DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0081-06

多点云雾爆炸波相互作用的数值模拟*

陈明生,白春华,李建平
(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: 为研究多点云雾爆炸超压场的分布特性,利用 LS-DYNA 程序,对 4 个非圆柱体云雾的爆炸超压的相互作用过程进行了数值模拟,并与实验结果进行了对比。得到了中心区域冲击波相互作用演化过程与中心竖直方向 0~20 m 处的超压变化规律,以及 0°、90°、135°和 180°等 4 个方向的地面峰值超压随水平距离变化的规律。结果表明:中心区域地面依次出现 3 重冲击波;地面整体超压场强度向中心区域倾斜。在 45°方向竖直截面上冲击波波系由入射波、反射波与马赫波构成。

关键词: 爆炸力学;峰值超压;LS-DYNA;多点云雾;相互作用
中图分类号: O383.3 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

多点云雾爆炸超压场的分布规律,是石化工业灾害预防[1]和云雾爆轰[2]等领域研究的焦点。与单个冲击波传播过程相比,两个强冲击波在正面相互作用后将形成强反射波[3]。而两个以上冲击波的相互作用机理、波系结构和超压分布复杂,形成的超压场对人员和财产将造成更大的伤害和损失。

施惠明[4]研究了多点抛撒、单点起爆的云雾爆炸超压随距离变化的特性。刘庆明等[5]、M. S. N. Raju[6]和 G. Liu 等[7]对单个圆柱体云雾的爆炸超压场进行了研究。岳鹏涛等[8]研究了圆柱体云雾爆炸波和地面作用问题,得到了对目标作用前后冲击波的波系结构。基于相同的计算方法,彭金华等[9]和徐胜利等[10]针对不同的爆源位置,研究了两团云雾爆炸后爆炸场的相互作用。

以往研究的云雾形状多为圆柱体[11]和球体[12],而针对非圆截面的云雾爆炸超压场的研究较少。非圆截面云雾的各水平边界与起爆中心的距离并不相同,由此产生的超压场在各个方向上的分布也有差异。目前对云雾的研究数量一般为 1 个,最多仅为 2 个并且缺乏实验验证。而传统的光学测量设备难以捕捉冲击波相互作用区域的形态与演化过程。本文中,基于实验确定的四棱柱体云雾,对 4 个云雾爆炸过程中的相互作用超压场进行数值模拟,分析中心区域冲击波波系结构演化与竖直方向的超压场分布规律,并将地面超压模拟结果与实验压力测试数据进行对比验证。

1 数值模拟

1.1 模型和参数

基于实验中高速摄像系统与 DV 设备分别在 0°和 270°方向对云雾外形的拍摄,确定了单个云雾外形为“四棱柱”,竖直方向投影形状为等腰梯形。随后结合高速摄像系统记录的数据后处理,得到云雾尺寸并将其作为构建数值模型的初始条件。其中,高速摄像系统型号为 HG-100K,拍摄速度为 2 000 s^{-1};DV 设备型号为 Canon-EOS-30D,拍摄速度为 25 s^{-1}。实验现场布置如图 1 所示,在 2 个方向拍摄的 4 个云雾外形如图 2 所示。图 2 中的白色虚线为形状辅助线。

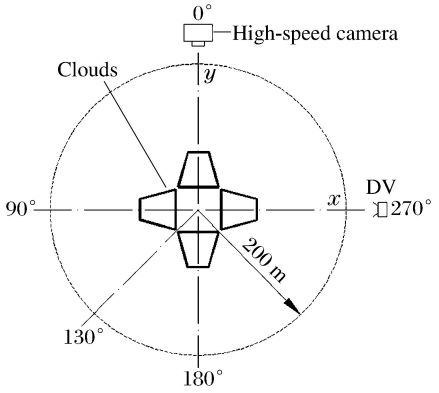

图 1 实验摄像系统现场布置
Fig. 1 Cameras arrangement for experiment

* **收稿日期**: 2014-07-18; **修回日期**: 2014-11-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(11372044)
第一作者: 陈明生(1986—),男,博士研究生,chenmings123@163.com。

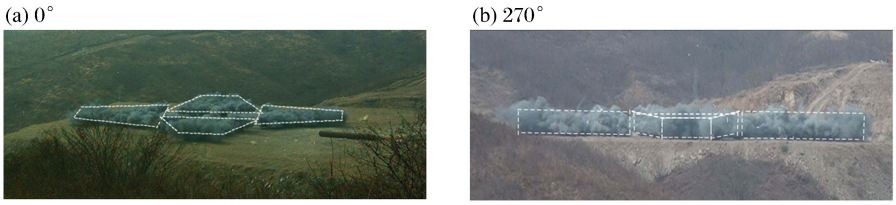

图 2 实验拍摄的多点云雾外形

Fig. 2 Shape of clouds recorded in experiment

如图 3 所示，计算模型中单个“四棱柱”云雾的高为 3 m，对应的横截面梯形上端长度为 12 m，下端长度为 26 m，梯形的高为 25 m。空气区域为圆柱体，高为 30 m，圆面直径为 110 m，空气四周设置为无反射边界。同时指定空气域底面（即地面）为 xy 平面，地面圆心为坐标原点，则原点与梯形长边垂直距离为 7.5 m；4 个起爆点坐标为(22,0,2.5)、(0,22,2.5)、(−22,0,2.5)和(0,−22,2.5) m。起爆时刻定义为零。计算中采用 ALE 多物质组分模型；1/4 模型的单元总数约 230 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；模型将云雾交叉区域简化作为所在方向云雾一部分。

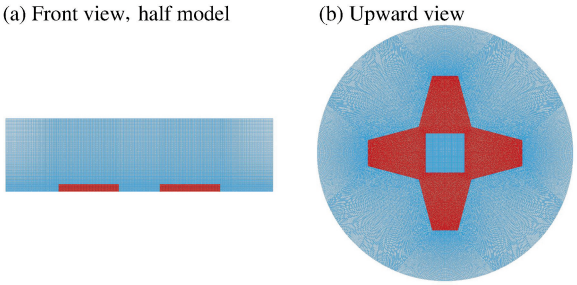

图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

计算过程涉及材料包括空气和云雾。材料模型与数值取自文献[13]。空气材料选用线性多项式状态方程，密度 ρ=1.29 mg/cm^3，压力 p_C=−0.1 Pa，动力黏性系数 μ=17.9 μPa·s，材料常数 C_5=0.4，C_6=0.4，单位体积内能 E_0=250 kJ/m^3。云雾采用高爆燃烧模型，密度 ρ=1.35 mg/cm^3。根据实验结果（见第 2.2 节），取云雾区 15、20 和 30 m 处爆压平均值 p_{CJ}=3.8 MPa，爆速平均值 D=1.3 km/s。结合前期实验结果[5]，拟合得 JWL 状态方程参数：A=671.2 MPa，B=3.43 MPa，R_1=5.0，R_2=1.5，ω_0=0.25，E_m=3.0 kJ/kg。

1.2 结 果

1.2.1 竖直方向超压场

为分析在中心区域竖直方向上的冲击波相互作用及其结构演化过程，分别选取了 0°和 45°方向 25、30、35 和 40 ms 时刻的超压云图，如图 4 所示。由于截面角度与对应时刻不同，各图之间的相同颜色深度不代表相同超压强度。

由图 4 可知，25 ms 时刻冲击波相遇，在地面附近形成近似圆柱体的高压中心；在 0°横截面中心区域，冲击波相遇形成的波系结构不规则，冲击波轨迹携带拐点。这是由于单点云雾外形（见图 1～3）在梯形锐角不平滑、且两点云雾相交位置的尖点引起的。在 45°横截面中心区域，冲击波外形以弧状为主，在 30 ms 时刻高压中心开始上移并呈圆锥形，并于 35 ms 时刻蜕变为月牙形。中心区域竖直方向上的高压中心为马赫波轨迹。

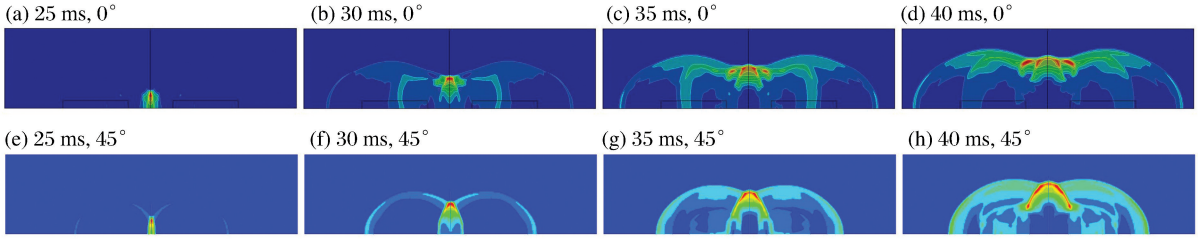

图 4 竖直方向超压模拟结果

Fig. 4 Simulation results for overpressure in vertical direction

从水平方向的冲击波轨迹上看，由 25 ms 时刻始出现第 1 道冲击波轨迹，并于 30 ms 时刻左右产生第 2 道冲击波，随后在 35 ms 时刻出现第 3 道较弱的冲击波向外扩张。40 ms 时刻由于稀疏波的追赶，最内部的弱冲击波逐渐衰退、消亡。由此可见，在中心区域附近地面受到了多次冲击波的扫掠，这是多点云雾优于单点云雾爆炸超压场的特性之一。文献[10]中贴地两爆源间的多波峰压力时间曲线也印证了上述说法。

此外，入射波先于反射波离开中心区域；两两正面相遇、强度一致的冲击波相互作用，相当于单个冲击波遇到刚性壁面后的反射作用，因此反射波强度大于入射波[3]。为定量描述中心区域竖直方向的超压场分布，分别取 z 轴坐标在 0～20m 范围内、每间隔 1 m 处的峰值超压，如图 5 所示。

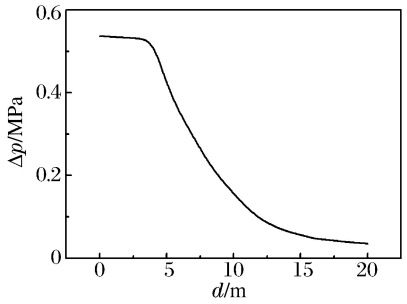

图 5 中心区域竖直方向上不同位置的超压

Fig. 5 Pressure variation in vertical direction in the central area

由图 5 可知，在中心区域竖直方向上 0～4 m 范围内，出现由多重冲击波相互作用产生的高压“平台”；而在 4～20 m 范围内，随着竖直距离的增加，监测点峰值超压迅速衰减。中心区域地面距离爆心 22 m、坐标为(0，0，0)处的峰值超压为 0.54 MPa。而文献[8]中单点云雾起爆后距离爆心 20 m 处的峰值超压已不足 0.1 MPa。

1.2.2 地面超压场

针对地面超压场随时间变化规律进行讨论，分别选取 15、30、45 和 60 ms 时刻对应的地面超压分布，如图 6 所示。

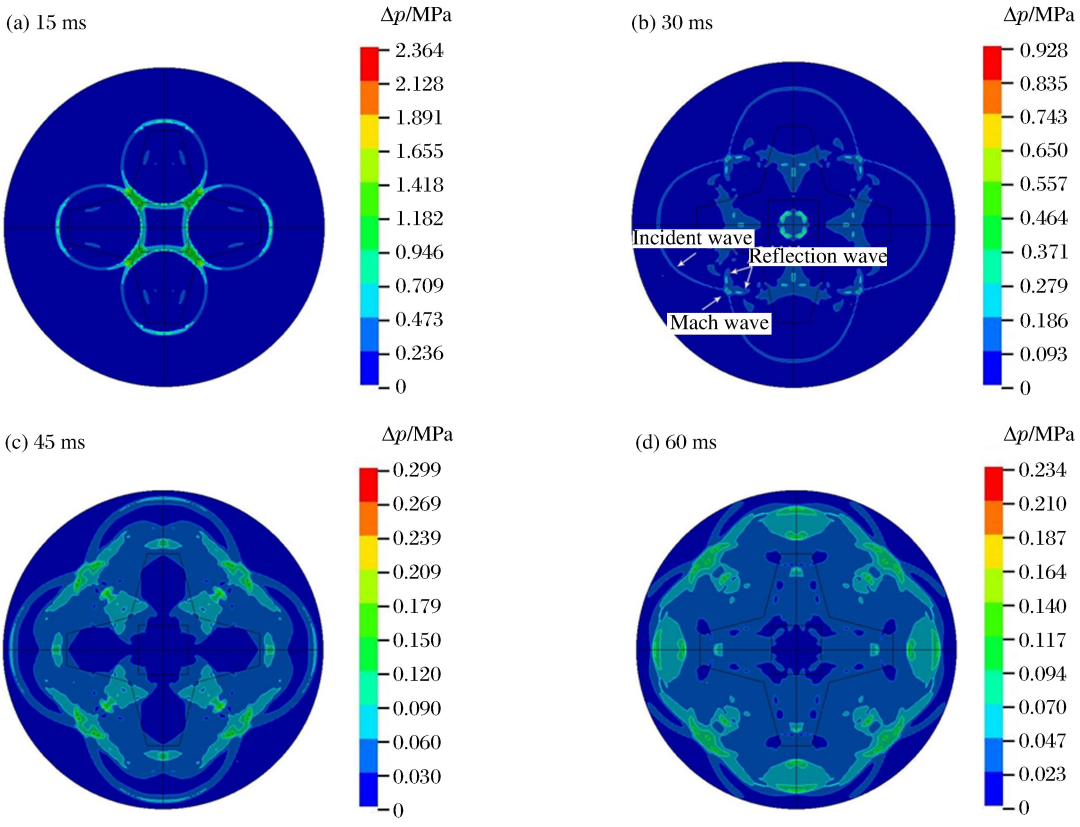

图 6 地面超压模拟结果

Fig. 6 Simulation results for pressure on ground

由图 6 可知，4 个云雾在起爆后地面冲击波呈椭圆形压力圈向外扩张，并且云雾梯形短边与长边对应的冲击波强度高于斜边，这与圆柱体云雾产生的冲击波外形和强度是不同的[13]。在 15 ms 时刻 45°方向冲击波已经相遇并相互作用；超压场在中心区域、x 轴和 y 轴均出现相互交错波系结构。30 ms 时刻，在 45°方向波系由入射波、反射波和马赫波构成，其中反射波与马赫波连接呈“V”形。

结合上述定性分析，下面对 0°和 45°方向地面各监测点的超压模拟结果与实验值作定量对比验证。

2 实验验证

2.1 实验布置

实验中的高速摄像系统布置见图 1。压力测试系统采用了 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 7 所示，在同一条直线方向上的 8 个传感器布置点与起爆中心距离分别为 5、8、10、15、20、30、40 和 50 m。

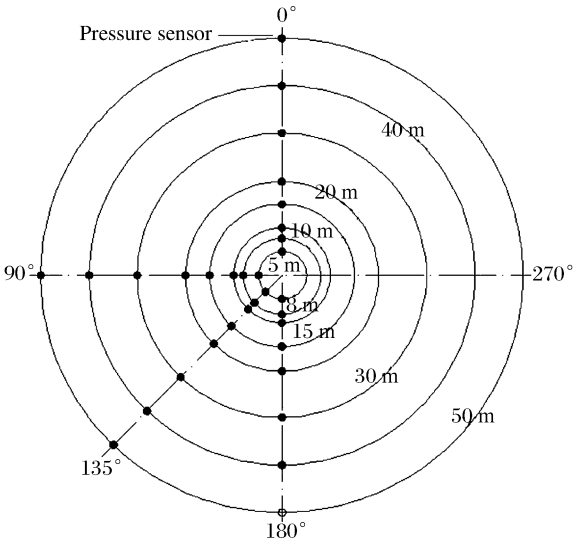

图 7 实验现场压力测试系统布置

Fig. 7 Pressure measurement system arrangement for experiment

2.2 结果比较

为保持与图 6 的时间及其间隔一致，选取了 15、30、45 和 60 ms 时刻在 0°方向高速摄像系统的记录结果，如图 8 所示。

由图 8 可知，云雾引爆后产生椭球形、亮红色爆轰火球并出现暗黑色爆轰产物；随后冲击波向外传播，在地面上扫掠后激起灰白色扬尘；爆轰火球发光强度逐渐减弱，外围爆轰产物进一步增多。为了对模拟结果与实验压力测试数据进行定量对比，下面将二者在不同方向的压力值进行绘制，如图 9 所示。其中根据云雾超压场对称性将 0°、90°和 180°共 3 个方向各压力监测点数据取平均值。

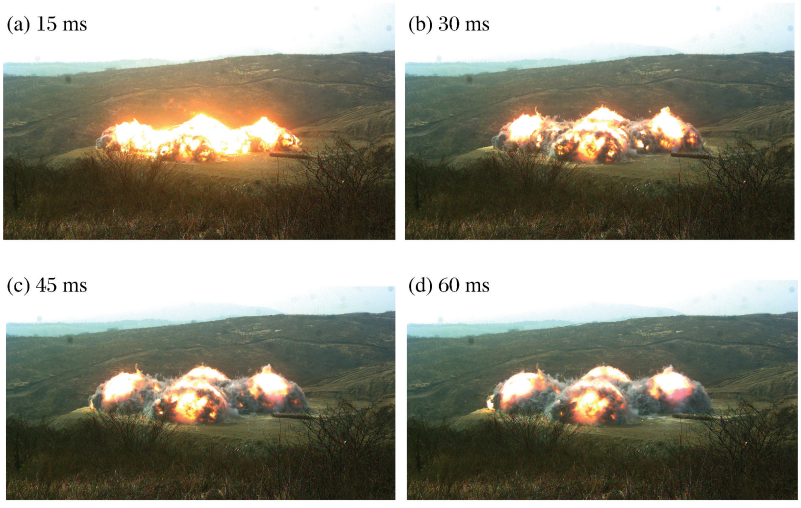

图 8 在 0°方向上高速摄像系统记录的爆炸过程

Fig. 8 Explosion process recorded by high-speed camera in 0° direction

由图 9 可知，由于云雾起爆点位于 x 轴和 y 轴±22 m 处，该处超压峰值与 15、30 m 处压力监测点的超压值形成高压“平台”，这与文献[10]中贴地两爆源爆炸超压场分布趋势一致但稍有不同。随着两侧距离的增加并远离云雾爆轰区，峰值超压出现下降速率先增大后减小的趋势；并且在偏往中心方向的冲击波传播区内超压高于另一侧。引起左高右低的原因主要有两个：一方面，由于单个云雾的质量分布主要在梯形下半部分（见图 1），使能量释放方向偏向于中心区域。另一方面，多点云雾起爆产生的冲击波由 4 个方向同时往中心区域传

播并相互作用使得超压衰减较慢；而外侧冲击波向半无限空气域传播，超压衰减较快。另外多重冲击波在中心附近汇聚（见图 4(a)和图 4(e)），从而该处压力重新上升。

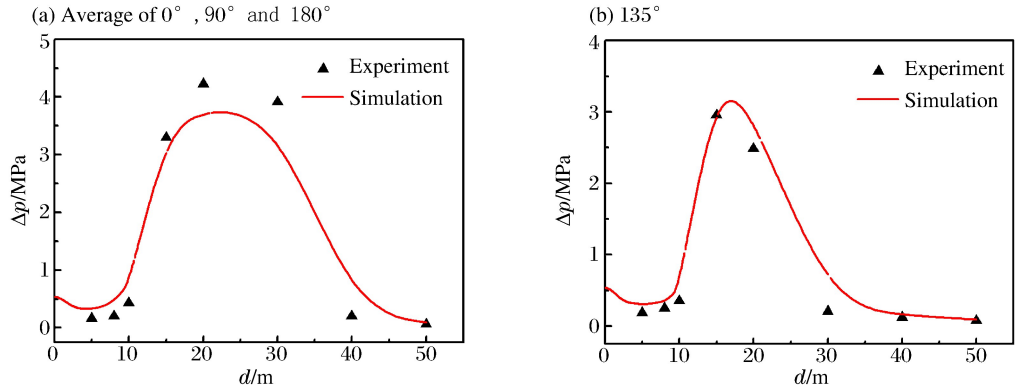

图 9　超压的数值模拟和实验结果

Fig. 9　Simulation and experimental results for overpressure

0°与 135°方向二者相比，由于 0°方向穿过云雾爆炸中心，所以在 20 m 处的峰值超压大于 135°方向；前者整体超压场的衰减速率也小于后者。另外，数值模拟得到的峰值超压随距离变化趋势与实验结果一致，偏差在可接受范围内。引起二者差异的原因主要有 3 个：第一，实验中的混合物浓度分布并不均匀；而模拟计算中各个位置的物质浓度完全相同，与空气交界处的物质浓度是突跃间断的。第二，实验中云雾边界并不光滑；而模拟计算中为便于网格划分将云雾外形简化为平面，各平面之间相交为一条线。第三，实验场地的地面为砂石混合物且不平整；而模拟计算中的地面为光滑刚性边界。

3　结　论

基于有限元分析法，对 4 个四棱柱体云雾的爆炸超压场进行了数值研究，分析了中心区域竖直方向上的相互作用冲击波波系结构和地面超压分布，并与实验结果进行了对比。主要结论有：

（1）0°和 45°方向竖直横截面存在逐渐向上移动的高压中心；中心区域地面受到多次冲击波扫掠。这些特性，使多点云雾爆炸在中心区域产生的冲击波相互作用超压场优于单点云雾爆炸。实验中云雾起爆后出现椭球形、亮红色爆轰火球，冲击波在地面扫掠后激起扬尘。

（2）中心区域竖直方向 0～4 m 处峰值超压形成高压“平台”，之后随着距离的增加迅速衰减。除冲击波相互作用效应外，四棱柱云雾在梯形长边方向上整体形状与质量的偏向性也增强了该方向的超压强度。针对多点爆源中心区域的超压场特性而调整和控制爆源位置，可实现云雾能量分布的最优化或在工业灾害预防方面降低冲击波的叠加效应。

参考文献：

[1]　李伟，汪佩兰. 某 LNG 储罐蒸气云火灾爆炸数值模拟[J]. 北京理工大学学报，2003，23(增刊)：307-311.
Li Wei, Wang Peilan. Numerical simulation of gas explosion in a LNG terminal[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(suppl): 307-311.

[2]　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.

[3]　汤文辉. 冲击波物理[M]. 北京：科学出版社，2011：145-152.

[4]　施惠明. 多点抛撒云雾爆炸特性研究[D]. 南京：南京理工大学，2008.

[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 Qingming, Bai Chunhua, Li Jianping. 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] 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.

[8] 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 Pengtao, Xu Shengli, Peng Jinhua. 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.

[9] 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 Jinhua, Tang Mingjun. Numerical simulation of blast fields from non-ideal explosion sources[J]. Explosive and Shock Waves, 1991,11(4):289-296.

[10] 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 Shengli, Yue Pengtao, Peng Jinhua. 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.

[11] 惠君明,张陶,郭学永. FAE 装置参数对燃料抛撒与爆炸威力影响的实验研究[J]. 高压物理学报,2004,18(2):103-108.
Hui Junming, Zhang Tao, Guo Xueyong. Experimental study on the influence of device parameters of FAE to fuel dispersion and explosive power[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004,18(2):103-108.

[12] 徐胜利,汤明钧,縻仲春. 近地空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 Shengli, Tang Mingjun, Mi Zhongchun. Studies on reflection of blast waves for symmetric cloud explosion close to the ground[J]. Explosive and Shock Waves, 1996,16(4):298-304.

[13] 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.

Simulation of blast waves interaction for multiple cloud explosion

Chen Mingsheng, Bai Chunhua, Li Jianping

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

Abstract: In this work, to study the overpressure distribution characteristics for multiple cloud explosion, we carried out a numerical simulation using LS-DYNA of the process of blast waves interaction for four non-circular cross-section clouds, with the computational results verified and compared with experimental data. Furthermore, based on our analysis of the peak overpressure located from 0 m to 20 m in the vertical direction and the processes of blast-waves interaction in the central area, we obtained the variation of the overpressure close to the ground versus the horizontal distances in four directions including 0°, 90°, 135° and 180°. Our results show that three blast waves occur in sequence over the central ground area, and there exists an increasingly higher pressure towards the central area. In the 45° vertical section, blast waves consist of incident wave, reflection wave and Mach wave.

Key words: mechanics of explosion; peak overpressure; LS-DYNA; multiple clouds; interaction

(责任编辑 丁 峰)