

文章编号: 1001-1455(2004)04-0330-07

柱形容器开口泄爆过程中的火焰传播特性^{*}

胡俊^{1, 2}, 万士昕², 浦以康², 贾复², JAROSINSKI Jozef³

(1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;

3. 波兰洛兹工业大学 波兰)

摘要: 泄爆过程中流动与燃烧的相互作用机制是研究开口泄爆问题的关键。对柱形容器泄爆过程中压力与火焰发展传播过程的观测与分析表明, 不同泄爆条件下压力与火焰的发展传播具有明显特点。泄爆诱导流动通过加速火焰传播、加剧火焰变形、增大火焰面积对容器内燃烧产生增强作用, 泄爆流动大小主要由泄爆面积决定。小口中低压泄爆过程压力与火焰的发展过程与封闭燃烧中类似; 小口高压以及大口泄爆过程中, 火焰变形剧烈, 传播速度明显上升, 并导致压力的回升。

关键词: 爆炸力学; 火焰传播; 开口泄爆; 柱形容器; 泄爆压力; 泄爆面积

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 130°3510

文献标志码: A

1 引言

现代工业的迅速发展使生产中涉及的可燃性气体、粉体等材料的种类越来越多, 操作的规模也越来越大。相应地, 气体、粉尘爆炸事故发生的频率、严重程度和灾害威胁也大大增加。“开口泄爆”作为一种最实用和有效的安全技术手段, 广泛应用于各种大型工业容器的安全设计中^[1~2]。然而, 开口泄爆是一个耦合了可燃介质流动与热化学反应的非定常过程。合理设计泄爆条件, 正确实现泄爆减灾目的, 必须认识与把握泄爆过程中容器内燃烧状况(包括燃烧速率, 火焰的传播、变形等)与泄爆引起的流动状况(湍流状态、流动速度等)之间的相互作用。

针对在工业中有着广泛应用的大长径比柱形容器, 作者根据泄爆过程中容器内压力、压力上升速率历史, 结合泄流率及燃烧状况变化, 总结出不同泄爆面积与泄爆压力下容器内压力发展的基本发展趋势^[3]。但泄爆过程中容器内压力的变化只是容器内燃烧与流动作用的综合反应, 进一步深入研究泄爆过程中火焰面的发展变形过程及其与压力历史间的联系, 才有可能正确刻画开口泄爆这样一个流动-燃烧的复合过程。

本文的目的是借助对泄爆过程中火焰发展历史的监测结果, 通过对几种典型泄爆条件下容器内火焰面发展变形、流动状况变化与压力发展的相关分析, 进一步提高对泄爆过程中流动与燃烧作用机制的认识。

2 实验装置与测试系统

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、火焰传播光学记录系统、压力监测与数据采集系统构成, 如图 1 所示。

柱形爆炸容器采用透明的有机玻璃制成。容器长 $L = 1\text{m}$, 内径 $D = 180\text{mm}$ ($L/D = 5.6$)。火焰传播过程的光学记录使用了波兰洛兹工业大学燃烧实验室的 Redlake 高速数字 CCD 摄像系统。实验中分别采用了全景和半景摄影。全景摄影记录整个过程中容器内火焰位置的变化, 拍摄速度为 250 帧/s,

* 收稿日期: 2003-08-04; 修回日期: 2003-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(19772060); 中国科学院知识创新工程基金项目(KJ CX2-SW-L05)

作者简介: 胡俊(1972—), 博士后。

分辨率为 480×420 , 最佳曝光时间为 $1/1250\text{s}$; 半景摄影则是为了更清楚地观察泄爆后期火焰变形形状, 摄像范围为容器上半部, 拍摄速度为 500 帧/s, 分辨率为 240×210 , 最佳曝光时间为 $1/1000\text{s}$ 。实验在暗室条件下进行。透明柱形容器后配以白色背景, 以增强火焰照片的对比效果。

实验系统的其余组成部分以及实验步骤的详细介绍可参考文献[3]。

实验内容及条件见表1。三种不同面积的泄爆口依其直径大小分别简称为大口、中口、小口。

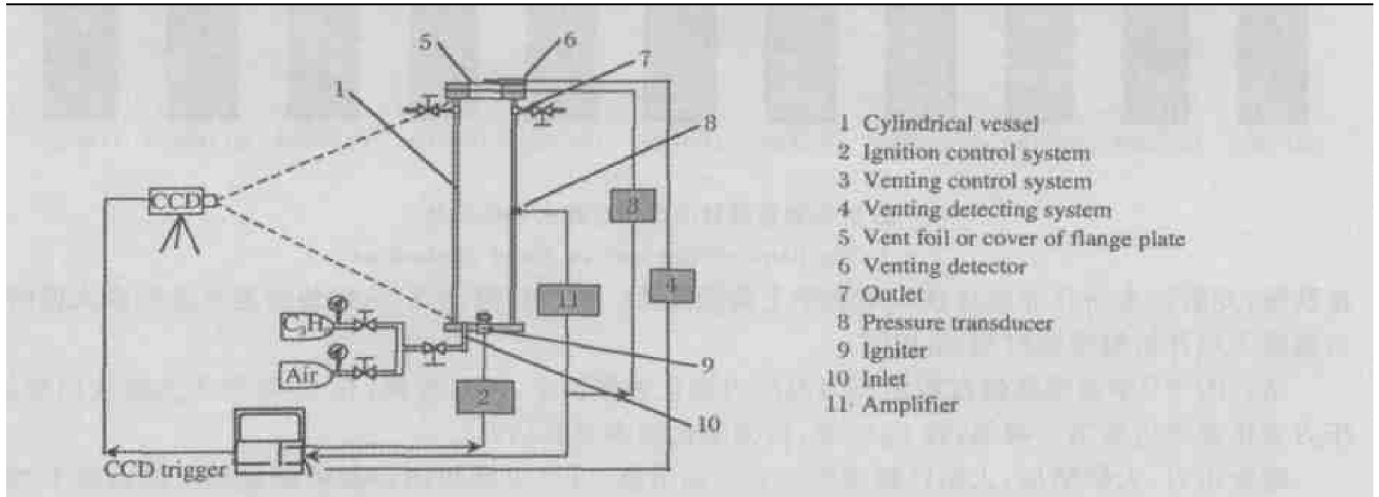


图1 柱形容器开口泄爆实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the experimental arrangement

表1 实验内容及实验条件

Table 1 Experimental arrange

实验气体	初压	点火位置	泄爆方式	泄爆口直径/mm	泄爆口面积/容器横截面积 V_r	泄爆压力范围/kPa
$4.1\% \text{C}_3\text{H}_8/\text{Air}$	常压	底端中心	顶端开口	50, 80, 100	$7.7\%, 30.8\%$	$5 \sim 460$

3 实验结果及讨论

选取 4.1% 的丙烷/空气预混气在封闭燃烧过程以及不同泄爆压力下大口 ($\varnothing 100\text{mm}$)、小口 ($\varnothing 50\text{mm}$) 泄爆过程中火焰发展的传播特性进行分析。

3.1 封闭燃烧过程

容器封闭燃烧发展过程中压力、火焰、流场的变化信息是比较分析泄爆过程燃烧与流动相互作用的基础。由于容器为透明有机玻璃材料构成, 出于实验装置安全考虑, 未进行完整的等容爆炸实验, 而是在实验中设置了远高于普通工业泄爆标准的泄爆压力 ($p_v = 460\text{kPa}$), 则开口前的封闭燃烧过程将作为分析比较泄爆过程的基础。

图2给出了封闭燃烧过程中容器内火焰面发展传播的照片。通过测量火焰传播系列照片中轴线上火焰面位置的变化, 提取出图3中火焰传播速度随时间的变化曲线, 曲线a对应了封闭燃烧过程火焰传播速度随时间的变化。

按照照片中火焰形态特点分析, 封闭燃烧过程火焰的传播大致可分为三个不同的阶段:

第一阶段: 从点火 ($t=0$) 开始至侧面火焰开始触壁 ($t_{A1} = 52\text{ms}$), 如图2(a)~(e)所示: 火焰从初始半球形逐渐拉长发展为半椭圆形火焰。

第二阶段: 如图2(e)~(g)所示, 随着侧面火焰触壁, 火焰柱形侧面迅速消失顶端随之变平, 且火焰面中部出现反向下凹。

第三阶段: 当 $t_{A2} \approx 76\text{ms}$ 时, 火焰下凹加深演变为典型的 Tulip 火焰^[4~6], 此后如图2(g)~(k)所示, Tulip 火焰保持较为稳定的形态向前传播直至封闭燃烧过程结束。

与火焰形态的三个阶段对应, 图3中火焰传播速度也经历了初始单调快速上升, 达到极大值后又迅

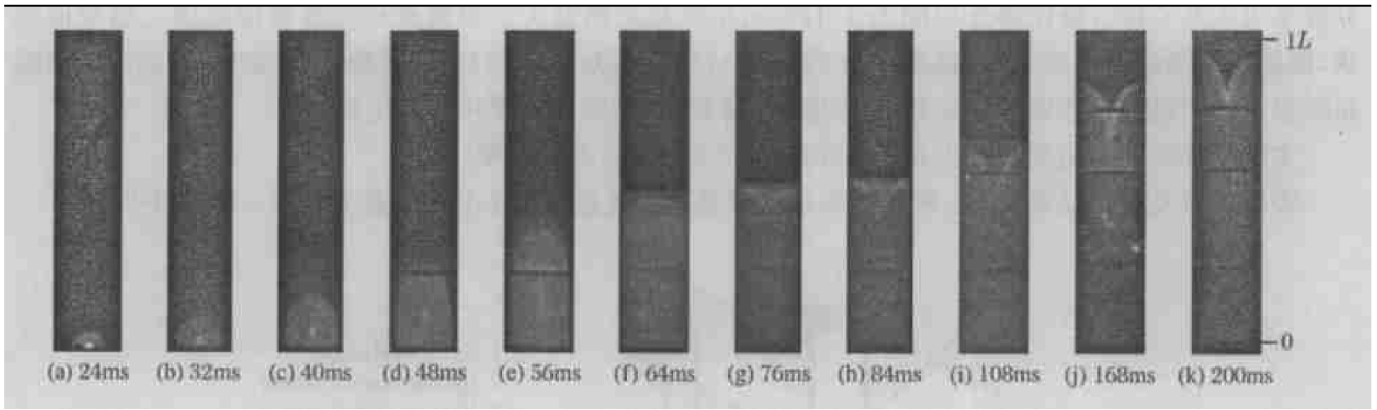


图 2 柱形容器封闭燃烧过程火焰传播照片

Fig. 2 The flame propagation in closed combustion

速跌落;此后逐步回升并维持在一定水平上高低涨落。值得注意的是,火焰传播速度达到最大值的时刻与侧面火焰开始触壁的时刻 t_{A1} 相同。

结合图 4^[3] 中封闭燃烧过程的压力与压力变化速率历史,可以发现,在 t_{A1} 时刻压力曲线出现拐点,压力变化速率达到第一峰值,在 t_{A1} 时刻,压力变化速率重新回升。

综合压力、火焰结构、火焰传播速度三方面的信息,可以发现封闭容器燃烧过程可以由两个特征时间来划分:当 $t < t_{A1}$ 时,已燃气体不断加剧的热膨胀、火焰面的迅速拉长和面积的增大反映出燃烧的不断加剧,而这一阶段可视为近似绝热阶段;在 $t_{A1} \sim t_{A2}$, 火焰传播迅速减速,它和侧面火焰触壁消失、壁面热损失、已燃区热膨胀骤减以及燃烧强度跌落联系在一起,燃烧进入非绝热阶段;从 t_{A2} 开始, Tulip 火焰的形成使得容器内燃烧重新加剧,火焰传播速度逐渐回升。Tulip 火焰的形成以及火焰传播速度的振荡可能是燃烧不稳定性、压力波传播、流动边界约束等多种复杂因素综合作用的结果,反映出此阶段燃烧的复杂性。

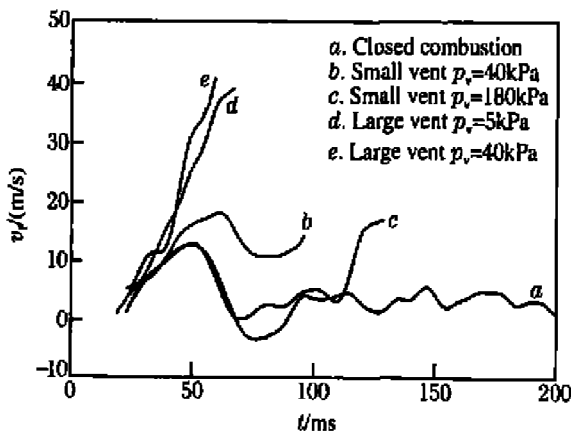


图 3 火焰传播速度随时间变化曲线

Fig. 3 The flame propagation velocity as function of time

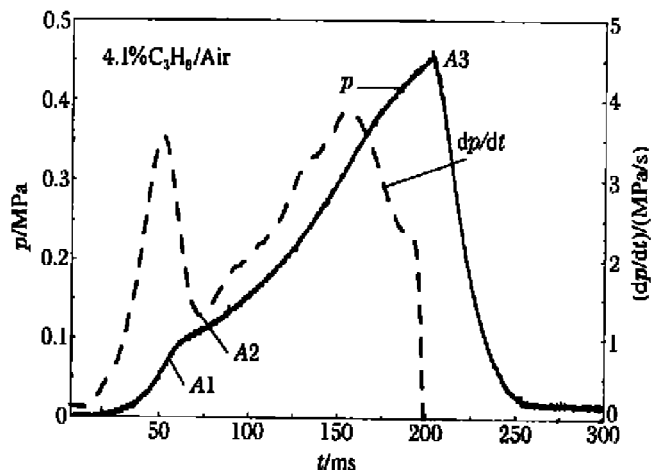


图 4 封闭容器中压力及压力变化速率历史

Fig. 4 Pressure history and pressure rise rate in closed combustion

3.2 小口泄爆过程

在小口泄爆实验研究的泄爆压力范围内 ($0 \sim 460\text{kPa}$), 从已获得的压力、火焰发展实验结果看, 大致可分为两类: 中低压泄爆与高压泄爆。以下分别以泄爆压力为 40kPa 与 180kPa 两种情况的实验结果为代表来说明两种过程中火焰传播的不同特点。

3.2.1 小口中低压泄爆

图 5 为小口泄爆过程中不同泄爆压力下容器内压力发展历史, 图 6 给出了泄爆口直径为 50mm ($V_v = 7.7\%$)、泄爆压力为 40kPa 时容器内火焰发展传播的照片。与之对应的压力曲线为图 5 中曲线 b , 对应的火焰传播速度随时间的变化曲线为图 3 中曲线 b 。

如图 6 所示(图中 t_v 表示开口时刻), 开口后容器内火焰发展经历了从椭球形逐渐拉长, 顶部变平, 继而发展为结构清晰、近似莲花形火焰的几个阶段, 其中莲花形火焰形成时间(74ms)与封闭燃烧过程中 Tulip 火焰形成时间(约 76ms)相当接近。从火焰形状变化过程到变形特征时间, 两种火焰演化的进程基本相似, 不同的只是泄爆过程后期火焰形状为莲花形。

与封闭燃烧过程火焰传播速度(图 3 曲线 a)相比, 小口中低压泄爆过程的火焰传播速度(图 3 曲线 b)除在接近泄爆口处高速逸出外, 仅整体抬高了一些。相应的压力变化(图 5^[3]中的曲线 b)表现为开口后压力继续上升后缓慢下降。

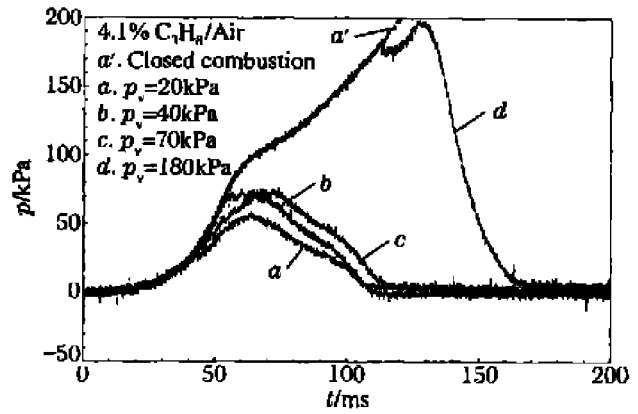


图 5 小口泄爆过程中不同泄爆压力下容器内压力发展历史
Fig.5 Pressure histories at different venting pressures when vent diameter is 50mm

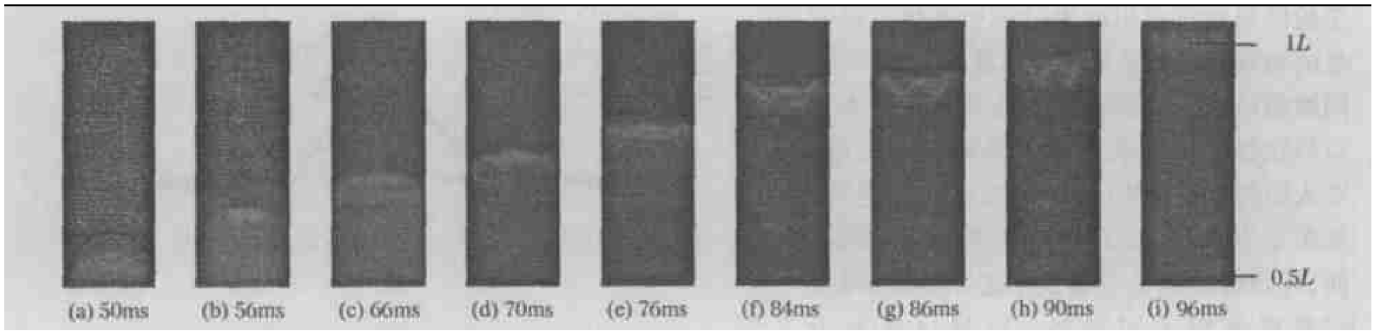


图 6 小口中低压泄爆过程火焰传播照片(4.1% C₃H₈/Air, $p_v=40\text{kPa}$, $t_v=48\text{ms}$, $V_r=7.7\%$)

Fig.6 The flame propagation during venting with vent diameter 50mm

3.2.2 小口高压泄爆

图 7 给出了泄爆口直径为 50mm ($V_r=7.7\%$, 开口时刻为 110ms), 泄爆压力为 180kPa 时容器内火焰发展传播照片。与之对应的压力曲线为图 5^[3]中曲线 d , 对应的火焰传播速度随时间的变化曲线为图 3 中曲线 c 。

由于开口压力较高, 开口前容器内火焰已发展到具有 Tulip 形态的阶段, 开口后火焰下凹逐渐拉长, 火焰锋面也逐渐模糊; 对应火焰传播速度曲线(图 3 中曲线 c)显示: 开口后火焰传播迅速加速直至火焰逸出容器。对应的压力曲线(图 5^[3]中曲线 d)则在开口后短暂下降之后重新回升形成第二峰。

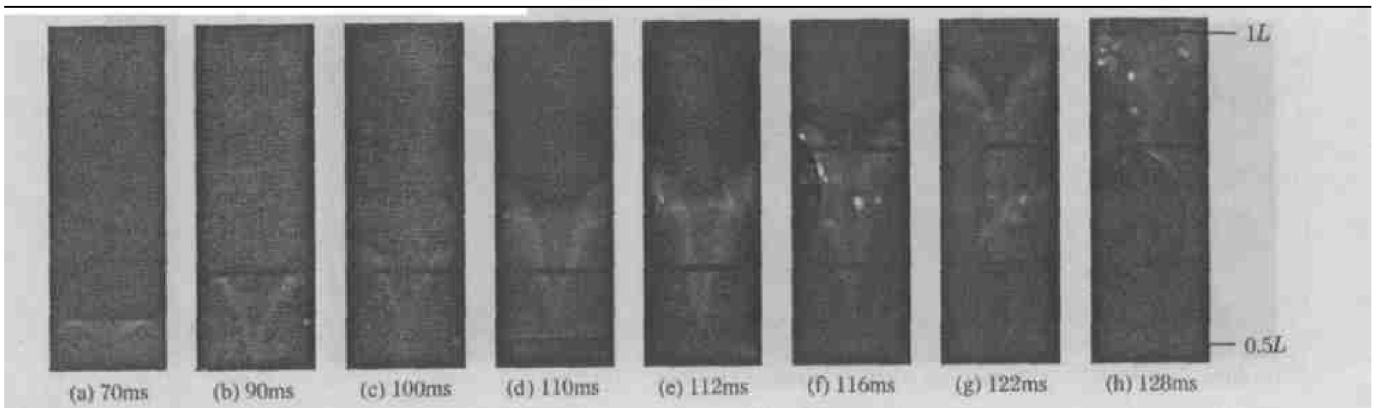


图 7 小口高压泄爆过程火焰传播照片(4.1% C₃H₈/Air, $p_v=180\text{kPa}$, $t_v=110\text{ms}$, $V_r=7.7\%$)

Fig.7 The flame propagation during venting with vent diameter 50mm

3.2.3 小口泄爆讨论

泄爆过程中,开口初始泄流及其诱导的湍流强度主要取决于泄爆口面积与泄爆压力大小;流动对燃烧的影响则主要表现在对燃烧速率、火焰面积、传播速度的影响;而开口时刻容器内火焰形状、位置也影响着此后流动与燃烧相互作用的效果。

小口中低压泄爆过程中,开口后压力继续上升、火焰变形发展历程与封闭燃烧过程类似以及火焰结构清晰等均反映出泄流对容器内燃烧过程的影响较弱。一方面,泄爆导致的外泄流动较弱,其影响区域也较小;另一方面,由于开口压力低,开口时火焰区距离泄爆口较远,泄流对火焰结构影响较小,使之能够保持与封闭燃烧过程相似的发展历程,同时仍能保持清晰的火焰结构;泄流对燃烧的作用仅表现为对火焰及管内流动的整体拉动作用。

小口高压泄爆过程中,泄爆压力高,泄流较强,影响区域大,开口时火焰距离泄爆口距离相对中低压泄爆开口时近。较强的泄流及其诱导的湍流使得火焰面急剧变形并加速传播,流动对燃烧具有较强的增强作用。

3.3 大口泄爆过程

在大口泄爆实验研究的泄爆压力范围(0~100kPa)内,已获得的压力、火焰发展实验结果均显示出泄爆过程中燃烧有较明显的加强趋势,图8^[3]大口泄爆过程中不同泄爆压力下容器内压力曲线均表现为开口后短暂下降而后重新上升形成第二峰,而火焰传播速度均呈单调加速上升趋势,如图3中曲线d、e。对应于开口压力的不同,开口时火焰的位置及形态不同,使得火焰变形呈现不同态势。以开口压力为5kPa及20kPa为例说明。

3.3.1 大口微压泄爆

图9给出了泄爆口直径为100mm($V_r=30.8\%$,开口时刻为28ms),泄爆压力为5kPa时容器内火焰发展传播照片。对应的压力曲线为图8中曲线a,对应的火焰传播速度随时间的变化曲线为图3中曲线d。

照片显示:大口微压泄爆过程中,火焰面始终保持半椭球形发展直至火焰泄出。从呈半球形火焰的起始时刻至 $t=56\text{ms}$ (图9(h)),火焰面最大拉长达到了约0.6m,远高于等容燃烧过程中半椭球形火焰面(约0.4m)的最大长度。

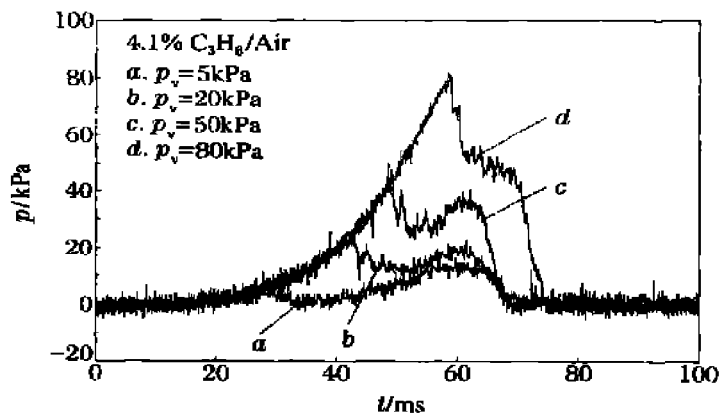


图8 小口泄爆过程中不同泄爆压力下容器内压力发展历史

Fig.8 Pressure histories at different venting pressures when vent diameter is 100mm

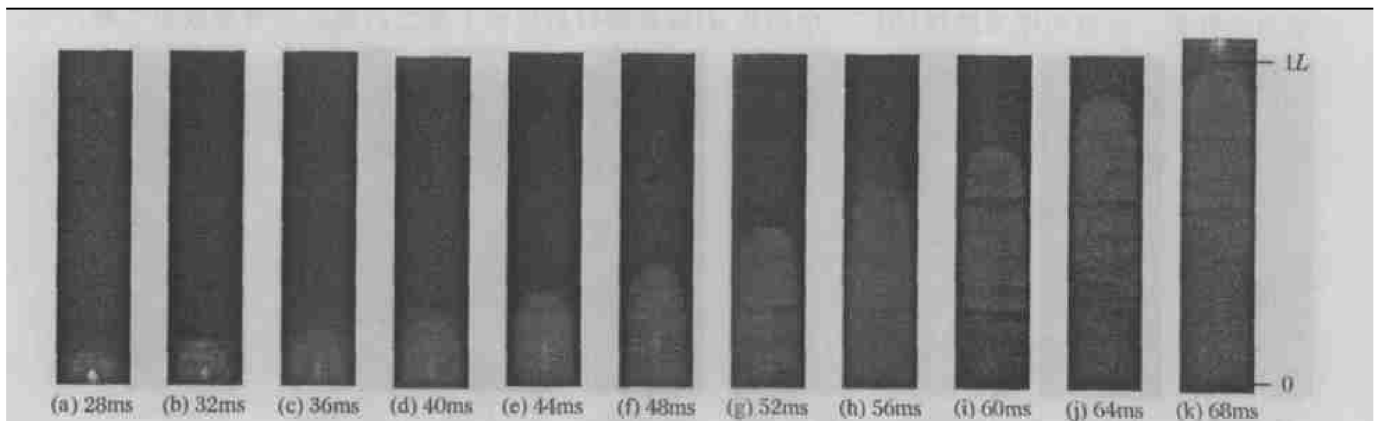


图9 大口微压泄爆过程火焰传播照片(4.1% C₃H₈/Air, $p_v=5\text{kPa}$, $t_v=28\text{ms}$, $V_r=30.8\%$)

Fig.9 The flame propagation during venting with vent diameter 100mm

3.3.2 大口中低压泄爆

图10给出泄爆口直径为100mm ($V_r=30.8\%$), 泄爆压力为20kPa时容器内火焰发展传播照片。对应的压力曲线为图8中曲线b, 对应的火焰传播速度随时间的变化曲线为图3中曲线e。

开口后, 如图10所示, 在较短时间间隔内, 火焰急剧变形为类似Tulip形状火焰, 火焰锋面较为模糊, 并迅速逸出容器。

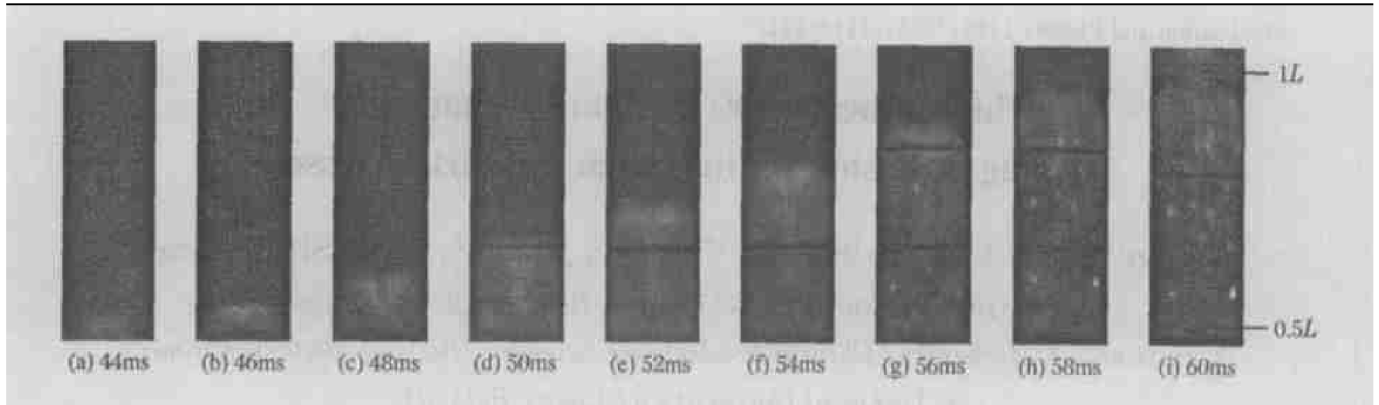


图10 大口中低压泄爆过程火焰传播照片 ($4.1\% \text{C}_3\text{H}_8/\text{Air}$, $p_v=20\text{kPa}$, $t_v=42\text{ms}$, $V_r=30.8\%$)

Fig. 10 The flame propagation during venting with vent diameter 100mm

3.2.3 大口泄爆讨论

与小口泄爆相比, 大口泄爆过程在所有的泄爆压力范围内均具有较强的泄爆诱导流动, 表现在压力回升形成双峰与火焰传播单调加速。在微压泄爆过程中, 开口时火焰距离泄爆口较远, 但较强的泄流将火焰区整体拉动, 由于火焰面轴向传播速度较高, 而侧向扩展速度较低, 整个泄爆过程中容器壁面的粘附气体层始终隔离着火焰面, 使侧面火焰得以维持。而中低压泄爆中, 较强的泄流及其诱导的湍流使得火焰面急剧变形, 火焰锋面增厚并加速传播。都表明了泄爆流动对容器内燃烧的加剧作用。

4 结 论

(1) 火焰面形状演化、火焰传播速度变化和压力变化三方面相互印证, 证实了柱形容器等容燃烧过程的基本特征: 在绝热的第一阶段, 容器内的燃烧随着火焰面面积的不断增大而加剧, 压力上升速率不断增大, 火焰加速传播; 在非绝热的第二阶段, 初始短暂的火焰面触壁过程中, 火焰面面积骤减、压力上升速率与火焰传播速度跌落, 燃烧减弱; 随着Tulip火焰的逐渐形成, 压力上升速率重新增大, 火焰传播速度呈涨落状, 容器内燃烧再次加剧。这是柱形容器等容燃烧的主要物理过程。

(2) 泄爆过程中, 泄爆流动的强弱与泄爆压力和泄爆口面积有关, 泄爆口面积影响更大。

(3) 小口中低压泄爆过程中, 火焰形状演变和传播速度变化规律与等容燃烧情形类似, 燃烧过程基本经历了等容燃烧同样几个阶段, 表现为压力的继续上升和缓慢下降。泄爆流动的影响主要表现为对容器内气体的整体的轴向拉动作用, 而对容器内燃烧过程的影响是第二位的。

(4) 小口高压泄爆及大口泄爆过程中, 压力的回升与火焰面变形、面积增大、火焰传播速度的加快有着良好的对应关系, 证实了强泄爆流动对容器内燃烧的加剧作用。

(5) 对于工业中实际应用的大长径比柱形容器, 其泄爆过程中压力变化趋势及泄爆诱导流动对燃烧的影响规律可参考上述几点结论, 但压力及燃烧状况的定量确定仍需通过大尺寸容器实验进一步验证。

参考文献:

- [1] Eckhoff R K. Dust Explosions in the Process Industries[M]. US: Butterworth-Heinemann Ltd, 1994:439-442.
- [2] Nagy J, Verakis C. Development and Control of Dust Explosions[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1983:166-176.
- [3] 胡俊, 浦以康, 万士昕, 等. 柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 47-52.

- HU Jun, PU Yi-kang, WAN Shi-xin, et al. Experimental investigations of pressure development during explosion venting from cylindrical vessels[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(1):47—52.
- [4] Ellis O C. Flame movement in gaseous explosive mixtures[J]. *Fuel in Science and Practice*, 1928, 7:502—508.
- [5] Markstein G H. *Nonsteady Flame Propagation*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1964:113—119.
- [6] Starke R, Roth P. An experimental investigation of flame behavior during explosions in cylindrical enclosures[J]. *Combustion and Flame*, 1989, 75(2):111—121.

The characteristics of flame propagation during explosion venting from cylindrical vessel

HU Jun^{1, 2*}, WAN Shi-xin², PU Yi-kang², JIA Fu², JAROSINSKI Jozef³

(1. *Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

2. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

3. *Technical University of Lodz, Poland*)

Abstract: The mechanism of interactions between combustion and venting induced flow is the basis of venting research. The pressure histories and flame propagation inside cylindrical vessel during venting process are measured and analyzed. The experimental results show that the developments of pressure and flame propagation have clear characteristics at different venting condition. The venting induced flow result in the flame acceleration, deformation and area increase, and the strength of venting induced flow is dominated mostly by the venting area. When small vent with low/medium venting pressure, the histories of pressure and flame is similar to closed combustion, when large vent and small vent with high venting pressure, the flame deformed drastically and the velocity of flame propagation were accelerated saliently.

Key words: mechanics of explosion; flame propagation; explosion venting; cylindrical vessel; venting pressure; venting area

* Corresponding author: HU Jun

E-mail address: hujun@bit.edu.cn

Telephone: 010-68912414