

文章编号: 1006-9941(2017)06-0466-06

# 动态云雾形成及爆轰场特性

王 晔, 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:** 为获得动态云雾爆轰的超压场分布特征, 采用空投方法实现动态云雾的形成和爆轰过程。利用高速运动分析系统和压力测试系统分别对动态云雾分散、爆轰过程和动态爆轰超压场进行测量, 对动态云雾的燃料抛撒和超压场分布进行了研究, 分析了轴向有加强杆装置结构和轴向无加强装置杆结构对动态云雾爆轰超压场的影响规律。结果表明: 轴向无加强杆结构和轴向有加强杆结构的动态最大峰值超压分别为 3.62 MPa 和 3.20 MPa, 轴向无加强杆结构具有较大的毁伤距离; 动态爆轰最大峰值超压较静态爆轰最大峰值超压提高 31.2%, 且动态爆轰毁伤距离大于静态爆轰。

**关键词:** 动态云雾爆轰; 空投试验; 峰值超压; 壳体结构

**中图分类号:** TJ55; O383

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.004

## 1 引 言

无约束云雾的爆炸超压场分布规律是云雾爆轰<sup>[1-3]</sup>和石化工业事故预防<sup>[4-6]</sup>等领域研究的热点问题。峰值超压对人员的伤害程度、周边设备的破坏程度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。

最早关于云雾爆轰的文献发表于 1963 年<sup>[7]</sup>, 此后学者们对云雾爆炸场的研究相继展开。Raju<sup>[8]</sup>、Liu<sup>[9]</sup> 和刘庆明<sup>[10]</sup> 等学者对云雾爆轰超压场进行了研究, 分别进行理论与数值计算, 拟合不同燃料组分云雾爆炸超压与比距离的关系, 得到不同距离处超压的 TNT 当量值, 发现了多相爆轰波的多峰结构压力波, 并得到云雾区内峰值超压是恒定的结论。Tulis<sup>[11]</sup> 通过试验得到云雾爆轰在远场的峰值超压比单纯等质量的 TNT 炸药起爆更具优势。

具有初始运动速率的云雾装置爆轰称为动态云雾爆轰。不具有初始运动速度的云雾爆轰装置<sup>[12]</sup> 进行云雾爆轰称为静态云雾爆轰。为获得更为符合实际状况的云雾爆炸超压场, 动态云雾爆轰的研究就极为重要。由于动态云雾爆轰试验操作复杂, 出现动态云雾爆轰装置落点位置不准确、动态云雾爆轰可靠性低等

问题; 众多学者过去研究的云雾状态多为静态爆轰<sup>[12-14]</sup>, 而针对动态云雾爆轰超压场的测试相对存在空白。

本研究根据飞行特征, 针对动态云雾爆轰进行空投试验, 利用高速运动分析系统和压力测试系统分别对动态云雾分散、爆轰过程和动态爆轰超压场进行测量, 对动态云雾的燃料抛撒和超压场分布进行了研究。分析了动态云雾峰值超压随传播距离变化的规律, 研究了不同结构对动态云雾爆轰超压场的影响规律。

## 2 试验方法

### 2.1 试验装置

如图 1 所示, 动态云雾爆轰装置由抛撒引信、装药结构、减速伞以及云雾起爆装置组成。

为方便讨论, 将试验中采用圆柱薄筒壁结构的装药结构称为无加强杆结构。添加加强杆部件, 变成轴向有加强杆结构。如图 2 所示, 无加强杆装置结构由中心管、上下加强端板以及筒壁组成。有加强杆装置结构由中心管、上下加强端板、加强杆以及筒壁组成, 四个加强杆对称分布。两种结构均在筒壁上均匀分布深度为 0.6 mm 的 16 道刻槽, 上下端板为圆形截面, 直径为 370 mm, 其筒壁为长度 1150 mm 的柱形。两种装药结构内部装填相同质量的 125 kg 固液混合燃料, 中心管内部装填 1.08 kg TNT 作为中心抛撒药。

抛撒引信起爆高度为 2 m, 保证起爆时云雾下端与地面接触。减速伞为十字形伞, 将伞绳连接到装药

收稿日期: 2016-08-30; 修回日期: 2016-12-14

基金项目: 国家部委预研重点基金项目(9140A05080507)

作者简介: 王晔(1986-), 女, 博士研究生, 从事爆炸力学和流体力学相关研究。e-mail: wangye\_0422@126.com

装置上端板处,保证试验装置以  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度稳定降落。云雾起爆装置内装填 8 kg TNT 炸药,经过延迟时间 240 ms 后起爆,云雾起爆装置安装在减速伞伞顶中心处,随同减速伞一起下落。

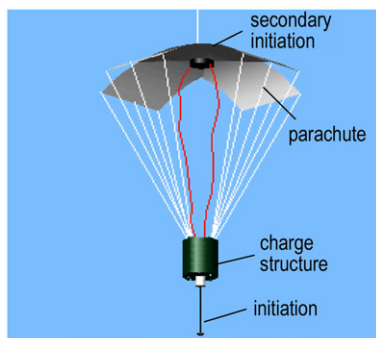


图 1 动态云爆装置终点状态及构成

Fig.1 Part of FAE device and states

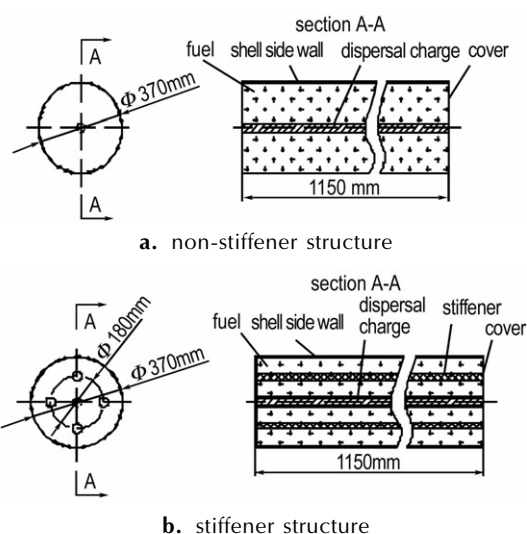


图 2 两种装药结构尺寸

Fig.2 Size for non-stiffener structure and stiffener structure

### 2.2 试验方案

为了解决落点位置精度差的难题,试验采用热气球投放系统投放动态云雾爆轰装置,模拟动态云雾爆轰终点作用过程。热气球通过系留绳与地面锚泊连接,地面锚设定三个点,以调整投放位置。释放系统的一端与热气球相连,另一端与动态云雾爆轰装置相连。热气球达到指定高度 300 m 稳定后并通过 GPS 得到水平面位置信息确定后,启动释放脱离系统,释放动态云雾爆轰装置。动态云雾爆轰装置落入测试区域内,落地精度可达半径为 10 m 的圆形区域内,实现终点动态云雾分散和爆轰过程,试验现场布置如图 3 所示。试验完毕后,将热气球回收降落到试验场地。

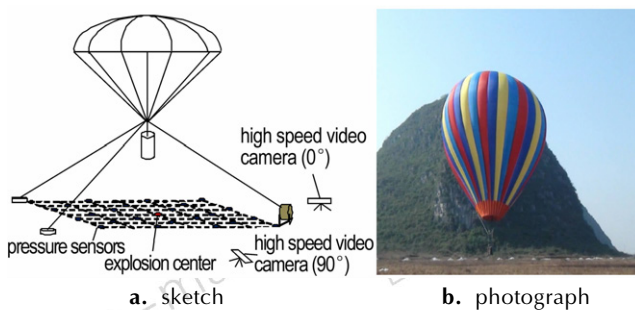


图 3 试验现场布置

Fig.3 Experimental layout

### 2.3 测试系统的布置

为获得动态条件下燃料抛撒和云雾爆轰全过程,利用高速摄像系统记录燃料抛撒过程、云雾的起爆以及云雾爆轰过程,并采用地面压力测试系统实现超压场分布的测量。

以投放位置的地面投影为中心,在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $180^\circ$  共 3 个方向布置高速摄像系统,记录整个试验过程,其中,每台高速摄像拍摄参数设置为 500 fps,记录时长不少于 2 s,型号为 V12。

试验中采用了 24 个压力传感器进行云雾爆炸超压场的测试,为获得足够的测量距离,每个测点间距为 12 m,测量范围面积为  $5184 \text{ m}^2$ ,以投放点地面投影为中心,成方形布置,如图 4 所示。图中红色点代表预定爆心,蓝色点代表压力传感器布置位置。

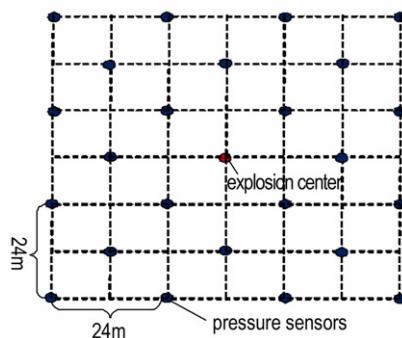


图 4 地面超压测试场布置

Fig.4 Pressure sensors arrangement for experiment

## 3 结果与讨论

### 3.1 燃料分散过程及云雾半径变化规律

高速摄像系统记录的典型结果如图 5 所示,记录了动态云雾爆轰全过程,通过对图像的分析,可以获得动态条件下云雾尺寸变化以及起爆前云雾形态。由图 5 可以看出,起爆前云雾形态为倾斜圆饼体,倾斜的

原因是由于伞的不稳定性,导致下方装药结构在空中进行周期摆动。相同时刻下,对三个方向的云雾尺寸读取并进行统计分析,得到云雾半径随时间变化曲线,如图6所示。起爆前,无加强杆装药结构形成半径为

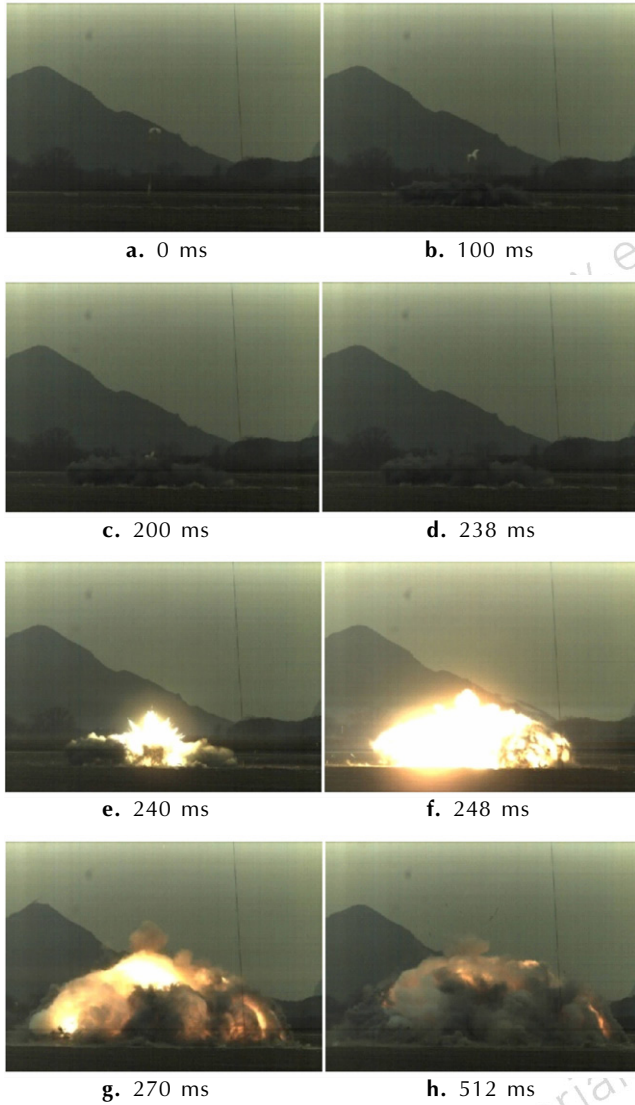


图5 动态云雾爆轰过程

Fig.5 Process for cloud dispersion and detonation

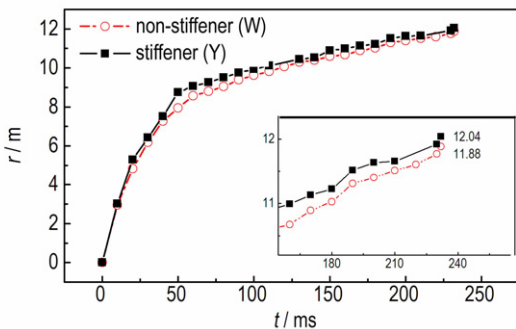


图6 云雾半径-时间变化曲线

Fig.6 The curves of radius-time

12.04 m, 而有加强杆装药结构最终形成半径为11.88 m的圆饼形云雾。

### 3.2 动态云雾爆炸冲击波的传播规律

当释放系统作用后,减速伞充气张开,空气由减速伞伞衣上的空隙中穿过,将减速伞充满,因此,在一次引信触地作用之前,减速伞均保持张满状态以稳定速度下降;当一次引信触地后,装填在装药结构内的燃料在中心抛撒药的作用下,开始抛撒,经过240 ms后,最终形成动态云雾。同时,安装在伞顶的云雾起爆装置继续下落,落入云雾中起爆,最终云雾成功爆轰,如图4所示。起爆后,爆轰波传播到云雾边界处,衰减并转变成冲击波。根据图4中布置的地面压力传感器采集的数据,可获得爆炸波传播轨迹,列举10~61 m内的6个压力传感器采集到的原始电压信号,如图7所示。图7中D表示测试点与爆心的直线距离,m。利用波形到达时间和测试位移可以计算出爆轰波速度为 $1430 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在云雾边界处,立即衰减为 $1033 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在比距离为 $12.2 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 处,冲击波速度衰减为 $354 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

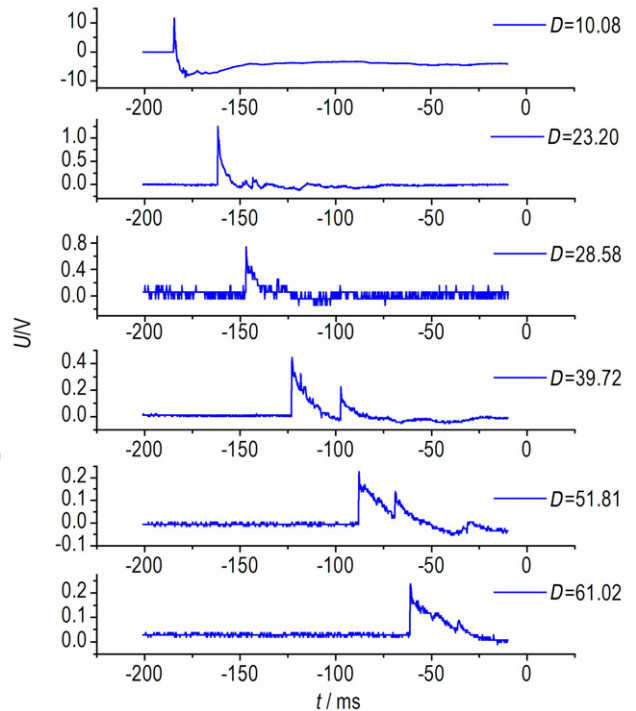


图7 不同距离(D)时动态云雾爆轰原始电压信号

Fig.7 Typical voltage signals of detonation of different distance(D)

对压力电信号进行处理<sup>[10]</sup>,得到动态云雾超压随比距离变化的峰值超压值,如图8所示。并与相同条件下(相同结构,相同起爆高度和相同比药量0.86%)的静态超压<sup>[15]</sup>进行对比,图8中直线和虚线分别表

示静态超压和动态超压随比距离衰减规律。由图 8 可知,动态爆轰和静态爆轰的最大峰值超压分别为 3.62 MPa 和 2.76 MPa,动态爆轰最大峰值超压较静态提高 31.2%; 随着冲击波的传播,动态爆轰和静态爆轰的峰值超压均平滑衰减,在比距离为  $10 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  时,动态和静态峰值超压分别衰减为 0.034 MPa 和 0.025 MPa,随着比距离的增加,动态爆轰的峰值超压均高于静态 29% ~ 36%。

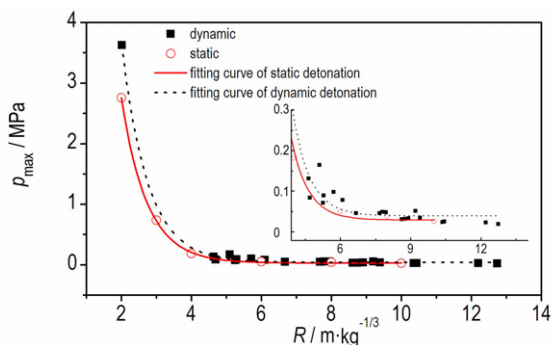


图 8 动态峰值超压随比距离变化规律

Fig. 8 The regular of overpressure with distance

常用超压对人员伤害条件评价云雾爆轰的毁伤范围,因此,选取 0.1, 0.05, 0.03 MPa 临界值作为判别标准。利用超压场分布可预测云雾爆轰的作用范围,分别对静态和动态峰值超压数据用最小二乘法进行拟合,得到静态超压和动态超压峰值超压传播随比距离的变化规律,分别为:

$$\Delta p_{\theta} = 0.53 \frac{\sqrt[3]{M}}{D} - 4.81 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^2 + 20.44 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^3 ;$$

$$0.1 \leq \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \leq 0.5 \quad (1)$$

$$\Delta p_{\theta} = 2.45 \frac{\sqrt[3]{M}}{D} - 13.93 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^2 + 35.16 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^3 ;$$

$$0.017 \leq \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \leq 0.5 \quad (2)$$

式中,  $\Delta p_{\theta}$  为峰值超压, MPa;  $M$  为燃料质量, kg;  $D$  为测点与爆心的距离, m; 比距离  $R = \sqrt[3]{M}/D, \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。

根据拟合公式,预测毁伤距离如表 1 所示。由表 1 可知,动态爆轰毁伤半径大于静态爆轰,在 0.1, 0.05, 0.03 MPa 时分别提高 8.7%、31.2% 和 16.3%。

综上所述,动态爆轰威力均优越于静态爆轰威力。两者的区别在于是否具有初始速度。可见,初始速度不仅能够影响云雾爆轰最大峰值超压而且影响冲击波传播的衰减速率。一方面,可能是由于初始轴向速度

更有利于燃料形成细小颗粒,并且初始速度增强了湍流效应,使燃料粒子与空气混合均匀,形成均匀浓度的云团,爆轰时更接近于稳态爆轰过程;另一方面,动态云雾形成过程中造成周围空气扰动加剧,云爆所形成的冲击波在扰动介质中,强度加大,衰减减慢。

表 1 不同超压位置对应位置与爆炸中心的距离

$p$ /MPa	initial state		structure	
	moving	static	non-stiffener structure	stiffener structure
0.1	25.1	23.1	25.1	22.7
0.05	36.2	27.6	36.2	32.7
0.03	47.1	40.5	47.1	43.9

### 3.3 不同装药结构的云爆装置爆炸超压场分布

在相同试验条件下,对两种结构进行动态爆轰试验。两种结构的峰值超压随比距离变化规律,如图 9 所示。图 9 中“W”代表无杆结构,“Y”代表有杆结构。由图 9 可知,无加强杆装药结构和有加强杆装药结构的最大峰值超压分别可达为 3.62 MPa 和 3.20 MPa,无加强杆装药结构爆轰最大峰值超压较有加强杆装药结构提高 13.1%; 随着冲击波的传播,无加强杆装药结构和有加强杆装药结构的峰值超压均平滑衰减,在比距离为  $9.26 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  时,无加强杆装药结构和有加强杆装药结构峰值超压分别衰减为 0.036 MPa 和 0.027 MPa,随着比距离的增加,无加强杆装药结构的峰值超压稍高于有加强杆装药结构。

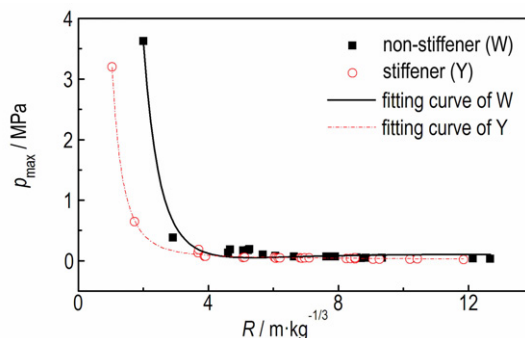


图 9 两种装药结构的超压随比距离变化曲线

Fig. 9 Overpressure vs. distance for different structure

分别对无加强杆结构和有加强杆结构的爆轰峰值超压数据用最小二乘法进行拟合,得到无加强杆结构和有加强杆结构的爆轰峰值超压传播随比距离的变化规律,分别为:

$$\Delta p_{\theta} = 2.45 \frac{\sqrt[3]{M}}{D} - 13.9 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^2 + 35.16 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^3 ;$$

$$0.017 \leq \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \leq 0.5 \quad (3)$$

$$\Delta p_{\theta} = 5.87 \frac{\sqrt[3]{M}}{D} - 5.87 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^2 + 46.63 \left( \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \right)^3 ;$$

$$0.017 \leq \frac{\sqrt[3]{M}}{D} \leq 0.5 \quad (4)$$

根据拟合公式, 预测毁伤距离如表 1 所示。由表 1 可知, 无加强杆装药结构和有加强杆装药结构在 0.1, 0.05, 0.03 MPa 的临界距离分别为 25.1, 36.2, 47.1 m 和 22.7, 32.7, 43.9 m。可见, 无加强杆结构毁伤半径大于有加强杆结构毁伤半径。

由上述数据可知, 随着冲击波的传播, 无加强杆装药结构的毁伤范围大于有加强杆装药结构。由于两种装药结构均为圆柱筒壁且均具有预制刻槽, 所以在径向方向的约束力相等, 因此两者的区别在于轴向约束强度。经计算可知<sup>[16]</sup>, 两者的轴向强度相差为  $0.7 \times 10^6$  N。可见, 提高轴向约束强度不一定有利于提高峰值压力和增大毁伤距离。爆轰超压主要受云雾尺寸、云团浓度以及云雾形状等因素决定, 为了增强爆炸对地面目标的毁伤范围, 应当增加云雾覆盖面积。由图 6 可知, 起爆前, 无杆结构形成的云雾半径为 12.04 m, 有杆结构形成的云雾半径为 11.88 m, 因此, 无加强杆装药结构的云雾覆盖面积大于有加强杆装药结构, 利于获得更广阔的超压作用范围。

## 4 结 论

基于空投试验实现动态云雾爆轰过程, 记录了动态云雾分散和爆轰全过程, 并获得动态云雾的超压场分布规律, 进而结合静态爆轰结果, 研究了动态条件对超压场分布规律的影响。随后分析了壳体结构对动态超压场分布规律的影响。主要结论有:

(1) 动态爆轰云雾区最大峰值超压值可达 3.62 MPa, 较相同条件下的静态爆轰云雾区最大峰值超压提高 31.2%, 随着比距离的增加, 动态爆轰的峰值超压均高于静态爆轰 29% ~ 36%。动态爆轰毁伤距离远于静态爆轰, 在 0.1, 0.05, 0.03 MPa 的临界毁伤距离较静态爆轰分别提高 8.7%、31.2% 和 16.3%。因此, 动态爆轰具有较高的最大峰值超压和较大的毁伤距离。

(2) 在相同条件下进行动态爆轰试验, 无加强杆装药结构和有加强杆装药结构的最大峰值超压分别为 3.62 MPa 和 3.20 MPa, 无加强杆结构毁伤半径大于有加强杆结构毁伤半径。因此, 无加强杆结构可获得更广阔的超压作用范围。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] XU Hui-lin, WANG Jia-hua. Fuel air explosion [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 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] BAI Chun-hua, LIANG Hui-min, LI Jian-ping, et al. Cloud detonation [M]. Beijing: Science Press, 2012: 4-12.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 宫广东, 刘庆明, 白春华. 管道中瓦斯爆炸特性的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2013, 31(1): 17-21.
- [8] GONG Guang-dong, LIU Qing-ming, BAI Chun-hua. Numerical simulation for gas explosion in tubes [J]. *Acta armamentaria*, 2013, 31(1): 17-21.
- [9] 陈明生, 李建平, 白春华. 非圆截面云雾爆炸超压场数值模拟 [J]. 含能材料, 2015, 23(5): 484-489.
- [10] CHEN Ming-sheng, LI Jian-ping, BAI Chun-hua. Simulation of explosion overpressure distribution for non-circular cross-section cloud [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(5): 484-489.
- [11] BAI Chun-hua, FAN Bao-long, LI Bin. Improvement of a gas intake device and a gas mixing study in a large-scale vessel [J]. *Cemistry*, 2014, 37(10): 1751-1756.
- [12] Gey W, Mygaard M. Feasibility study of FAE explosive [R]. Technical report, NAVWEPS-8065. U. S. Naval Ordnance Test Station, China Lake, 1963.
- [13] Raju M S N. The blast waves from unconfined axisymmetric vapour cloud explosion [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1975.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Tulis A J. On the unconfined detonation of aluminum powder-air clouds [C] // 1st International Colloquium on Explosibility of Industrial Dusts, Warsaw, Poland, 1984: 178-186.
- [18] Leyer J C. An Experimental study of pressure fields by exploding cylindrical clouds [J]. *Combustion and Flame*, 1982: 251-263.
- [19] Borisov A A, Gelfand B E, Gubin S A, et al. Detonation of fuel-air mixtures above the surface of the earth [J]. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 1988, 24(2): 238-40.
- [20] Fishburn B, Slagg N, Lu P. Blast effect from a pancake shaped fuel drop-air cloud detonation (theory and experiment) [J]. *Journal of Hazard Material*, 1981, 5: 65-75.
- [21] Chun-hua B, Ye W, Jian-ping L, et al. Influences of the cloud shape of fuel-air mixtures on the overpressure field [J]. *Shock and Vibration*, 2016.
- [22] 祝燮权. 实用五金手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
- [23] ZHU Xie-quan. Practical hardware manual [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2000.

## Formation and Blasting Field Characteristics of Moving Cloud Detonation

WANG Ye, BAI Chun-hua, LI Jian-ping

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081, China)

**Abstract:** In order to obtain overpressure distribution of moving cloud detonation, process of cloud dispersion and detonation was surveyed by airdrop. A high-speed motion analyzer system and a pressure measurement system were used to measure process of cloud detonation and pressure field during explosion. Fuel dispersion and overpressure field were studied. The variation of blast parameters with propagation distance for non-stiffener structure and stiffener structure was analyzed. Results show the maximum value of peak overpressure for detonation with non-stiffener structure is 3.62 MPa, and with stiffener structure is 3.20 MPa. Detonation of non-stiffener structure has great damage range. Peak overpressure of detonation increased 31.2% with the same dose for static detonation. Mutilate distance for detonation is larger than static detonation.

**Key words:** moving cloud detonation; airdrop; overpressure; shell structure

**CLC number:** TJ55; O383

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.004



## 第二届弹药安全技术研讨会 暨第六届固体推进剂安全技术研讨会征文通知(第二轮)

为了提高我军武器安全技术水平,不断推动导弹武器安全健康快速发展,并为科研工作者提供技术交流平台,拟于2017年10月在四川省成都市召开第二届弹药安全技术研讨会暨第六届固体推进剂安全技术研讨会,此次会议由中国宇航学会弹药安全技术专业委员会、航天工业固体推进剂安全技术研究中心主办,航天科技集团公司四院四十二所承办。

会议主题:弹药安全技术研究进展与发展方向

### 一、征文范围

弹药安全技术研究最新进展,弹药安全试验及分析技术,弹药安全数值模拟技术,弹药安全评估、评价技术,固体推进剂及原材料安全技术,固体推进剂安全控制技术,固体推进剂安全理论。

### 二、征文要求

1、观点明确、数据可靠、图表清晰、文字简洁流畅;2、文责自负,论文不应涉及他人知识产权,须通过单位保密审查;3、投稿请注明作者姓名、单位、详细通讯地址、联系电话、传真、电子邮箱等;4、投稿请寄打印稿和电子文档各一份,并附单位保密审查证明;5、录用稿件将统一编入《第二届弹药安全技术研讨会暨第六届固体推进剂安全技术研讨会论文集》,创新性和高质量的论文将向《固体火箭技术》、《含能材料》等专业核心期刊推荐;6、本论文集已加入中国知网、万方数据资源系统数字化期刊群并全文入网,如作者不同意论文编入数据库或入网,请在投稿时声明。

### 三、征文截稿时间

2017年8月31日。

### 四、联系方式

联系人:李军 0710-3219010, 13487151431, 兰慧 0710-3219202, 13871699701,

传真:0710-3219111, 邮箱:aqjsyth@163.com

通信地址:湖北省襄阳市156信箱,441003

中国宇航学会弹药安全技术专业委员会  
航天工业固体推进剂安全技术研究中心

2017年5月6日