

# 开口泄爆过程流动与燃烧 相互作用的实验研究

胡俊 浦以康 贾复 万士昕

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 在体积为  $0.025\text{m}^3$  的柱形容器中, 对 4.1% 的丙烷-空气预混气底端中心点火, 顶端开口泄爆过程进行了实验研究。实验考察了在大小两个泄爆面积, 不同泄爆压力下容器内的压力发展历史和火焰演化过程。实验结果表明, 小口泄爆时, 容器内压力会继续上升, 泄爆流动引起火焰演变为近莲花状; 大口泄爆时, 容器内压力历史出现双峰, 火焰演变为近 tulip 形火焰。就不同泄爆条件下容器内泄爆流动与燃烧发展的相互作用进行了讨论。

**关键词** 爆炸, 开口泄爆, 泄爆压力, 泄爆面积, 火焰变形

## 引言

“开口泄爆”是防止工业装置或容器内发生严重爆炸灾害而广泛应用的一种减灾技术手段<sup>[1]</sup>。开口泄爆过程是一个耦合了可燃介质流动与热化学反应的非定常过程, 它受到燃料物性、容器形状、流动状态、泄爆口位置、面积、泄爆压力等诸多因素的影响。对泄爆过程中流动与燃烧相互作用机理的认识是安全泄爆设计理论的基础。

虽然基于大量实验数据和观测, 逐渐形成了一系列工业防爆和开口泄爆规范<sup>[2-3]</sup>, 但由于缺乏恰当的泄爆理论指导, 应用的把握性和通用性都不令人满意。由于对泄爆真实物理过程观测、认识的困难, 目前泄爆机理研究还大多集中于球形, 方腔形容器中心点火等较为理想的条件<sup>[4-8]</sup>。对于工业装置中广泛应用的大长径比( $L/D > 4$ )柱形容器, 其容器内的等容爆炸过程与泄爆过程较之球形、方腔容器内的爆炸、泄爆过程有较大差异, 目前对其开口泄爆的研究从实验观测到机理探讨都还相对缺乏, 研究工作必须从基本的实验研究入手。

本研究工作的目的, 就是对大长径比柱形容器的泄爆过程进行实验研究, 通过对容器内爆炸压力历史的测量和火焰演化传播过程的光学记录, 描述柱形容器泄爆的基本物理过程, 为泄爆机理研究提供合理的模型基础。在此基础上对大长径比柱形容器泄爆过程中压力、火焰面的发展变化特点与泄爆流动间的相互作用进行了初步探讨。

## 1 实验装置、实验步骤及实验内容

开口泄爆实验系统由配气系统、柱形泄爆实验容器、点火与泄爆控制系统、高速摄影系统、压力监测与数据采集系统构成, 示于图 1。为便于对火焰的演化过程进行高速光学观测记录, 柱形容器采用透明有机玻璃制成。容器长 1m, 内径 0.18m。

实验步骤为: 高压电火花在容器底面中心点火起爆, 当容器内压力上升至预定破膜压力, 泄爆口开启泄爆; 泄爆监测系统监测泄爆口开启的压力与时间, 高速 CCD 与压力传感器记录整个过程中容器内火焰的发展传播和压力变化历史。

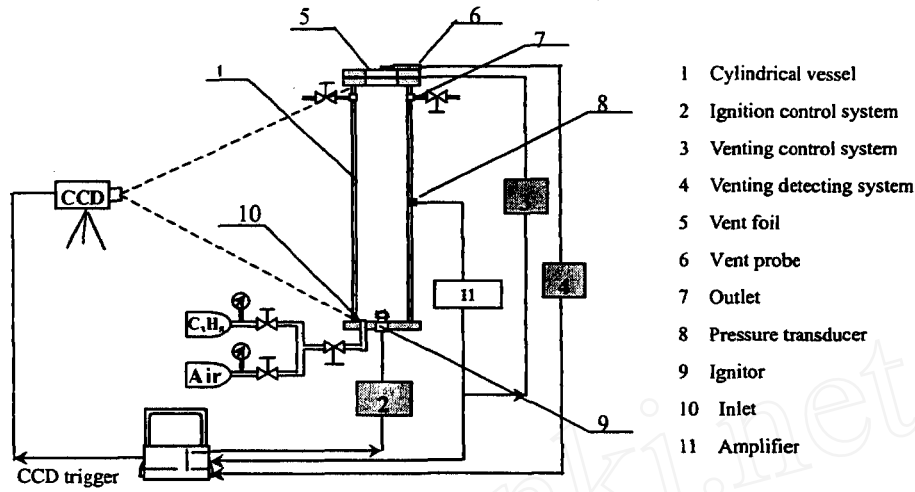


图1 柱形容器开口泄爆实验装置

实验考察了 4.1%的丙烷-空气预混气, 在底端中心点火, 顶端开口泄爆方式下, 容器内火焰传播过程和压力发展情况。实验中采用了直径分别为 100mm, 50mm 的大小两个圆形泄爆口, 泄爆压力的范围为 0~0.2MPa。容器内初始压力均为外界环境压力(以下讨论的压力均为超过环境压力的超压部分)。

## 2 主要实验结果

### 2.1 不同泄爆口面积下的压力发展历史

图 2, 图 3 分别给出泄爆口直径为 50 mm, 100mm (泄爆口面积与容器横截面面积之比为  $V_f=7.7\%$ ,  $30.8\%$ ) 时, 不同泄爆压力范围内, 容器内爆炸压力随时间发展的典型曲线。

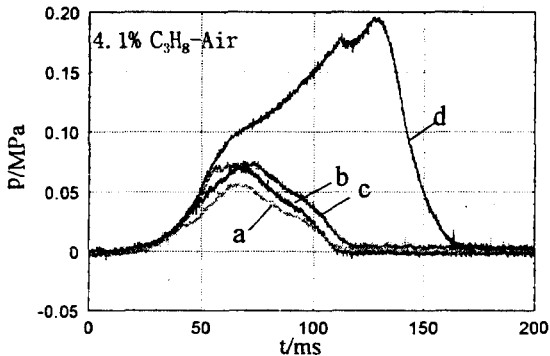


图2 泄爆口直径为 50mm 时, 不同泄爆压力下容器内爆炸压力发展曲线

泄爆压力(MPa): a—0.02; b—0.04; c—0.07; d—0.18

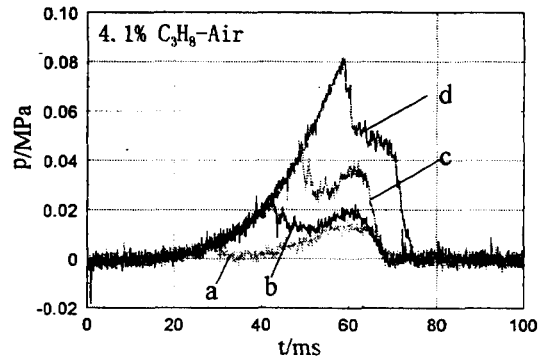


图3 泄爆口直径为 100mm 时, 不同泄爆压力下容器内爆炸压力发展曲线

泄爆压力(MPa): a—0.005; b—0.02; c—0.05; d—0.08

对于小泄爆口泄爆( $V_f=7.7\%$ , 图 2), 实验考察了泄爆压力为 0.02~0.18MPa 范围内的情况, 其总的特征是: 泄爆口开启后压力并未立即下降而是继续上升, 达到最大压力后缓慢下降。

当泄爆口面积增大( $V_f=30.8\%$ , 图 3), 在 0.005~0.1MPa 的泄爆压力范围内, 表现出如下特点: 泄爆口开启后压力立即下降, 但随后缓慢回升, 形成压力的双峰现象; 达到第二峰值后, 压力急剧下降。

## 2.2 不同泄爆口面积下的火焰演化过程

封闭条件下容器内火焰传播特性是研究泄爆影响的基础。图 4 给出了等容爆炸过程中火焰发展传播特性。照片清晰地展示了柱形容器内爆炸发展的两阶段特性<sup>[9, 10]</sup>。第一阶段(图 4a~e): 火焰从初始半球形逐渐拉长为半椭球形, 此阶段容器内的燃烧可认为是绝热; 非绝热燃烧的第二阶段(图 4f~k): 火焰侧面近柱形部分触壁消失, 顶端反向凹陷形成所谓的“tulip”火焰<sup>[11]</sup>, 并稳定传播直至爆炸结束。

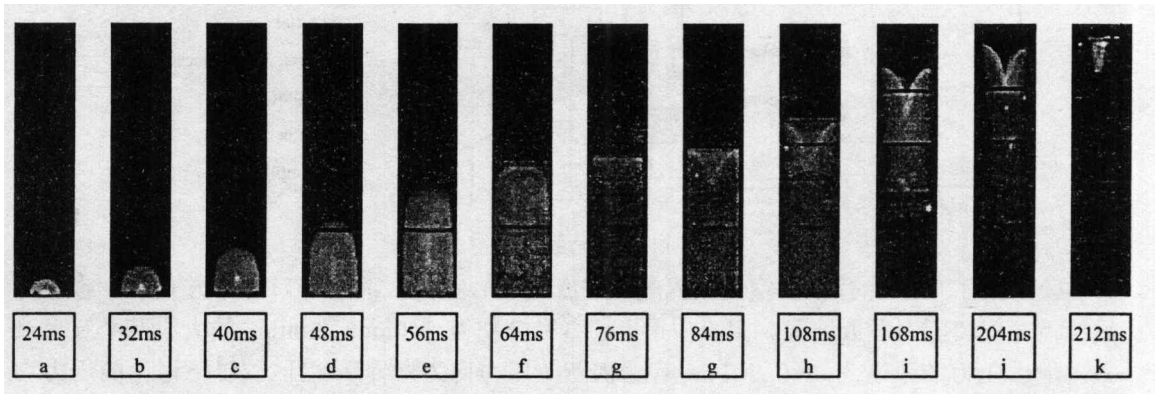


图 4 柱形封闭容器内火焰传播过程

对于小泄爆口泄爆( $V_f=7.7\%$ ), 当泄爆压力在 0.02~0.1MPa 范围内时, 图 5 给出了与图 2 中曲线 b 对应的典型的火焰演化照片(容器上半部照片)。泄爆口开启后, 火焰面顶端逐渐变平, 中心发亮并向上凸起, 四周缓慢上翘, 逐渐演变为近似莲花形火焰, 稳定向上传播最后泄出容器。

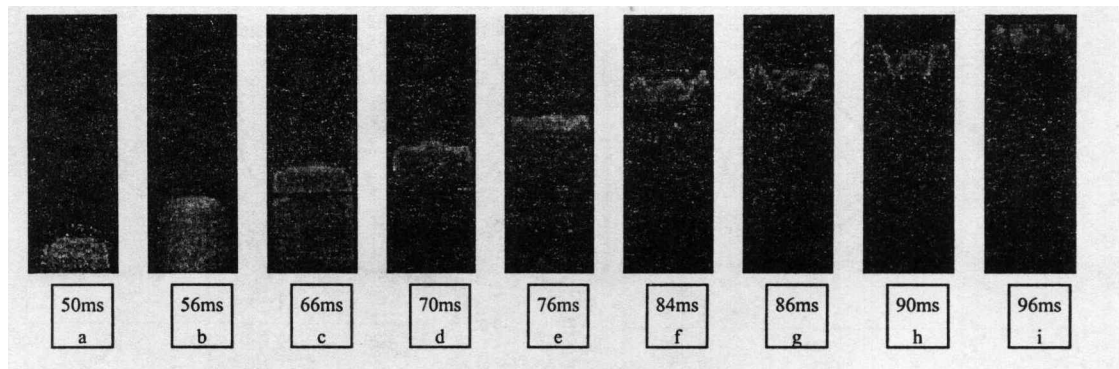


图 5 柱形容器泄爆过程中火焰传播过程

4.1% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-air,  $P_v=0.04\text{MPa}$ ,  $t_v=48\text{ms}$ ,  $V_f=7.7\%$

对于大泄爆口( $V_f=30.8\%$ ), 在 0.02~0.1MPa 的泄爆压力范围内, 典型的火焰演化过程(容器上半部照片, 与图 3 曲线 b 工况对应)如图 6 所示: 泄爆口开启后, 火焰传播加速, 火焰面前缘变平, 中心部分变亮下凹, 下凹部分逐渐拉长形成类似于等容燃烧中 tulip 形状的火焰。

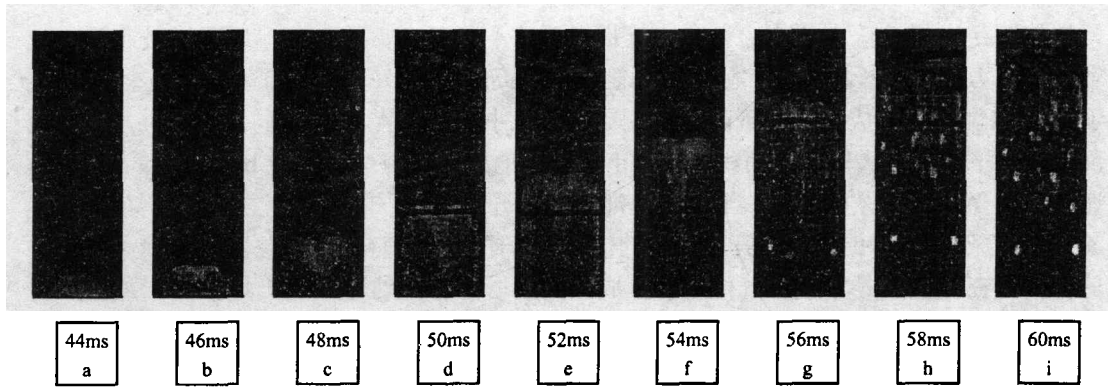


图6 柱形容器泄爆过程中火焰传播过程

4.1% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-air, P<sub>v</sub>=0.02MPa, τ=42ms, V<sub>r</sub>=30.8%

### 3 讨论

#### 3.1 不同泄爆条件下容器内压力发展趋势

泄爆过程中容器内压力主要决定于两个过程相互作用的综合效果：一是容器内由于燃烧而致的气体的净生成率，主要由火焰面面积与燃烧速率决定；另一是气体从泄爆口流出的泄流率，它决定于泄爆口大小和容器内压力等。

泄爆口开启前，容器内爆炸发展遵从等容燃烧规律。气体的净生成率表现为容器内压力上升速率。从容器的等容爆炸压力曲线，可以得到对应不同泄爆压力时(开口瞬间)容器内压力上升速率的变化规律。泄爆口开启后，气体从泄爆口的流出造成容器内压力的下降。泄爆口开启瞬间，由气体泄流引起的容器内压力下降速率可按照一维等熵流动估计为<sup>[5]</sup>

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} \frac{R \cdot T_v}{V} \left[ -918 A_v \left( \frac{p_v - p_2}{T} \right)^{1/2} \right] & (\text{亚音速泄流 } p_v \leq 1.89 P_2) \\ \frac{R \cdot T_v}{V} \left( -1.392 \frac{A_v p_v}{T_v^{1/2}} \right) & (\text{音速泄流 } p_v > 1.89 P_2) \end{cases} \quad (1)$$

其中  $p_v$  为泄爆压力， $p_2$  为环境压力， $T_v$  为未燃气温度， $A_v$  为泄爆口面积， $\gamma$  为未燃气比热比， $R$  为气体常数。

图7给出了泄爆口开启瞬间，不同泄爆压力下容器内燃烧产生的压力上升速率和气体泄流引起的压力下降速率(绝对值)曲线。

对应不同的泄爆压力，比较压力的上升和下降速率曲线，可以看出：较小泄爆口(直径为50mm,  $V_r=7.7\%$ )的压力下降速率曲线 a 与等容燃烧压力上升速率曲线 A 有两个交点，当泄爆压力处于两点之间时，燃烧造成的压力上升占主导

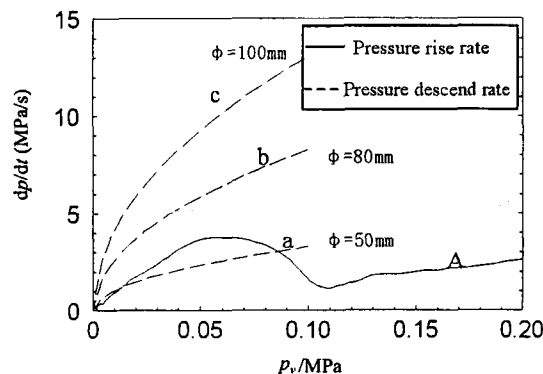


图7 不同泄爆压力下，容器内压力上升速率与下降速率的比较

地位,泄流不足以抵消压力的净增长。这就是大多数小泄爆口实验,在泄爆压力较小时,泄爆后容器内压力继续增长的机制。随着泄爆压力的增高(燃烧的发展进入了相对平缓段)曲线 a 高于曲线 A,泄流造成的压力下降成为主导,因此小泄爆口在高泄爆压力泄爆时,压力也会表现出单调下降。较大的泄爆面积条件下,对应的压力下降速率曲线 b, c 全都高于压力上升速率曲线 A,这就是较大开口泄爆时,泄爆压力普遍立即下降的原因。但是正如图 3 中曲线 a, b, c, d 所表示的,较大开口面积的泄爆过程中压力仍有回升现象。这是泄爆过程中燃烧的特征所在,它应是泄爆后气体流动造成的湍流增强和流动造成的火焰面变形加大所引起的燃烧加强。

### 3.2 泄爆流动对容器内火焰演化过程的影响

泄爆容器内压力发展历史,是泄爆流动与容器内燃烧状况综合作用的最终结果,而泄爆过程中火焰面形状特征、焰面面积以及传播速度等特性的变化,则直接反映了泄爆流动与容器燃烧相互作用的具体过程。

从火焰传播照片中,可以提取火焰传播速度的变化规律。图 8 给出了在等容爆炸和大、小口泄爆时,火焰传播速度的比较。结合前面给出的泄爆过程的压力、火焰发展历史,讨论泄爆流动对容器内爆炸发展的影响。

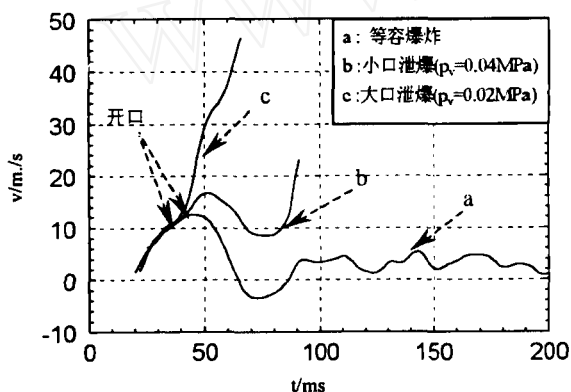


图 8 等容爆炸与开口泄爆过程中火焰传播速度比较

对于小口泄爆,从图 8 中(曲线 b)可以看出,开口后,火焰传播速度略有增大,但火焰面变形不大(图 5(a)~(b)),表明此时泄爆流动对火焰的影响还较弱,但由于此时泄流率较小,容器内压力继续上升;随着火焰面逐渐演变为莲花形(图 5(d)),容器内压力上升至最大值,泄流也随之增强,容器内压力开始下降;由于火焰面面积的增大,为莲花形火焰也保持较为稳定的速度传播(图 5(e)~(h)),使得容器内压力以较为缓慢速度下降,直至火焰泄出容器(图 5(f)),

容器内压力才迅速下降至外界环境压力。

对于大口泄爆,泄爆开口后,火焰传播速度骤增(图 8 曲线 c),火焰面迅速向 Tulip 火焰转化(图 6(a)~(c)),泄爆流动较为强烈,压力迅速下降;随着火焰变形加速,近 tulip 火焰的形成(图 6(d)),火焰面面积和泄流引起的湍流使得燃烧加剧,容器内气体生成率重新超过泄流率,压力开始回升;但由于泄流导致火焰传播速度较大,火焰迅速泄出容器,容器内压力经历短暂上升后,迅速降至常压。

总的看来,小口泄爆时,开口后容器内压力会继续上升,变化较为平稳,泄爆流动对容器内燃烧增强作用不太明显;而大口泄爆时,虽然压力衰减较快,但泄爆流动对容器内燃烧有明显的增强效果,导致压力重新上升形成双峰。

## 4 结束语

开口泄爆是一个流动与燃烧相互耦合的复杂过程,合理的泄爆理论,必须正确描述泄爆

流动、容器内燃烧状况与压力变化之间的联系机制。通过对泄爆过程中,不同泄爆条件下容器内压力变化历史和火焰传播特性的观测和初步探讨,使我们有可能大体上把握大长径比柱形容器开口泄爆的基本物理过程与发展趋势,但进一步细致刻画泄爆过程中燃烧发展、演化的动力学过程,还必须借助流场测量,数值模拟等手段,才有可能揭示出其内在的联系,这是我们正在继续的工作。

本文实验工作得到了波兰宇航研究所的大力协助,并在波兰洛兹工业大学热工及制冷技术实验室协助下完成,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Eckhoff RK. Dust Explosions in the Process Industries. US: Butterworth-Heinemann Ltd, 1991
- 2 VDI 3673 Part1. Pressure Venting of Dust Explosions. Dusseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 1995
- 3 NFPA 68. Guide for Venting of Deflagrations. Quincy: National Fire Prevention Association, 1994
- 4 Bradley D, Mitcheson A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels, I-Theory. *Combustion and Flame*, 1978, 32: 221~236
- 5 Nagy J, Verakis C. Development and Control of Dust Explosions. New York: Marcel Dekker Inc, 1983. 166~176
- 6 Canu P, Rota R, and Carra S. Venting gas deflagrations a detailed mathematical model tuned on a large set of experimental data. *Combustion and Flame*, 1990, 80: 49~64
- 7 Schumann St, Rastogi AK. Dust explosion venting: experiments and numerical modeling. *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, 1995, 1: 231~242
- 8 Mercx W P M. Modeling and experimental research into gas explosions. *Loss Prevention and safety Promotion in the Process Industries*, 1995, 1: 333~347
- 9 Markstein GH. Nonsteady Flame Propagation. Oxford: Pergamon Press, 1964. 113~119
- 10 Pu YK. Fundamental characteristics of laminar and turbulent flames in cornstarch dust-air mixture. [Ph D Thesis]. Montreal: McGill University, 1987. 105~106
- 11 Ellis O C DE C. Flame movement in gaseous explosive mixtures. *Fuel in Science and Practice*, 1928, 7: 502