文章编号：1000-5773(2011)01-0068-05

云爆弹外壳体厚度对威力的影响规律研究*

高洪泉[1]，卢芳云[1]，罗永锋[2]，王少龙[2]，胡 建[2]，袁 伟[2]，秦志强[2]

(1. 国防科技大学理学院技术物理研究所，湖南长沙 410073；
2. 第二炮兵装备研究院，北京 100085)

摘要：通过对不同厚度壳体的速度和动能进行理论分析，给出了壳体对燃料抛撒的影响规律；同时开展了不同厚度壳体的云爆装置试验，得到了装置威力与壳体厚度的关系。研究结果表明：采用薄壳体，并加强壳体与端盖的连接强度，可以提高中心抛撒药能量的利用率，进而提高一次起爆型燃料空气弹(SEFAE)的威力，试验结果与理论分析结果一致。

关键词：爆炸力学；云爆弹；试验研究；威力
中图分类号：O383.3 **文献标识码**：A

1 引 言

新型燃料空气炸药的特点是，将第一、第二代云爆弹的两次起爆机制改为一次起爆机制，从而简化武器结构，提高武器性能，拓宽应用范围，增强武器生存能力和降低费效比。一次起爆型燃料空气弹(Single Event FAE，简称 SEFAE)的中心装药既是抛撒燃料的能量来源，也是二次引爆的能量来源，所以一次起爆型 FAE 的设计，不能仅仅从燃料的能量性能考虑，还要考虑结构设计，以满足一次起爆技术对燃料离散与爆轰更加严格的自协调性要求。SEFAE 装置一般采用整体型薄壳结构[1](如图 1 所示)，外壳体是影响燃料抛撒的关键因素之一，因此开展 SEFAE 外壳体厚度对装置威力影响规律的研究，具有重要的理论和应用价值。

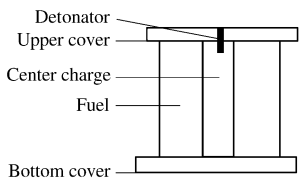


图 1 典型的一次起爆试验装置

Fig. 1 Typical structure of SEFAE

多位学者对 SEFAE 装置外壳体的设计、燃料的爆炸抛撒进行了探索与研究[1-5]，得到了具有实际指导意义的研究成果，如：化学一次起爆 FAE 装置[2]，燃料出壳体后 2 ms 达到最大运动速度；同量级的钢壳体 FAE 所形成的云雾大于铝壳体 FAE 所形成的云雾[3]；外壳体材料的屈服强度越小，越有利于燃料抛撒速度的提高[4]；壳体越厚或壳体质量越大，对空气冲击波的影响越显著[5]等。但上述研究均未给出 SEFAE 装置威力与外壳体厚度之间的定量关系。本工作在前人研究成果的基础上，通过理论计算，定量分析壳体对 SEFAE 装置威力的影响规律，并进行不同厚度壳体的 SEFAE 装置试验，对理论计算结果进行验证。

2 壳体对燃料抛撒影响规律的理论分析

燃料的抛撒半径和混合均匀性，是影响 SEFAE 威力的两个主要因素，因此减小壳体的破壳能量，提高燃料对中心抛撒药能量的利用率，是提高 SEFAE 装置威力的主要方法之一。

考察圆筒形薄壳体的情况[6]，假定：(1) 炸药装药发生瞬时爆轰，且爆轰产物从中轴到液体燃料内表面之间的运动速度成线性分布；(2) 壳体破裂前，爆轰产物与液体燃料之间未发生混合；(3) 液体燃

* **收稿日期**：2010-03-23；**修回日期**：2010-09-27
作者简介：高洪泉(1981—)，男，博士，主要从事爆炸过程的数值仿真及毁伤效应研究. E-mail：gaohonggang20037@sina.com

料的密度不变,且其速度与壳体的速度相同;(4) 壳体的塑性变形与断裂所消耗的能量相对壳体的动能来说较小[7],忽略不计。

在某一给定时刻,壳体、燃料的速度为 v,爆轰产物的平均速度为 $0.5v$。鉴于爆炸能量用于液体燃料、壳体的加速和爆炸产物的飞散,按牛顿第二定律,有

$$\left(M+m_{\text{fuel}}+\frac{m}{2}\right)\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\left(M+m_{\text{fuel}}+\frac{m}{2}\right)v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}r}=S\cdot p \tag{1}$$

式中:M、m_{fuel}、m 分别为壳体、液体燃料、爆轰产物的质量,S 为 t 时刻受到爆轰产物作用的液体燃料内表面的面积;r 为液体燃料的内径;v 为该时刻壳体的运动速度;p 为炸药瞬时爆轰时气体产物的平均压强。

设 r_0 为照耀爆轰完毕时刻液体燃料的内径,r 为 t 时刻液体内表面膨胀运动到的径向位置,$\overline{p}$ 为炸药爆轰完毕时刻爆轰产物的平均压强,h 为 SEFAE 装置壳体的高度,在爆轰产物的绝热指数 $\gamma=3$ 的假定下,得到 t 时刻作用于液体内表面的压强 p 为

$$p=\overline{p}\left(\frac{\pi r_0^2 h}{\pi r^2 h}\right)^3=\overline{p}\left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \tag{2}$$

由于炸药为瞬时爆轰,引入爆速 D,则 $\overline{p}=\frac{1}{8}\rho_0 D^2$,(2)式可表示为

$$p=\frac{1}{8}\rho_0 D^2\left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \tag{3}$$

得到壳体速度和动能的表达式为

$$v=\frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{2+\beta}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right]}=\frac{D}{2}\sqrt{\frac{2\alpha}{2-\alpha}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right]} \tag{4}$$

$$E_{\text{m}}=\frac{1}{2}Mv^2=\frac{D^2}{8}\frac{m}{2+[(2m_{\text{fuel}}+m)/M]}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right] \tag{5}$$

式中:$\beta=m/(M+m_{\text{fuel}})=\alpha/(1-\alpha)$,由于 SEFAE 的主装药为液体燃料,即 $(2m_{\text{fuel}}+m)/M\gg 2$,因此壳体的动能公式可以简化为

$$E_{\text{m}}=\frac{D^2}{8}\frac{Mm}{2m_{\text{fuel}}+m}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right] \tag{6}$$

当取 $r\to\infty$ 时,得到

$$v_{\max}=\frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{2+\beta}}=\frac{D}{2}\sqrt{\frac{2\alpha}{2-\alpha}}$$

$$E_{\max}=\frac{D^2}{8}\frac{Mm}{2m_{\text{fuel}}+m}$$

壳体速度和动能随壳体破裂半径变化的曲线见图 2。

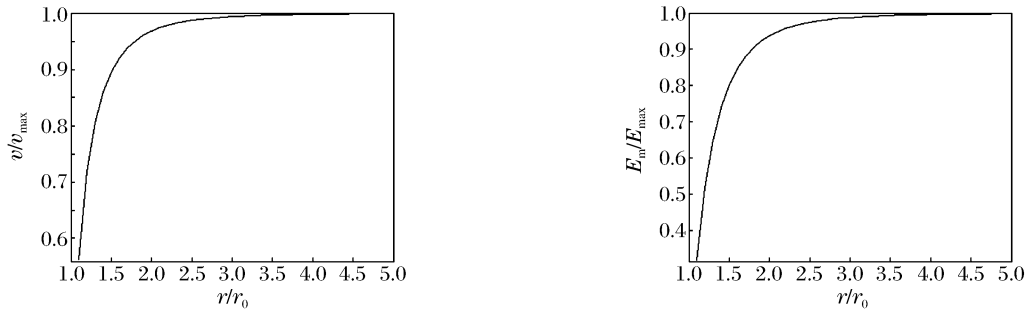


图 2　不同半径下壳体速度与最大速度、动能与最大动能之比

Fig. 2　The ratio of the shell velocity to the maximum speed and the ratio of the kinetic energy to the maximum kinetic energy under different radii

壳体的速度、动能变化趋势表明，随着外壳体破裂半径的增加，壳体的抛撒速度和动能迅速增加，尤其是当壳体破裂半径与初始半径的比值 r/r_0 在 1～2 区间内时，壳体速度和动能的变化显著，分别由最大速度的 57%和 32%提高至 95%和 90%，并在 r/r_0 为 2.5 时趋近最大值；在壳体破裂半径不变的情况下，壳体的动能随壳体质量线性增加。因此，适当减小壳体的厚度和破裂半径，壳体的动能迅速减小，而中心抛撒药爆炸所释放的能量一定，以致燃料所获得的抛撒能量增加，提高了燃料的抛撒和混合均匀性，从而提高了 SEFAE 试验装置的威力。

3 试验验证

3.1 试验装置

采用均未刻槽的外壳体，设计了壳体壁厚分别为 15.0、4.0 和 1.5 mm 的 3 种云爆试验装置[8]，3 种试验装置的其余参数均相同：装药量 10 kg，壳体材料为钢壳，形状为圆柱形，长径比为 4.9。爆炸试验的炸高为 0.92 m。每种壁厚的战斗部进行两发试验。

3.2 试验结果及分析

采用有效 TNT 当量法衡量试验装置威力，进而得到试验装置威力随壳体厚度变化的关系。TNT 当量(Q_{TNT})的概念是：与一定量有壳云爆装药(SEFAE 战斗部)产生相等爆炸冲击波威力的无壳 TNT 装药量，同该云爆剂装药量的比值。首先利用同场同条件下测得的 TNT 裸装药的爆炸参数，拟合 TNT 超压随比距离 $R/w^{1/3}$ 的变化关系式，进而求得试验装置不同测点的 TNT 当量，取其平均值作为有效的 TNT 当量。实测的云爆试验装置超压与 TNT 当量数据见表 1。

表 1 不同壳体壁厚的 SEFAE 试验装置的超压数据

Table 1 Overpressure data of SEFAE devices with different thicknesses of the shell

R/(m)	Δp/(kPa)			R/(m)	Δp/(kPa)		
	d=15 mm, Q_{TNT}=1.62	d=4 mm, Q_{TNT}=1.85	d=1.5 mm, Q_{TNT}=2.09		d=15 mm, Q_{TNT}=1.62	d=4 mm, Q_{TNT}=1.85	d=1.5 mm, Q_{TNT}=2.09
2.5	1 659.70	2 333.20	3 441.40	15.0	51.61	38.52	41.91
4.0	568.23	882.20	905.30	18.0	30.05	27.46	30.11
6.0	201.86	269.80	290.95	20.0	28.31	25.26	25.06
8.0	103.45	117.05	152.29	26.0	15.30	17.90	18.07
10.0	72.52	89.66	79.06	32.0	10.08	12.31	13.25

采用对数方程拟合 TNT 当量与壳体厚度之间的关系式，得到装置 TNT 当量 Y 与壳体厚度 d 之间的关系式为

$$\lg Y = -0.1101 \cdot \lg d + 0.7767 \tag{7}$$

试验装置的壳体为圆柱形薄壳体，因此圆柱壳体的质量可近似为 $M = 2\pi r_0 h d \rho_0$，由壳体的动能公式(6)式得到 $d = kE_m$，其中 k 为系数。壳体破裂半径不变时，壳体的厚度与壳体的动能存在正比关系，由此得到 TNT 当量与壳体动能之间的关系式如下

$$\lg Y = -0.1101 \cdot \lg E_m - 0.1101 \cdot \lg k + 0.7767 \tag{8}$$

(8)式表明，SEFAE 试验装置的 TNT 当量随外壳体动能的增加而减小，随外壳体动能的减小而增加，该结论与理论分析结果一致。

在某发 SEFAE 试验装置爆炸过程的高速录像记录中发现，由于试验装置壳体与上端盖连接强度不够，SEFAE 爆炸云团向上泄露，这时，处于高压状态的 SEFAE 爆炸云团高速地向上喷射，并发生“二次爆炸”，同时由于壳体破裂的不均匀性，SEFAE 试验装置的火球呈现非对称膨胀，如图 3 所示。



t=40 ms　　t=53 ms　　t=76 ms　　t=80 ms

图 3　SEFAE 试验装置的二次爆炸现象

Fig. 3　The secondary blast of SEFAE

通过对上述试验现象、试验结果的分析，得到如下结论：

(1) 随着壳体厚度的增加，壳体动能增加，中心抛撒药能量的利用率降低，燃料的抛撒和混合均匀性减弱，等效 TNT 当量减小；

(2) 在正常情况下，燃料云团的“二次爆炸”发生在主云团内部，可增强 SEFAE 装置的爆炸威力[7]。而如图 3 所示，在壳体与端盖连接处发生云团的泄露，说明壳体与端盖连接处强度不足，过早发生断裂。因此在采用薄壳体的同时，应加强壳体与端盖的连接强度，避免燃料云团的泄露，以提高 SEFAE 装置的威力。

4　结　论

通过对不同状态壳体的破片速度和动能进行理论分析可得到：壳体的破裂半径在初始半径的 1～2 倍区间内时，壳体的速度、动能变化显著，分别由最大速度的 57%和 32%提高至 95%和 90%，并在 r/r_0 为 2.5 时，趋近最大值；在壳体破裂半径不变的情况下，壳体的动能随壳体质量线性增加；通过进行不同厚度壳体的 SEFAE 装置静爆试验，得到了 TNT 当量与壳体动能之间的定量关系。理论分析与试验结果表明，采用薄壳体，并加强顶盖与壳体的连接强度，可以显著提高中心抛撒药能量的利用率，提高燃料的抛撒、混合均匀性，增大火球直径，提高 SEFAE 装置的威力。

References：

[1] Guo X Y. Basic Technical Research on Fuel Air Explosive Warhead [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006: 33-34. (in Chinese)
郭学永. 云爆战斗部基础技术研究 [D]. 南京：南京理工大学，2006：33-34.

[2] Xu X Z, Pei M J, Wang Y H, et al. Dispersion Characteristics of Single-Event [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2000, 23(1): 47-49. (in Chinese)
许学忠，裴明敬，王宇辉，等. 一次起爆 FAE 的燃料扩散特征 [J]. 火炸药学报，2000，23(1)：47-49.

[3] Guo X Y, Hui J M. Influence of Equipment Parameters on FAE Cloud Status [J]. Energ Mater, 2002, 10(4): 161-164. (in Chinese)
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.

[4] Song Z D, Li Y H, Zhou L, et al. Simulation Analysis on Effect of Shell to Spill of Liquid Fuel of FAE [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(24): 5868-5870. (in Chinese)
宋志东，李运华，周　伦，等. 壳体对云爆弹燃料抛撒影响的仿真分析 [J]. 系统仿真学报，2007，19(24)：5868-5870.

[5] Zhang Q, Miao C Q, Bai C H, et al. The Influence of Shell on Blast Shock Wave Intensity [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(3): 145-148. (in Chinese)

张 奇,苗常青,白春华,等.壳体对爆炸空气冲击波强度的影响[J].应用力学学报,2003,20(3):145-148.

[6] Zhang B P,Zhang Q M,Huang F L. Theory of Detonation [M]. Beijing:Armament Industry Press,2006:311-314. (in Chinese)
张宝坪,张庆明,黄凤雷.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,2006:311-314.

[7] Sui S Y,Wang S S. Terminal Effects [M]. Defense Industry Press,2000:290-291. (in Chinese)
隋树元,王树山.终点效应学[M].北京:国防工业出版社,2000:290-291.

[8] Kan J L,Liu J C. The Blast Characteristic of SEFAE [J]. Explosion and Shock Waves,2006,26(5):404-409. (in Chinese)
阚金玲,刘家骢.一次引爆云爆剂的爆炸特性[J].爆炸与冲击,2006,26(5):404-409.

Study on the Influence of the Outer Shell Thickness on the SEFAE Damage-Power

GAO Hong-Quan[1],LU Fang-Yun[1],LUO Yong-Feng[2],WANG Shao-Long[2],
HU Jian[2],YUAN Wei[2],QIN Zhi-Qiang[2]

(1. *Institute of Technical Physics,College of Science,National University of Defense Technology,Changsha* 410073,*China*;
2. *The Second Artillery Equipment Academe,Beijing*,100085,*China*)

Abstract:Based on the theoretical analysis of the SEFAE outer shell velocity and kinetic energy with different depths,the influence of the shell on the dispersed fuel was obtained. The relationships between the damage power and the thickness of the shells were obtained by different SEFAE explosion experiments. The theoretical and experimental results show that the TNT equivalent of the SEFAE and the utilization rate of the center charge can be improved by using the thinner shell and increasing the connection strength between the shell and the end cover,in which the experimental results were in agreement with the theoretical results.

Key words:mechanics of explosion;FAE;experiment study;damage power