

Experimental Study on Pressure Characteristics of Development in High Pressure Vessel Explosion Venting

Zhendong Zhao¹, Yanjia Li¹, Huaqing Hou¹, Chao Chen¹, Chaoyang Qie^{2*}

¹China Guangdong Nuclear Power Engineering Design Co. Ltd, Shenzhen Guangdong

²Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Email: 809413828@qq.com

Received: Mar. 6th, 2015; accepted: Mar. 18th, 2015; published: Mar. 24th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The design of vented explosion has attracted more concerns for industrial buildings subject to explosive loading of high pressure vessel. The present paper performs the experimental testing research of vented explosion within 0.15 m³ rectangular enclosure. High pressure pipeline, using to simulate the explosive behavior, and explosive venting device are respectively connected to both sides of experimental system. The opening process of venting device is studied within different pressure loadings. The major parameters of initial opening pressure and opening period are investigated with the variations of pressures. The experimental results show the practical values in the design for the protection of explosive venting of high pressure vessel.

Keywords

The High Pressure Explosion, Explosion Venting, Experimental Study

高压容器开口泄爆过程中压力发展特征的实验研究

赵振东¹, 李艳嘉¹, 侯华青¹, 陈超¹, 郝超阳^{2*}

*通讯作者。

¹深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳

²大连理工大学, 辽宁 大连

Email: 809413828@qq.com

收稿日期: 2015年3月6日; 录用日期: 2015年3月18日; 发布日期: 2015年3月24日

摘要

建筑物承受高压容器爆炸荷载作用的泄爆设计被日益重视。本文开展了在容积为0.15 m³方形容器中泄爆实验测试。实验装置一端连接高压管道, 模拟产生高压爆炸。另一端连接泄爆装置, 对不同压力作用的泄爆装置开启过程进行了实验研究。实验结果给出了不同爆炸压力条件下容器内压力发展时程和泄爆装置开启压力、开启时间等指标, 对于高压容器的泄爆防护具有工程应用价值。

关键词

高压爆炸, 开口泄爆, 实验研究

1. 引言

随着化工、核电行业的蓬勃发展, 高压容器和高压管道已经成为普遍应用的特种装备, 由于高压荷载的特殊性, 对装备使用的安全防护日益突出。高压装备发生泄漏爆炸, 将会产生政治影响。对于高压容器爆炸防护问题, 目前主要有抗暴、防爆和泄爆等手段, 而由于经济性和易用性, 泄爆是目前主要的方法。

为了保证建筑物的安全性, “开口泄爆”是工业生产降低爆炸灾害的有效减灾技术手段。开口泄爆是通过设置一定大小的泄爆口, 将爆炸压力及时从内部排放出去, 保护建筑设备安全。对寒冷地区进行泄爆设计时, 建筑物设计还需要满足密闭、防冻、保温等要求, 开口泄爆方式通常在泄爆口被要求安装泄爆装置, 如泄爆窗、金属盖板等。泄爆装置在指定初始压力下开启, 在短时间内开启到指定范围达到泄爆效果, 建筑物内部压力变化与泄爆装置的开启过程相互耦合, 为泄爆口的设计带来挑战。针对具有泄爆装置的泄爆过程分析, 不但需要分析泄爆面积对泄爆效率的影响, 还要考虑泄爆装置的开启压力、开启速率等随市内压力发展的耦合过程, 目前缺乏类似的实验和研究。

当今, 对于泄爆过程的研究, 具有代表性的是从等容绝热燃烧模式出发[1] [2], 同时考虑对泄爆过程的热力学平衡过程。即: 从泄流气体的质量、能量平衡出发, 按照气体泄流率不小于容器内气体生成率的泄爆条件, 给出开口面积、容器体积和泄爆压力等参数的关联公式。在此基础上通过理想气体绝热膨胀公式[3]计算气体的爆破能量, 通过能量换算关系计算爆破能量所对应的炸药爆炸, 最终从某些已知药量的实验中所测到的超压来确定任意药量爆炸时在各种相应距离下的超压。冼巧妍[4]曾采用这种方法对某企业一段蒸汽管道在发生物理爆炸和破裂时冲击波破坏力的危害后果进行计算。但是由于经验参数的不确定性和不同容器中泄爆发展的差异性, 将这些公式运用于不同容器的泄爆设计时, 其设计效果不能令人满意。崔益虎等人[5]对侧面带有泄爆口的球形容器在不同惰性气体浓度条件下密闭爆炸及泄爆过程进行了实验研究, 分析惰化条件下受限空间内部混合气体爆炸及泄爆过程中的压力变化规律, 验证了不同初压对容器内气体密闭爆炸特性的影响和不同惰性气体分数对密闭爆炸的影响。由于通过理论计算对高压力容器爆炸进行泄爆设计时, 容器内部的湍流因子、气固耦合与超压反射等具体的过程过于复杂,

通过公式难以准确计算模拟。目前对于高压压力容器爆炸的开口泄爆研究从实验观测到机理探讨都还相对缺乏，研究工作应该从基础的实验研究入手。

基于大量的实验数据与数据分析，逐渐形成了工程应用的开口泄爆设计规范[6]-[8]，但由于缺乏恰当的理论指导，虽然耗费了巨大的人力物力，泄爆设计的实际应用可靠性和通用性仍不能令人满意。迄今为止，还没有一套较为全面、有效的泄爆理论来指导开口泄爆设计。

本研究主要工作针对考虑泄爆装置模拟高压压力容器爆炸的泄爆过程开展实验研究。研究内容包括：设计了一套模拟高压气体爆炸过程的开口泄爆装置，对泄爆过程中压力时程、泄爆装置开启过程开展测试，考虑泄爆压力变化对泄爆装置开启过程的对应关系。为后续泄爆机理研究提供实验依据。

2. 受限空间气体泄爆性能测试

由于可操作性、安全性等因素限制，目前关于高压容器爆炸的实验研究有所不足。在理论分析结合数值模拟的基础上，设计了一套泄爆实验装置，可实现高压容器爆炸效果，采集监测系统可实时采集爆炸压力，为研究高压容器爆炸的特征提供了实验基础。

泄爆实验系统由配气系统(高压气源)，方形爆炸容器，泄爆装置、蝶阀开关与控制系统，监测与数据采集系统构成。如图 1 所示。

方形容器一端利用管道和高压气源连接，可以自由调节管道内部压力大小，以获得指定的初始压力。柱形管道两侧均安装有蝶阀开关。容器四周均设有压力传感器，正对出口一侧安装泄爆窗作为开口泄爆装置，泄爆窗侧面布设高速摄影装置记录泄爆窗开启过程和开启时间。

实验前，通过高压气源向柱形管道内注入一定压力的气体，然后通过柱形管道内的高压气体向容器内部瞬间释放产生气体爆炸。容器周围安装有压力传感器，实时采集泄爆过程中容器内部的压力值时程。

3. 不同起爆压力下容器内压力分布行为

考虑两种初始压力 0.3 MPa、0.4 MPa 工况下的泄爆行为，实验过程中，通过开关控制蝶阀气动，管道内高压气体瞬间释放到容器内部，在容器内产生爆炸效果，同时泄爆装置开启进行泄爆，高压管道泄出的气流冲击压力探针，采集系统实时记录压力值大小，一侧的高速摄影会准确记录泄爆装置的开启时间和开启的整个过程。

3.1. 不同起爆压力下全封闭行为的压力分布

泄爆口封堵和带有泄爆装置两种条件下进行爆炸测试，图 2，图 3 给出了在 0.3 MPa 和 0.4 MPa 初始压力下，全封闭和带有泄爆装置两种行为下的实验压力时程。

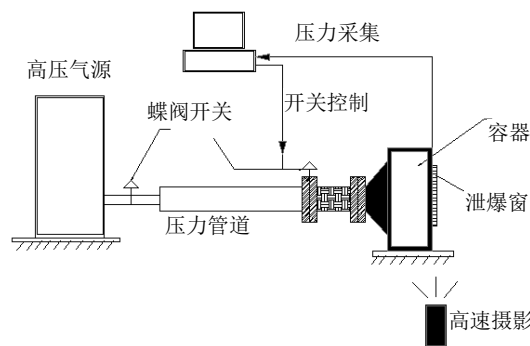


Figure 1. Venting experiment system
图 1. 泄爆实验系统

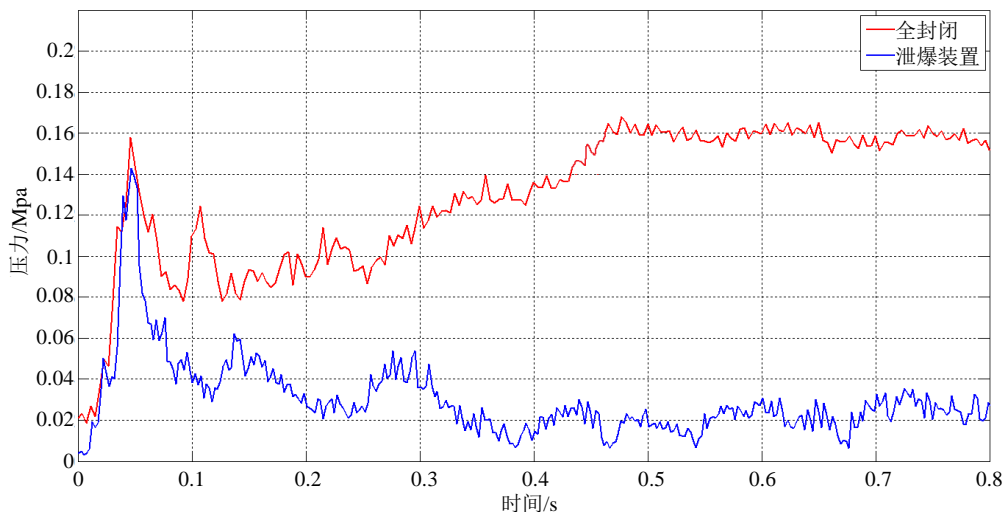


Figure 2. Initiation pressure of 0.3 MPa explosion pressure development curve
图 2. 起爆压力为 0.3 MPa 时爆炸压力发展曲线

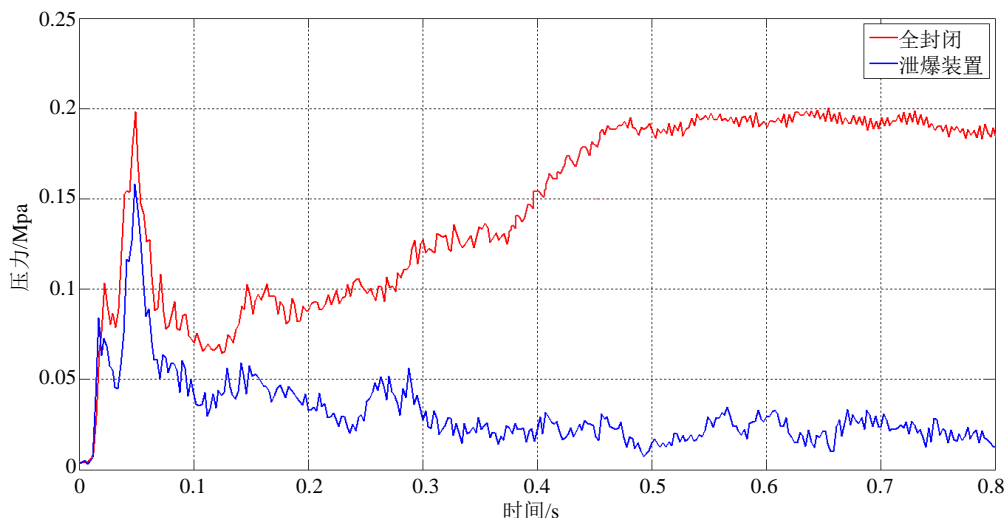


Figure 3. Initiation pressure of 0.4 MPa explosion pressure development curve
图 3. 起爆压力为 0.4 MPa 时爆炸压力发展曲线

从实验结果看出，全封闭行为下，激波期、峰值、升压期等关键参数随起爆压力的变化如表 1 所示。

可以看出，在两种不同起爆压力下的封闭等容实验过程中，爆炸初期(0~0.05 s)，由于爆破激波产生的压力飙升的现象，压力峰值分别为 0.16 MPa 和 0.2 MPa。起爆压力增加，激波能量随之增大，当激波遇容器壁被破碎之后，压力迅速下降。曲线在 0.05~0.1 s 之间压力恢复到正常状态；随后压力开始缓慢升高，起爆压力为 0.3 MPa 时，压力在 0.1~0.5 s 升高至峰值 0.17 MPa；起爆压力为 0.4 MPa 时，压力在 0.1~0.5 s 升高至峰值 0.2 MPa。可以看出，在最终的升压期，起爆压力越大升压速率越大，且最终压力峰值越大，产生更高的爆炸能量。综合两组实验可以发现，两次等容实验过程中，爆炸压力出现两次峰值，第一次峰值与第二次峰值的大小也近似相同。

3.2. 不同起爆压力下泄爆装置对容器内压力的影响

实验结果可以看出，在有泄爆装置行为下，爆炸压力在 0~0.05 s 左右到达压力峰值，且达到峰值的

时间和峰值大小与全封闭行为下近似相同；随着泄爆口的开启，容器内压力被泄放出去，压力迅速下降至环境压力。对比两种不同行为实验可以看出，当有泄爆装置时，压力时程只会出现一次峰值。

对比两次不同起爆压力下泄爆装置行为的实验，升压期、峰值和泄压期等关键参数随起爆压力的变化如表 2 所示。

可以看出，在两种不同起爆压力下泄爆装置的实验过程中，爆炸到达峰值的时间为 0.05 s，压力峰值分别为 0.14 MPa 和 0.16 MPa。起爆压力越大所产生的爆炸能量越高，且升压速率越快；随泄爆口开启，在 0.05~0.4 s 压力迅速下降，且压力下降速率越来越小。泄爆速率与泄爆面积和容器内外压差有关，随着压力下降容器内外压差越来越小，泄压速率也会随之变小。

3.3. 泄爆装置开启压力对泄爆过程的影响

泄爆装置设置的开启压力为 360 Pa，通过两个有泄爆装置行为下的爆炸实验结果可以看出，爆炸初期压力达到泄爆装置的开启压力后，压力依然迅速升高；随着泄爆装置开启到一定面积，进入泄压期，压力被迅速泄放。可见，爆炸产生的压力峰值远远大于泄爆装置开启压力，只有泄爆装置开启到一定面积才能起到泄爆效果。所以有泄爆装置的泄爆设计中，装置的开启压力与开启速度是设计的关键参数，需要根据泄爆要求进行详细的分析。

4. 讨论

就泄爆工程而言，关键问题之一是实施泄爆后容器内压力发展，概括来说，泄爆过程中容器内压力变化主要依赖容器内爆炸而致的气体生成量和气体从泄爆口流出的泄流量两个过程的综合效果。所以爆炸产生的超压值、爆炸压力升高速率和泄放速率是高压容器泄爆防护的重要因素。

本次通过与全封闭行为下的爆炸相对比，发现有泄爆装置时，虽然爆炸后期压力得到泄放，但是前期由于激波产生的压力依然存在，且压力峰值与全封闭行为下的压力峰值近似相等。可见，对有泄爆装置的泄爆过程，爆炸前期的压力泄放仍需要进一步深入研究。

泄爆过程使用的泄爆装置为泄爆窗，开启方式为旋转开启，具有一定开启压力和转动惯量。泄爆过程中，泄爆窗会在开启压力下开启，且压力变化与窗体开启面积是耦合的过程，由于泄爆面积是决定泄流速度的关键参数，所以如何将泄爆窗的关键参数与泄爆设计相结合是需要进一步研究的问题。为此，数值模拟是必要的，这些工作正在进行中。

Table 1. Experimental results comparison of different initiation pressure blast

表 1. 不同起爆压力下等容爆炸实验结果对比

起爆压力/MPa	激波期/s	激波期峰值/MPa	升压期/s	峰值/MPa	稳压期/s
0.3	0~0.05	0.16	0.1~0.5	0.17	0.5 之后
0.4	0~0.05	0.2	0.1~0.5	0.2	0.5 之后

Table 2. Comparison of experimental results with different venting initiation pressure

表 2. 不同起爆压力下开口泄爆实验结果对比

起爆压力/MPa	升压期/s	峰值/MPa	泄压期/s
0.3	0~0.05	0.14	0.05~0.4
0.4	0~0.05	0.15	0.05~0.4

5. 结论

本文开展了高压容器爆炸荷载作用下密闭容器泄爆指标的实验研究。设计了一套模拟高压管道泄爆和测试的实验装置，考虑了两种不同起爆压力下带有泄爆装置与全封闭等容实验行为，通过实验结果的对比分析获得如下结论：

1) 对不同起爆压力下封闭等容实验的升压过程进行分析：爆炸压力出现两个峰值，且峰值大小几乎相等；不同起爆压力下，起爆压力越大升压速率就越大且达到的峰值越高，产生的爆炸能量越大。

2) 对不同起爆压力下开口泄爆实验的升压过程进行分析：爆炸压力只出现一个峰值，且远高于泄爆装置的开启压力；起爆压力越大升压速率越高，且达到的峰值越大。

泄爆过程中容器压力变化是容器内气体流动与泄爆窗旋转开启的综合反应，不同的起爆压力对应着不同的爆炸发展状态，泄爆开启面积和泄流速率密切相关。容器内气体传播过程的压力分布和对具有转动惯量的泄爆装置的综合泄爆设计需考虑压力发展与泄爆面积变化的耦合过程，结合数值模拟和进一步的开启压力和固定泄爆口面积行为下的实验研究，揭示其内在的联系。

参考文献 (References)

- [1] 孙永庆, 钟群鹏, 张征 (2006) 城市燃气管道风险评估中失效后果的计算. *天然气工业*, **1**, 120-122.
- [2] 宋宝荣, 朱喜成, 杜宇峰, 等 (2007) 燃气系统漏损事故原因的定量分析. *煤气与热力*, **5**, 48-50.
- [3] 吴粤 (1993) 压力容器安全技术. 化学工业出版社, 北京.
- [4] 洗巧妍 (2010) 蒸汽管道爆炸事故后果模拟分析实例. *中国高新技术企业*, **19**, 14-15.
- [5] 崔益虎, 蒋军成, 喻源, 张庆武 (2014) 受限空间内气体爆炸惰化泄爆实验研究. *中国矿业大学学报*, **3**, 421-425.
- [6] NFPA 68, Guide for Venting of Deflagrations Quincy.
- [7] GB50016-2006, 建筑防火设计规范.
- [8] GB/T15605 粉尘爆炸泄压指南, 1995.