

文章编号: 1001-1455(2012)02-0221-04

# 等泄压比条件下连通容器泄爆实验研究\*

尤明伟<sup>1,2</sup>, 蒋军成<sup>1</sup>, 喻源<sup>1</sup>, 王志荣<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学城市建设与安全工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 福建消防总队, 福建 福州 350003)

**摘要:** 通过开展单个容器和连通容器内预混气体的泄爆实验, 分析连通条件下容器泄爆的压力变化和火焰传播过程。实验结果表明: 连通容器内气体爆炸湍流燃烧, 容器的最大泄爆压力和最大压力上升速率均超过单容器, 特别是最大压力上升速率更高, 差别更大; 在等泄压比条件下, 连通容器中传爆容器的最大泄爆压力比起爆容器高, 且当传爆容器为小容器时, 最大泄爆压力更高; 随着管长的增加, 传爆容器的最大泄爆压力增加, 起爆容器的最大泄爆压力变化不大; 连通容器泄爆过程, 火焰在管道中加速传播。在相同管长条件时, 小球容器向大球容器传爆的火焰传播速率高于大球容器向小球容器传爆的火焰速率。

**关键词:** 爆炸力学; 气体泄爆; 火焰传播速率; 连通容器

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 1303530

**文献标志码:** A

在化工生产过程中, 存有可燃气体的各类容器通过管道相连接, 由于静电、操作不当等原因会导致容器中的可燃气体爆炸, 产生的火焰可以通过管道在容器中传播。当火焰从一个容器(简称起爆容器)进入管道时, 几何结构的改变将导致火焰前沿的加速<sup>[1-3]</sup>。在喷射火焰和压力预压缩作用下, 相邻容器(简称传爆容器)将产生比单容器爆炸更大的压力峰值<sup>[4-6]</sup>。当前的各种估算安全泄爆面积的经验公式和规范都只适用于单个容器<sup>[7]</sup>, 如果简单采用单容器气体爆炸超压泄放的标准对连通容器进行防爆泄放设计, 就有可能失效。因此, 开展连通容器泄爆实验, 研究连通容器泄爆过程中的火焰传播和容器内压力变化规律, 对连通容器泄爆设计具有重要意义。

## 1 实验装置与方法

实验使用的连通容器结构如图 1 所示。2 个球形容器的内径分别为 0.6、0.35 m, 体积分别为 0.113、0.022 m<sup>3</sup>, 以下均简称为大、小球容器。管道由 3 段连接组成, 可根据需要拆装组成管长为 2.45、4.45、6.45 m 的连通容器。

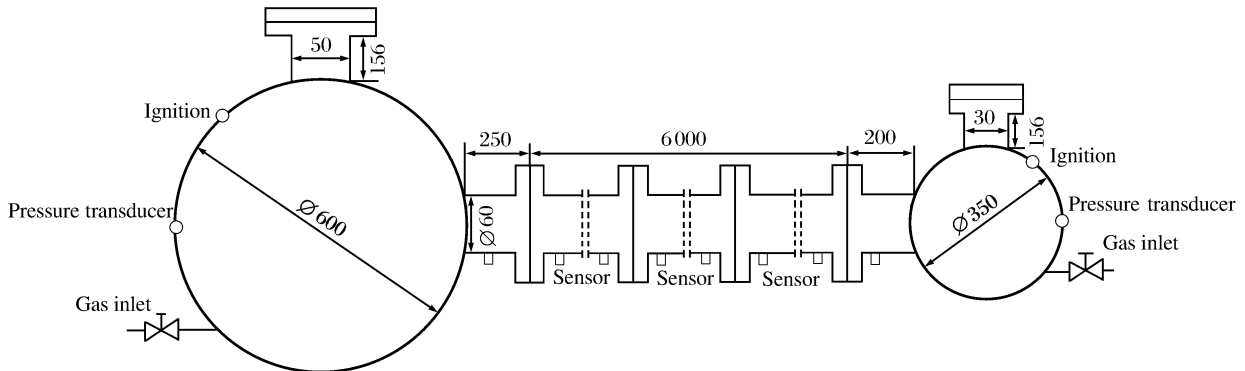


图 1 连通容器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the linked spherical vessels

\* 收稿日期: 2011-01-26; 修回日期: 2011-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(20976081, 50904037); 江苏省高校自然科学基金项目(10KJB620001)

作者简介: 尤明伟(1982—), 男, 博士研究生。

选用工业上常用的甲烷和空气预混气体开展实验,甲烷浓度为10%。点火装置采用高能点火器,点火能量为6 J,点火位置位于容器中心。实验中,通过在泄爆导管口添加圆环孔板改变泄爆面积,泄爆压力为0.13 MPa。

## 2 实验结果分析

### 2.1 单容器泄爆的压力变化

W. Barktnecht<sup>[1]</sup>认为:无论是密闭爆炸或是泄爆,在相同初始条件下,燃烧物质的爆炸强度都可以用立方根定律来说明,即 $(dp/dt)_m V^{1/3} = K_G$ ,  $(dp/dt)_m$ 为压力最大上升率,  $K_G$ 为混合气体爆炸特征值。由此得出,当大小容积不同的容器的泄爆片破膜压力相同时,若容器的量纲一有效泄爆面积(泄压比) $A/V^{2/3}$ ,满足 $A_1/V_1^{2/3} = A_2/V_2^{2/3}$ ,则2个容器的压力曲线接近一致。其中,  $A$ 为泄爆面积,  $V$ 为容器体积,下标1、2表示小球容器和大球容器。

图2给出了单个泄爆直径分别为0.05、0.03 m的大、小球容器泄爆实验中压力随时间变化规律。从图2中可知,2个容器的泄压比基本相等;破膜泄爆后(图中虚线位置),2个容器的压力继续上升,属非平衡泄爆。压力的变化基本一致,说明了实验的单容器泄爆满足三次方定律。为便于比较研究,在连通容器泄爆实验中,大球容器的泄爆口直径均设为0.05 m,小球容器的泄爆口直径均设为0.03 m,即2个容器的泄压比相等。表1给出了等泄压比条件下,单个容器泄爆的压力特性值,其中,  $p_s$ 为静态破膜压力,  $p_m$ 为最大泄爆压力。

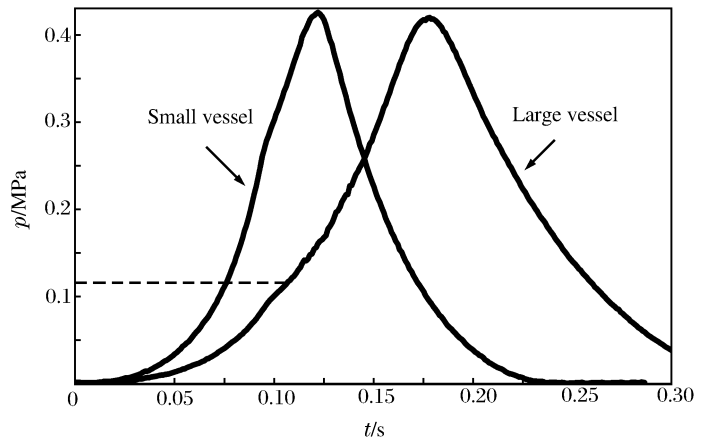


图2 等泄压比条件下单容器的泄爆压力曲线

Fig. 2 Pressure history of explosion venting of single vessel

表1 等泄压比条件下,单容器泄爆的压力特性值

Table 1 Explosive characteristic value of single vessel with the same effective vent area

$V/m^3$	$d/m$	$p_s/MPa$	$A/V^{2/3}$	$(dp/dt)_m/(MPa/s)$	$p_m/MPa$	$K_G/(MPa \cdot m/s)$
0.022	0.03	0.13	0.027	7.5	0.43	21.2
0.113	0.05	0.13	0.029	4.3	0.42	20.6

### 2.2 等泄压比下,连通容器泄爆的压力变化

图3为经过6.45 m管道,大球容器向小球容器传爆和小球往大球传爆时,2个容器的泄爆压力曲线,其中虚线为破膜压力。由图3可知,尽管2个容器的量纲一有效泄爆面积相等,但2个容器泄爆的压力变化情况完全不同,火焰传播方向也不同。

当大球容器点火向小球容器传爆时,初始时刻大球层流燃烧,产生的压力波通过管道先于火焰由大球容器传递到小球容器,大球容器压力(图中曲线2)与小球容器压力(图中曲线1)基本同时达到破膜压力;随后,火焰到达小球容器,在喷射火焰和压力预压

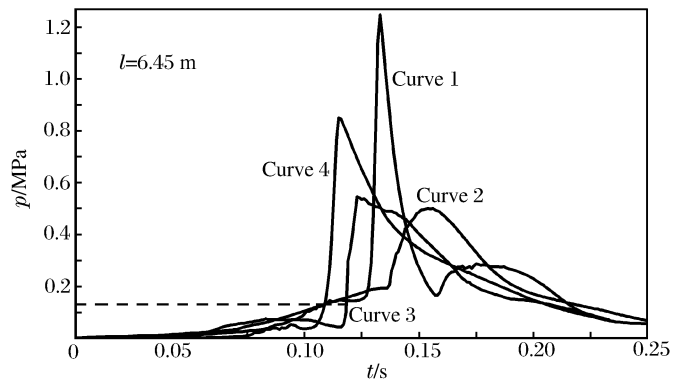


图3 不同容器点火时连通容器的泄爆压力曲线

Fig. 3 Pressure histories of explosion vented in linked vessels

缩的作用下，小球容器产生湍流燃烧，压力急剧上升并达到峰值，受小球容器湍流燃烧和压力波回流的影响，大球容器燃烧加快，压力也加速上升达到峰值；最后，2 个容器压力振荡下降到破膜压力以下。

当小球点火向大球传爆时，首先小球容器（图中曲线 4）发生层流燃烧，产生压力波向大球容器（图中曲线 3）传递，但由于小球容器的体积小，产生的压力波对整个连通容器的作用较弱。因此，虽然 2 个容器的压力均上升，但都低于破膜压力；当火焰到达大球容器后，大球容器发生湍流燃烧，压力迅速上升超过破膜压力，并达到峰值；在大球湍流燃烧压力波的作用下，小球燃烧加快，压力也迅速上升超过破膜压力，达到峰值，最后与大球压力一起下降。

2.3 不同管长条件下，连通容器泄爆的压力变化

表 2、表 3 给出了不同管长条件时，大球容器向小球容器传爆和小球容器向大球容器传爆时，2 个容器等泄压比泄爆的最大压力和最大压力上升速率。从表 2 和表 3 中可知，连通条件下，容器泄爆的最大压力和最大压力上升速率均超过单个容器，尤其是最大压力上升速率差别明显，说明连通条件下爆炸产生的压力振荡剧烈，爆炸强度更高；传爆容器的最大压力和最大压力上升速率均大于起爆容器，特别是小球容器作为传爆容器时，泄爆的最大压力和最大压力上升速率更高；随着管长的增加，传爆容器的泄爆最大压力不断增加，起爆容器的泄爆最大压力差别不大；泄爆的压力上升速率受管道固有振荡频率及泄爆过程流场扰动等影响较多，随管长的变化还有待进一步的分析。

表 2 由小球容器向大球容器传爆，

不同管道长度传爆时泄爆的压力特性值

Table 2 Explosive characteristics of explosion transferred from a small vessel to a large vessel at different pipe lengths

l/m	0.022 m <sup>3</sup>		0.113 m <sup>3</sup>	
	p <sub>m</sub> /MPa	(dp/dt) <sub>m</sub> / (MPa/s)	p <sub>m</sub> /MPa	(dp/dt) <sub>m</sub> / (MPa/s)
0.43	0.43	7.5	0.42	4.3
2.45	0.64	52.7	0.54	111.7
4.45	0.60	68.8	0.77	70.0
6.45	0.55	90.0	0.84	45.6

表 3 由大球容器向小球容器传爆，

不同管道长度传爆时泄爆的压力特性值

Table 3 Explosive characteristics of explosion transferred from a large vessel to a small vessel at different pipe lengths

l/m	0.113 m <sup>3</sup>		0.022 m <sup>3</sup>	
	p <sub>m</sub> /MPa	(dp/dt) <sub>m</sub> / (MPa/s)	p <sub>m</sub> /MPa	(dp/dt) <sub>m</sub> / (MPa/s)
0.42	0.42	4.3	0.13	7.5
2.45	0.64	52.7	0.54	111.7
4.45	0.55	27.5	0.96	162.0
6.45	0.50	14.8	1.25	270.0

2.4 不同管长条件下，连通容器泄爆过程的火焰传播

表 4 给出了不同管长条件下，在不同传播方向上，火焰平均传播速率。从表 4 中可知，随着管长的增加，火焰的平均传播速率增加，说明在连通容器泄爆过程中火焰在管道中加速传播；在相同管长条件下，小球容器向大球容器传爆的火焰传播速率高于大球容器向小球容器传爆的火焰传播速率，这主要是由于小球体积较小，作为传爆容器时，受大球爆炸燃烧压力波的预压缩作用使小球容器内的压力较高，对火焰传播的阻滞作用明显，因此大球容器向小球容器传爆时，火焰平均传播速率较小。

表 4 不同管长条件下火焰平均传播速率

Table 4 Average flame propagation speeds at different pipe lengths

l/m	$\bar{v}/(m/s)$	
	0.022 m <sup>3</sup> → 0.113 m <sup>3</sup>	0.113 m <sup>3</sup> → 0.022 m <sup>3</sup>
2.45	109.4	104.7
4.45	121.5	114.8
6.45	138.3	125.6

3 结 论

(1) 连通容器内气体爆炸湍流燃烧，容器的最大泄爆压力和最大压力上升速率均超过单容器，特别是最大压力上升速率更高，差别更大。(2) 等泄压比条件下，连通容器中传爆容器的最大泄爆压力比起爆容器高，且当小容器作为传爆容器时，最大泄爆压力更高；随管长的增加，传爆容器的最大泄爆压力增加，起爆容器的最大泄爆压力变化不大。(3) 连通容器泄爆过程，火焰在管道中加速传播。在相同管长条件时，小球容器往大球容器传爆的火焰传播速率高于大球容器往小球容器传爆的火焰速率。

## 参考文献:

- [1] Bartknecht W. Explosion course prevention protection[M]. Berlin: Springer, 1981.
- [2] Bjerketvedt D, Bakke J R, Wingerden K V. Gas explosion handbook[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997,52(1):1-150.
- [3] 周凯元,李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动[J]. 爆炸与冲击, 2000,20(2):137-142.  
ZHOU Kai-yuan, LI Zong-fen. Flame front acceleration of propane-air deflagration in straight tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(2):137-142.
- [4] Singh J. Gas explosions in inter-connected vessels; Pressure piling[J]. Process Safety and Environmental Protection, 1994,72(4):220-228.
- [5] Phylaktou H, Andrews G E. Gas explosions in linked vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1993,6(1):15-19.
- [6] 王志荣,蒋军成,郑杨艳. 连通容器气体爆炸流场的CFD模拟[J]. 化工学报, 2007,58(4):854-861.  
WANG Zhi-rong, JIANG Jun-cheng, ZHENG Yang-yan. CFD simulation on gas explosion field in linked vessels [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007,58(4):854-861.
- [7] Razus D M, Krause U. Comparison of empirical and semi-empirical calculation methods for venting of gas explosions[J]. Fire Safety Journal, 2001,36(1):1-23.

## Experimental study on premixed flammable gas explosion venting in linked vessels under the same effective vent area \*

YOU Ming-wei<sup>1,2</sup>, JIANG Jun-cheng<sup>1</sup>, YU Yuan<sup>1</sup>, WANG Zhi-rong<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction and Safety Engineering,

Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, Jiangsu, China;

2. Fujian Fire Bureau, Fuzhou 350003, Fujian, China)

**Abstract:** Explosion venting was carried out in both linked and single vessels under the same dimensionless effective vent area conditions to study flame propagation and explosion pressure evolution. It is shown that the maximum reduced explosion pressure and the maximum pressure rise rate in the linked vessels exceed those in the single vessels, especially, the difference of the maximum pressure rise rates is much greater between the linked vessels and the single vessels. At the same dimensionless effective vent area, the maximum reduced explosion pressure in the receiving vessel of the linked vessels, is higher than that in the releasing vessel. When the receiving vessel is smaller than the releasing vessel, the maximum reduced explosion pressure in the receiving vessel is much higher. With the increase of the pipe length, the maximum reduced explosion pressure in the receiving vessel increases, and the maximum reduced explosion pressure in the releasing vessel changes unobviously. During the explosion venting in the linked vessels, the flame propagates acceleratively in the pipe. And at the same pipe lengths, the flame propagation speed from a small vessel to a big vessel is higher than that from a big vessel to a small vessel.

**Key words:** mechanics of explosion; gas explosion venting; flame propagation speed; linked vessels

\* Received 26 January 2011; Revised 24 June 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (20976081,50904037)

Corresponding author: JIANG Jun-cheng, jcjiang@njut.edu.cn