

文章编号: 1001-1455(2004)03-0281-04

内设半球条栅形障碍物的可燃气云爆炸实验研究*

毕明树¹, 李生娟², 丁信伟¹

(1. 大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116012;

2. 上海理工大学动力学院化工过程机械研究所, 上海 200093)

摘要: 以混合比为13.3%的乙炔-空气混合物为介质进行了内设半球条栅形障碍物的可燃气云爆燃实验研究。通过对实验数据进行曲线回归, 并经方差分析检验, 得到了描述可燃气云爆燃压力场的拟合关系式。应用多能模型构想对半球形可燃气云内设半球条栅形障碍物的爆燃实验结果进行分析, 得到综合考虑边界条件、混合物活性和尺度比例因子的爆燃超压关系式, 为其它可燃气云在其它形式障碍物约束下的爆燃超压提出估算方法。

关键词: 爆炸力学; 爆燃; 障碍物; 超压; 可燃气云

中图分类号: O381

国标学科代码: 130°35

文献标志码: A

可燃气云爆燃是工业生产和生活领域爆炸灾害的主要形式之一, 尤其是在障碍物诱导下具有极大的破坏力, 可造成巨大的经济损失和人员伤亡。因此, 研究约束条件对可燃气云爆燃场的影响, 为进一步提出切实可行的防爆、抑爆方案提供理论依据, 具有重要的经济与社会意义。

可燃气云爆燃的实验研究最初从无约束可燃气云爆炸实验开始, 这方面的研究工作国外起步较早^[1], 主要研究可燃气云体积、形状, 可燃气体种类、活性对爆炸威力的影响。一般认为, 在无约束、无障碍物情况下, 可燃气云爆燃产生的超压较小, 而约束与障碍物的存在是增强可燃气云爆燃威力的主要因素。A. J. Harrison 等^[2]采用多层栅板, W. P. M. Mercx 等^[3]采用框架阵列, B. H. Hjertager^[4]采用排管等进行了实验研究, 得到了一些特定工况下的实验结果。国内的研究多为密闭空间障碍物对爆燃威力的影响^[5], 关于开敞空间气云爆燃实验仅涉及无障碍物约束的开敞空间可燃气云爆燃的实验研究^[6]和可燃气云外部设置平板障碍物的实验研究^[7]。

本文中, 为便于对障碍物进行描述, 选用了半球条栅形障碍物作为局部约束, 拟通过一系列实验, 研究受局部约束的开敞空间可燃气云爆燃的超压特性。通过对大量实验数据进行拟合回归分析, 得到爆燃超压 Δp 与障碍物特性参数 (r, b, ϕ) 及可燃气云半径 R 和测点距离 d 之间的无量纲拟合方程, 给出障碍物对爆燃威力影响的定性及定量的预测; 在实验研究的理论分析基础上, 将多能模型^[8~10]的构想应用于半球形可燃气云受障碍物约束的可燃气云爆燃研究, 得到综合考虑约束条件和介质性质的总的爆燃超压关系式, 从而为其它约束条件下的可燃气云爆燃场的预测提供一定依据。

1 实验方法

实验是在占地 4000m² 的开敞空间气体爆炸野外实验基地进行的, 为了减少外部环境(风雨等)对实验结果的干扰, 建立了直径为 20m 的半球形室内实验场。实验以高反应活性的乙炔气与空气形成预混可燃气云, 取产生最大爆炸威力的乙炔-空气混合比 $\varphi_{C_2H_2} = 13.3\%$, 气云形状为半球形, 半径 $R = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25m$, 实验装置见图 1。气云内部设置与气云形状相似的半球条栅形障碍物, 特性参数分别为: 障碍物半径 $r = 0.10, 0.20, 0.25, 0.30m$, 障碍物条栅宽度 $b = 15, 30, 45, 60mm$, 障碍

* 收稿日期: 2003-07-22; 修回日期: 2003-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(5007006)

作者简介: 毕明树(1963—), 男, 博士, 教授。

物空隙宽度 $b_0=15, 30, 45, 60\text{mm}$, 同时 b 与 b_0 综合影响因素为障碍物空隙率 $\phi=20\% \sim 75\%$; 实验采用 8 通道高速同步数据采集系统, 测量了距离爆源中心不同位置 d ($d/R=1.4, 1.8, 2.2, 3.0, 5.4, 7.0$) 处的爆燃超压; 考虑工业可燃气体云爆炸多发生在点火源为弱点火范围内, 如静电、火花塞等, 而在此范围内点火源的强度对爆炸强度的影响不明显^[6], 采用电火花点火, 火花塞设在气云中心处。

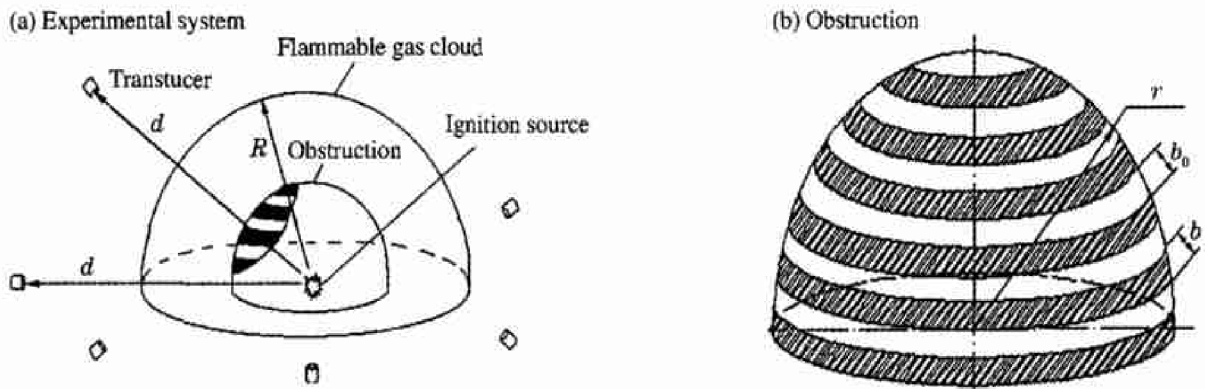


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Test equipment schematic diagram

2 实验结果及讨论

为考察障碍物对可燃气体云爆燃压力场的影响, 进行了 300 多次半球形可燃气体云内存在半球条栅形障碍物情况下的爆燃实验。

参照多能模型中对约束条件的设定^[8~10], 本实验中爆炸威力与各约束条件可表示成如下形式的关系式

$$\Delta p \propto \left| \frac{(r\theta)^2(R/d)}{b} \right|^m \tag{1}$$

式中: $r\theta$ 为控制着爆炸源区内的障碍物的体积占有, m ; 阻塞率 $\theta=1-\phi$; R/d 为可燃气体云外部爆燃冲击波传播的相对距离; b 为平均障碍物尺寸, m 。

可燃气体云爆燃受边界条件影响产生湍流燃烧, 湍流燃烧过程的发展关于爆燃超压和火焰速度的关系可近似按指数形式发展^[10]

$$\Delta p \propto S_1^{2.7} S_c^{0.7} \tag{2}$$

式中: S_1 为燃料-空气混合物的层流燃烧速度, m/s ; S_c 为尺度比例因子, m 。

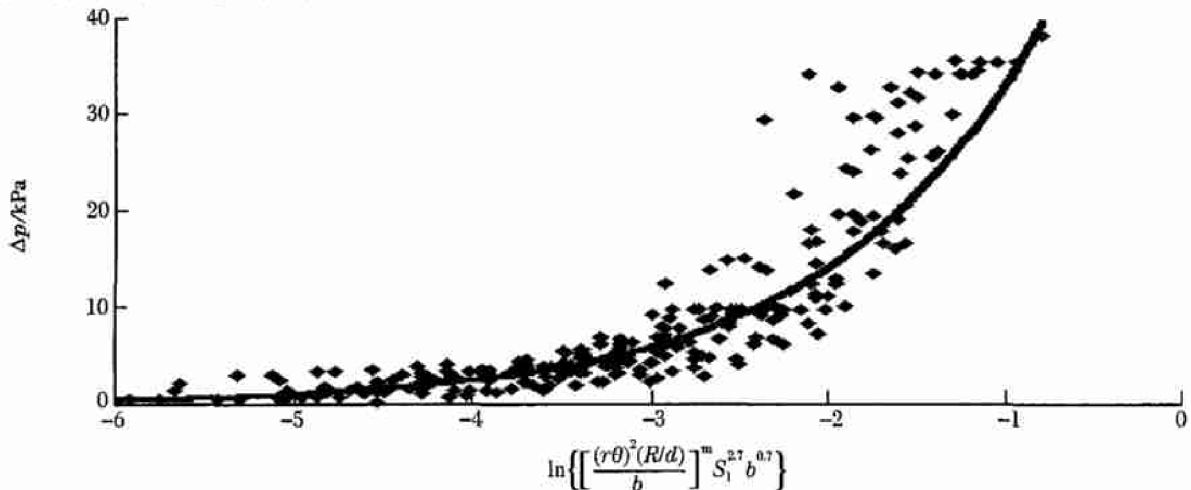


图 2 本实验观测的爆燃超压结果与参数组合的相关性

Fig. 2 Observed explosion overpressure dependent on the parameter combination for present experimental datasets

这样通过对实验数据进行曲线拟合, 得到爆燃超压与影响因素之间的回归关系式

$$\Delta p = a \left| \frac{(r\theta)^2 (R/d)}{b} \right|^m S_1^{2.7} b^{0.7} \quad (3)$$

式中: a 、 m 是确定爆燃超压与约束条件组合参数的最佳相关性的常数。本实验条件下 $a = 119.4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{0.7} / \text{m}^{5.4}$, $m = 1$ 。图 2 给出了拟合方程与实验结果的相关程度。可见, 两者吻合较好。将实验数据进行回归方程的方差分析^[11], 结果为: 拟合方程 $\Delta p = 119.4L$, 约束条件参数组合 $L = \frac{(r\theta)^2 (R/d)}{b} S_1^{2.7} b^{0.7}$, 回归平方和 $SS_f = 22543.6$, 剩余平方和 $SS_e = 3501.09$, $F = \frac{SS_f/1}{SS_e/(n-2)} = 1693.46$, $F_{0.01}(1, n-2) = 6.72$ 。

3 结 论

在实验范围内(乙炔-空气可燃气体云浓度 $\varphi_{\text{C}_2\text{H}_2} = 13.3\%$, 气云半径 $R = 0.25 \sim 1.25 \text{ m}$, 障碍物半径 $r = 0.1 \sim 0.3 \text{ m}$, 障碍物条栅宽度 $b = 15 \sim 60 \text{ mm}$, 空隙宽度 $b_0 = 15 \sim 60 \text{ mm}$, 空隙率 $\phi = 20\% \sim 75\%$, 测点位置 $d/R = 1.4 \sim 7.0$), 可燃气体云内部设置障碍物会使爆燃超压值明显增大, 可达无障碍物时的 8~10 倍。

应用多能模型构想, 通过对可燃气体云内部设置半球条栅形障碍物的大量实验数据进行拟合回归分析, 得到爆燃超压 Δp 与障碍物特性参数(r, b, ϕ)、可燃气体云半径 R 、测点距离 d 以及混合气体层流燃烧速度之间的拟合方程

$$\Delta p = a \left| \frac{(r\theta)^2 (R/d)}{b} \right|^m S_1^{2.7} b^{0.7}$$

可见: (1) 开敞空间半球形可燃气体云内部设置半球条栅形障碍物时, 爆燃超压 Δp 与可燃气体云外部的测点距离 d 成反比, 与气云半径 R 成正比, 即随着可燃气体云半径的增大, 也就是可燃气体量的增多, 爆燃超压相应增大, 而且由于可燃气体云体积增大, 爆燃火焰更为明显; (2) 爆燃超压 Δp 与障碍物条栅宽度 b 成反比, 与阻塞率 θ 的平方成正比, 空隙率越小爆燃冲击波受阻碍的程度越大, 则爆燃超压越大; 而障碍物条栅宽度越小, 条栅数量越多, 对爆燃波的传播的扰动越显著, 也导致爆燃超压增大; (3) 爆燃超压随着内设障碍物半径 r 的增大而增大, 障碍物越大对爆燃冲击波及火焰传播阻碍的程度越大, 则湍流程度越大, 会产生更大的爆燃威力。

参考文献:

- [1] Layer J C, Gu Rrau D C, Manson N. The restrict of soap bubble on vapour cloud explosions[A]. The method for the experimental study of unconfined vapour cloud explosions[C]. Berlin: The Science & Combustion Press, 1975: 645—653.
- [2] Harrison A J, Eyer J A. The effect of obstacle arrays on the combustion of large premixed gas/air clouds[J]. Combustion Science and Technology, 1987, 52: 121—137.
- [3] Mercx W P M, Johnson D M, Puttock J. Validation of scaling techniques for experimental vapor cloud explosion investigations [A]. AICHE Loss Prevention Symposium[C]. Atlanta, Georgia, USA, 1994: 1—20.
- [4] Hjertager B H. Simulation of transient compressible turbulent reactive flows[J]. Combustion Science and Technology, 1982, 27: 159—170.
- [5] 林柏泉, 吕恒宏, 张仁贵. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律及其加速机理的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 56—58.
LIN Bai-quan, Lǚ Heng-hong, ZHANG Ren-gui. Research on accelerating mechanism and flame transmission gas explosion[J]. Coal Journal, 1999, 24(1): 56—58.
- [6] 毕明树, 王淑兰, 丁信伟, 等. 无约束气云弱点火爆炸压力实验研究[J]. 化工学报, 2001, 52(1): 68—71.
BI Ming-shu, WANG Shu-lan, DING Xin-wei, et al. Experimental study on explosion pressures of unrestricted gas cloud explosions[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(1): 68—71.
- [7] 毕明树, 王淑兰, 丁信伟, 等. 平板形障碍物对气云爆炸强度影响的实验研究[J]. 化工学报, 2002, 53(8): 815—818.
BI Ming-shu, WANG Shu-lan, DING Xin-wei, et al. Experimental research on effect of plates on explosion pressures of

- flammable gas clouds[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2002, 53(8):815—818.
- [8] Mercx W P M, Van den Berg A C, Hayhurst C J, et al. Developments in vapor cloud explosion blast modeling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 71:301—319.
- [9] Puttock J S, Yardley M R, Cresswell T M. Prediction of vapor cloud explosion using the scope model[J]. *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, 2000, 13:419—431.
- [10] Tang M J, Baker Q A. Comparison of blast curves from vapor cloud explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13:433—438.
- [11] 白新桂. 数据分析与试验优化设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1989:4.

An experimental research on the premixed flammable gas cloud explosion induced by semi-spherical shaped grate obstructions

BI Ming-shu^{1*}, LI Sheng-juan², DING Xin-wei¹

(1. *School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, Liaoning, China;*

2. *Department of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: An experimental system consisting of pressure transducers, data acquisition card, computer and electric spark ignition device was set up to study the premixed flammable gas cloud explosion in a space with semi-spherical shaped grate obstructions. The tested gas mixture was acetylene/air of a fuel concentration 13.3%. The radii of gas cloud in experiments ranged from 0.25m to 1.25m, and the radii of obstructions 0.1m and 0.3m, in which the bar grating width varied from 15mm to 60mm, and the interspaced ratio was from 20% to 75%. Based on a multi-energy model as well as the experimental data regression and deviation analysis, a fitting formula has been obtained to relate the cloud deflagration pressure to the cloud radius, the distance from ignition point, the obstruction characteristics and the laminar burning speed of mixture. The results of deviation analysis shows that the fitting formula is effective on a higher confidence level.

Key words: mechanics of explosion; deflagration; obstructions; overpressure; flammable gas cloud

* Corresponding author: BI Ming-shu
E-mail address: bimingshu@dl.cn
Telephone: 0411-82629481