

球形容器内可燃气燃爆泄放实验研究*

李岳 王淑兰 丁信伟

(大连理工大学化工学院)

李岳等. 球形容器内可燃气燃爆泄放实验研究. 天然气工业, 2004; 24(4): 104~107

摘要 在直径为 1 m 的球形容器中, 采用中心点火方式, 对液化石油气进行了大量密闭燃爆和燃爆泄放的实验, 得出了液化石油气最大破坏力的浓度范围 5%~6%、密闭下燃爆最大压力与初始压力呈线性关系, 并基于不同条件下燃爆泄放实验, 通过量纲分析将泄放面积、容器内表面积、容器体积、泄放压力及初始压力等关联成燃爆泄放状态准数, 建立了燃爆泄放最大超压与泄放准数之间关系式, 关系式覆盖的体积范围(0.029~213 m³), 内部初始压力范围(0.1~0.4 MPa), 泄放压力与初始压力比(1~2.5)、容器长径比(1~2), 在该范围内关系式与实验结果吻合较好。

关键词 球形壳体 容器 液化石油气 密闭系统 燃烧 爆炸 泄放 实验室 研究

目前的泄放设计规范基本上是在实验数据基础上形成的, 由于各研究者的实验方法、实验条件有差异, 造成实验结果有较大分散性, 由这些实验结果所形成的关联式之间也有较大差别^[1~2]。如果操作条件、容器形状与实验条件略有不同, 则这些关联式计算结果与实验结果就可能相差甚远。由文献[3]列出的实验结果与 NFPA68 规范计算结果比较可见, 其计算结果过于保守, 尽管保守设计在工程上是偏安全的, 但会造成泄放面积过大, 使设备强度降低。另外 NFPA68 和 VDI3673 标准适用于强度较低设备的安全泄放设计, 且点火时设备内为常压, 泄放口开启压力也低于 0.2 MPa。然而在工业生产中, 处理易燃易爆介质设备的操作压力往往较高, 泄放口开启压力也大于操作压力。对这一类设备的安全泄放设计, 尽管有人在一定内压下做了一些燃爆实验^[4~5], 但由于燃爆泄放耦合了可燃介质流动与热化学反应的复杂非正常过程, 受到燃料性质、容器形状、流动状态、泄放口位置、初始压力、泄放面积、泄放压力等诸多因素影响, 其研究成果还难以广泛应用, 还有大量问题需要解决。笔者从基本实验入手, 探讨了初始压力对燃爆泄放的影响。

实验装置和实验步骤

图1是实验装置示意图。燃爆实验设计为球形

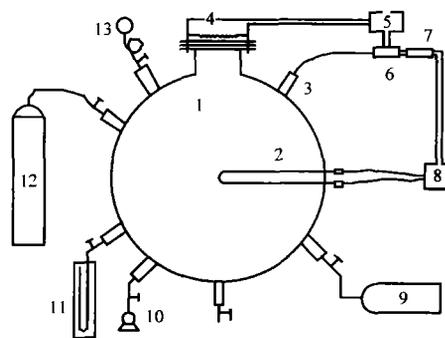


图1 燃爆实验系统简图

1. 球形容器; 2. 点火电极; 3. 压力传感器; 4. 变径法兰及细铅线;
5. 燃爆监测电路; 6. 数据采集卡; 7. 启爆装置; 8. 计算机; 9. 压缩空气贮罐;
10. 真空泵; 11. 水银压差计; 12. 液化石油气贮罐; 13. 真空压力表

容器, 直径 1000 mm, 体积为 0.524 m³, 设计压力为 5.0 MPa, 设计温度 400 °C, 顶部设有不同面积的圆形泄放口法兰结构。为了考查泄放面积影响, 实验中采用 $\varnothing 150$ 、 $\varnothing 250$ 、 $\varnothing 300$ mm 三种泄放直径, 泄放口用不同厚度聚乙烯膜或铝膜封闭。实验介质为石油液化气—空气混合物, 实验温度为 285~305 K, 实验中采用高压电极放电点火。实验容器内气体配比采用抽真空后充入气体, 混合气体浓度由流量计测量及道尔顿分压定律计算控制。容器内压力由安装在容器侧壁的压电式压力传感器监测, 压力信号和

* 本成果为教育部博士研究生学科点专项基金(编号 2001041026)资助项目。

作者简介: 李岳, 1964 年生, 在职博士; 长期从事设备安全技术研究工作。地址: (116024) 辽宁省大连市西岗区英华街 52 号。电话: (0411) 83629202。E-mail: lychw1999@sina.com

泄放口打开时间由采集频率为 200 kHz 的高速数据采集板记录,为了准确确定泄放口打开时间及打开时容器内压力,在泄放口上方设置一极细铅线(0.3 mm)与压力采集系统相连构成回路,当泄放口打开,铅线断裂,在采集的压力—时间曲线上记录下断开时容器内压力和时间。点火系统工作原理为:电容充电→电压升高→点火电极尖端放电→起爆。实验中起爆与数据采集全由计算机控制,点火与压力采集同时进行。液化气与空气通入后放置 20 分钟,让两种气体充分混合均匀。

实验内容及条件见表 1。

表 1 实验内容及条件

初压 (MPa)	点火位置	泄压方式	泄放直径 (mm)	泄放口开启压力 (MPa)
0.1~0.4	中心点火	密闭		∞
0.1、0.2、0.3	中心点火	顶端开口	150、250、300	0.2~0.7

主要实验结果

1. 密闭容器燃爆实验

密闭燃爆实验是研究燃爆泄放特征的基础,可以获得可燃介质燃爆特性。

(1) 液化气浓度对燃爆强度影响

实验重点考察了 3%~7% 浓度范围,对 3.5%、4%、4.5%、5%、5.5%、6%、7% 各不同浓度分别进行了 2~5 次燃爆实验,得到了液化石油气—空气混合气体的最大燃爆压力和最大升压速率随浓度变化曲线(图 2),结果显示液化石油气浓度在 5%~6% 之间燃爆压力最大。

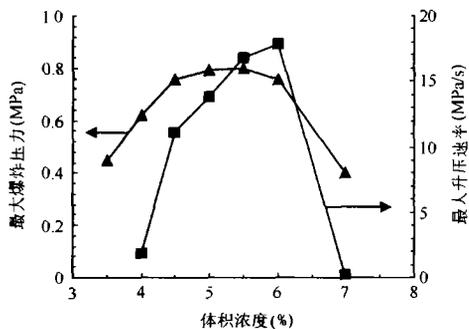


图 2 密闭下液化石油气最大燃爆压力与最大升压速率随浓度变化曲线

(2) 初压对燃爆强度的影响

采用浓度为 5.5% 的混合气做了不同初压下密闭燃爆实验,图 3 为密闭下最大燃爆压力 p_m 和最大升压速率 $(dp/dt)_m$ 随初始压力 p_0 变化的曲线,经线性回归得: $p_m \approx 9.2p_0$, $(dp/dt)_m = 681p_0 - 52$ 。

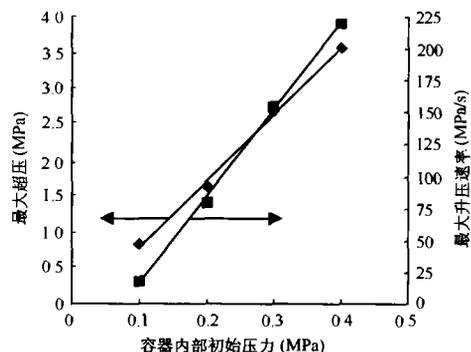


图 3 最大燃爆压力和最大升压速率与初始压力关系曲线

可见可燃介质初始压力越高,燃爆最大压力越大,升压速度也越快,基本上呈线性关系。该类设备必须有足够的泄放面积或足够的强度,如果泄放面积不够,泄压速度小于升压速度,则无法有效泄压,泄放口打开后内部压力会继续升高。

2. 燃爆泄放实验

实验中选取了 150、250、300 mm 3 种泄放口径,液化气体浓度 5.5%,燃爆实验分别在 3 种初压下进行。泄放口根据不同初始压力分别使用不同厚度铝膜封闭(铝膜厚度偏差为 3%),容器内初始压力分别设置为 0.1、0.2、0.3 MPa,实验数据列于表 2 中。

表 2 不同初压下燃爆泄放最大压力

序号	气体初始压力 (MPa)	气体初始温度 (°C)	泄放面积 (m ²)	泄放压力 (MPa)	燃爆泄放最大压力 (MPa)
1	0.1	293	0.07065	0.1827	0.1827
2	0.1	294	0.07065	0.28	0.28
3	0.1	295	0.04906	0.475	0.475
4	0.2	295	0.04906	0.263	0.92
5	0.2	294	0.04906	0.472	1.04
6	0.3	295	0.04906	0.384	1.18
7	0.3	295	0.04906	0.475	1.22
8	0.1	298	0.01766	0.236	0.481
9	0.1	296	0.01766	0.61	0.64
10	0.2	295	0.01766	0.32	1.38
11	0.2	294	0.01766	0.394	1.42
12	0.3	295	0.01766	0.588	2.2
13	0.3	294	0.01766	0.674	2.32

通过对上述实验数据和有关文献实验数据^[1,4~5]的整理发现,对同种气体在相同泄放面积

下,初始压力增大,燃爆最大压力迅速增大,影响特别明显;泄放口开启压力增加,燃爆压力也响应增大,但增加幅度较小;容器体积增大或相同体积下表面积大的容器,燃爆最大压力也增大;在一定范围内泄放面积增加,燃爆压力迅速减小。比较不同气体的燃爆压力,密闭下燃爆压力越高、燃爆速度越快的气体,在相同泄放面积和泄放压力下,燃爆压力也越大,有些气体尽管密闭绝热下燃爆最大压力会很高,但燃烧速度慢,在相同泄放面积下,内部压力也较低。由此笔者提出了一种新的燃爆泄放准数 A_{sp} ,将容器初始压力 p_0 (绝压)、泄放口开启压力 p_v (绝压)、容器体积 V 、容器内表面积 F 、泄放面积 A_v 及气体燃烧特征准数 \bar{S}_0 关联起来, A_{sp} 表达式如下:

$$A_{sp} = \frac{\bar{S}_0(1+V^{1/3})F}{A_v}(Kp_0 + p_v)$$

$$\text{气体燃烧特征准数 } \bar{S}_0 = \frac{S_{u0}}{C_{u0}} \left(\frac{\rho_{u0}}{\rho_{b0}} - 1 \right)$$

式中: S_{u0} 表示标准状态下气体基本燃烧速率; C_{u0} 表示未燃气中声速; ρ_{u0} 、 ρ_{b0} 分别表示初始未燃气和已燃气密度; \bar{S}_0 反映了气体标准状态下燃烧速度及燃烧时体积的膨胀能力^[8]。

对上式进行量纲分析如下。

$Kp_0\bar{S}_0$ 项可间接反映介质燃爆过程压力增加率。初始压力越大, \bar{S}_0 越大, 压力增加率就越大, K 为密闭下燃爆最大压力与初始压力比值。

$F(1+V^{1/3})$ 项可看成容器的当量体积。

$Kp_0\bar{S}_0F(1+V^{1/3})$ 项近似反映燃爆过程容器内压力能的增加率。

$p_v\bar{S}_0F(1+V^{1/3})$ 项可看成泄放时对容器内部的扰动冲击能。间接反映由于泄放口打开, 引起内部燃烧速度进一步提高, 使得压力能增加率也进一步增大。

上述量纲分析发现, 上式的分子项本质上可以看成是压力能的增加率, 由两部分组成: 一部分是泄放口未打开时容器内燃爆的压力能增加率, 取决于容器体积、表面积、初始压力和气体燃烧特征准数; 另一部分则可以看成是泄放时的扰动冲击引起的容器内部压力能增加率的增量, 泄放压力越大, 引起的压力能增量也越大。但实验发现, 扰动能项对最大燃爆升压影响较小, 分析原因: 当泄放压力低时, 扰动能小, 引起内部压力能增加率改变也小, 当泄放压力高时, 尽管扰动能大, 但内部未燃气体量少, 同样引起内部压力能增加率改变也小。当泄放口打开压力与密闭下爆破压力接近时, 不管泄放面积大小, 容

器内最大压力均与密闭下燃爆最大压力接近。在一定泄放面积下, 压力能增加率越大, 容器内出现的最大压力也越大。

将本文实验结果及从有关文献得到近百组不同初始条件下的燃爆泄放最大压力 p_m (绝压) 与燃爆泄放准数 A_{sp} 之间关系列于图 4, 经数学回归可得: $p_m \approx 0.4378A_{sp}^{0.6578}$ 。

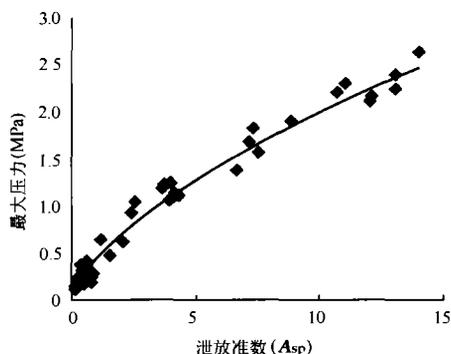


图 4 燃爆泄放最大压力 p_m 与泄放准数 A_{sp} 关系

利用泄放准数关系式对有一定初压的球形容器、方形容器及长径比小于 2 的柱形容器的燃爆泄放进行了大量计算, 并与实验结果进行比较, 总体看计算结果与实验结果吻合比较好, 偏差基本小于 20%。但初始压力接近常压时, 计算结果偏大。当泄放面积小于一定值, 计算结果可能会出现大于密闭下燃爆压力, 可以认为此时泄放已不起作用, 燃爆泄放最大压力为密闭下燃爆压力。当泄放面积超过一定值时, 计算的最大压力有可能小于泄放压力, 则表示泄放口打开后容器内部压力立刻降低, 此时最大压力为泄放压力。以上所引用的实验数据, 燃爆介质为碳氢化合物, 点火位置为中心点火。

结 论

(1) 实验条件下, 液化石油气出现最大燃爆压力的浓度为 5%~6%, 在该范围内燃爆破坏性最大, 燃爆升压速率最大。

(2) 密闭容器内, 液化石油气燃爆最大压力和最大升压速率与初始压力呈线性关系, 最大压力近似为初始压力的 9.2 倍。

(3) 通过引入燃爆泄放准数 A_{sp} 概念, 较好解决了有初压容器的燃爆泄放问题, 获得了燃爆泄放最大压力与各参数之间关系式, 对球形容器、方形容器及长径比小于 2 的柱形容器, 其最大燃爆压力计算结果与实验结果吻合较好。

符号说明

A_v 表示泄放面积, m^2 ; F 表示设备内表面积, m^2 ; V 表示设备体积, m^3 ; p_m 表示介质燃爆泄放过程的最大压力(绝压), MPa; p_v 表示泄放口开启压力(绝压), MPa; p_0 表示容器初始内压(绝压), MPa; K 表示密闭容器内最大燃爆压力与初始压力之比, 无量纲; (dp/dt) 代表密闭容器内燃爆最大升压速率, MPa/s。

参考文献

- 1 VDI3673—Part1. Pressure Venting of Dust Explosions.
- 2 NFPA68. Guide for venting of Defagations. 1994
- 3 Razus D M, rause U K. Comparison of empirical and semi-empirical calculation methods for venting of gas explosions. *Fire Safety Journal*, 2001;36:1~23
- 4 Derek Bradley *et al.* The venting of gaseous explosions in

- spherical vessels. II -theory and experiment. *Combustion and Flame*, 1978;32:237~255
- 5 Vladimir Molkov, Ritsu Dobashi. *et al.* Venting of deflagrations: hydrocarbon-air hydrogen-air systems. *Journal of loss prevention in the process industries* 2000;13:97~400
 - 6 Chippett S. Modeling of vented deflagrations. *Combustion and Flame*, 1984;55: 127~140
 - 7 Cousins E W, Cotton P E. Design closed vessels to withstand internal explosions. *Chemical Engineering*, 1951; 58:133~136
 - 8 Derek Bradley *et al.* The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I -theory. *Combustion and Flame*. 1978;32:221~236

(收稿日期 2003-12-18 编辑 居维清)

西气东输工程将于今年10月份全线贯通

中国石油天然气股份有限公司总裁陈耕最近在香港表示,西气东输工程将在今年10月全线贯通,这意味着这一工程较原计划提前一年开通。此项目回报率目前维持在12%的水平。

2003年,中国石油的天然气重点工程进展顺利。西气东输工程东段全面完工,于2003年10月1日一次投产成功,实现了向河南、安徽、江苏、浙江等地供气,2004年1月1日如期实现向上海商业供气。西段主体管道焊接全部完工。忠武管道(重庆忠县至湖北武汉)去年8月28日全面开工,长江穿越等控制性工程已完成50%以上。陕西至北京的陕京二线初步设计完成,控制性工程已经开工。

(居维清 摘)