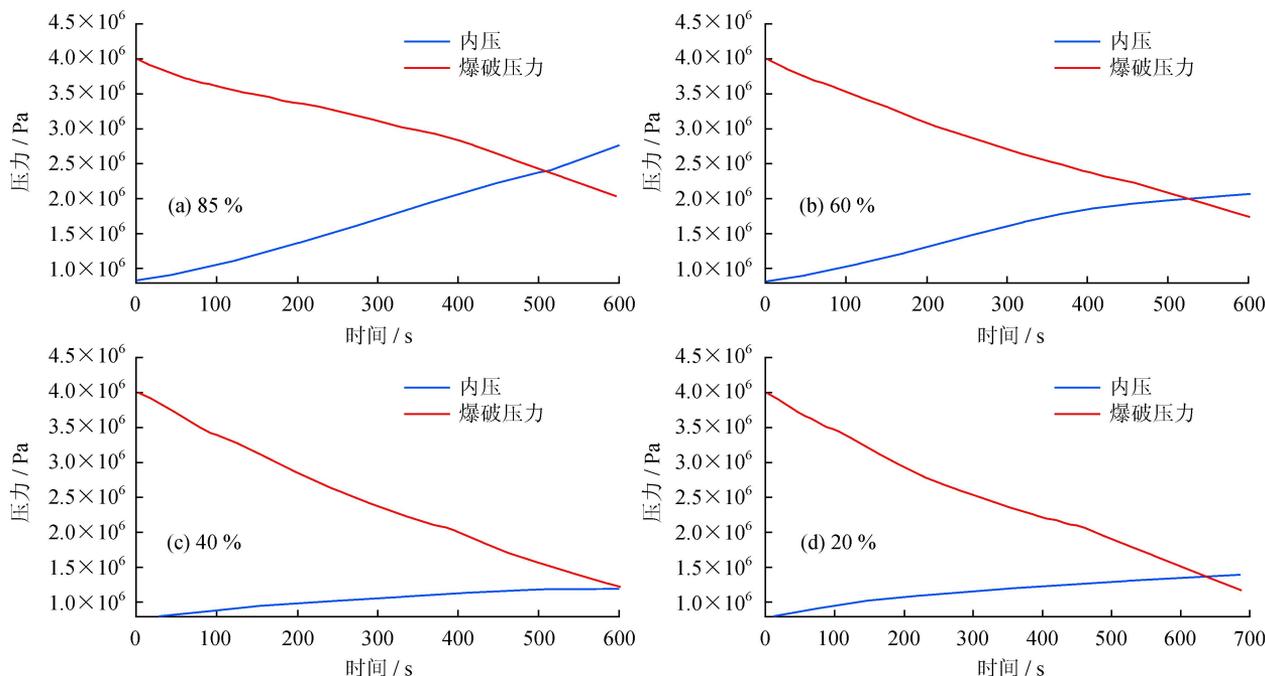


图 6 池火条件下不同充装率对储罐失效时间的影响图

位于此处附近。

### 2.3 影响因素分析

图 6 为池火条件下不同充装率对储罐失效时间的影响。图中显示,4 种充装率的储罐在池火作用下的失效时间分别为 507 s、535 s、597 s、621 s。可见,池火灾作用下,充装率越高,储罐失效时间越短。原因主要在于充装率越高,气相空间越小,从而由相变导致的压力升高越快。总之,不同充装率的 LPG 储罐受池火侵袭破坏的时间范围为 500~620 s。

## 3 结论

利用 FLUENT 软件对处于池火灾环境下的 LPG 储罐热响应过程进行了数值模拟,计算结果与实验结果吻合。得出以下结论:

1)池火环境下储罐内介质温度分布总体上呈现上部高下部低的趋势,气相及液相分层区的温度分层明显,液相分层区下部为过冷液体区,该区液体温度上升较慢。

2)储罐升压速率随着充装率的增大而增大。

3)池火作用下,LPG 储罐失效受到两个因素控制,一是介质温度升高导致的储罐内介质压力升高,二是气相区壁温升高导致的强度下降。两条曲线的交叉点即为储罐的失效点。储罐内介质的充装率越高,储罐失效时间越短。

### 参 考 文 献

[1] BIRK A M, CUNNINGHAM M H. Liquid temperature stratification and its effect on BLEVEs and their hazards [J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 48: 219-237.

[2] 淮秀兰, 俞昌铭. 高温环境下容器内液化气的热响应分析 [J]. 河北理工学院学报, 1996 (1): 24-29.

[3] EULALIA PLANAS-CUCHI, JOAQUIM C. Modeling temperature evolution in equipment engulfed in a pool-fire [J]. Fire Safety Journal, 1998, 30 (3): 251-268.

[4] 邢志祥, 常建国, 赵晓芳. 液化石油气储罐热响应影响因素模拟分析 [J]. 炼油技术与工程, 2005, 35 (9): 59-61.

[5] 淮秀兰, 俞昌铭. 高温环境下未充满的容器内液化气的传热传质分析 [C] // 中国金属学会第七届热能与热工学术会议论文集. 北京科技大学专辑. 无锡: 中国金属学会, 1993, 46-51.

(收稿日期 2010-05-31 编辑 赵 勤)