

液化石油气储罐安全防护的模拟设计法^{*}

邢志祥^{1,2} 蒋军成¹

(1. 南京工业大学城市建设与安全环境学院 2. 中国人民武装警察部队学院消防指挥系)

邢志祥等. 液化石油气储罐安全防护的模拟设计法. 天然气工业, 2004; 24(7): 111~114

摘 要 液化石油气储罐周围一旦发生火灾, 在火灾环境的影响下储罐内液化石油气的温度和压力会迅速升高, 同时储罐的强度会迅速下降, 在一定条件下储罐即会发生破裂和爆炸, 进而引发 BLEVE 爆炸, 并引起爆炸冲击波、容器碎片抛出及巨大的火球热辐射, 对周围的人员、建筑和设备造成更大的破坏。为此, 对液化石油气罐区的安全防护方法进行了分析, 对各种方法的特点进行了比较, 并提出了进行安全设计时选择安全防护方法的基本原则。根据液化石油气储罐在火灾作用下的响应规律的数值模拟方法, 提出了液化石油气储罐安全防护设计的模拟安全设计法, 这种方法比传统的方法具有更强的针对性, 更为合理和科学。

主题词 液化石油气 罐 安全 防护 措施 模拟 设计

液化石油气是工业和民用中应用十分广泛的一种燃料。由于它具有易燃、易爆的危险性, 在生产、运输和使用中极易发生火灾和爆炸事故。国内外曾多次发生液化石油气火灾并引起连锁爆炸的事故, 造成惨重的损失。1998 年西安市一座液化石油气站由于液化石油气在一球罐底部泄漏, 引发火灾, 在火焰高温的作用下相继造成 2 个 400 m³ 的球罐发生爆炸, 并引起 BLEVE 爆炸, 造成 10 多人死亡, 数十人受伤, 直接经济损失 400 多万元。

液化气体储罐的许多事故, 如蒸气爆炸、气体扩散与燃烧爆炸等一旦发生, 则可能在很大程度上超出人力所能控制的范围。因此, 在液化气体储存中, 采取适当的安全措施以最大限度地减少事故发生的可能性是极为重要的。液化石油气储罐的安全防护方法较多, 如何选择安全可靠又经济合理的防护方法, 同时如何根据储罐在最不利情况下的热响应规律, 并采用科学的方法对储罐进行安全设计, 是设计时必须考虑的关键问题。

储罐的隔热防护方法

防止发生液化石油气连锁事故, 必须首先确保液化石油气储罐在使用过程中的安全, 即防止受到热冲击引起超压和机械撞击引起泄漏。防止由于受

到热冲击引起超压, 可以采取水冷却、防火隔热层、蒸气泄压等方法。

1. 安全阀泄压

采用安全阀泄压的方法, 可以有效降低储罐内压力的增加速度。液化石油气储罐最不利的情况就是周围发生火灾, 储罐在火灾包围下储罐内部的压力变化情况可以用数值模拟的方法进行模拟, 模拟结果如图 1 所示。但是在安全阀的排放面积不够时, 储罐内部的压力仍然继续升高。因此在选用安全阀时关键是要有足够的排放面积, 从而保证安全阀的泄放量大于储罐所需的安全泄放量。

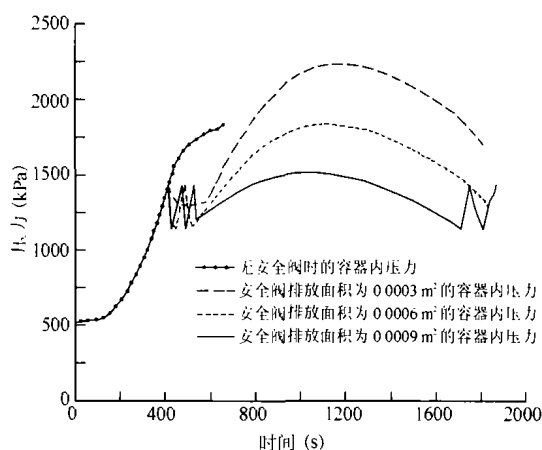


图 1 安全阀对压力响应的影响

^{*} 本成果得到国家自然科学基金资助(编号 50206009)。

作者简介: 邢志祥, 1967 年生, 武警学院消防指挥系副教授; 1991 年毕业于南京化工学院化工机械专业, 获硕士学位, 现为南京工业大学安全技术工程专业博士研究生; 主要研究方向为化工过程灾害模拟和安全评价, 已发表学术论文 50 多篇。地址: (210009) 南京工业大学 186 信箱。电话: (025) 83587305, 13814045438。E-mail: xingzhixiang@21cn.com

2. 绝热保护层

从最基本的意义上说,绝热保护层是位于火焰和金属壳体之间的一个绝热层,它能延缓罐壁温度升高和介质压力上升,从而为采取其他灭火措施创造条件。绝热保护层的防护效果可以从图2~3明显看出。

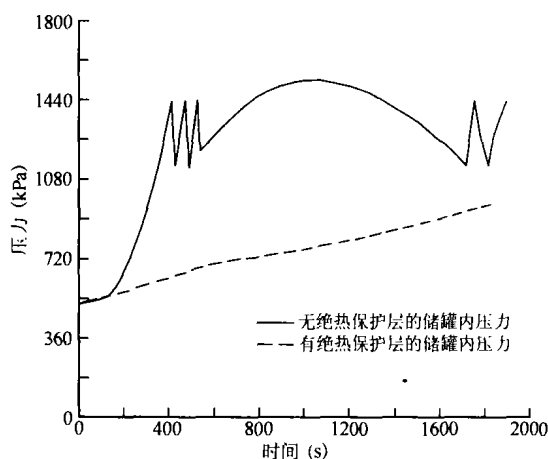


图2 绝热保护层对压力响应的影响

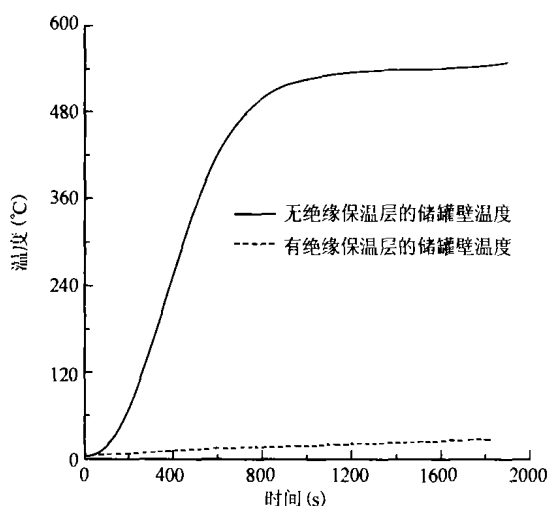


图3 绝热层对罐壁温度的影响

设置绝热保护层的关键是要合理地选择并安装具有足够隔热效率且适合现场使用环境的隔热材料。设置防火隔热层具有的明显优越性是:它从火灾发生的瞬间就开始提供防护,无需以任何方式开启系统,它无需用防护储罐的冷却水。采用防火绝热层的缺点是:增加初期投资,增加罐体并进而增加支承结构的重量,不便于罐体检查,同时需注意的是任何绝热保护层的延缓时间都是有限的。

3. 水冷却

当储罐受到火焰或辐射侵袭时,用冷却水能有效地降低储罐表面的温度,使表面不因温度迅速上

升而显著降低强度,罐内介质压力也不致迅速升高。水冷却的关键是喷水量必须足够吸收作用到罐体上的热量,保证足够的冷却供水强度。水冷却可以采用移动式 and 固定式两种方式。

移动式水冷却是采用消防水龙头以人工方式喷水,是一种经常采用的方法,因为这种方法具有简单、可移动、可根据不同火灾条件灵活操作等优点。但人工喷水法在预防蒸汽爆炸这样的事故时受到很大制约,主要原因是:需水量太大;由于储罐方位、火焰强度、场地限制等原因,人工喷水并不一定能够实施;操作人员距离火焰太近,则有生命危险。

固定式水冷却系统包括在顶部集中配水罐壁漫流式、固定水喷淋、水喷雾、固定水炮等4种基本形式。顶部集中配水罐壁漫流式可用堰式、穿孔管、喷头等形式,对球罐最为有效,有助于水的均匀分布,管道配置少,管道不易堵塞,单阀启动快,且不易被蒸气爆炸所破坏。可用于对着火罐和邻罐的冷却。其缺点是当介质燃烧在罐体表面产生抗湿性炭沉积层时,将使漫流水离开表面而不能形成水膜,影响冷却效果。此外,罐低部供水不足。水喷淋和水喷雾系统管道配置多,喷头布置为网格状,水分布均匀。但一套系统要满足对着火罐和邻罐的冷却较困难,一般要设置2套系统。此系统易被蒸气爆炸破坏,喷头易堵塞,维护较困难。水喷淋对于防止处于均匀火焰环境下的储罐能起到较好的效果,但对于喷射火焰,由于加热的不均匀性,效果较差。固定水炮供水可用较快地向储罐供水,不易被蒸气爆炸破坏,一般不易堵塞,若水炮布置得当可将水覆盖到储罐全部表面,能将水喷射到暴露于火焰中的有效表面,可以减少用水量,但有时受风影响较大时则可能需要加大用水量。

储罐隔热防护方式的选择

储罐的安全防护方式可以选择上述一种或同时选择几种,一般蒸气泄放方法要与水冷却或防火隔热层联合使用,因此安全防护方式选择实际上是首先决定使用水冷却方式还是使用防火隔热层,进而决定采用何种水冷却方式或采用何种防火隔热层。

1. 水冷却与防火隔热层保护效果比较

文献[1,2]对液化石油气储罐分别采用水喷淋冷却和防火隔热层保护时进行了全包围火灾实验,其试验条件为:容器容积 4.85 m^3 ,壁厚 6.5 mm ,材料STE36钢(屈服强度为 360 N/mm^2),储罐上设置安全泄放阀。试验结果如图4所示。

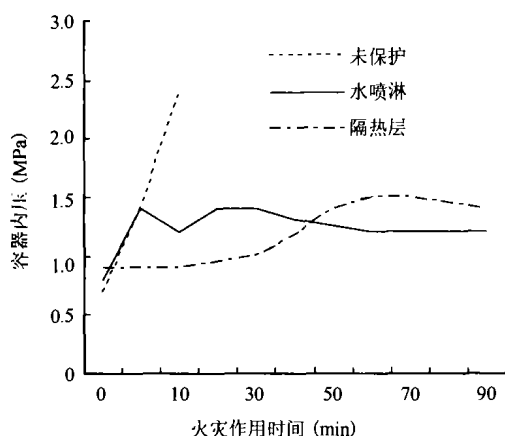


图4 各种防护方式比较

由图4可看出,对未采用防护措施的储罐,在火灾作用下储罐内部压力迅速上升,12 min即发生爆炸;采用水喷淋冷却(冷却强度为 $100 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$)的储罐,在火灾作用下在开始5 min内压力迅速上升,当达到安全阀排放压力1.4 MPa后,安全阀开启排气,储罐内压力在1.2~1.4 MPa之间波动,随后有所下降;采用隔热层保护的储罐,在火灾作用下压力升高速度缓慢,在50 min前储罐内部的压力一直低于水喷淋冷却的储罐,而后压力较水喷淋储罐稍高。水喷淋冷却和隔热层保护的储罐均可以在火灾作用下90 min内不发生爆炸。从防护效果看,采用隔热层防护比水喷淋冷却在火灾初期更为有效,采用水喷淋冷却必须要有安全阀配合使用。但是隔热层防护的初期投资比水冷却大。

因此选择防护方式时,对于固定式储罐水喷淋冷却和隔热层防护这两种方式均可以采用,我国目前大多采用水冷却方式;对于移动式储罐应采用隔热层防护方式。

2. 水冷却方式的选择

对于前述的4种水冷却方式,根据国外的资料介绍,可靠性的排序依次为漫流式、固定水炮、水喷淋或水喷雾。而我国目前大多采用水喷淋或水喷雾方式,但从使用效果看这种方式不太妥当,因为这种方式在发生蒸气爆炸时易受到破坏,西安“3.5”事故就是如此。而且喷头容易堵塞,维护比较困难。根据我国的国情,水冷却方式宜采用顶部布水罐壁漫流与固定水炮相结合的方式,即部分冷却水用漫流式,部分冷却水用固定水炮提供。该形式可靠性高且灵活,能分别满足防日晒冷却、着火罐冷却以及邻近罐冷却等不同冷却强度的供水要求,且对于与储罐内部蒸气区相接触的罐壁部分冷却更有保证。该

形式容易维护,工程费用比目前使用的水喷淋或水喷雾系统低。对于大型储罐建议设置自摆的移动式水炮,以减少灭火人员暴露于火灾危险区中的危险性,并能有效保证喷射水流到达暴露于火灾中的储罐表面。

模拟设计法

1. 现行的安全泄放设计方法

现行的液化石油气储罐安全泄放设计是保证安全阀的排放量大于容器的安全泄放量。容器的安全泄放量是根据在火灾情况下容器的吸热量而引起的蒸发量。

在无绝热保护层时,液化气体压力容器的安全泄放量 G (单位 kg/h ,下同)为:

$$G = \frac{Q}{q} = \frac{2.54 \times 10^8 A^{0.82}}{q} \quad (1)$$

式中: q 表示液化气体的汽化热, J/kg ; A 表示容器的受热面积, m^2 ; Q 表示液化石油气储罐从周围环境中吸收的热量, J/h 。

有绝热保温层时,液化气体容器的安全泄放量 G 可以按下式计算:

$$G = \frac{9400(650 - T)\lambda A^{0.82}}{\delta q} \quad (2)$$

式中: T 表示在泄放压力下的饱和温度, $^{\circ}\text{C}$; λ 表示常温下绝热材料的导热系数, $\text{W/(m} \cdot ^{\circ}\text{C)}$; A 表示容器的受热面积, m^2 ; δ 表示保温层的厚度, m ; q 表示液化气体汽化热, J/kg 。

该设计方法是基于有限的实验数据而得到的容器在火灾条件下的吸热量计算经验公式,由于实验是在特定条件下进行的,而且实验数据本身有着较大的分散性。因此这种经验公式有着很大的局限性,由此确定的容器的安全泄放量同样也存在着很大的近似性。

2. 模拟设计法

模拟设计法是利用火灾环境下液化石油气储罐热响应的模拟方法进行安全设计的一种新型设计方法。这种设计方法的基本思想是:先假设储罐安全阀泄放面积和(或)绝热保护层,然后利用液化石油气对火灾的热响应模拟程序LPGTRS^[3]对储罐的热响应进行模拟,根据模拟结果判断假设的安全泄放面积或绝热保护层是否合适,如果不合适,那么根据模拟结果重新假设,如果最大压力和罐壁最高温度偏大,那么要增加泄放面积和绝热层厚度,反之则减少。直到最大压力和最高壁温符合要求为止。此时

的安全阀泄放面积和绝热层厚度即是设计所需的参数。模拟设计法的流程如图5所示。

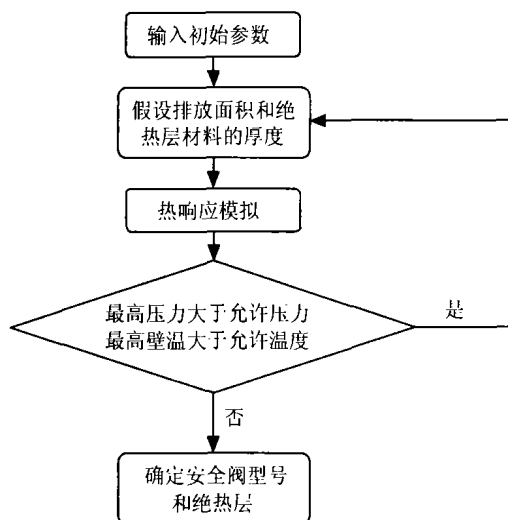


图5 模拟设计法流程图

液化石油气储罐防护保护方式对于预防和控制灾难性事故的发生是至关重要的,因此应根据具体情况选择合适的防护方法。对于固定式储罐,建议采用储罐顶部水漫流冷却和固定水炮相结合的方式,同时应设置大小合适的安全阀,对于大型储罐建议设置自摆的移动水炮。对于移动式储罐,建议采用隔热层保护和安全阀泄压相结合的方式。例如,对于容积 10.25 m^3 , 直径 1.7 m 的储罐,利用 LPGTRS 模拟程序对储罐的热响应过程进行模拟,

模拟结果如表1所示,因此用模拟设计法可以得到在没有绝热保护层时安全阀的排放面积为 $9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。如果采用传统设计法安全阀的排放面积为 $1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。可以看出传统的设计方法设计需要的安全阀的排放面积为模拟设计法的2倍。

表1 储罐参数表

容积 10.25 m^3	阀门开启压力 1.43 MPa
直径 1.7 m	阀门关闭压力 1.0 MPa
壁厚 11.85 mm	最高火焰温度 1050 K
储罐长度 4.88 m	最低火焰温度 600 K
筒体长度 4 m	

综上所述,笔者提出的液化石油气储罐安全防护的模拟设计法比传统的设计方法更加科学合理。

参考文献

- 1 B Droste, W Schoen. Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks. Journal of Hazardous Materials, 1988; 20: 41~53
- 2 W Schoen, B Droste. Investigations of water spraying systems for LPG storage tanks by full scale fire tests. Journal of Hazardous Materials, 1988; 20: 73~82
- 3 邢志祥, 蒋军成. 液化气体储罐对火灾的热响应模拟. 中国工程热物理学会燃烧学分会 2003 年学术会议, 2003

(修改回稿日期 2004-03-04 编辑 居维清)

我国油气勘探实力跃居全球第四

从“1004 国际地球物理会议暨展览”会上了解到,目前我国油气勘探整体实力已跃居全球第四。各国专家们在新技术研讨中指出,中国西部盆地是全球石油地球物理勘探最困难的区域之一,中国的石油勘探技术在西部三大盆地的油气发现过程中取得了巨大进步。国际勘探地球物理学家学会主席皮特·顿勒说:“目前中国已经成为世界陆地勘探的领导者,并且由原来的(勘探)技术进口国变成了技术和人才的输出国,甚至在一些没有希望的地方获得了(油气)新发现,为有效扩大全球找油领域做出了贡献。”目前,仅中国石油天然气集团公司在世界油气勘探服务市场的份额就达到 12%,业内整体市场实力居全球第四位,其中陆上勘探的业内市场份额位居全球第一。

(蒋静萍 摘自央视国际新闻)