

文章编号: 1006-9941(2015)05-0484-06

# 非圆截面云雾爆炸超压场数值模拟

陈明生, 李建平, 白春华

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为研究非圆截面云雾爆炸超压场的分布特性,用 LS-DYNA 程序对云雾爆炸超压过程进行了数值模拟,将数值模拟超压值与试验超压结果进行了对比,得到了  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $180^\circ$  共 4 个方向的峰值超压随距离的变化规律,以及不同起爆高度对超压场分布的影响。结果表明,试验中起爆云雾呈椭球形爆轰火球。4 个方向在距离爆炸中心 5 m 处的峰值超压为 2.9 ~ 5.2 MPa。在距离爆炸中心 5 ~ 50 m 范围内,地面冲击波轨迹呈椭圆形。冲击波在  $90^\circ$  方向的传播速率最小。当起爆高度由 0.5 m 增加至 2.5 m 时,5 ~ 15 m 范围内的地面峰值超压平均提高了 8%。

**关键词:** 非圆截面; 超压; 起爆高度; 云雾爆炸; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; O383

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.015

## 1 引言

可燃气体云雾的爆炸超压场分布规律,是石化工业事故预防<sup>[1]</sup>和云雾爆轰<sup>[2-3]</sup>等领域研究的焦点。爆炸超压场对人员的伤害程度、周边设备的破坏情况及其随距离变化的衰减特性,是计算安全距离与评估事故灾害的主要依据。

Liu<sup>[4]</sup>对不同燃料组分云雾爆炸超压与比距离的关系进行了拟合,并计算了不同距离处超压的 TNT 当量值。刘庆明<sup>[5]</sup>对多相燃料形成的云雾超压场进行了试验研究,发现了多相爆轰波的多峰结构压力波,并认为云雾区内峰值超压是恒定的。Raju<sup>[6]</sup>对无约束空间内云雾爆炸的峰值超压和冲量进行了理论与数值计算。彭金华<sup>[7]</sup>对非理想爆源在地面上形成的二维轴对称爆炸场进行了数值研究。徐胜利<sup>[8-9]</sup>针对不同的爆源位置,研究了 2 个圆柱体云雾爆炸场的相互作用规律。基于相同的计算方法,岳鹏涛<sup>[10]</sup>研究了圆柱体云雾爆炸波对地面目标作用前后的波结构变化规律与压力场分布。

以往研究的云雾形状多为圆柱体<sup>[11-12]</sup>和球体<sup>[13]</sup>,而针对非圆截面的云雾爆炸超压场的文献较少。为满足不同飞行装置的设计与应用,非圆截面的

外壳结构应运而生<sup>[14]</sup>。在异形壳体的不均匀约束条件下,燃料向外抛撒形成了非圆截面云雾。非圆截面云雾在外形上的不规则性,导致了不同方向上的冲击波轨迹与超压场分布差异。本研究根据飞行装置需求,针对由试验确定的非圆截面云雾在爆炸过程中的超压场分布进行了数值模拟,并在试验压力测试结果对比的基础上分析了起爆高度对超压场的影响规律。

## 2 试验与模拟参数

### 2.1 试验

为获得数值模拟过程中的云雾模型,基于试验中高速摄像系统在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $180^\circ$  共 4 个不同角度的记录结果,确定云雾外形为“四棱柱”。从俯视角度观察,云雾的形状为等腰梯形。随后结合高速摄像系统储存数据的后处理,得到云雾尺寸并将其作为构建数值模型的初始条件。其中高速摄像机型号为 HG-100K,拍摄速度为 2000 fps。试验现场布置如图 1 所示,在 4 个方向拍摄的云雾外形如图 2 所示。图 2 中的白色实线为形状辅助线。同时定义云雾成形,即引爆云雾的时刻为 0 ms。

### 2.2 计算模型

基于上述试验结果,确定模拟计算中的非圆截面(四棱柱)云雾的高为 3 m,对应横截面梯形的上端长度为 12 m,下端长度为 26 m,梯形的高为 25 m,如图 3 所示。考虑到云雾在水平方向主要呈向外放射状,因此取空气区域为圆柱体。通过前期建模试算,结

收稿日期: 2014-07-17; 修回日期: 2014-09-22

基金项目: 国家部委预研重点基金项目(9140A05080507)

作者简介: 陈明生(1986-),男,博士研究生,主要从事多相爆炸与数值模拟研究。e-mail: chenmings123@163.com

合计算域内冲击波的整体轨迹位置以及试验验证中的压力对比需要,取圆柱体圆面直径为 110 m。为保持计算域对应圆柱体一定的长径比,并考虑云雾高度,取圆柱体高为 30 m。同时指定圆柱体空气域地面为  $x-y$  平面,地面圆心为坐标原点,则原点与梯形短边垂直距离为 10.5 m;起爆点坐标为 (0 m, 0 m, 2.5 m)。起爆时刻定义为 0 ms。计算中采用 ALE 多物质组分模型<sup>[15]</sup>;单元数量约为 200 万个,单元形状均为六面体;网格密度由中心向四周逐渐稀疏。

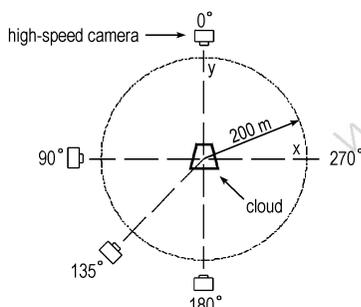


图 1 试验现场高速摄像系统布置

Fig. 1 High-speed camera system arrangement for experiment

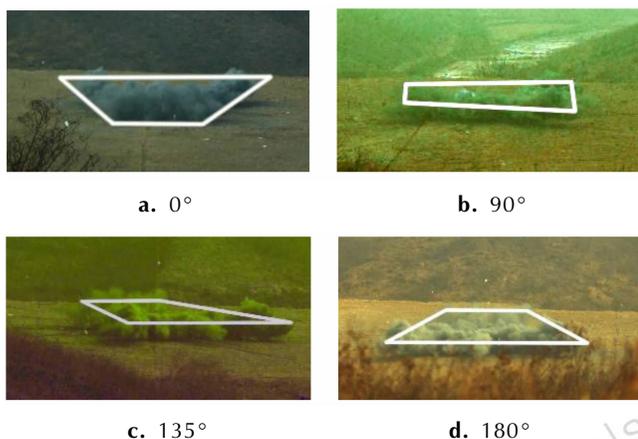


图 2 试验中 4 个方向拍摄的照片 (0ms)

Fig. 2 Pictures recorded at four directions in experiment (0ms)

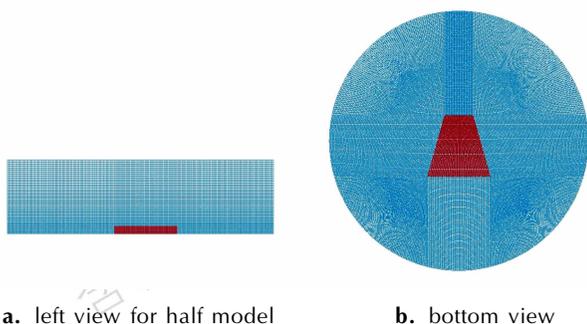


图 3 数值模型

Fig. 3 Simulation model

## 2.3 材料参数

计算过程涉及的材料包括空气和云雾。材料模型与数值取自文献<sup>[15-16]</sup>。空气材料选用 LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程。质量密度  $\rho$  为  $1.29 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 压力  $p_c$  为  $-0.1 \text{ Pa}$ , 动力粘性系数  $\mu$  为  $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 材料常数  $C_5$  为 0.4,  $C_6$  为 0.4, 单位体积内能  $E_0$  为  $2.5 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。云雾采用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 模型。由于云雾区内的燃料颗粒远大于空气分子尺寸,故将云雾近似为抛撒的燃料与周边空气的混合物。因此结合空气密度、燃料质量与云雾体积,可确定云雾质量密度  $\rho$  为  $1.35 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

根据云雾尺寸可知,距离爆炸中心 8 m 处的部分位置已经接近云雾边缘,因此取云雾区 5 m 范围内爆压平均值  $p_{Cl}$  为 3.9 MPa (试验布置及其结果见 2.2 节内容),取 5 ~ 8 m 范围内的爆速平均值  $D$  为  $1350 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合前期试验结果<sup>[5]</sup>,拟合得 JWL 状态方程参数  $A$  为 671.2 MPa,  $B$  为 0.343 MPa,  $R_1$  为 5.0,  $R_2$  为 1.5,  $w_0$  为 0.25, 单位质量能量  $E_m$  为  $3.0 \times 10^{-3} \text{ GPa}$ 。

## 3 模拟结果与试验验证

### 3.1 模拟压力云图

为节省篇幅,分别选取 25, 50, 75 ms 和 100 ms 时刻对应的压力分布,如图 4 所示。同时为了更清楚地观察压力场,对左视图进行了 15° 的仰角旋转。

由图 4 可知,从俯视角度观察地面冲击波轨迹为“上小下大”的近似椭圆。同时各个方向的压力分布不均匀,即局部区域存在较强超压。根据图 4 中冲击波轨迹在各个方向与爆炸中心的距离可知,在 135° 和 180° 方向的冲击波传播速率相对较大;90° 方向上的冲击波传播速率最小。这是由于云雾在不同方向的质量分布差异造成的。上述性质与圆柱体或球体<sup>[13]</sup> 云雾产生的冲击波在地面呈圆环状向外传播的特性是不同的。随着时间的推移,冲击波轨迹在各个方向的差异逐渐减小。从左视角度观察,由于云雾高度为 3 m,与其他方向尺寸相比较小,因此冲击波在垂直方向上的传播速率较小。

### 3.2 试验验证

作为数值模拟的验证手段,下面对试验结果进行分析。试验中采用了 32 个 Kilster-ICP 型压电式压力传感器,分别设置于 0°、90°、135° 和 180° 共 4 个方向。如图 5 所示,在每个方向上的 8 个传感器布置点与起

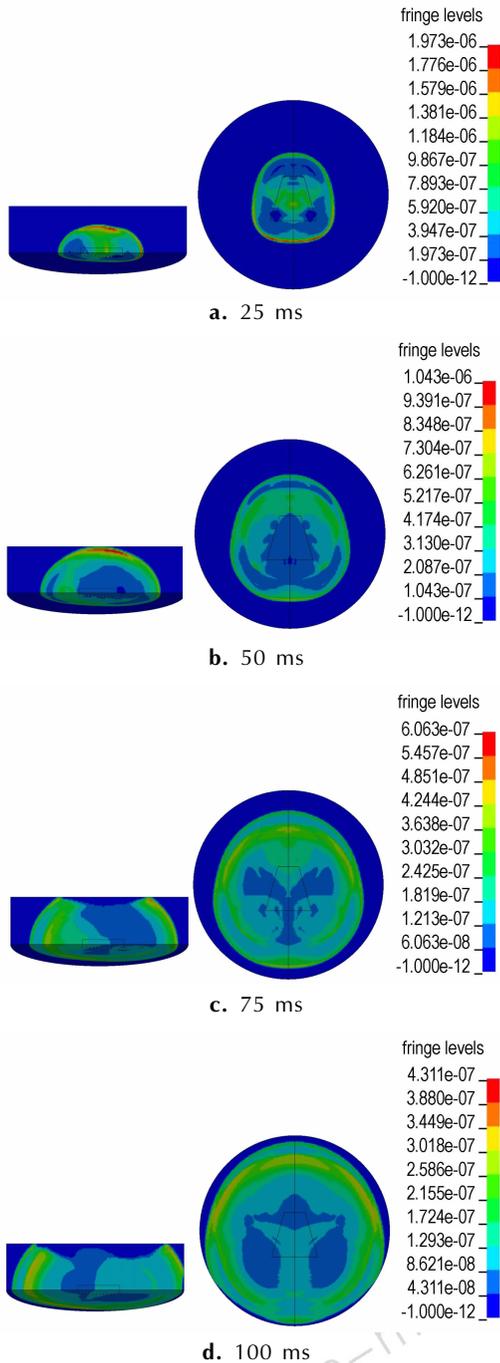


图4 压力云图模拟结果 ( $1 \times 10^5$  MPa)  
 Fig.4 Simulated results for pressure cloud ( $1 \times 10^5$  MPa)

爆中心距离分别为 5, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 50 m。为保持与(图 4)模拟中左视图视角和时间间隔的一致性,选取了 90°方向距爆炸中心 200 m 处高速摄像系统(布置情况见图 1)的记录结果,如图 6 所示。虽然试验中冲击波阵面轨迹是无色的,但可以根据冲击波波轨迹与其周边空气折射率的差异来判断波阵面所在位置。因此,通过图像后处理在图 6 中冲击波轨的实

际位置处添加了白色虚线辅助线以便观察。试验共重复进行 3 次,在后处理时超压取平均值。

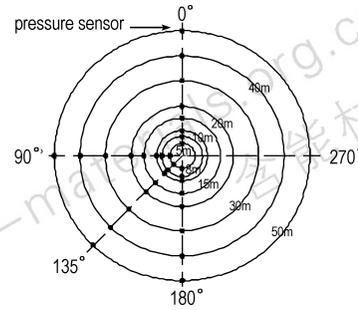


图5 试验现场压力传感器布置  
 Fig.5 Pressure sensors arrangement for experiment

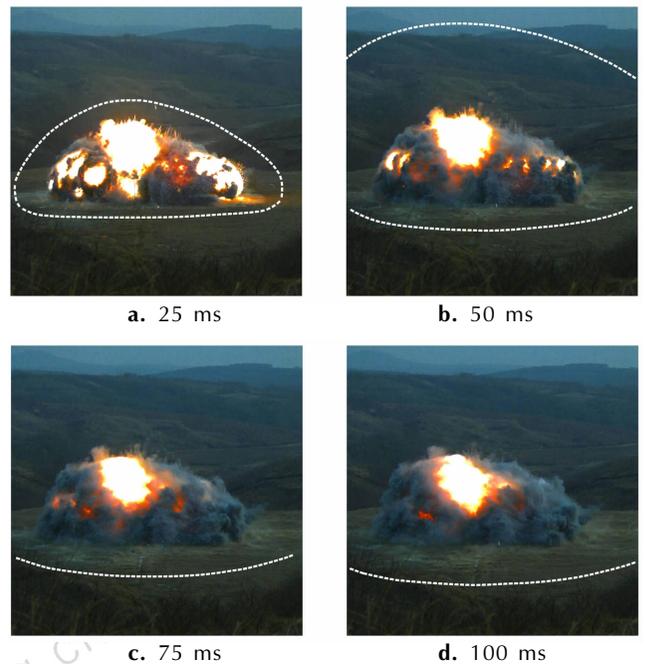


图6 在 90°方向上高速摄像系统记录的试验结果  
 Fig.6 Experimental results recorded by high-speed camera at 90° direction

由图 6 可知,云雾的初始扁平外形结构(0 ms 时刻,图 2b)迅速膨胀(25 ms 时刻,图 6a);云雾引爆后产生亮红色爆轰火球,其外形近似椭球;随后冲击波波阵面呈弧状向外传播,在地面上扫掠后激起灰白色扬尘。在 75 ms 时刻,垂直方向的空气冲击波已经传播至拍摄范围外。随着时间的推移,爆轰火球的亮度逐渐降低,体积不断缩小,其周边爆轰产物开始增多;云雾区内的反应物消耗殆尽。为了对模拟结果与试验压力测试数据进行定量对比,分别绘制二者在 0°、90°、135°和 180°共 4 个方向的压力值,如图 7 所示。图 7 中符号“E”代表试验值,“S\_5 m”代表距离爆炸

中心 5 m 处地面单元的模拟压力值。模拟压力值根据 LS-PrePost 软件对计算模型中指定位置单元的压力监测获得。

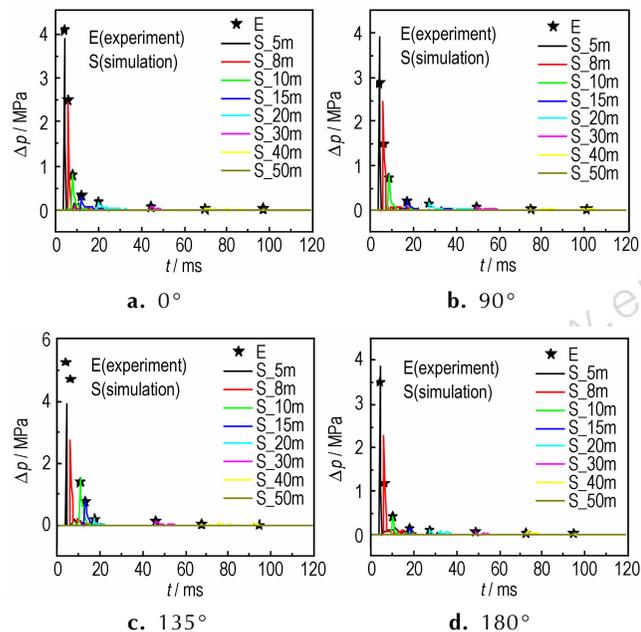


图7 模拟与试验压力值对比

Fig. 7 Comparison of pressure between simulation and experiment

由图 7 可知,随着距离的增加,同一方向上的压力迅速衰减,15 m 后 4 个方向超压值均已低于 1 MPa。试验中冲击波到达压力监测点的时间上看,90°方向在 30,40,50 m 的时间始终最晚。而结合数值模拟结果(图 4)可以看出,受到云雾初始形状的影响,冲击波“压力圈”在 90°方向形状“最窄”,因此冲击波到达同一距离压力监测点的时间相对较晚。在这一点上试验值与模拟结果一致。

另一方面,在 5 m 与 8 m 处数值模拟的超压与试验测试结果有差异。造成二者不同的原因可能是:首先,试验中的混合物浓度分布并不均匀,尤其是在 5 m 处 4 个方向的峰值超压为 2.9 ~ 5.2 MPa;而模拟计算中各个位置的物质浓度相同,在 5 m 处的峰值超压为 3.9 MPa。其次,试验中云雾边界是不光滑、非线性的(图 2),而计算中为便于网格划分对云雾形状进行了简化处理(图 3)。最后,试验中的地面为砂石混合物,受到冲击波作用后发生形变并激起扬尘(图 6);而计算中的地面为刚性边界。

总体而言,4 个方向上的试验压力数据与模拟结果的变化趋势一致,从而验证了数值模拟的可行性。

基于上述模拟条件,下面保持材料种类,物质密度和计算域尺寸等参数不变,针对不同起爆高度进行数

值模拟,分析在 3 种不同起爆高度条件下 4 个方向的超压场变化规律。

### 3 不同起爆高度的超压场模拟

上节对超压场模拟的云雾起爆高度为 2.5 m,本节为分析起爆高度对压力场分布的影响,分别采用起爆高度为 0.5 m 和 1.5 m 模拟爆炸超压过程,并将计算结果与起爆高度为 2.5 m 的模拟值进行对比。获得 0°、90°、135°和 180°等 4 个方向不同距离处对应的峰值超压如图 8 所示。图 8 中“H”表示起爆高度。

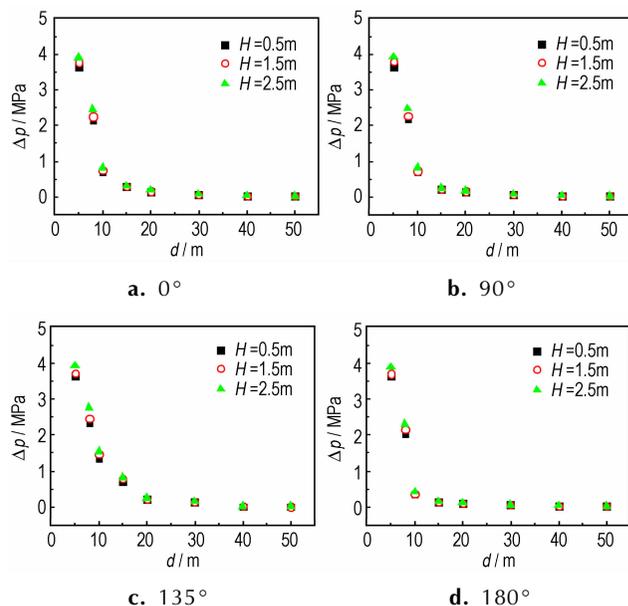


图8 不同起爆高度条件下的压力分布

Fig. 8 Pressure distribution with three different ignition heights

由图 8 可知,当起爆高度由 0.5 m 增加至 2.5 m 时,在 5 ~ 15 m 区域内 4 个方向的峰值超压平均提高了 8%。从云雾区内的爆轰波传播轨迹上看,以地面为参照物,若起爆点位于地面(即起爆高度为 0 m)则爆轰波传播方向是自下而上的。当起爆高度大于 0 m 时,则有向上和向下传播的两道爆轰波,影响地面超压的是后者。随着起爆高度的增加,冲击波自上而下传播至地面的方向性越明显。从垂直方向的云雾物质含量上看,起爆高度越大,则在起爆点与地面之间的燃料质量越多,这就使得影响地面超压的云雾爆轰反应时间更长、能量释放也更多,因此地面超压也越大。

但对于 15 ~ 50 m 范围内的地面超压而言,起爆高度的影响不明显。主要原因是冲击波能量在不断衰减直至较远距离时,各个方向之间的差异不断减小且超压

值逐渐趋近于0。在一定范围内随着起爆高度的增加同一监测点的峰值超压越大,这与前期试验<sup>[17]</sup>获得的结论是一致的。结合文献<sup>[18]</sup>可知,适当增加起爆高度可增强峰值超压,但高度过大反而导致超压降低。

与其它3个方向相比,135°方向上10~20 m内的峰值超压“回落”平稳,压力衰减的速率最小。这是因为云雾对应的梯形斜边(见图3)在该方向边界延伸最大,并且沿着方向直线附近的云雾质量逐渐减少。而90°方向云雾边界与x轴的夹角约为45°,0°与180°方向云雾边界与y轴垂直。因此边界间断明显,使得超压衰减速率较大。

## 5 结 论

基于有限元分析法,对四棱柱体云雾的爆炸超压场在4个不同方向的分布规律进行了数值模拟,并与试验超压测试结果作了对比验证,随后分析了起爆高度的影响,主要结论有:

(1) 非圆截面云雾在起爆后地面冲击波轨迹呈两端大小不同的椭圆形,且各个方向上的冲击波传播速率和超压衰减特性不同。在0°、90°、135°和180°共4个方向中,135°方向冲击波传播速率较大且超压衰减速率最小;90°方向冲击波传播速率较低且超压衰减速率较大;0°和180°方向的冲击波与超压差异不明显。因此可根据能量输出偏好的需要,通过改变云雾朝向实现特定方向的超压强弱分布。

(2) 在3种起爆高度的模拟条件下,峰值超压随着起爆高度的增加而增大,且增长幅度随着距离增加而逐渐减小。当起爆高度由0.5 m增加至2.5 m时,对云雾区域及其附近(5~15 m)的爆炸超压有8%的提升效应;而对空气冲击波传播区域(15~50 m)超压影响可以忽略,对整体远场超压无明显的牵制作用。也就是说,在一定范围内起爆高度并不是影响云雾爆轰超压场分布的主要因素。

(3) 通过试验对比发现,数值模拟中冲击波达到各监测点的时刻与实际情况相吻合。试验中不同方向云雾的质量浓度存在差异,使得距爆心5 m处的爆炸峰值超压在2.9~5.2 MPa内波动。本研究数值模拟的对象仅限于密度分布均匀的非圆截面云雾,而对具有浓度梯度的实际云雾爆炸超压场分析等工作有待进一步研究,以便为云雾爆轰能量输出分布的评价与优化设计提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] 丛立新. 气云爆燃压力场与冲量场实验与数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
CONG Li-xin. Experiment and simulation on pressure and impulse field of gas cloud deflagration[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [2] 许会林, 汪家骅. 燃料空气炸药[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 10-18.
- [3] 白春华, 梁慧敏, 李建平, 等. 云雾爆轰[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 4-12.
- [4] Liu G, Hou F, Cao B, et al. Experimental study of fuel-air explosive[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44(2): 213-217.
- [5] 刘庆明, 白春华, 李建平. 多相燃料空气炸药爆炸压力场研究[J]. 实验力学, 2008, 23(4): 361-370.  
LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, LI Jian-ping. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(4): 361-370.
- [6] Raju M S N. The blast waves from unconfined axisymmetric vapour cloud explosion[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1975.
- [7] 彭金华, 汤明钧. 非理想爆源产生的爆炸场数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(4): 289-296.  
PENG Jin-hua, TANG Ming-jun. Numerical simulation of blast fields from non-ideal explosion sources[J]. *Explosive and Shock Waves*, 1991, 11(4): 289-296.
- [8] 徐胜利. 无约束可燃气云雾爆炸场的数值模拟和实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1994.  
XU Sheng-li. Numerical simulation and experimental study on unconfined explosion field of flammable gas cloud[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1994.
- [9] 徐胜利, 岳鹏涛, 彭金华. 多爆源云雾爆炸波相互作用的三维数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 1-6.  
XU Sheng-li, YUE Peng-tao, PENG Jin-hua. Three dimensional computation on the interaction of blast waves generated by multi-sources of FAE[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2000, 20(1): 1-6.
- [10] 岳鹏涛, 徐胜利, 彭金华. FAE爆炸波对地面目标作用的三维数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 97-106.  
YUE Peng-tao, XU Sheng-li, PENG Jin-hua. Three dimensional computation on the interaction of blast waves generated by multi-sources of FAE[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2000, 20(2): 97-106.
- [11] 李秀丽, 惠君明, 王伯良. 云爆剂爆炸/冲击波参数研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 410-414.  
LI Xiu-li, HUI Jun-ming, WANG Bo-liang. Blast/Shock wave parameters of single-event FAE[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 410-414.
- [12] 郭学永. 云爆战斗部基础技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
GUO Xue-yong. Basic technical research on fuel air explosive warhead[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [13] 徐胜利, 汤明钧, 糜仲春. 近地空气中气云爆炸波遇地面反射的研究[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(4): 298-304.  
XU Sheng-li, TANG Ming-jun, MI Zhong-chun. Studies on reflection of blast waves for symmetric cloud explosion close to the ground[J]. *Explosive and Shock Waves*, 1996, 16(4): 298-304.

- [14] Garon K D, Faminu O. Aeroballistic Range tests of missile configurations with non-circular cross-sections and aeroprediction comparison results, AIAA03-1243[R]. 2003.
- [15] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 184-249.
- [16] 白金泽. LS-DYNA3D 基础理论与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 74-103.
- [17] 苗长青, 张奇, 白春华, 等. FAE 装置炸高对爆炸压力场影响的实验研究[J]. 火炸药学报, 2002, 25(3): 9-10.
- MIAO Chang-qing, ZHANG Qi, BAI Chun-hua, et al. Investigation of bursting height of FAE influences blast pressure measuring [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2002, 25(3): 9-10.
- [18] 黄菊, 王伯良, 仲倩, 等. 炸高对爆炸超压的影响规律[J]. 火炸药学报, 2012, 35(1): 35-38.
- HUANG Ju, WANG Bo-liang, ZHONG Qian, et al. Influence rule of bursting height on blast over pressure[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2012, 35(1): 35-38.

## Simulation of Explosion Overpressure Distribution for Non-circular Cross-section Cloud

CHEN Ming-sheng, LI Jian-ping, BAI Chun-hua

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the distribution characteristics of explosion overpressure field for non-circular cross-section cloud, the numerical simulation of overpressure process of cloud explosion was performed by LS-DYNA program. Comparison between the simulated overpressure values with experimental was carried out. The changing rule of overpressure with distance, as well as of different ignition height on overpressure field distribution was studied at four directions, including  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  and  $180^\circ$ . Results show that: ignited cloud shows up as an ellipsoidal detonation fireball in experiment. The peak overpressure value measured at the position of 5 m from explosion center at four directions is from 2.9 MPa to 5.2 MPa. In the range of 5 m to 50 m from explosion center, a shock wave oval trajectory on ground was revealed. Shock wave propagated at  $90^\circ$  direction has lower velocity than others. In the range of 5 m to 15 m, the ground peak overpressure enhances by 8% averagely when ignited height increases from 0.5 m to 2.5 m.

**Key words:** non-circular cross-section; overpressure; ignition height; cloud explosion numerical simulation

CLC number: TJ55; O383

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.015



## 《含能材料》固体推进剂专栏征稿

高能量、低特征信号、低易损、低成本、低污染、灵活能量管理和高可靠性成为当前固体推进剂面临的紧迫课题,为促进其研究,本刊将于 2015 年开设推进剂研究专栏,以专题报道固体推进剂研究的最新研究进展。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

## 《含能材料》高品质炸药晶体研究专栏征稿

高品质炸药晶体的出现为钝感弹药的研究与应用开辟了一条重要途径,高品质炸药晶体因而也成为目前国内外含能材料研究领域的热点之一。为促进高品质炸药晶体的研究和应用,《含能材料》将于 2015 年开设高品质炸药晶体研究专栏,专题报道高品质炸药晶体的制备、表征、性能、应用等领域的最新研究成果,促进学者间的交流。欢迎相关研究学者投稿。来稿建议为英文。来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部