

文章编号: 1006-9941(2015)11-1061-06

爆炸抛撒过程中 FAE 云雾的运动特性

方伟, 赵省向, 李文祥, 贾宪振, 姚李娜

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究爆炸抛撒过程中燃料空气炸药(FAE)云雾的发展和变化特征,通过高速摄影观测了不同密度 FAE 的云雾形成和运动状态,用数值仿真计算了燃料圆柱外表面中心点处质点的速度变化,在距爆心 2.5 m 处利用光电探测方法测量了云雾相对浓度变化。结果表明:燃料在云雾形成之前的运动主要以射流为主,云雾形成后主要为扩散运动。燃料密度越大,相同时刻云雾扩展直径越大。燃料质点的速度在爆炸抛撒条件下经历先快速增大后缓慢降低的过程,最高速度达到 $377 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 10~80 ms,燃料浓度的变化幅度表现出由大到小的变化,显示抛撒云雾内部的燃料颗粒空间分布具有非均匀性的特点,并且适当延长云雾运动时间,燃料颗粒分布的均匀性可得到有效改善。

关键词: 燃料空气炸药(FAE); 抛撒; 云雾

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.005

1 引言

燃料的爆炸抛撒是形成燃料空气炸药(FAE)的主要方式^[1],FAE 的爆轰性能在宏观上受到云雾形状和尺寸的影响,在微观上受到燃料粒度大小和空间分布的影响,而这些影响因素很大程度上决定于燃料的抛撒过程。

爆炸抛撒形成 FAE 云雾是一个相当复杂的过程,目前,FAE 燃料爆炸抛撒的研究主要以试验为主。李席^[2]利用高速摄影技术研究了燃料种类和比药量对液固 FAE 云雾状态的影响,利用同样的技术,张奇^[3]研究了比药量与云雾尺寸之间的对应关系,蒋治海^[4]研究了不同厚度壳体的破裂过程。同时,通过相关测试技术,抛撒颗粒粒度和动能特征也得到了广泛研究^[5-8]。此外,仿真计算技术在近年来也逐步开始应用于爆炸抛撒的研究^[9-10]。分析已有文献结果发现,对 FAE 燃料爆炸抛撒全过程及不同阶段云雾发展变化规律的研究比较缺乏。为此,本研究利用外场实验与仿真计算相结合的方法,针对新型 FAE 燃料体系,对燃料

爆炸抛撒全过程和各阶段燃料运动特征进行描述分析,并结合浓度测试,揭示云雾内部燃料的分布特征。

2 实验部分

2.1 试验装置及测试条件

FAE 燃料的抛撒试验在野外靶场进行,抛撒装置结构示意图如图 1 所示。中心抛撒装置壳体为圆柱形,圆柱尺寸为 $\phi 195 \text{ mm} \times 205 \text{ mm}$;圆柱中心轴向设置中心管用于固定中心抛撒药柱,中心管直径为 26 mm;中心管与圆柱壳体之间的空间用于装填 FAE 燃料,壳体采用聚氯乙烯(PVC)材料制成。选用 TNT 作为抛撒药,药柱尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$,密度为 $1.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比药量为 3.5% 左右。

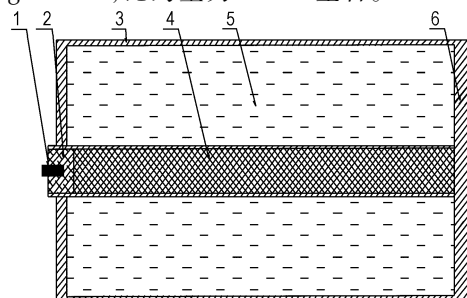


图 1 FAE 爆炸抛撒装置

1—雷管, 2—起爆药柱, 3—壳体, 4—抛撒装药, 5—FAE 燃料, 6—壳底

Fig. 1 FAE explosion dispersal device

1—detonator, 2—initiating explosive grain, 3—shell, 4—dispersal charge, 5—FAE fuel, 6—shell bottom

收稿日期: 2015-01-28; 修回日期: 2015-03-31

基金项目: 高能常规毁伤技术专项(004010306)

作者简介: 方伟(1982-),男,助理研究员,主要从事混合炸药研究。

e-mail: davidfangw@126.com

通信联系人: 赵省向(1967-),男,研究员,主要从事混合炸药研究。

e-mail: zsx58@sina.com

采用高速摄影记录燃料抛撒过程, 拍摄速率为 3800 帧/s, 像素为 1024×624。装填完毕的抛撒装置水平放置于高 2m 的木支架上, 以抛撒装置所在位置为中心, 在两边同一直线上, 距爆心距离为 2 m 和 4 m 处, 分别设置 2 个高 3 m 的标杆, 以便于估测抛撒云团尺寸, 高速摄影装置距爆心 50 m, 与抛撒装置同高, 两者中心连线与标杆所在平面垂直。

2.2 FAE 燃料的选择

为了尽量减少影响因素, 试验采用同种体系的燃料, 主要组分包括烃、硝酸酯、铝粉以及添加剂。通过变化液体组分比例和添加铝粉来调节 FAE 燃料的密度, 试验对象分为液体型和液固复合型两类, 对应的装药密度和装药质量见表 1 (每发装药体积基本保持一致)。

表 1 燃料密度和装药质量

Table 1 Density and charge mass of fuel

types of fuel	No.	density/g · cm ⁻³	mass of charge/g
liquid	1 [#]	0.86	3933
	2 [#]	0.89	4070
	3 [#]	1.02	4665
	4 [#]	1.10	5026
liquid/solid mixture	5 [#]	1.20	5480
	6 [#]	1.30	5935

2.3 云雾浓度测量

采用波长为 630 nm 的激光照射燃料抛撒云团, 并对透过云团的激光强度进行探测, 通过比较光能量的衰减情况来实现云团内颗粒平均浓度的测量。浓度测量系统主要由激光发射器、发射光学系统、接收光学系统、激光接收器、信号处理电路、多通道高速数据记录仪、系统软件等组成, 构成示意图如图 2 所示。

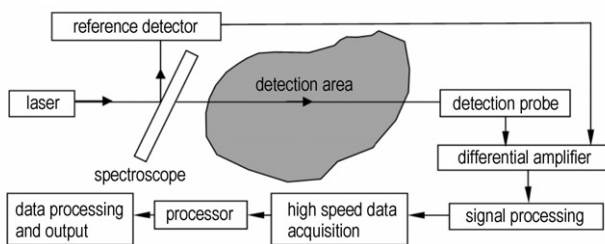


图 2 浓度测量系统构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of concentration test system structure

3 结果与讨论

3.1 FAE 燃料爆炸抛撒过程及分析

图 3 为 1[#]~6[#]燃料抛撒过程的高速摄影照片, 其主要抛撒现象为: 0.26 ms 时, 抛撒装药的爆轰产物突破周围包裹的燃料而发出亮光; 1 ms 时, 燃料呈圆

环状将大部分爆轰产物包裹在轴向中心位置, 燃料环沿径向快速扩展; 5 ms 时, 燃料环表面密布针状燃料射流; 10 ms 时, 1[#]、2[#]、3[#]燃料射流明显减少, 而 4[#]、5[#]、6[#]燃料射流仍清晰可见, 通过观察对比该时刻的抛撒照片, 可发现射流运动持续时间随燃料密度增大而变长的趋势; 40ms 时, 射流已完全消失, 燃料完全与空气混合形成云雾。此外, 燃料环上部射流指向为斜上方而非水平方向, 这是由于 TNT 抛撒药从上端起爆, 下部燃料受到的压力高于上端, 并且支架平面对爆轰波具有一定的反射作用的结果。

对试验现象进行分析认为, 燃料在爆炸抛撒条件下的运动主要包括以下过程: TNT 爆轰产物气体作用于燃料形成冲击波, 冲击波压力迅速传递到抛撒装置壳体并使之破裂, 燃料随即从裂缝中喷出形成射流, 燃料射流由于受到界面不稳定性影响失去稳定产生紊动, 在随后的运动中, 气液固界面不稳定性得到充分发展, 燃料破碎成颗粒群, 最终形成燃料空气混合云雾。通过上述分析可知, 燃料在形成云雾之前, 其运动主要以射流为主, 云雾形成后, 燃料的运动主要为扩散运动。

3.2 抛撒云雾运动特性

对抛撒过程的高速摄影照片进行处理, 得到不同燃料云雾直径随时间的变化曲线, 如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 各燃料云雾直径在前 40 ms 增长较快, 随着时间的延长, 云雾直径的增长速率逐渐减小。燃料抛撒时先受到爆炸驱动力的作用, 随着云雾的扩展, 爆炸驱动力逐渐减弱, 气动阻力的影响相对增强, 燃料云雾的直径增长速率出现由快到慢的变化过程。从图 4 还可以看到 1[#]、2[#]燃料云雾直径变化曲线基本重合, 这是由于 1[#]和 2[#]燃料密度(0.86 g · cm⁻³和 0.89 g · cm⁻³)相差较小, 物理性能也基本相同, 相同抛撒条件下的云雾尺寸差别很小。对比 3[#]~6[#]直径变化曲线可以看出, 相同时刻, 燃料密度越大, 抛撒云雾直径也越大。

为了进一步分析液体和液固复合型燃料抛撒运动的差异, 将 2[#]和 6[#]燃料抛撒结果进行比较。从图 5 看出, 抛撒后 10 ms 左右的时间内, 2[#]燃料的直径大于 6[#]燃料, 之后, 6[#]燃料的直径超过 2[#]。通过比较燃料运动速度能更直观的解释这两种燃料抛撒尺寸变化的差异, 因此对图 5 中的曲线求导, 得到 2[#]和 6[#]燃料边界运动速度变化曲线, 如图 6 所示。从图 6 中看出, 在测量时间范围内, 2[#]和 6[#]燃料边界的运动速度均持续降低, 10 ms 之前, 两种燃料均大致处于匀减速状态, 其中 2[#]燃料速度降低的更快, 10~20 ms, 燃料的减速运动状态发生了扰动, 20 ms 以后, 燃料边界速度渐趋平稳。

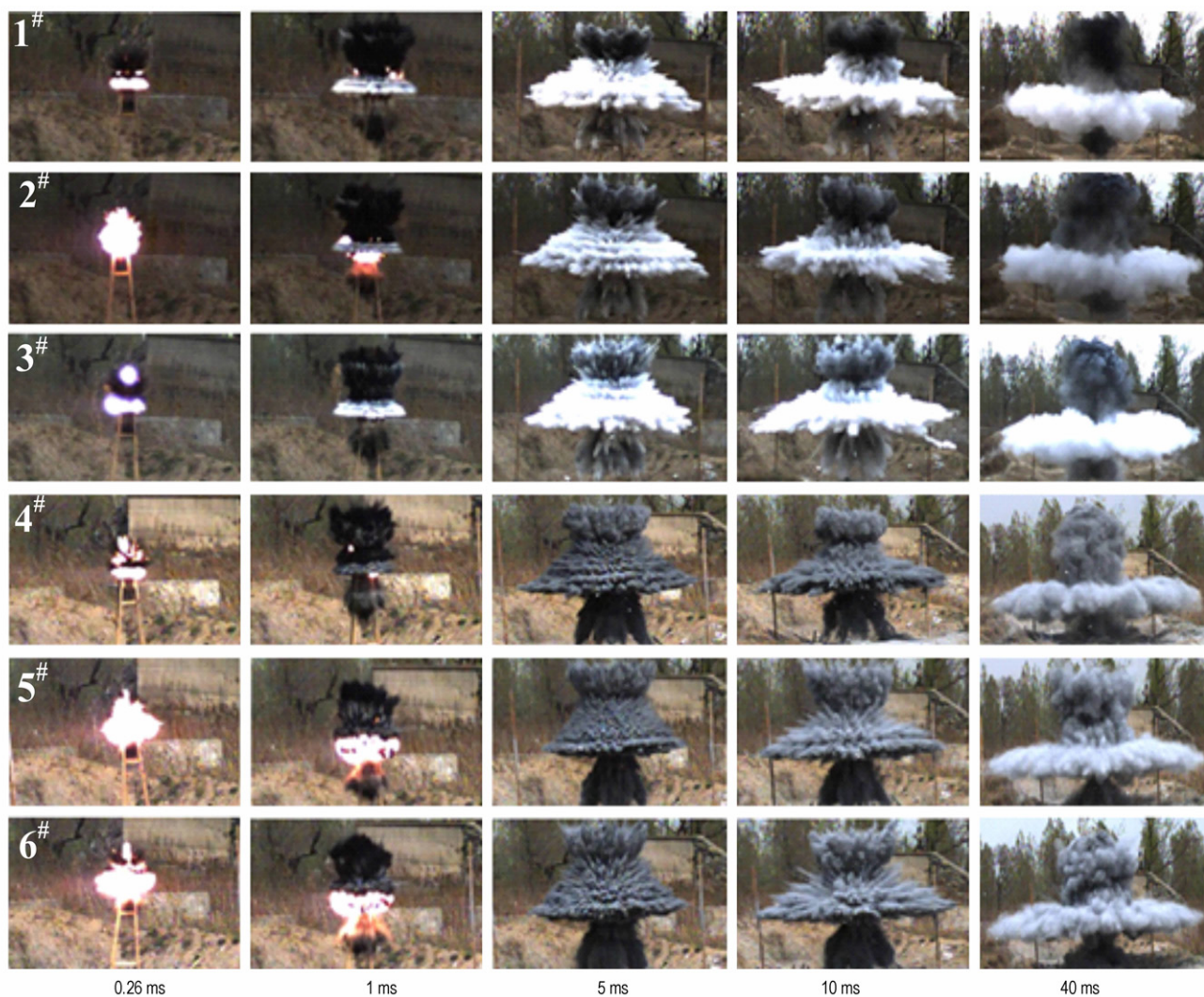


图 3 燃料抛撒过程高速摄影照片

Fig. 3 High-speed photographs of fuel dispersion process

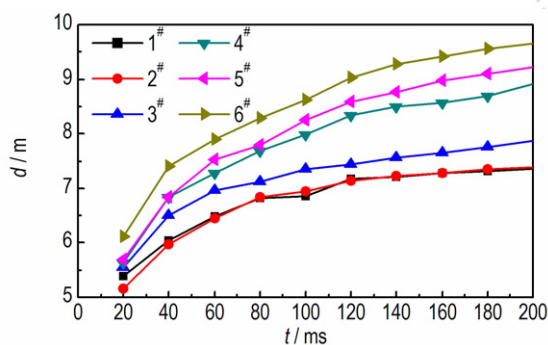


图 4 FAE 燃料云雾扩展直径与时间关系

Fig. 4 Variation in FAE fuel cloud expanding diameters with time

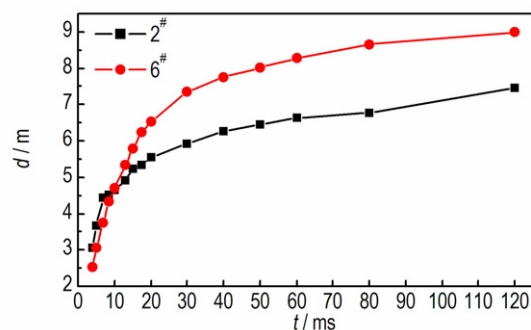


图 5 2#和6#燃料云雾扩展直径与时间关系

Fig. 5 Variation in 2# and 6# FAE fuel cloud expanding diameters with time

分析认为,燃料受抛撒装药爆轰产物驱动速度很快达到最大值,然后,在气动阻力作用下,燃料射流作为整体速度不断降低,抛撒后 10 ms 左右,燃料射流在界面不稳定性影响下开始破碎成大小不一颗粒,燃料整体性遭到破坏,由于大小不同的燃料颗粒受到的阻力不同,界面处燃料颗粒的运动速度变化出现差异(图 6 中燃料速度的扰动就发生在该阶段),随着时间的发展,燃料射流完全破碎成颗粒并形成缓慢扩散的燃料云雾。通过上述分析可得到的结论是:燃料射流破碎速度越慢,持续时间越长,越有利于抛撒云雾直径的扩展。基于该结论,密度较大的燃料受到气动阻力的影响较小,导致破碎成燃料颗粒的速度更慢,射流持续时间更长,所以具有更大的抛撒云雾直径。

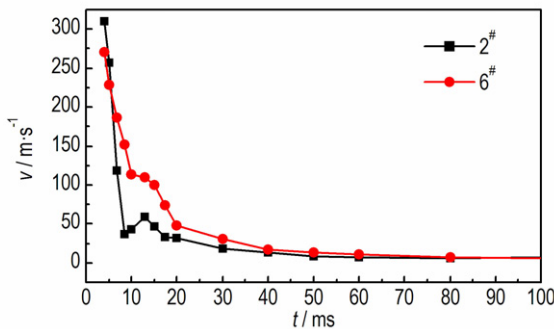


图 6 2#和 6# FAE 燃料边界运动速度与时间关系

Fig. 6 Variation in boundary movement velocity of 2# and 6# FAE fuel with time

3.3 燃料运动速度计算

由上节分析可知,燃料在抛撒装药爆轰产物驱动下,运动速度很快达到最大值,由于时间尺度太小,高速摄影无法观测到燃料的加速过程,为此,采用 AUTODYN 程序^[11]对 6# 燃料爆炸抛撒过程进行数值模拟,得到了特定位置处燃料质点 A (A 点位于燃料圆柱外表面中心点处)的速度变化情况。计算模型(图 7)包含三种材料:炸药、燃料和空气。

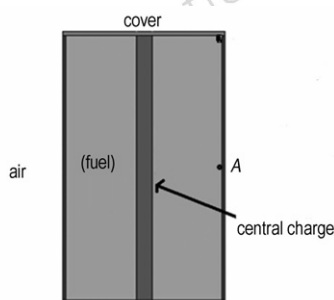


图 7 燃料抛撒模型

Fig. 7 Dispersion model of fuel

TNT 炸药爆轰产物的状态方程采用 JWL 方程^[11]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e_0^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e_0^{-R_2 v} + \frac{\omega e_0}{v} \quad (1)$$

式中, p 为压力,Pa; e_0 为初始比内能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ 或 Pa; v 为相对比容,无量纲量; A, B, R_1, R_2 和 ω 均为 JWL 状态方程参数, $A = 3.712 \times 10^{11}$ Pa, $B = 0.0323 \times 10^{11}$ Pa, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$ 和 $\omega = 0.4$ 。

燃料的状态方程采用 Mie-Gruneisen 方程,该方程可以模拟燃料在爆炸波高压驱动作用下的燃料状态,在 AUTODYN 中该方程的形式为^[11]:

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (2)$$

式中, p 为压力,Pa; p_H 为冲击 Hugoniot 压力,Pa; Γ 为 Gruneisen 系数; ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; e 为单位质量内能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, e_H 为单位质量参考内能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。计算时认为 $\Gamma \rho = \Gamma_0 \rho_0 = \text{constant}$, 并且:

$$\rho_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s-1)\mu]^2} \quad (3)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu}\right) \quad (4)$$

式(3)和(4)中 μ 为压缩比, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, c_0 和 s 分别为 Hugoniot 冲击关系式中的常数,即:

$$u_s = c_0 + s u_p \quad (5)$$

式中, u_s 和 u_p 分别为冲击波速度和质点速度,二者的单位均为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $c_0 = 1560 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $s = 1.72$ 。

空气的状态方程采用理想气体状态方程^[11]:

$$p = (\gamma - 1) \rho e_0 \quad (6)$$

式中, p 为压力,Pa, γ 为绝热指数,空气 $\gamma = 1.4$, ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, e_0 为初始比内能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ 或 Pa。

图 8 为燃料质点 A 的速度变化计算结果。从图 8 中可以看出,抛撒装药起爆后冲击波通过燃料传播到 A 点经历了 $34.6 \mu\text{s}$, 在 $34.6 \sim 54.8 \mu\text{s}$, A 点受到爆

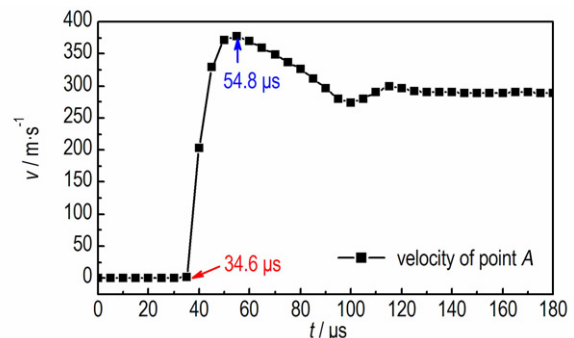


图 8 A 点运动速度计算结果

Fig. 8 Calculated results of movement velocity of point A

炸冲击波的直接作用,速度从0迅速增大到 $377\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,之后,冲击波对A点的驱动作用持续减弱,气动阻力的作用相对增大,A点速度开始缓慢降低。

3.4 云雾浓度测量结果及分析

激光强度衰减程度与云雾颗粒浓度有直接关系,光强衰减程度的测量结果能间接反映云雾浓度的大小,因此需要确定光强衰减程度与云雾浓度之间的关系。首先,定义透过云雾的激光强度的衰减程度为云雾相对浓度(c)表达式为:

$$c = 1 - \frac{I}{I_0} \quad (7)$$

式中, I_0 为入射光强, I 为出射光强,单位均为 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。 I 和 I_0 的关系为:

$$I = I_0 e^{-\frac{1}{4} N_V \pi L d^2 K(\lambda, m, d)} \quad (8)$$

式(8)中, K 为消光系数, m^{-1} ; λ 为光源波长, m ; m 为折射率, d 颗粒粒径, m ; L 为待测粉尘区厚度, m ; N_V 为云雾浓度,表示每平方米云雾中包含的粒子个数。由式(7)和(8)得到云雾浓度与相对浓度关系式为:

$$N_V = \ln\left(\frac{1}{1-c}\right) \frac{4}{\pi L d^2 K(\lambda, m, d)} \quad (9)$$

由(9)式可知,云雾浓度 N_V 随着相对浓度 c 的变化而单调变化,表明通过相对浓度的测量能够反映真实云雾浓度的变化趋势。

图9为6[#]燃料距爆心2.5 m处的云雾相对浓度变化曲线。之所以将探测点定在2.5 m处是因为通过试验发现,该位置既避开了中心空洞薄弱区,又具有较长的数据采集时间。从图9中可知,抛撒开始10.78 ms后燃料到达浓度探测点,10.78~27.66 ms,相对浓度值在18.75%~96.08%范围内出现了剧烈的高低震荡变化,27.66 ms之后,相对浓度变化幅度放缓,浓度值变化范围(57.07%~100%)减小。

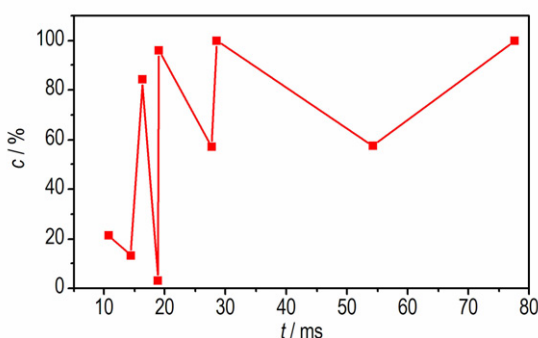


图9 距离抛撒中心2.5 m处云雾相对浓度变化

Fig.9 Variation in cloud relative concentration at 2.5 m from the center

浓度测量结果表明,燃料云雾内部颗粒的空间分布具有非均匀性的特点,并且随着时间的发展,浓度变化越来越小,粒子空间分布的非均匀性逐渐降低。说明适当地延长抛撒时间,可以改善云雾浓度的均匀性。

4 结论

(1)在爆炸抛撒形成云雾之前,燃料的运动形式主要以射流为主,其最高运动速度(以6[#]燃料为例)的计算结果为 $377\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,射流运动持续10 ms左右,并且射流运动时间随燃料密度增大而变长;射流受界面不稳定性影响破碎成燃料颗粒,在空气中进行扩散运动而形成燃料空气炸药云雾。

(2)密度越大的燃料其射流受到气动阻力的影响较小,射流运动持续时间更长,形成燃料空气炸药云雾后,在相同时刻具有更大的云雾直径。

(3)云雾内部燃料粒子的空间分布具有非均匀性的特点,并且燃料浓度变化的幅度随时间的延长而减小,表明燃料粒子空间分布的均匀性可通过延长云雾的扩散运动时间而得到改善。

参考文献:

- [1] 惠君明. FAE 燃料抛撒与云雾状态的控制[J]. 火炸药学报, 1999, 22(1):10-13.
HUI Jun-ming. FAE fuel throw and control of cloud state [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 1999, 22(1):10-13.
- [2] 李席, 王伯良, 韩早, 等. 液固复合 FAE 云雾状态影响因素的试验研究[J]. 爆破器材, 2013 (5):23-26.
LI Xi, WANG Bo-liang, HAN Zao, et al. Experimental study on influencing factors of the cloud status of liquid-solid fuel air explosive [J]. Explosive Materials, 2013 (5):23-26.
- [3] 张奇, 白春华, 刘庆明, 等. 燃料抛撒过程中的相似律[J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(5):651-655.
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Law of similitude in fuel dispersal process [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(5):651-655.
- [4] 蒋治海, 龙新平, 韩勇, 等. 炸药爆炸驱动壳体破裂及液体喷射过程试验研究[J]. 含能材料, 2011, 19(3):321-324.
JIANG Zhi-hai, LONG Xin-ping, HAN Yong, et al. Experimental studies on shell fracturing and jet forming and developing process driven by detonation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2011, 19(3):321-324.
- [5] Zhiembetov, A K, Mikhaylov A L, Smirnov G S. Experimental study of explosive fragmentation of metals [M]. Shock Compression of Condensed Matter, 2001.
- [6] Arkadiusz Kobiera, Jacek Szymczyk. Study of the shock-induced acceleration of hexane droplets [J]. Shock Waves, 2009, 18: 475-485.
- [7] 陈亚红, 白春华, 刘意, 等. 爆炸抛撒颗粒群动能特性的评价[J].

- 火炸药学报, 2011, 34(4):45-48.
- CHEN Ya-hong, BAI Chun-hua, LIU Yi, et al. Assessment on kinetic characteristics of granular swarm dispersed by explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(4):45-48.
- [8] 陈军, 吴国栋, 韩肇元, 等. FAE 爆炸抛撒后云雾液滴尺寸的量[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1):74-77.
- CHEN Jun, WU Guo-dong, HAN Zhao-yuan, et al. Measurement on mean size of liquid droplets of FAE dispersed by explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1):74-77.
- [9] 郭俊, 余文力, 王少龙, 等. 端盖对 FAE 燃料抛撒影响的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(6):65-67.
- GUO Jun, YU Wen-li, WANG Shao-long, et al. Numerical simulation on influence of cover to spill of liquid fuel of FAE[J]. *Sichuan Ordnance Journal*, 2013, 34(6):65-67.
- [10] 贾飞, 李向东, 白强本, 等. 爆炸抛撒方式对 FAE 近场抛撒影响的数值模拟研究[J]. 机械与电子, 2014, 32(4):24-27.
- JIA Fei, LI Xiang-dong, BAI Qiang-ben, et al. Numerical simulation on effect of explosive dispersal methods of FAE fuel on near field spilling[J]. *Machinery & Electronics*, 2014, 32(4):24-27.
- [11] ANSYS Inc. AUTODYNexplicit software for nonlinear dynamics theory manual[M]. USA: ANSYS Inc. 2005.

Movement Characteristics of Fuel-air Explosive (FAE) Clouds in the Explosion Dispersal Process

FANG Wei, ZHAO Sheng-xiang, LI Wen-xiang, JIA Xian-zhen, YAO Li-na

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To study the development and change characteristics of fuel-air explosive (FAE) cloud in the explosion dispersal process, the formation and movement state of clouds of FAE with different densities were observed by high-speed photography, the particle velocity changes of the central point on the outside surface of the fuel cylinder were calculated by numerical simulation and the changes of cloud relative concentration at 2.5 m from the explosive center were measured by photoelectric detection method. Results show that the fuel moves mainly in the form of jet prior to the formation of clouds, after what it moves mainly in the form of diffusion. The bigger the density of fuel, the bigger the cloud extended diameter at the same moment. Fuel particle velocity under the explosive dispersal condition experiences the process of first rapid increase and then slow decrease and the maximum value of the velocity is $377 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The change amplitude and frequency of fuel concentration show the change from big to small in the 10~80 ms, revealing that the fuel particle space distribution inside the throwing cloud has non-uniform distribution characteristics and the uniformity of fuel particle distribution can be improved effectively as the cloud movement time extends appropriately.

Key words: fuel-air explosive (FAE); dispersal; cloud

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.005