

研究论文

# 圆柱形可燃气云爆炸实验研究与数值模拟

杨国刚<sup>1</sup>, 岳丹婷<sup>1</sup>, 毕明树<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026; <sup>2</sup> 大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116012)

**摘要:** 与半球形可燃气云模型相比, 圆柱形模型更接近于气云爆炸事故的实际情况。进行了乙炔浓度 7.75%、气云体积 0.26 m<sup>3</sup> 的圆柱形可燃气云爆炸实验, 记录了距气云中心 1.2 m 与 1.6 m 两点的爆炸超压。建立了描述气云爆炸的理论模型, 采用 SIMPLE 算法编制了计算程序。计算结果经实验数据考核, 最大与平均相对偏差分别为 18.3% 与 5.4%, 证实程序满足气云爆炸模拟与预测的要求。研究结果显示: 爆炸流场不具备球形对称的性质, 爆炸超压与火焰传播方向有关, 当气云高径比 0.2 时, 沿地面方向的最大超压可达垂直方向的 3.3 倍; 气云体积不变而形状变化时, 爆炸强度随着高径比的增大而增大, 高径比 1.0 时的最大超压可达高径比 0.1 时的 3.1 倍; 气云高径比降低时, 火焰传播距离增大, 燃烧时间增长, 气云释能速率下降, 因此爆炸超压降低。研究结果对可燃气云爆炸灾害的预测具有一定的指导意义。

**关键词:** 可燃气云; 爆炸; 超压; 数值模拟

**中图分类号:** TQ 016

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2008) 11-2954-06

## Experimental and numerical study on cylindrical flammable gas cloud explosion

YANG Guogang<sup>1</sup>, YUE Danting<sup>1</sup>, BI Mingshu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

<sup>2</sup> School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, Liaoning, China)

**Abstract:** Compared with semi-spherical flammable gas cloud model, cylindrical model could represent cloud explosion accidents more exactly. Experiments of cylindrical gas cloud explosion were performed with 7.75 % of ethyne and 0.26 m<sup>3</sup> of gas cloud volume and overpressures at 1.2 m and 1.6 m points from cloud center were recorded. A theoretical model of cloud explosion was established and SIMPLE algorithm was adopted in writing calculated codes. Compared with the test data, the maximum and average relative deviations of calculation results were 18.3% and 5.4% respectively, which showed that the codes met the need to simulate the cloud explosion. This work indicated that the explosion intensity was related to flame spread direction and the explosion field was not spherically symmetric. The maximum explosion overpressure close to the ground was about 3.3 times higher than that along the vertical direction when the ratio of height and radius of the cloud was 0.2. The explosion intensity increased with increasing ratio of height and radius of gas cloud, and the maximum overpressure should increase by 3.1 times when the ratio changed from 0.1 to 1.0. When the ratio decreased, the distance of flame spread increased and the time of inflammation delayed, which led to decreasing energy transfer of gas cloud and falling explosion

2008-03-20 收到初稿, 2008-06-05 收到修改稿。

**联系人及第一作者:** 杨国刚 (1972—), 男, 博士, 副教授。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50706004)。

**Received date:** 2008-03-20.

**Corresponding author:** Dr. YANG Guogang. E-mail: yangguogang168@sina.com

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (50706004).

overpressure. The research results are of some significance to predict the disaster of flammable gas cloud explosion.

**Key words:** flammable gas cloud; explosion; overpressure; numerical simulation

引 言

在化工、石油、交通运输等行业或部门，由于可燃气体或液体泄漏形成可燃燃气云，遇到适合条件可引发开敞空间可燃燃气云爆炸事故，从而造成严重的财产损失与人员伤亡<sup>[1-3]</sup>。

开敞空间可燃燃气云爆炸研究，最早出现的理论方法为 TNT 当量法：假设气云为点源，根据气云内所含化学能折合成相应的 TNT 当量，然后应用 TNT 爆炸理论来预测爆炸远场的超压<sup>[4]</sup>。van den Berg 等<sup>[5]</sup>在上述基础上提出了多能模型法：假设气云为半球形，气云内部可燃气体浓度均匀且处于最佳浓度下，把爆炸分成不同等级，查阅图表即可得到爆炸远场的爆炸超压。20 世纪 90 年代后，数值模拟方法得到较快发展。最早出现能量加入法与能量波法等比较简单的模拟方法，同样针对半球形气云，它假设能量一层层地加入到气云内部来模拟火焰面的传播，以此来求解气云温度与压力<sup>[6]</sup>。之后比较成熟的方法是首先求解爆炸流场，以此揭示火焰面、膨胀流场、超压之间的相互关系<sup>[7-9]</sup>。

上述方法均把气云假设为点源或半球形，这是因为：把爆炸流场简化成一维情况，研究难度与计算工作量得以降低；同样体积的可燃燃气云，半球形气云爆炸强度最高<sup>[1]</sup>，采用半球形模型得到偏安全与保守的预测结果，这在工程应用上是可以接受的。但另一方面，在现实气云爆炸事故中，很难形成半球形气云。尤其是可燃液体泄漏时，首先液体流淌到地面上，形成表面积很大的液池，然后气体蒸发形成底面积较大、高较小的气云<sup>[10-11]</sup>。例如狄建华等<sup>[12]</sup>在研究苯蒸气云爆炸时，假设苯蒸气形成底面积 400 m<sup>2</sup>，高 3 m，总体积为 2400 m<sup>3</sup> 的气云。可见圆柱形可燃燃气云模型更接近于实际情况。因此，有必要研究圆柱形气云爆炸的流场变化规律，分析气云形状（高径比）对爆炸强度的影响等。

本文拟在半球形可燃燃气云爆炸研究基础上，对圆柱形可燃燃气云爆炸进行实验与数值模拟研究，建

立描述气云爆炸的二维数学模型并求解，在采用实验数据验证基础上，对火焰传播与超压形成规律进行分析，并对气云形状（高径比）对爆炸超压的影响及原因进行探讨。研究结果将对可燃燃气云爆炸灾害的预测具有一定的指导意义。

1 实 验

1.1 实验方法与装置

图 1 为实验装置示意图。实验时，用聚乙烯薄膜作为约束物，把气云限制成圆柱形。薄膜内充入预混乙炔/空气混合气，乙炔浓度为 7.75%。在气云中心设置点火电极。点火装置参照 ISO 6184《Explosion Protection Systems》规定制作，采用电火花点燃，点火能量约 100 mJ。爆炸产生的压力由量程为 -5~30 kPa 的压力变送器感受，经数据采集卡采集，最后由计算机记录。变送器共两支，采集位置距爆心分别为 1.2 m 与 1.6 m，动态响应时间为 1 ms，精度 0.5%。采集卡为 12 位，精度 0.02%，采集频率可调，实验中设为 200 kHz。

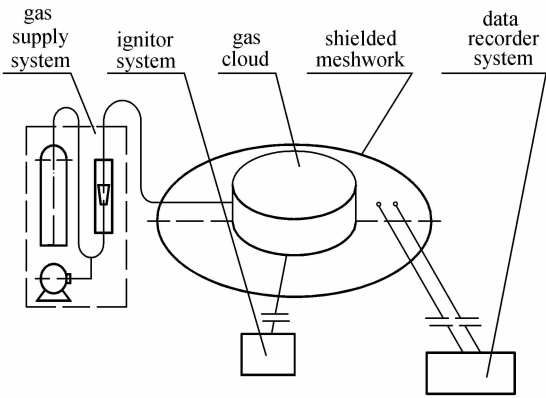


图 1 实验装置  
Fig. 1 Experimental apparatus

1.2 气云尺寸

实验时气云体积为 0.26 m<sup>3</sup>，取不同高径比进行实验。定义高径比为圆柱体的形状因子，以  $\epsilon$  表示。表 1 为实验采用的气云形状因子以及对应的半径与高。

表 1 不同气云形状因子时气云半径与高

Table 1 Radius and height of cloud at different form factor

| $\epsilon$ | $r/\text{m}$ | $h/\text{m}$ |
|------------|--------------|--------------|
| 0.1        | 0.94         | 0.094        |
| 0.2        | 0.75         | 0.15         |
| 0.3        | 0.65         | 0.20         |
| 0.4        | 0.59         | 0.24         |
| 0.5        | 0.55         | 0.28         |
| 0.6        | 0.52         | 0.31         |

## 2 理论模型与计算方法

### 2.1 几何模型

图 2 为圆柱形气云示意图, 以气云中心为坐标原点, 做气云的剖面图, 建立图 3 所示几何模型。

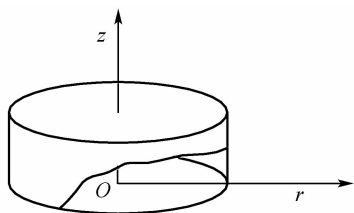


图 2 圆柱形气云示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cylinder cloud

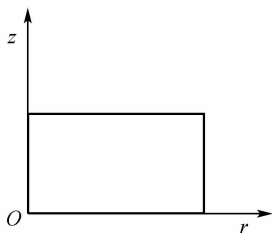


图 3 圆柱形气云几何模型

Fig. 3 Geometric model of cylinder cloud

### 2.2 基本方程

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho u_r r)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u_r)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u_r u_z)}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho u_z)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_r u_z)}{\partial r} =$$

$$- \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (3)$$

能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho u_r T)}{\partial r} + u_z \frac{\partial (\rho u_z T)}{\partial z} = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\lambda r}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + R_{fu} q \end{aligned} \quad (4)$$

组分方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho Y_{fu})}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho u_r Y_{fu} r)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u_z Y_{fu})}{\partial z} = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D r \frac{\partial (\rho Y_{fu})}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial (\rho Y_{fu})}{\partial z} \right) + R_{fu} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.3 燃烧模型

采用改进的 Bakke-Hjertager 层流燃烧模型<sup>[13]</sup>, 该模型适用于开敞空间可燃气云爆炸过程中, 火焰以层流形式传播。

$$R_{fu} = E_t A_i \frac{u_i}{\delta_i} \rho Y_{lim} H(m_{prod} - C_q) \quad (6)$$

$$E_t = 1 + 1.5 \max \{0, \min [(d - 0.05)/0.45, 1]\} \quad (7)$$

$$Y_{lim} = \min(Y_{fu}, Y_{O_2}, Y_{prod}) \quad (8)$$

$$H(m_{prod} - C_q) = \begin{cases} 1 & m_{prod} \geq C_q \\ 0 & m_{prod} < C_q \end{cases} \quad (9)$$

$$C_q = \max \{0.01, \min [1, 0.23 \times 10^9 \exp(E_a/RT)]\} \quad (10)$$

### 2.4 初值和边界条件

(1) 初值条件

$$u = 0; v = 0; p = 1.01 \times 10^2 \text{ kPa};$$

$$T = 300 \text{ K}; \rho = 1.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

(2) 边界条件 (气云中心与无穷远处)

$$u = 0; v = 0; \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0; \frac{\partial Y_{fu}}{\partial r} = 0; \frac{\partial Y_{fu}}{\partial z} = 0$$

(3) 点火模型: 假设点火瞬间在气云中心节点有 10% 可燃气体发生反应<sup>[14]</sup>。

### 2.5 计算方法

本文数值方法采用控制容积积分法<sup>[15]</sup>, 并选用改进 SIMPLE 算法解决压力与速度耦合问题<sup>[7]</sup>。计算外边界设定为 10 倍气云半径 (或高), 经试算, 再增加长度对计算结果已无明显影响。主网格大小为 0.02 m × 0.02 m。采用 TDMA (tridiagonal matrix method) 算法求解离散方程。根据以上理论, 编制计算程序。

## 3 实验数据与计算结果考核

实验中采集了距气云中心分别为 1.2 m 与 1.6 m 两点的爆炸超压。实验数据与计算结果对比见表 2。经计算, 二者间最大相对偏差为 18.3%, 平均相对偏差为 5.4%, 基本吻合。证明可以采用本文编制程序对圆柱形可燃气云爆炸进行研究。

表 2 实验值与计算值的对比

Table 2 Comparison of experimental data with numerical result

| $\epsilon$ | Overpressure ( $r=1.2$ m) |                      |         | Overpressure ( $r=1.6$ m) |                      |         |
|------------|---------------------------|----------------------|---------|---------------------------|----------------------|---------|
|            | Experimental data/kPa     | Numerical result/kPa | Error/% | Experimental data/kPa     | Numerical result/kPa | Error/% |
| 0.1        | 0.273                     | 0.301                | 4.8     | 0.237                     | 0.240                | 0.5     |
| 0.2        | 0.400                     | 0.392                | 1.1     | 0.375                     | 0.387                | 1.5     |
| 0.3        | 0.595                     | 0.551                | 3.8     | 0.543                     | 0.512                | 2.9     |
| 0.4        | 0.714                     | 0.692                | 1.5     | 0.632                     | 0.502                | 11.5    |
| 0.5        | 0.712                     | 0.685                | 1.9     | 0.618                     | 0.456                | 15.1    |
| 0.6        | 0.710                     | 0.682                | 2.0     | 0.626                     | 0.432                | 18.3    |

4 计算结果分析

以形状因子  $\epsilon=0.2$  ( $r=0.75$  m,  $h=0.15$  m) 的气云为例进行研究。

4.1 爆炸流场机理分析

计算中得到乙炔浓度、速度、压力、温度、密度、燃烧速率等流场参数随时间、空间的分布。以前 3 个参数为例进行分析。

图 4 为气云乙炔浓度分布图，6 个云图分别对应爆炸开始后 20、40、60、80、100、120 ms 不同时刻。

观察第一个子云图，蓝色区域数值等于零，为周围环境；褐色区域数值等于 7.75，表示气云。坐标原点颜色发生变化，表示气云中心处发生燃烧反应，乙炔浓度下降。顺序观察其他子云图，反应区域逐渐扩大，显示火焰面呈球形进行传播。60 ms 之后，由于气云形状原因，火焰面只向外、而不再向上扩展。气云发生局部变形，并扩展到原始气云范围之外。

图 5 为流场速度分布图。火焰面向外传播的同时，已燃气体也向外传播，生成了向外流动的膨胀流场。图 4、图 5 进行对比，发现流场中速度最大区域发生在火焰面偏前位置。随着火焰面的传播，流场速度值也逐渐增大。80 ms 之后，膨胀流场基本上沿着地面向外传播，最大值点为贴近地面处。

图 6 为压力分布图。膨胀流场向外运动，像活塞一样冲击周围大气，由此产生向外传播的冲击波，导致周围大气压力上升。图 5、图 6 对比，压力峰值区域出现在速度峰值偏前位置。

4.2 爆炸流场不对称性分析

设测点到爆心距离为  $d$ ，研究范围为  $0\sim2$  m；与地面夹角为  $\theta$ ，其值为  $0$ 、 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 、 $\pi/2$ 。根据计算结果作图 7。

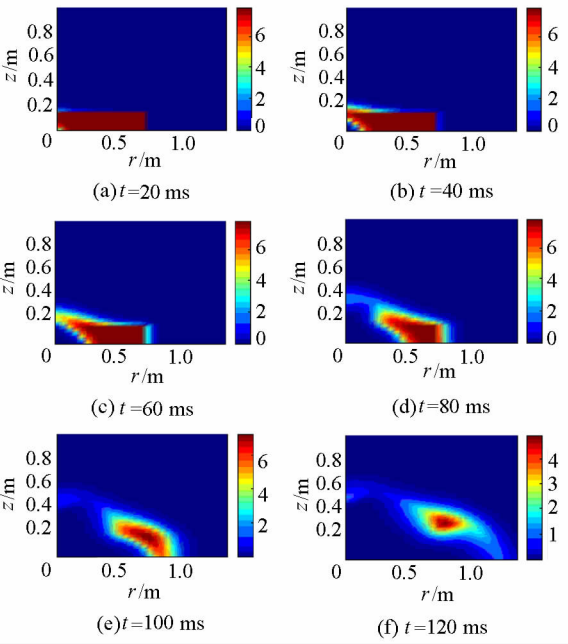


图 4 乙炔浓度分布云图

Fig. 4 Distribution of ethyne concentration contour (%)

从图中可以看出，地面处爆燃强度（0.46 kPa）最高，气云轴心处（0.14 kPa）最低，前者是后者的 3.1 倍。地面处最大超压点出现在约 1.5 m 处，即气云半径的 2 倍处。随着与地面夹角的增大，出现最大超压点的距离也逐渐减小，气云轴心处出现在距离爆心 0.8 m 处。说明圆柱形流场不具有球对称的性质，靠近地面处为最危险区域，应该做好防护措施。

4.3 气云形状因子对爆燃强度的影响

取测点与地面的夹角  $\theta$  为  $0$ ，讨论气云形状因子  $\epsilon$  对爆燃强度的影响，结果见图 8。曲线可以分成两部分： $\epsilon<0.4$ ，最大超压随着  $\epsilon$  的增大快速升高； $\epsilon>0.4$ ，最大超压随着  $\epsilon$  的增大也有升高趋势，但上升速度较慢。当  $\epsilon$  为 1.0 时，最大超压（0.84 kPa）是  $\epsilon$  为 0.1 时（0.27 kPa）的 3.1

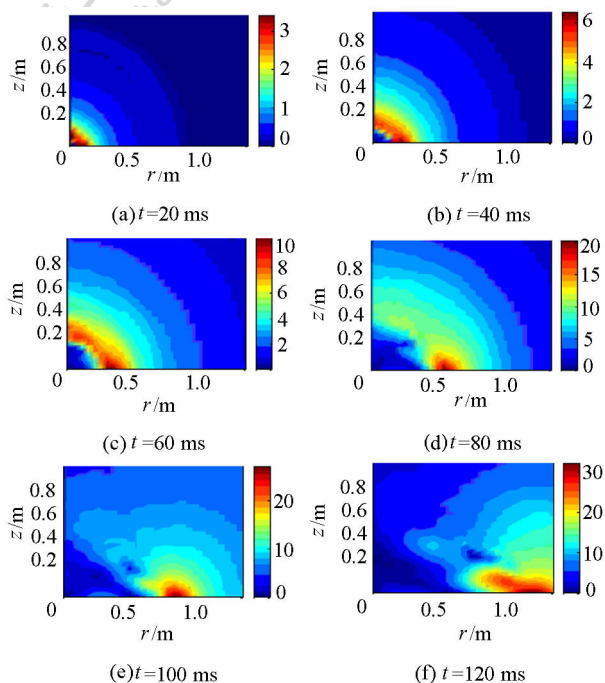


图 5 速度分布云图

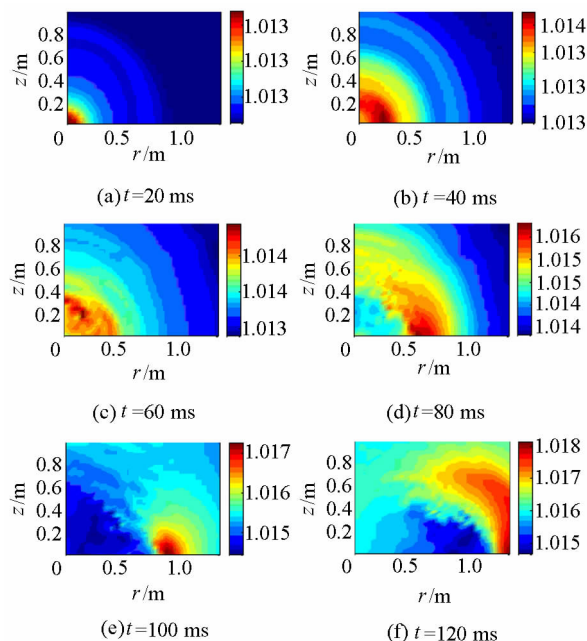
Fig. 5 Distribution of velocity contour ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

图 6 压力分布云图

Fig. 6 Distribution of pressure contour ( $\times 10^{-5} / \text{Pa}$ )

倍, 可见形状因子  $\epsilon$  对气云爆燃的强度具有重要的影响。

#### 4.4 爆炸时间分析

设燃烧速率小于  $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 燃烧过程结束。不同形状因子  $\epsilon$  对应的燃烧时间见图 9。可以看出, 随着  $\epsilon$  的减小, 气云的半径逐渐增

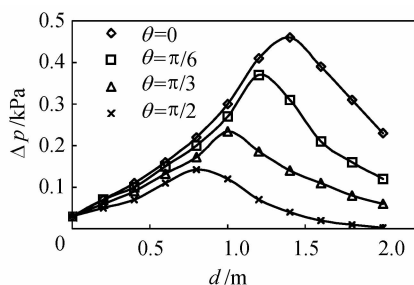


图 7 最大超压随距离变化曲线

Fig. 7 Maximum overpressure against distance

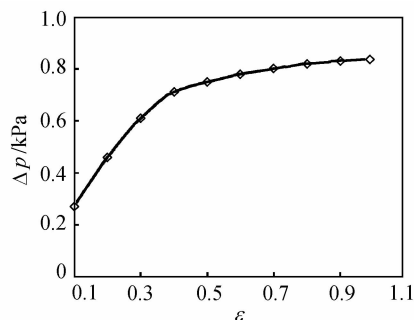


图 8 最大超压随气云形状因子变化曲线

Fig. 8 Maximum overpressure against parameter of cloud form

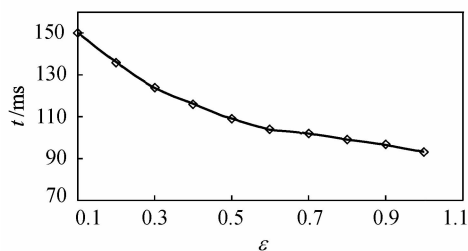


图 9 燃烧时间随气云形状因子变化曲线

Fig. 9 Combustion time against parameter of cloud form

大, 火焰传播路径增长, 因此燃烧时间增长。 $\epsilon$  为 0.1 时所用燃烧时间 (150 ms) 是  $\epsilon$  为 1.0 时所用时间 (92 ms) 的 1.6 倍。而燃烧时间越长, 气云总的释能速率越低, 爆炸强度就越低。

## 5 结 论

(1) 设计了圆柱形可燃气云实验装置, 进行了不同气云形状因子下的气云爆炸实验。实验中记录了距气云中心 1.2 m 与 1.6 m 两处的超压。研究范围内, 最大超压小于 1 kPa, 破坏能力较小。

(2) 建立了描述圆柱形气云爆炸的理论模型并求解, 数值解与实验数据相比较, 最大偏差与平均相对偏差分别为 18.3% 与 5.4%, 基本吻合。

(3) 得到爆炸流场各参数随时间、空间的分布, 以乙炔浓度、流场速度、压力为例进行分析。结果显示: 火焰传播过程中, 气云发生局部变形并扩展到原始气云边界外, 一定时间之后, 火焰只向外而不再向上传播; 火焰面的传播诱导出膨胀流场, 流场速度最大值发生在火焰面偏前位置; 膨胀流场向外冲击大气, 诱导出冲击波, 导致周围大气压力上升。

(4) 圆柱形气云爆炸, 贴近地面处为最危险区域, 该处最大超压可达垂直地面方向的 3.3 倍; 气云爆炸最大超压随着形状因子  $\epsilon$  的增大而增大,  $\epsilon$  为 1.0 时的最大超压可达  $\epsilon$  为 0.1 时的 3.1 倍; 气云形状因子越小, 火焰传播路径越长, 燃烧反应所需时间越长, 气云的能量释放速率就越低, 因此爆炸强度也就越低。

### 符 号 说 明

$A_t$ ——层流燃烧模型常数 (通常取 9)

$C_q$ ——对应火焰冷峰面熄灭函数 (当  $m_{\text{prod}}$  小于该值时火焰熄灭)

$c_p$ ——比定压热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$D$ ——扩散系数,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$d$ ——测点到爆心距离, m

$E_t$ ——层流燃烧加强因子

$h$ ——气云高, m

$m_{\text{prod}}$ ——燃烧产物质量分数 (本文选用  $\text{CO}_2$ ), %

$p$ ——压力, kPa

$\Delta p$ ——超压, kPa

$q$ ——燃烧热,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$R$ ——理想气体常数,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$R_{\text{fu}}$ ——燃烧速率,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

$r$ ——气云半径, m

$T$ ——热力学温度, K

$u_r, u_z$ ——速度分量,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$u_t$ ——基本层流燃烧速度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

$Y_{\text{fu}}, Y_{\text{O}_2}, Y_{\text{prod}}$ ——分别为可燃气体、氧气、燃烧产物浓度, %

$Y_{\text{lim}}$ ——燃料、氧气与产物 3 个浓度的最小值, %

$\epsilon$ ——气云形状因子 (高径比)

$\delta_t$ ——火焰层厚度 (本文取网格厚度), m

$\lambda$ ——热导率,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$\mu$ ——动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$

$\rho$ ——密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

### References

- [1] Jerketvedt D B, Bakke J R, Wingerden K V. Gas explosion handbook. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, **52** (1): 1-150
- [2] Khan F I, Abbasi S A. Major accident in process industries and an analysis of causes and consequence. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1999, **12**: 361-378
- [3] Oggero A O, Darbra R M. A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **A133** (1): 1-7
- [4] Zhao Hengyang (赵衡阳). Principle of Explosion of Gas and Dust (气体和粉尘爆炸原理). Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1996
- [5] van den Berg A C, Lannoy A. Methods for vapor cloud explosion blast modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 1993, **34**: 151-171
- [6] Xu Shengli (徐胜利), Mi Zhongchun (糜仲春), Tang Mingjun (汤明钧). Studies on combustible cloud explosion with limited energy release. *Journal of Combustion Science and Technology* (燃烧科学与技术), 1997, **2** (3): 155-162
- [7] Yang Guogang (杨国刚), Ding Xinwei (丁信伟), Bi Mingshu (毕明树). An improved SIMPLE algorithm used in numerical simulation of flammable gas cloud explosion. *Journal of Dalian University of Technology* (大连理工大学学报), 2004, **44** (6): 789-792
- [8] Yang Guogang (杨国刚), Ding Xinwei (丁信伟), Bi Mingshu (毕明树). Experimental and simulated study of effect of polythene film on flammable vapor cloud explosion. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (1): 180-183
- [9] Tufano V. Simulation of VCEs by CFD modeling: an analysis of sensitivity. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1998, **11**: 169-175
- [10] Epstein M, Fauske H K. Total flammable mass and volume within a vapour cloud produced by a continuous fuel-gas or volatile liquid-fuel release. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **147**: 1037-1050
- [11] Koopman R P, Ermak D L. Lessons learned from LNG safety research. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **140**: 412-428
- [12] Di Jianhua (狄建华), Zhen Liang (甄亮). Hazard assessment of the oil smoke cloud explosion in the wharf. *Industrial Safety and Environmental Protection* (工业安全与环保), 2005, **31** (4): 50-51
- [13] Arntzen B J. Final report on modeling in MERGE [R]. Christian Michelsen Research AS, CMR \_ 93 \_ F25042, 1993
- [14] Kravchik T. Modeling of spark ignition and flame initiation in a quiescent methane-air mixture. *Combustion and Flame*, 1994, **99**: 635
- [15] Tao Wenquan (陶文铨). Numerical Heat Transfer (数值传热学). Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001