

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.004

# 300 kg 装药 FAE 燃料爆炸抛撒成雾的实验研究<sup>\*</sup>

王永旭<sup>①</sup>  解立峰<sup>①</sup>  贾晓亮<sup>②</sup>  张  莹<sup>②</sup>  李  斌<sup>①</sup>  
①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)  
②辽宁锦华机电有限公司(辽宁葫芦岛,125000)

[摘  要]  为了研究大装药扇形壳体结构燃料空气炸药(FAE)云雾的发展和变化特征,为下一步的云雾爆轰提供依据,通过高速相机和无人机观测了装药量为300 kg的扇形壳体结构燃料的爆炸抛撒和雾化过程。结果表明:燃料在各个方向上的运动速度存在差异,导致最终云雾形状不规则,为带有许多条状突出的五角星形状;云雾临爆前的浓度为70 g/m<sup>3</sup>,燃料与空气中氧气的化学当量比为0.46;对于300 kg燃料,最佳二次起爆延迟时间为300 ms。最佳二次起爆位置在扇形壳体45°或315°方向、距离中心4.2 m处。

[关键词]  爆炸抛撒;云雾;扇形结构

[分类号]  TJ55

## Experimental Study on 300 kg Charge of FAE Clouds by Explosion Dispersal

WANG Yongxu<sup>①</sup>, XIE Lifeng<sup>①</sup>, JIA Xiaoliang<sup>②</sup>, ZHANG Ying<sup>②</sup>, LI Bin<sup>①</sup>  
① School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)  
② Liaoning Jinhua Electromechanical Co., Ltd. (Liaoning Huludao, 125000)

[ABSTRACT]  The dispersion and atomization process of the sector-shaped shell structure with a charge of 300 kg fuel was observed by high-speed video recording and drone to understand the development and variation characteristics of fuel air explosive (FAE) cloud in large charge sector structure and to provide a theoretical basis for further cloud detonation. The results show that there is a difference among the speeds along various directions, thus creating an irregular shape for the cloud, i. e. a five-pointed star along with many strips. Cloud concentration before burst is 70 g/m<sup>3</sup>, and the chemical equivalent ratio of fuel to oxygen in the air is 0.46. For 300 kg fuel, the optimal secondary detonation delay time is 300 ms. The optimum secondary initiation position is 4.2 m from the center and along the 45° or 315° directions of the sector shell.

[KEYWORDS]  explosion dispersal; cloud; sector structure

### 引言

燃料的爆炸抛撒和雾化在消防、工业和军事上都具有重要意义。在消防上,可以利用爆炸作用力将大量的抑爆剂快速分散到火源上方,实现快速灭火<sup>[1]</sup>;在工业上,燃料的分散和雾化机理可以为工业防护提供理论指导;在国防军事上,最典型的应用是燃料空气炸药(fuel air explosive,简称FAE)<sup>[2-4]</sup>。

关于燃料爆炸抛撒形成云雾的研究,初期多采用数值仿真的手段进行。Zabelka等<sup>[5]</sup>根据燃料上

的爆炸力与气动阻力的相对大小,将燃料运动分为两个阶段:云雾的运动主要由爆炸作用力来决定的阶段,称之为近场阶段;气动阻力支配云雾运动的阶段,称之为远场阶段。这一划分在后续研究中被广泛接受和采用。Gardner<sup>[6]</sup>提出了径向膨胀的薄膜线性不稳定模型,假设连续液体环在膨胀变薄过程中,内外界面的扰动也在增长,当内外界面扰动增长到大于膨胀的液体环厚度时,即发生首次破碎。许多学者在燃料爆炸抛撒过程理论分析、燃料云雾特征参数(形状、尺寸和扩散速度等)<sup>[7-10]</sup>数值仿真以及抛撒装置参数(壳体材质、结构和比药量等)<sup>[11-14]</sup>对云雾状态影响实验等多个方面开展了研

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-09-02  
第一作者:王永旭(1992-),男,博士研究生,主要从事燃料空气炸药研究。E-mail:wangyongxu216@163.com  
通信作者:解立峰(1962-),男,教授,博导,主要从事爆炸力学研究。E-mail:xielifeng319@sina.com

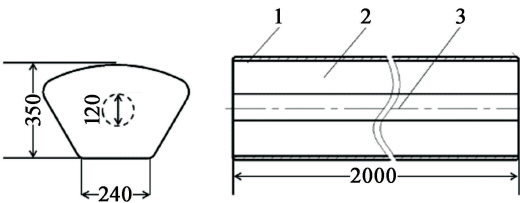
究。对于大体积的燃料抛撒,陈明生<sup>[14]</sup>通过数值模拟和实验相结合的方法,对比了圆形和扇形壳体结构燃料(装药量 85 kg)爆炸抛撒形成云雾外形的差异特性;刘庆明等<sup>[15]</sup>研究了 100 kg 装药量 FAE 的云雾抛撒和爆轰威力;郭学永<sup>[16]</sup>研究了 5、20、50 kg 3 个量级燃料爆炸抛撒过程,给出了云雾最大空洞、最大直径与燃料质量的经验公式。对于 FAE,燃料的爆炸抛撒和雾化是一个复杂的过程,目前针对该过程还没有精确的物理模型和计算方法。只能在实验中探索云雾尺寸和燃料浓度随时间的变化关系,寻找最佳的二次起爆实验条件<sup>[17]</sup>。

针对 FAE,以往研究的壳体结构多为圆柱体,为了满足不同弹体结构的设计与应用,扇形结构应运而生<sup>[18]</sup>。本文中,根据弹体设计的需求,对大体积扇形壳体结构的 FAE 进行了爆炸抛撒实验研究,探索扇形结构壳体云雾形成的特征参数,为进一步的云雾爆轰实验打下基础。

1 实验装置及方法

1.1 燃料抛撒结构

扇形壳体的结构示意图见图 1。装置高度为 2 m,壳体材质为铝板,厚度为 3 mm。此次实验中,抛撒的燃料为以乙醚和铝粉为主体的液固复合燃料,燃料装填质量为 300 kg,密度为 1.2 g/cm<sup>3</sup>。燃料爆炸抛撒的中心管药总长 2 m,直径 120 mm。装药量为 3 kg,中心分散药与燃料的质量比(简称比药量)为 1%。



(a) 横截面 (b) 剖面  
1 - 壳体; 2 - 燃料; 3 - 抛撒载荷。

图 1 抛撒装置结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of the dispersing device(unit:mm)

1.2 测试方法

爆炸抛撒实验如图 2。装置固定在高 2 m 的架子上,在距离中心 16 m 处设置 4 个标杆,在底部利用 8#雷管起爆中心分散药柱。采用高速相机和无人机记录燃料爆炸抛撒的整个过程。高速相机型号为 Fastcam Mini UX100,拍摄速度为 2 000 帧/s。无人机型号为大疆悟 2,最大拍摄速度为 120 帧/s。



图 2 抛撒实验布置图

Fig. 2 Layout of dispersing experiment

2 实验结果与分析

2.1 燃料抛撒过程

扇形壳体结构爆炸抛撒过程如图 3 所示。在整个爆炸抛撒过程中云雾没有发生窜火,成功实现了比药量为 1% 的情况下 300 kg 燃料的爆炸抛撒。为了获得最佳的爆轰效果,一般要求云雾呈扁平圆柱体,这样可以增大云雾爆轰的直接作用范围。因为 FAE 属于体积爆轰,在云雾区内压力衰减比云雾区外慢,云雾区域越大,对目标的毁伤和破坏范围越大。从图 3 可以看出,燃料的运动主要以横向为主,有利于形成最终的爆轰威力。云雾最终形成了类似于五角星的形状。这是由壳体的形状特征导致的。本次抛撒实验中,壳体的截面为扇形,各个方向的燃料装填质量是不一样的。在 50 ms 时,云雾整体还能维持圆形,但随着时间的推移,由于各个方向的燃料质量不一样,运动速率也不相同,最终形成了类似于五角星的云雾形状。

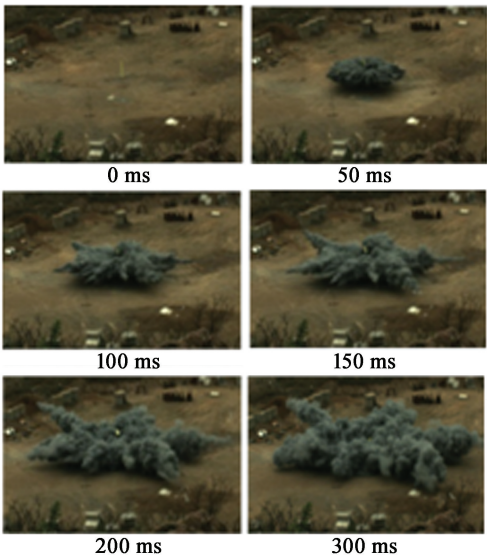


图 3 燃料爆炸抛撒过程

Fig. 3 Dispersal process of fuel explosion dispersal process

2.2 云雾运动特性

为了研究扇形壳体结构爆炸抛撒的云雾运动特性,定义了扇形结构的各个方向,并与云雾最终的形状相结合,可以更好地看到壳体截面外形与云雾外形的关系,如图 4 所示。可以看到,在云雾边缘有许多条状突出,而且是不规则的。其中,0°方向的条状突出最明显,说明该方向壳体强度最低,在冲击波作用下首先破裂,壳体破片带着少量燃料往该方向运动。在下一步的改进实验中,可以加强出现条状突出方向的壳体强度,使云雾形状更加规则。

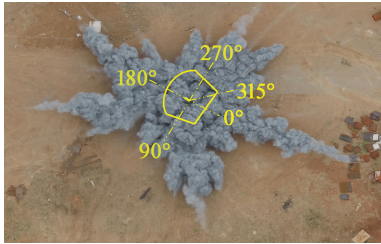


图 4 扇形结构方向示意  
Fig. 4 Direction of the sector structure

利用实验前布置的标杆,对高速相机和无人机拍摄的爆炸抛撒过程的图片进行处理,同时去除云雾边缘的条状突出,可以得到不同方向上云雾半径随时间的变化规律,如图 5 所示。

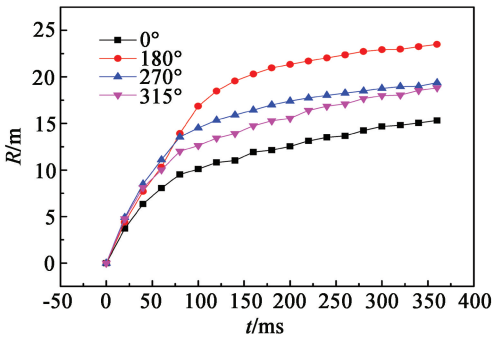


图 5 不同方向上云雾半径随时间的变化  
Fig. 5 Variation of cloud radius with time in different directions

从图 5 可以看出,当  $t < 100$  ms 时,云雾半径增长较快,说明此时云雾运动由爆炸作用力驱动,属于近场阶段。此阶段始于中心抛撒药爆炸瞬间,爆轰产物推动周围的燃料向外运动。随着爆轰产物的膨胀,爆炸作用力逐渐减少。当气动阻力大于爆炸作用力时,云雾运动进入远场阶段。云雾半径增长速率变慢,在气动阻力的支配下,云雾缓慢向外膨胀,最终形成爆炸性云团。当  $t < 80$  ms 时,云雾尺寸在各个方向上都基本一致,此时还是规则的圆形。这与高速相机拍摄的图片结果一致。随着时间的推移,各个方向的差异开始明显。这是由 3 个方面的

原因导致的,一是相比于圆形壳体,扇形壳体在各个方向的强度不一致;二是在各个方向的装药量也不一样;三是冲击波到达各个方向的时间不同。研究表明,云雾半径在初期呈指数增长,之后增长速率变慢,跟随渐近线,本次实验也符合该规律。

根据 Apparao 等<sup>[19]</sup>的研究结果,燃料爆炸抛撒形成云雾的半径扩展公式可以表示为

$$R(t) = a[1 - e^{(-bt + ct^2)}] \tag{1}$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

对式(1)求导,可以得到云雾运动速度的公式:

$$v(t) = \frac{dR(t)}{dt} = -a(2ct - b)e^{(-bt + ct^2)} \tag{2}$$

对图 5 求导,可以得到云雾运动速度随时间的变化规律,如图 6 所示。

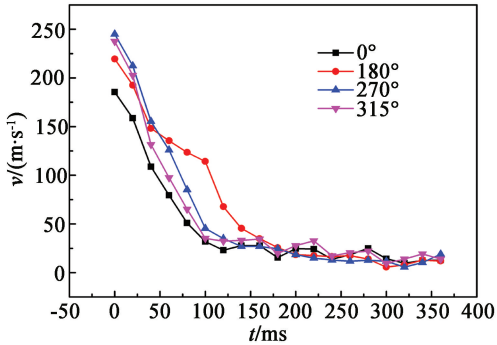


图 6 云雾运动速度随时间的变化  
Fig. 6 Variation of cloud movement speed with time

从图 6 可以看出,燃料没有加速过程,一直处于减速状态。这是由于燃料在中心装药爆轰产物的驱动下迅速达到最大值,由于时间很短,高速相机无法捕捉到。当  $t < 100$  ms 时,燃料基本做匀减速运动,运动速度迅速下降,之后速度下降趋势变慢,但云雾向外运动速度较低。

2.3 云雾体积及燃料浓度

FAE 本身不含氧或者含少量的氧,反应时利用空气中的氧气。因此,只有燃料与空气中氧气形成的浓度在爆炸极限范围内,云雾才能实现爆轰。对于圆形壳体,其爆炸抛撒的云雾可以近似为圆柱体,通常用式(3)直接计算燃料的体积,从而计算燃料的浓度。

$$V = \eta \frac{\pi D^2}{4} H \tag{3}$$

式中: $V$  为不同时刻的云雾体积,  $\text{m}^3$ ;  $D$  为云雾直径,  $\text{m}$ ;  $H$  为云雾高度,  $\text{m}$ ;  $\eta$  为云雾空洞系数,一般  $\eta = 0.9$ 。

但扇形壳体爆炸抛撒的云雾形状是不规则的,需要采用特殊的方法计算云雾浓度。本文中,无人



机在正上方拍摄燃料爆炸抛撒过程,通过正上方的投影面积计算云雾体积。无人机拍摄图片如图 7 所示,拍摄速度 120 帧/s。

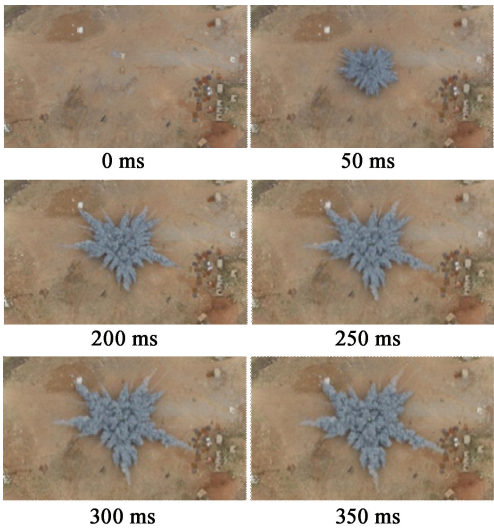


图 7 无人机拍摄的燃料抛撒过程图片  
Fig. 7 Drone picture of fuel dispersal process

虽然无人机拍摄速度相对于高速录像较慢,但对于大体积的 FAE,燃料爆炸抛撒的时间是百毫秒量级,利用无人机可以完整观察到燃料爆炸抛撒的整个过程。而且无人机不受地理条件的限制,可以从各个角度拍摄云雾爆炸抛撒过程,因此对于大体积 FAE 来说,无人机是一个优秀的实验观测设备。对无人机拍摄的图片,利用一开始布置在弹体四周的标尺,得到图片的比例尺寸。利用 PS 软件去除云雾白边和条形突出后,将云雾的边缘画出,利用 PS 内置的功能就可以得到不规则图形的面积。利用该方法可以得到不同时刻云雾在正上方的投影面积。

云雾高度采用高速相机获得,不同时刻云雾侧面的高速录像如图8所示。由于各个位置的云雾高度也不一致,取3个位置的高度平均值 $\bar{H}$ 作为云雾

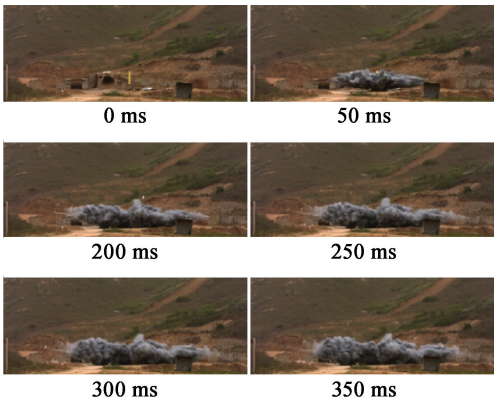


图 8 不同时刻云雾侧面的高速录像  
Fig. 8 High-speed video recording of the cloud sides at different times

的高度。3 个位置分别位于爆炸抛撒云雾的中心和左、右侧中心,如图 9 所示。

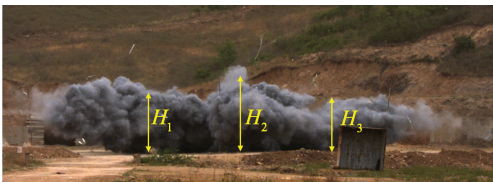


图 9 云雾高度示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of the cloud height

结合云雾高度和云雾在正上方的投影面积,可以得到不同时刻的云雾体积,如表 1 所示。

表 1 不同时刻的云雾特征参数  
Tab. 1 Cloud characteristic parameters at different moments

$t/\text{ms}$	$\bar{H}/\text{m}$	$S/\text{m}^2$	$V/\text{m}^3$
200	5.28	628.85	3 320.33
216	5.47	668.24	3 655.27
232	5.70	695.35	3 963.50
248	5.52	732.85	4 045.33
264	5.30	739.60	3 919.88
280	5.30	806.79	4 275.99
296	5.30	797.63	4 227.44
312	5.30	822.53	4 359.41

从表 1 可以看出,云雾高度先变大,后减小,之后保持不变。这是因为测量的是平均云雾高度,燃料被中心分散药爆轰驱动向外运动,中间部分的云雾高度很快保持不变。云雾边缘高度则是先变大,后减小。而云雾的直径、面积和体积等其他特征参数都随时间的增长而增大。

得到云雾体积随时间的变化后,在不考虑云雾分散的均匀性的情况下,可以得到云雾浓度与时间的变化关系。云雾体积和浓度随时间的变化如图 10 所示。

从图10可以看出,在 $t < 240\text{ ms}$ 时,云雾体积

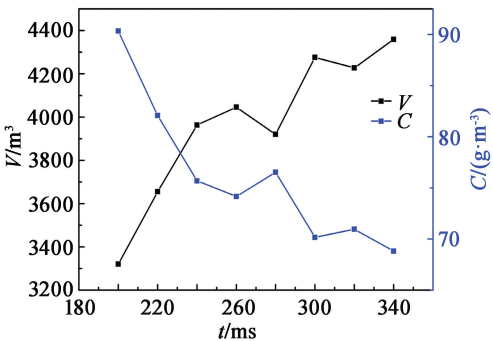


图 10 云雾体积和浓度随时间的变化  
Fig. 10 Variation of cloud volume and concentration with time

迅速增大,之后增长变缓。在此时,中心爆炸驱动的力已经完全消失,云雾处于自由扩散阶段。云雾浓度随着时间推移不断降低,在临近爆炸前,云雾浓度在 70 g/m<sup>3</sup> 左右,此时燃料的化学当量比为 0.46。实验和理论表明,燃料的化学当量比稍大于 1 时,云雾具有最小的临界起爆能量。因此,必须提高二次起爆能量才能实现云雾的可靠爆轰。

2.4 延迟时间及二次起爆位置

从一次引信作用引爆中心分散药到二次引信作用引爆二次药柱的时间间隔称为延迟时间。延迟时间是二次型 FAE 的关键参数,延迟时间太长,云雾浓度太低,不能稳定爆轰;时间太短,云雾覆盖范围太小,爆炸威力降低。

二次药柱的起爆位置对二次型 FAE 也至关重要。不能离中心位置太近,因为存在云雾空洞,该区域几乎没有燃料或者燃料浓度较低;同时,中心分散药的爆轰产物和壳体破片也可能对二次起爆药柱造成破坏,使二次药柱不能正常起爆。也不能离中心太远,否则二次药柱不能完全起爆整个云雾。

从表 1 可知,云雾高度从 260 ms 开始就保持不变,280~300 ms 之间云雾面积基本不变。综合分析认为,300 kg 燃料的二次起爆最佳延迟时间为 300 ms。扇形壳体结构形成的云雾空洞如图 11 所示。与圆形壳体一样,云雾空洞出现在中心位置,空洞直径为 1.84 m。



图 11 云雾空洞  
Fig. 11 Cloud hollow

由于 45°与 315°方向是壳体面与面的连接处,连接比较薄弱,在中心分散药的爆轰产物作用下会首先裂开,不会在该方向形成破片,对二次药柱造成破坏;因此,可以将二次起爆位置放在这两个方向。郭学永<sup>[16]</sup>通过不同量级的 FAE 抛撒实验,总结了二次起爆药柱位置的经验公式:

$$R = \frac{R_{\text{空}} + R_{\text{直}}}{4} \tag{4}$$

式中: $R$  为二次起爆药柱距离爆心的距离,m; $R_{\text{空}}$  为云雾空洞半径,m; $R_{\text{直}}$  为云雾半径,m。

起爆时云雾半径为 16 m,云雾空洞半径为 0.92 m,所以二次起爆药柱距离爆心的距离为 4.2 m。

3 结论

为了研究大体积 FAE 燃料的分散特性,以扇形结构壳体为研究对象,进行了 300 kg 燃料的爆炸抛撒实验,结果表明:

- 1) 相比于圆形壳体,扇形壳体结构形成的云雾形状是不规则的,云雾主要以横向运动为主,最终形成类似于五角星形状,同时,云雾边缘有许多条状突出;
- 2) FAE 云雾二次起爆前的燃料化学当量比远小于 1,为了保证云雾的可靠爆轰,需要提高二次起爆能量;
- 3) 扇形壳体结构存在云雾空洞,300 kg 燃料形成的云雾空洞直径大约为 1.84 m。

参 考 文 献

[1] 蒋耀港. 冷激波灭火系统的应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012.  
JIANG Y G. Application study of the cold shock wave fire-extinguishing system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2012.

[2] 史远通, 张奇. 爆炸驱动燃料抛散的非理想化特征[J]. 含能材料,2015,23(4):330-335.  
SHI Y T, ZHANG Q. Non-ideal characteristics of fuel dispersal driven by explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2015,23(4):330-335.

[3] PONTALIER Q, LOISEAU J, GOROSHIN S, et al. Experimental investigation of blast mitigation and particle-blast interaction during the explosive dispersal of particles and liquids[J]. Shock Waves,2018,28(3):489-511.

[4] 徐敏潇,刘大斌,吴秋洁. 二次起爆条件对小型燃料空气炸药爆轰参数的影响[J] 爆破器材,2017,46(2):11-15.  
XU M X, LIU D B, WU Q J. Influence of re-initiation on detonation parameters of small scale fuel-air explosive [J]. Explosive Materials, 2017,46(2):11-15.

[5] ZABELKA R J, SMITH L H. Explosively dispersed liquids AD-863268[R]. China Lake, CA: Naval Weapons Center,1969.

[6] GARDNER D R. Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air-explosive:SAND-90-0686[R]. 1990.

[7] 肖绍清. 分散药 T 型装药控制二次引爆型 FAE 云雾研究[J]. 火炸药学报,2006,29(2):10-14.

- XIAO S Q. Study on control cloud of twice-detonating FAE by T-type charge of burster[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006,29(2):10-14.
- [8] 方伟,赵省向,李文祥,等. 爆炸抛撒过程中 FAE 云雾的运动特性[J]. 含能材料,2015,23(11):1061-1066.
- FANG W, ZHAO S X, LI W X, et al. Movement characteristics of fuel-air explosive (FAE) clouds in the explosion dispersal process[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015,23(11):1061-1066.
- [9] 郭学永,惠君明. 装置参数对 FAE 云雾状态的影响[J]. 含能材料,2002,10(4):161-164.
- GUO X Y, HUI J M. Influence of equipment parameters on FAE cloud status[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2002,10(4):161-164.
- [10] 陈明生,白春华,李建平. 燃料抛撒的初始速率与结构动态响应数值模拟[J]. 含能材料,2015,23(4):323-329.
- CHEN M X, BAI C H, LI J P. Simulation on initial velocity and structure dynamic response for fuel dispersion[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015,23(4):323-329.
- [11] 王晔,白春华,李建平. 弹壳体结构对燃料装药抛撒速率影响的数值模拟研究[J]. 兵工学报,2017,38(1):43-49.
- WANG Y, BAI C H, LI J P. Influence of shell structure on dispersing velocity of fuel-air mixture [J]. Acta Armamentarii, 2017,38(1):43-49.
- [12] 陆晓霞,李磊,赵守田,等. 壳体约束对液体爆炸抛撒流场特性的影响[J]. 爆炸与冲击,2016,36(6):803-810.
- LU X X, LI L, ZHAO S T, et al. Effects of shell constraints on flow characteristics in an explosive dispersal of a liquid volume[J]. Explosion and Shock Waves, 2016,36(6):803-810.
- [13] BALAKRISHNAN K, KUHL A L, BELL J B, et al. An empirical model for the ignition of explosively dispersed aluminum particle clouds[J]. Shock Waves, 2012,22(6):591-603.
- [14] 陈明生. 大体积燃料空气混合物爆轰基础问题研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- CHEN M S. Research on basic characteristics of large volume fuel air mixtures detonation[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2015.
- [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):360-370.
- LIU Q M, BAI C H, LI J P. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008,23(4):360-370.
- [16] 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 X Y. Basic technical research on fuel air explosive warhead[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2006.
- [17] 惠君明. FAE 燃料抛撒与云雾状态的控制[J]. 火炸药学报,1999(1):10-13.
- HUI J M. FAE fuel throw and control of cloud state[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999(1):10-13.
- [18] 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.
- CHEN M S, LI J P, BAI C H. Simulation of explosion overpressure distribution for non-circular cross-section cloud[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015,23(5):484-489.
- [19] APPARAO A, RAO C R, TEWARI S P. Studies on formation of unconfined detonable vapor cloud using explosive means[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013,254/255:214-220.