

文章编号: 1006-9941(2006)01-0008-04

# 内置障碍物诱导下的开敞空间球形气云爆炸冲量的研究

毕明树, 姚 敏

(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116012)

**摘要:** 为研究带有结构物的可燃气体云爆炸冲量, 设计了内置半球条栅形和球袋形两种障碍物的气云爆炸实验, 对障碍物特性参数与冲量的关系进行了研究, 得到了半球形气云爆炸冲量随障碍物特性参数的近似余弦衰减规律。对实验数据进行综合回归, 引入多能模型思想, 得到了计算可燃气体云爆炸冲量的拟合方程式。

**关键词:** 爆炸力学; 可燃气体云; 冲量; 障碍物

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

## 1 引言

可燃气体泄漏至开敞空间, 与空气预混合形成可燃气体云, 如被意外地点燃就可能形成破坏力极强的气相爆炸, 这种现象称作开敞空间气云爆炸。开敞空间可燃气体云的爆炸过程通常属于爆燃过程, 其爆炸作用主要表现为超压和冲量。

关于可燃气体种类、气云体积、不同障碍物对爆燃强度的影响已有很多研究报道<sup>[1-4]</sup>, 如 Harrison<sup>[1]</sup>采用多层栅板, MERGE<sup>[2]</sup>实验采用框架阵列, DISCOR<sup>[3]</sup>实验采用排管等进行了实验研究, 得到了一些特定工况下的爆炸超压的基本规律, 但对于爆炸冲量方面的研究则少之又少。大量的理论和实践均表明, 可燃气体燃烧爆炸对建筑物造成破坏的模式主要有压力破坏和冲量破坏两种, 爆炸所产生的爆炸波峰压力较低, 但压力作用持续时间长, 具有较高的冲量, 对周围环境产生很大的破坏作用<sup>[5]</sup>。所以研究影响气体爆炸冲量的各个因素, 预测并防止或减小气体爆炸的危害是非常必要的。

本工作建立了一套研究开敞空间可燃气体云受局部约束的爆燃实验系统, 并针对内部设置条栅形和球袋形障碍物进行了一系列实验, 考察气云浓度、气云半径及障碍物特性参数对爆炸冲量的影响, 对大量实验数据进行拟合回归分析, 得到爆炸冲量与障碍物特性参数及气云半径和测点距离之间的拟合方程, 给出障碍物对爆炸冲量影响的定性及定量的预测; 在理论分析基础上, 将多能模型规整障碍物的思想应用于半球形

可燃气体云受障碍物约束的气云爆燃研究, 得到约束条件、介质性质与爆炸冲量之间的关系, 为其它约束条件下的可燃气体云爆炸场的预测提供一定依据。

## 2 实验方法

本实验依靠 0.02 mm 的聚乙烯薄膜形成半球形限制膜, 向球内充入按化学计量配比的乙炔与空气的混合物, 从而形成半球形气云。气云内置障碍物, 在半球形气云的中心设置点火电极, 传感器分布于气云外离气云中心不同距离处, 距地面高度大约为 10 cm, 实验装置如图 1 所示。实验所用条栅形障碍物和球袋形障碍物分别如图 2、3 所示。在本实验中, 气云半径  $R=0.25 \sim 1.25$  m; 障碍物半径  $r=0.1 \sim 0.4$  m; 条栅形障碍物条栅宽度  $b=0.015 \sim 0.090$  m; 条栅形障碍物空隙宽度  $b_0=0.015 \sim 0.090$  m; 球袋形障碍物中心角  $\alpha=15^\circ \sim 75^\circ$ 。在气云内部压力为一个大气压的条件下, 由弱点火点燃气云发生爆燃。

本实验所用的点火装置为火花塞点火, 因为工业气云爆燃多是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燃强度的影响不明显<sup>[6]</sup>。点火装置参照国际标准 ISO6184《Explosion Protection Systems》和美国标准 NFPA68《Guide For Venting of Deflagrations》的规定制作, 采用电火花点燃, 点火电极之间的间隙为 3~5 mm, 点火能量约为 100 mJ。爆炸产生的压力和时间信号由量程为 -5~35 kPa 的压力变送器感受, 经 A/D 卡转换后经计算机储存输出(见图 4)。用 C 语言编制程序计算压力-时间曲线下的正相超压与时间轴所包围的面积, 即得该观测点在整个爆燃过程所受到的正冲量, 负相超压与时间轴所包围的面积为该观测点在整个爆燃过程所受到的负冲量。

收稿日期: 2005-04-15; 修回日期: 2005-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50076006)和辽宁省博士启动基金(20021064)资助

作者简介: 毕明树(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事工业装置安全技术的研究。

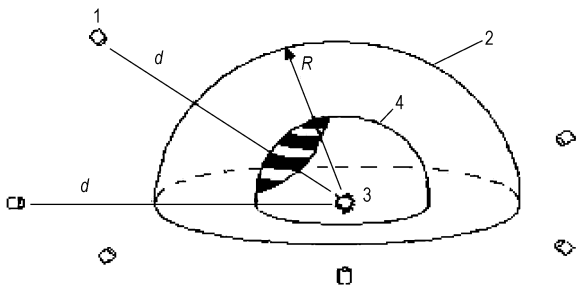


图 1 实验装置示意图

1—传感器, 2—可燃气云, 3—点火源, 4—障碍物  
 $R$ —气云半径,  $d$ —测点距离

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

1—sensor, 2—flammable cloud, 3—fire source, 4—barrier  
 $R$ —cloud radius,  $d$ —pilot distance

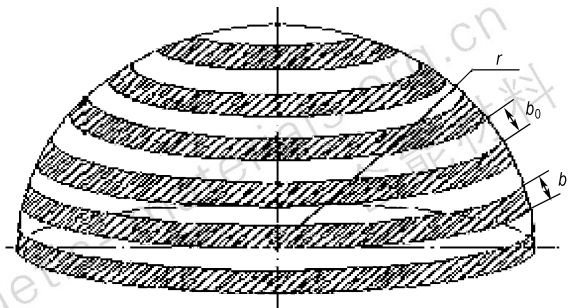


图 2 半球条栅形障碍物示意图

$r$ —障碍物半径,  $b_0$ —一条栅形障碍物空隙宽度,  
 $b$ —条栅形障碍物条栅宽度

Fig. 2 Schematic diagram of the semispherical barriers

$r$ —barrier radius,  $b_0$ —barrier width,  
 $b$ —bar radius

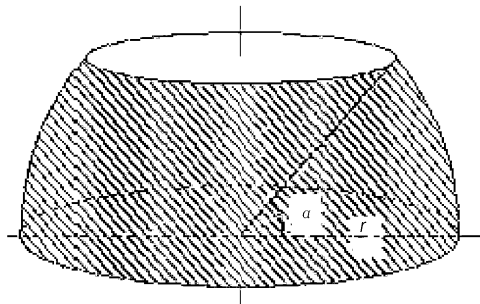


图 3 球袋形障碍物示意图

$r$ —障碍物半径,  $\alpha$ —球袋形障碍物中心角

Fig. 3 Schematic diagram of spherical-baggy obstructor

$r$ —barrier radius,  $\alpha$ —central angle

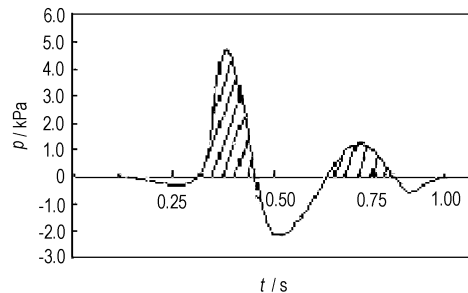


图 4 超压-时间曲线

Fig. 4 Curve of overpressure( $p$ )-time( $t$ )

### 3 障碍物对爆炸冲量影响的实验结果与分析

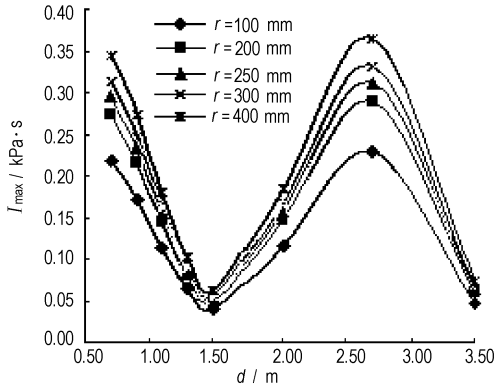
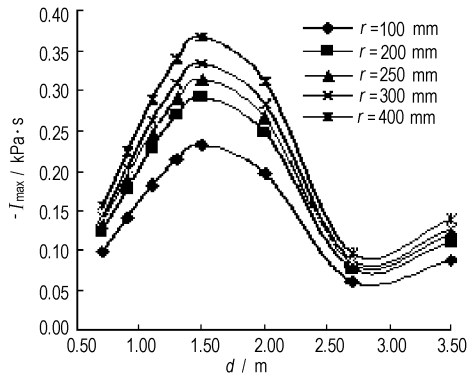
为了确定障碍物特性参数对爆炸冲量的影响效果,笔者以乙炔含量为 13.3% 的最危险浓度<sup>[7]</sup>,对条栅形障碍物和球袋形障碍物分别进行实验。

#### 3.1 条栅形障碍物特性参数对爆炸冲量的影响

通过正交实验分析可以得知,障碍物半径  $r$ 、空隙宽度  $b_0$ 、条栅宽度  $b$  三个特性因素都对爆炸冲量有显著影响,而其交互作用的影响作用不显著<sup>[7]</sup>。综合考虑条栅形障碍物的这三个因素,引入阻碍率概念,令阻碍率  $\theta = \frac{b}{b + b_0}$ ,阻碍率  $\theta$  受障碍物条栅宽度  $b$  和空隙宽度  $b_0$  的综合控制。因此可以用阻碍率  $\theta$  代替空隙宽度  $b_0$ 。

固定条栅宽度  $b$  ( $b = 30 \text{ mm}$ ) 和阻碍率  $\theta$  ( $\theta = 0.5$ ),改变障碍物半径  $r$ ,可以得到障碍物半径  $r$  对爆炸冲量  $I$  的影响曲线,如图 5 和图 6 所示。

从图 5、6 可以看出,爆炸冲量随着障碍物半径  $r$  的增大而增大,且这种增大趋势很明显。障碍物的存在极大提高了开敞空间可燃气云的爆炸冲量,这是因为障碍物的存在会增大火焰传播速度,火焰传播在障碍物后剧烈波动。由火焰加速机理可知,火焰遇到障碍物时发生畸变,火焰阵面形成速度梯度场,火焰表面产生了伸长和皱折。这种畸变火焰引起体积燃烧速率的增加,也增加了有效燃烧速度,而较高的燃烧速度又赋予火焰面前的气体更大的位移速度,形成更高的速度梯度场,产生更大的扭曲和皱折<sup>[8]</sup>。正是由于障碍物的作用提高了火焰传播过程中的湍流程度,湍流又加速了火焰传播,从而导致火焰传播速度迅速提高,爆炸冲量明显增大。从图中可见,对于本实验形成的半球型气云爆燃场在距球心 2.7 m 处有二次峰值正冲量形成,这主要是因为可燃气云爆燃虽然能量释放速率低,但作用时间长,因而有可能在离爆心某较远距离处产生较大的冲量,从而产生较强的破坏效应。这一实验结果与可燃气云爆炸火焰加速机理符合。

图5 障碍物半径  $r$  对爆炸冲量  $I_{\max}$  影响的实验曲线图Fig.5 Curves of radius ( $r$ ) vs. explosion impulse ( $I_{\max}$ )图6 障碍物半径  $r$  对爆炸负冲量  $-I_{\max}$  影响的实验曲线图Fig.6 Curves of radius ( $r$ ) vs. explosion impulse ( $-I_{\max}$ )

同理,根据固定障碍物半径  $r$  ( $r=200$  mm)、阻碍率  $\theta$  ( $\theta=0.5$ ) 和变化障碍物条栅宽度  $b$ ,可以得到:阻碍率  $\theta=0.5$  时,随着障碍物条栅宽度  $b$  的减小爆炸冲量值增大。这是因为当阻碍率  $\theta=0.5$  时,  $b=b_0$ ,随着障碍物条栅宽度  $b$  的减小,形成了更多的小型环状障碍物,使气流流道更为曲折、更为复杂,爆燃气流受到的扰动持续增强,因而爆炸冲量更大,破坏效应更强。

根据固定障碍物半径  $r$  ( $r=200$  mm) 和条栅宽度  $b$  ( $b=30$  mm),变化障碍物空隙宽度,可以得到如下结论:爆炸冲量随着条栅障碍物空隙宽度的增大而减小。这是由于随着障碍物空隙宽度  $b_0$  增大阻碍率  $\theta$  减小,从而导致障碍物对爆炸冲击波的阻碍作用减小。

### 3.2 内置条栅形、球袋形障碍物特性参数对爆炸冲量影响的实验曲线回归分析

对条栅形障碍物实验数据进行曲线拟合得到,爆燃正冲量  $I_{\max}$  和负冲量  $-I_{\max}$  与条栅形障碍物半径  $r$ 、阻碍率  $\theta$  和条栅宽度  $b$  的拟合关系式:

$$I_{\max} = 0.3672(R^5 r^2 \theta^2 b^{-1})^{\frac{1}{6}} + 0.2643(R^5 r^2 \theta^2 b^{-1})^{\frac{1}{6}} \cos(3d - 1.5) \quad (1)$$

$$-I_{\max} = 0.3664(R^5 r^2 \theta^2 b^{-1})^{\frac{1}{6}} + 0.2635(R^5 r^2 \theta^2 b^{-1})^{\frac{1}{6}} \cos(2.2d - 3.5) \quad (2)$$

对于球袋形障碍物(见图3),其侧表面积为:  $S = 2\pi r^2 \sin\alpha$ 。引入阻碍率概念:  $\theta' = \frac{2\pi r^2 \sin\alpha}{2\pi r^2} = \sin\alpha$ 。可见障碍物中心角  $\alpha$  对爆炸冲量的影响可以看作是球袋形障碍物阻碍率  $\theta'$  对爆炸冲量的影响。根据球袋形障碍物特性参数对爆炸冲量影响的实验曲线回归分析,得到爆燃正冲量  $I_{\max}$  和负冲量  $-I_{\max}$  与球袋形障碍物半径  $r$ 、阻碍率  $\theta'$  的拟合关系式:

$$I_{\max} = 0.3498(R^5 r \theta')^{\frac{1}{6}} + 0.2413(R^5 r \theta')^{\frac{1}{6}} \cos(3.0d - 1.5) \quad (\text{kPa} \cdot \text{s}) \quad (3)$$

$$-I_{\max} = 0.3476(R^5 r \theta')^{\frac{1}{6}} + 0.2396(R^5 r \theta')^{\frac{1}{6}} \cos(2.2d - 3.5) \quad (\text{kPa} \cdot \text{s}) \quad (4)$$

## 4 多能模型在内设障碍物气云中的应用

多能模型将实验中障碍物处理成规整的障碍物,其结构可用障碍物密度( $\rho$ )和障碍物尺寸( $F$ )来表达。这两个参数构成了障碍物间隔的度量标准。对于规整的障碍物,火焰传播过程中障碍物结构参数和超压的变化符合指数定律<sup>[5]</sup>。

$$p_{\max} \propto \left[ \frac{\rho}{F} \right]^A \quad (5)$$

对于多能模型,需综合考虑边界条件、混合物活性、比例因子三个影响因素,其冲量近似方程为:

$$I_{\max} \propto \left[ \frac{\rho}{F} \right]^A \cdot S_l^{2.7} \cdot S_c^{0.7} \quad (6)$$

式中,  $\rho$  为爆炸源区的障碍物的体积占有率;  $F$  为平均障碍物尺寸, m;  $S_l$  为燃料-空气的层流燃烧速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $S_c$  为尺度比例因子, m;  $A$  为确定最佳相关性的常数。

在本实验条件下,条栅形障碍物的体积占有密度  $\rho = R^5 \cdot r^2 \cdot \theta^2$ , 平均障碍物尺寸  $F = b$ , 球袋形障碍物的体积占有密度  $\rho = R^5 \cdot r^2 \cdot \theta'^2$ , 平均障碍物尺寸  $F = r \cdot \theta'$ 。尺度比例因子  $S_c$  是尺度差异引起的爆炸冲量的差异。基于气体爆炸机理的研究,尺度比例因子对爆炸强度的影响主要由火焰的扭曲变形效应引起,而火焰变形受燃烧化学动力学和湍流混合的平衡控制,特定的湍流混合时间与特定的湍流长度成比例,即与障碍物的平均尺寸成比例,因此尺度比例因子可用障碍物的平均尺寸  $F$  代替。浓度为 13.3% 的乙炔-空气混合气云的层流燃烧速度  $S_l = 1.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[5]</sup>。综合

影响爆炸冲量的局部约束条件、可燃混合物性质和尺度比例因子,得到浓度为 13.3% 的乙炔-空气混合气云内置障碍物的爆炸冲量关系式:

$$I_{\max} = N_0 [3.2536 + 2.2763 \cos(7.5D - 1.5)] \quad (7)$$

$$-I_{\max} = N_0 [3.2422 + 2.2684 \cos(5.5D - 3.5)] \quad (8)$$

式中,  $N_0$  为气云性质、障碍物等组合参数,  $N_0 = \left(\frac{\rho}{F}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot S_l^{2.7} \cdot S_c^{0.7}$ ;  $D$  为气云外部爆炸冲击波传播的相对距离。

## 5 结 论

(1) 内置障碍物的半球形可燃气体云爆炸冲量随气云半径、阻碍率和障碍物直径的增大而增大。

(2) 经过多能模型简化后,得到能够普遍应用的内置障碍物的可燃气体云爆炸冲量关系式:

$$I_{\max} = N_0 [3.2536 + 2.2763 \cos(7.5D - 1.5)]$$

$$-I_{\max} = N_0 [3.2422 + 2.2684 \cos(5.5D - 3.5)]$$

### 参考文献:

- [1] Harris R J, Wichens M J. Understanding vapour cloud explosions: An experimental study [R]. Inst of Gas Engineers, Comm. No. 1408 (7989).
- [2] Merx W P M. Modelling and experimental research into gas explosions. Overall final report of the MERGE project [R]. CEC contract STEP-CT-011 (SSMA).
- [3] BI Ming-shu, DING Xin-wei, ZHOU Yi-hui. Experimental study on unconfined vapor cloud explosion[J]. *Chinese J Chem Eng*, 2003, 11(1): 90-93.
- [4] 丁信伟,李志义,李应博. 可燃气体云爆燃实验[J]. *化工学报*, 1999, 50(4): 558-562.
- DING Xin-wei, LI Zhi-yi, LI Ying-bo. The experiment of the flammable vapor cloud explosion [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1999, 50(4): 558-562.
- [5] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [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): 68-70.
- BI Ming-shu, WANG Shu-lan, DING Xin-Wei, et al. The power experiment study of the unconfined vapor cloud explosion [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2001, 52(1): 68-70.
- [7] 毕明树,丛立新. 可燃气体云内置障碍物对爆炸冲量场影响的实验研究[J]. *石油学报*, 2004, 20(6): 63-67.
- BI Ming-shu, CONG Li-xin. The experiment study of the flammable vapor cloud explosion to explosion impulse field and the barrier is put in it [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 20(6): 63-67.
- [8] Kenneth K K. 燃烧原理 [M]. 陈义良,张孝春(编译). 北京: 航空工业出版社, 1992.
- Kenneth K K. The Combustion Principle [M]. CHEN Yi-liang, ZHANG Xiao-chun. Beijing: The Publishing Company of the Aeronautical Engineering, 1992.

## Explosion Impulse of Spherical Vapor Cloud Built-in Barriers

BI Ming-shu, YAO Min

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

**Abstract:** The experiments of vapor cloud explosion were carried out respectively in which the hemispherical strip barrier and the global pouched barrier were set. The pressure-time curve was recorded by system consisted of pressure transducer, A/D card and computer with less than one millisecond. A program was designed to calculate the explosion impulse of observed spot on the basis of pressure-time curve, and the effects of the characteristic parameters of barriers on the explosion impulse were studied. The experimental results show that the explosion impulse increases with interspaced ratio, vapor cloud radius, and barrier radius. The relationship between impulse and distance in the hemispherical vapor cloud is approximate cosine. Moreover, a fitting equation to calculate explosion impulse of hemispherical vapor clouds was proposed by applying multi-energy model.

**Key words:** explosion mechanics; flammable vapor cloud; explosion impulse; barrier