

doi: 10.7690/bgzdh.2014.11.009

中心装药起爆方式对 FAE 影响的仿真研究

李贝^{1,2}, 余文力¹, 王文欣³, 罗永峰²

(1. 第二炮兵工程大学一系, 西安 710025; 2. 第二炮兵装备研究院二所, 北京 100085; 3. 中北大学, 太原 030051)

摘要: 为提高燃料空气炸弹的释能效率, 研究中心装药的起爆方式对燃料空气炸弹爆炸威力的影响。建立 1 点、2 点、5 点起爆方式的仿真模型, 运用 AUTODYN 软件, 对中心装药起爆过程中的最大压力和最大抛撒速度进行仿真计算, 并对爆轰波传播过程进行分析。仿真结果表明: 在 3 种起爆方式中, 2 点起爆能够形成扁平状火球, 作用区域更广; 2 点起爆的峰值可以达到其他 2 种起爆方式的 2 倍左右; 2 点起爆和 5 点起爆情况下的燃料抛撒的速度比 1 点起爆可提高 19%。

关键词: 起爆方式; FAE; 仿真**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** A

Simulation and Research on Influence of Center Charge Ignition Method on FAE

Li Bei^{1,2}, Yu Wenli¹, Wang Wenxin³, Luo Yongfeng²

(1. No. 1 Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. No. 2 Institute, The Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China;

3. North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For improving energy releasing efficiency of fuel air explosive (FAE), research on influence of center charge ignition method on FAE explosion strength. Establish ignition simulation modes of 1 point, 2 points and 5 points, use AUTODYN software, on the center charge blasting fling at the maximum stress and maximum speed in the process of simulation computation, the detonation wave propagation process is analyzed. The simulation results show that: in 3 ignition methods, 2 points detonation can form flat fireballs, function area is more extensive; 2 points blasting peak can reach around twice of the other two ignition methods; 2 points detonation ignition and 5 points cases of fuel can increase 19% than 1 points initiation.

Keywords: igniting method; FAE; numerical simulation

0 引言

燃料空气炸弹 (fuel air explosive, FAE) 集威力大、温度高、超压作用区大等优点于一身, 在现代武器装备中占据重要地位^[1]。关于 FAE, 在装药和壳体结构方面已经开展了很多研究, 笔者将重点研究中心装药的起爆方式对于 FAE 爆炸威力的影响。

FAE 爆炸时, 中心装药在传爆系统作用下首先爆炸, 从而驱动云爆药剂向外抛散并发生爆炸, 产生高温超压, 对目标实行打击。中心装药的抛撒作为一个重要的中间过程, 决定了爆轰波传播方向, 直接关系着中心装药抛撒的均匀情况, 对于云爆药的爆炸释能有很大的影响。因而, 采取适当的起爆方式, 使中心装药在起爆后均匀抛撒云爆药剂并与周围空气充分混合, 就能提高 FAE 的释能效率。

笔者设计了 1 点、2 点、5 点起爆 3 种中心装药的起爆方式, 通过 AUTODYN 软件仿真计算^[2], 对这 3 种起爆状况下的有关爆炸参数进行分析, 得到中心装药的优化起爆方式。

1 建立模型

1.1 条件假设

在工程实际中存在很多不确定因素, 笔者忽略其中的次要因素, 做出如下假设:

- 1) 装药密度均匀, 没有明显裂缝、空隙、硬块;
- 2) 多点起爆时, 各雷管同时起爆, 没有时间差;
- 3) 各部件间贴合紧密, 没有空腔;
- 4) 起爆可视为点起爆。

1.2 物理模型

3 种起爆情况中, 1 点起爆为一端端盖中心起爆; 2 点起爆为两端端盖中心两端起爆; 5 点起爆为轴线均匀 5 点起爆。笔者采用圆柱结构, 其示意图见图 1。内、外壳体及中心装药的长度为 400 mm。内壳体内半径 32 mm, 厚度为 1 mm, 外壳体内半径 80 mm, 厚度为 2 mm, 上下端盖厚度为 4 mm, 空气域长度为 500 mm, 半径 150 mm。将装置简化为二维轴对称问题, 以方便对装置进行分析, 建立

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-08-27

作者简介: 李贝 (1990—), 男, 河北人, 在读硕士, 从事导弹战斗部工程研究。

如图 2 所示的物理模型，并进行有限元网格划分。

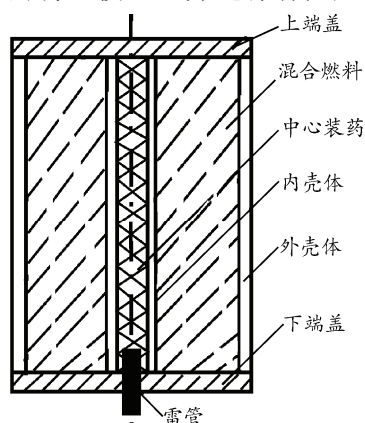


图 1 FAE 装置结构简图

在计算模型中设置固定类型的观测点以考察外壳体的应力情况和燃料区外围的超压情况，观测点位于云爆药内，距中心轴线 79.5 mm，间隔 50 mm 设置，共 7 个观测点。图 2 为观测点的设置情况。

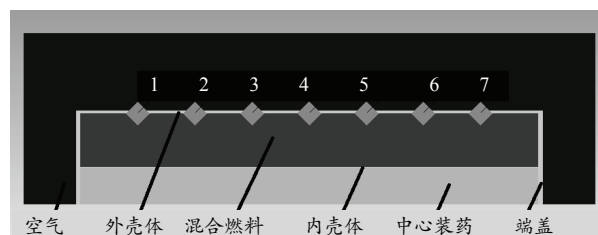


图 2 物理模型示意图

1.3 材料参数及算法

中心装药为 8701^[3]炸药，内外壳体及端盖材料均选取 4340 钢，混合燃料以水代替。除 8701 炸药外其余材料参数取自 AUTODYN 程序材料数据库。8701 炸药的参数： $A=581.4$ GPa， $B=6.801$ GPa， $R_1=4.10$ ， $R_2=1.00$ ， $\omega=0.35$ ， $\rho=1\ 700$ kg/m³， $D=8\ 390$ m/s， $P_{cJ}=34$ GPa， $E_0=9$ GPa。增加了侵蚀算法防止拉式算法的网格畸变使计算不能进行。表 1 列出其余材料的计算参数。

表 1 材料参数及模型

部件	材料	密度/(g/cm ³)	状态方程	强度模型	侵蚀算法	侵蚀应变
端盖	STEEL4340	7.83	Shock	Johnson-Cook	几何应变	2
混合燃料	WATER	1.00	Shock	None	None	None
壳体	STEEL4340	7.83	Shock	Johnson-Cook	几何应变	2

在流体单元边界处设置 Flow Out 类型压力流出边界条件，使得燃料介质在边界附近的抛撒不受影响，减少计算量^[4]。内外壳体、端盖的膨胀断裂和飞散采用二维 Lagrange 求解器求解，中心装药的爆轰、燃料介质的抛撒采用二维 Euler 求解器求解，内外壳体、端盖与中心装药爆轰、燃料介质抛撒之

间的相互作用则采用流固耦合算法进行模拟^[5]。

2 模拟结果

通过模拟仿真，得出 3 种情况下的爆轰云图。

2.1 1 点起爆情况

1 点起爆情况下爆轰波变化云图如图 3。

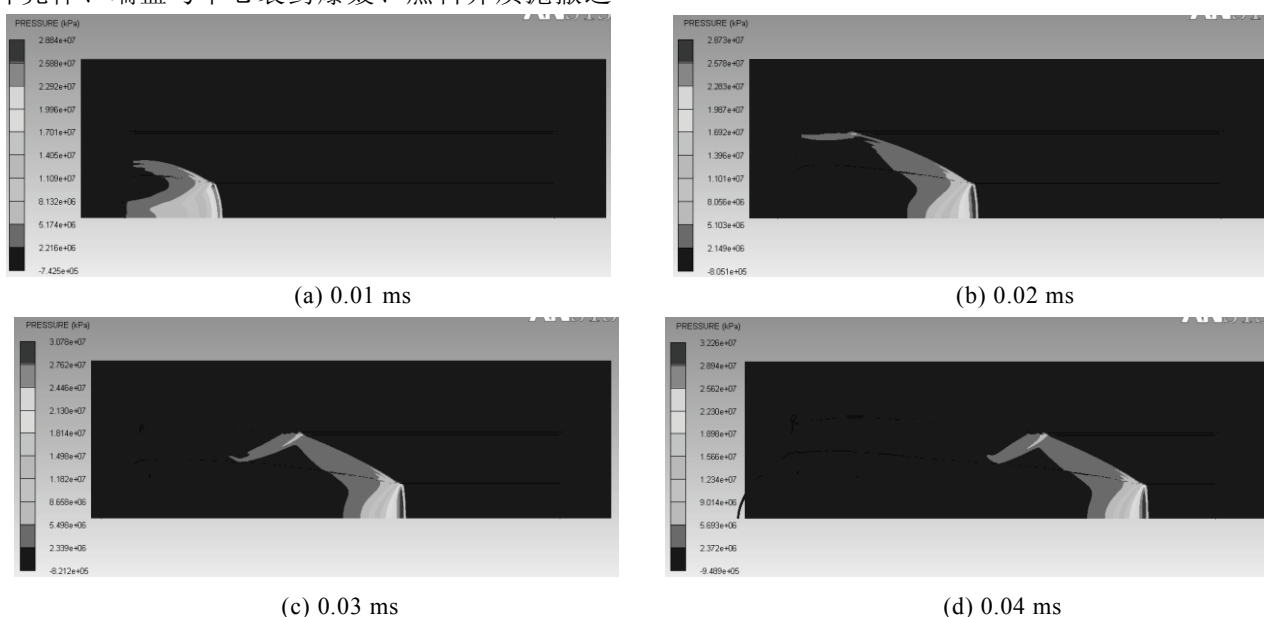


图 3 1 点起爆情况下爆轰波变化云图

中心装药 1 点起爆后，炸药以 8 390 m/s 的速度沿轴向爆轰^[6]，中心装药壳体在爆轰波的作用下受

到侧向动压而爆裂破碎，爆炸产物迅速作用于燃料并将其压实，爆炸超压经一定程度的衰减后作用于

外壳体，使外壳体在压力作用下发生变形破裂，一部分燃料从裂缝中喷射出，另一部分燃料仍保持连续的环形，被爆炸产物像活塞一样推动随射流扩张。随着外壳体的破碎燃料开始加速运动，直至抛出。该种情况下，外壳体在该阶段大致呈 V 形变形。

2.2 2 点起爆情况

2 点起爆情况下爆轰波变化云图如图 4。

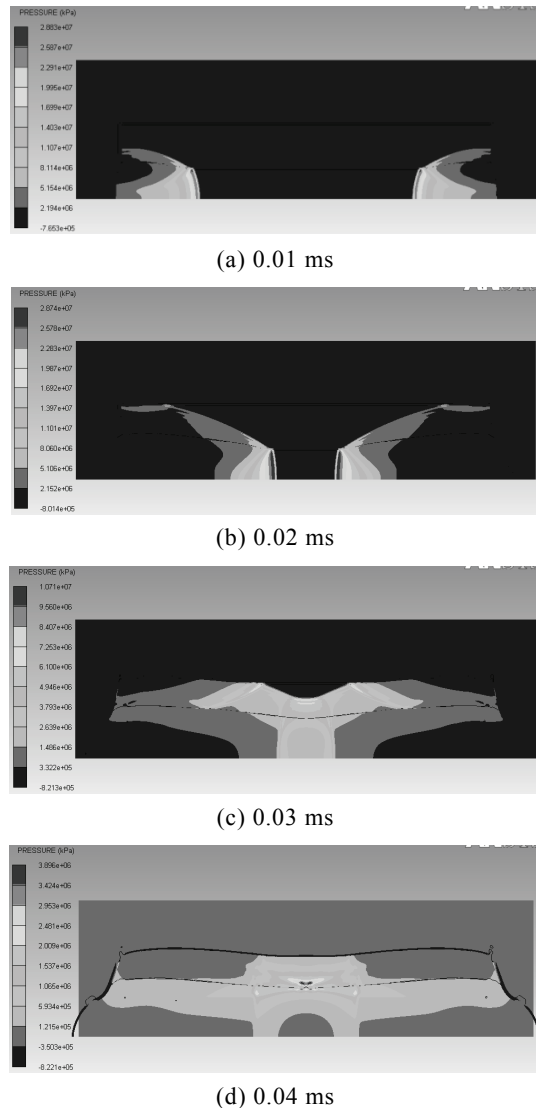


图 4 2 点起爆情况下爆轰波变化云图

中心装药两点起爆后，爆轰波从两端面出发，以相同的速度独立地向对面进行传播。大概在 0.025 ms 时，2 列爆轰波同时传至药柱横向对称平面处，在该处 2 列爆轰波相遇并产生相互作用出现超压。该种情况下，外壳体在该阶段大致呈 X 形变形。

2.3 五点起爆情况

中心装药五点起爆后，从图 5 可以看出，在 0.01 ms 时爆轰波阵面结构不再是由单一的 C-J 爆轰波

构成的球面波，而是由 C-J 爆轰波和马赫波相间布置共同组成的 4 列复合波阵面结构。同时由于有 4 列复合波同时作用于壳体，所以壳体大致以同一速度向外变形。该种情况下，外壳体在该阶段大致呈 H 形变形。

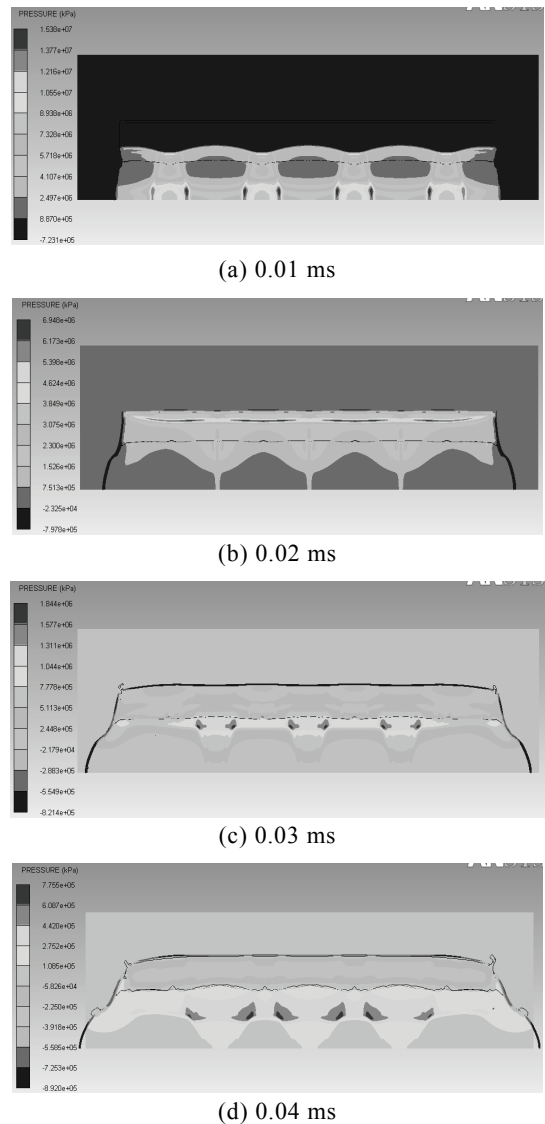


图 5 5 点起爆情况下爆轰波变化云图

3 结果分析

1) 对模拟结果进行分析，得出 3 种情况下最大压力和最大径向抛撒速度所在位置如表 2 所示。

表 2 最大压力和最大径向抛撒速度

起爆方式	观测点	最大压力/GPa	最大速度/(m/s)
1 点起爆	G4	6.219	1 384.1
2 点起爆	G4	11.76	1 647.2
5 点起爆	G4	5.918	1 646.4

2 点和 5 点起爆情况下，最大压力和最大径向抛撒速度在 G4 处产生。1 点起爆情况下，峰值位置在 G7 处，由于 G7 处的峰值与 G4 处大致相同，为

方便研究，按 G4 处理。因此，G4 处的各项指标在很大程度上影响了装置的超压作用区域和火球扩散半径。

2) 对观测点 G4 处的压力随时间变化情况进行观察，如图 6 所示。

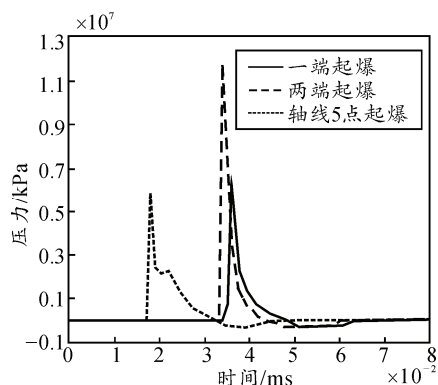


图 6 3 种起爆方式下观测点 G4 压力-时间曲线

在图 6 中，5 点起爆情况最先在 G4 点处达到峰值压力，中心药柱起爆后，位于轴线内部的 3 个爆点所产生的爆轰波几乎同时到达 G4 点，在该点处叠加产生峰值超压，由于起爆点较多且分布均匀使得爆轰波在到达观测点时没有经过较长的药柱，因而能量积累不多，峰值超压不够大；1 点起爆和 2 点起爆情况几乎同时到达 G4 且形成峰值超压，但 1 点起爆情况下爆轰波在到达观测点时是一列波作用的结果，而 2 点起爆情况在到达观测点时两列波发生相互作用产生叠加，故而 2 点起爆超压峰值大约是 1 点起爆情况的 2 倍。

3) 对观测点 G4 处的抛撒速度随时间变化情况进行观察，如图 7 所示。

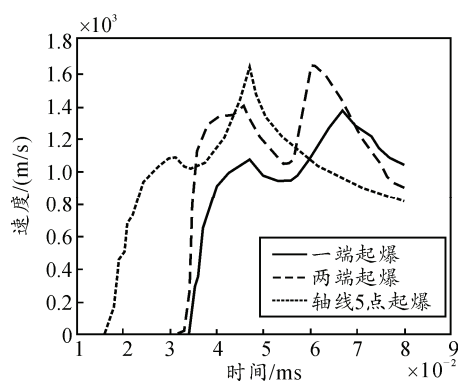


图 7 3 种起爆方式下观测点 4 径向抛撒速度曲线

在观测点 G4 处，速度曲线有 2 次到达波峰，这是爆轰波加速作用和外壳体减速作用共同作用的结果。中心药柱在起爆点产生的爆轰波的作用下发生爆轰，而后产生的爆轰波在装置中传播，在到达观测点后对观测点附近的燃料介质进行加速形成波

峰，爆轰波在产波过程中也激发了燃料介质，使得燃料介质发生反应，产生第 2 次爆轰波，观测点在第 2 次爆轰波的作用下又产生第 2 次波峰。5 点起爆情况下产生波峰的时间较早，这是由于起爆点与观测点距离较近，1 点起爆和 2 点起爆情况的速度曲线形状大致相同，但 2 点起爆的速度曲线整体上数值较大，这是 2 点起爆情况能量更集中，在该观测点处形成爆轰波叠加的结果。从图 7 可以看出，2 点起爆和 5 点起爆下的燃料抛撒速度比 1 点起爆提高了 19%。

4) 2 点起爆情况下，选取 G2、G4、G7 3 个观测点进行比较，结果如表 3。可见，采取两端起爆，药柱中间位置处燃料能够获得较大的压力和速度，其他位置的燃料获得的压力和速度都比较小，形成两头尖、中间宽的扁平状火球，能量在中间位置处更加集中。这样，装置在起爆后，所产生的火球会在中间位置超压的作用下向外扩散更广的空间。

表 3 2 点起爆方式下 G2、G4、G7 3 点最大压力和最大径向抛撒速度

观测点	最大压力/GPa	最大速度/(m/s)
G2	4.507	1 373.3
G4	11.760	1 647.2
G7	6.698	1 314.0

4 结论

综上所述，可得出如下结论：

1) 在这 3 种起爆方式中，2 点起爆能够形成扁平状火球，作用区域更广；2) 2 点起爆情况下峰值超压大约是其他 2 种起爆方式的 2 倍；3) 3 种起爆方式中，2 点起爆和 5 点起爆情况下，燃料抛撒的速度最大，比 1 点起爆可以提高 19%。

综合观察，2 点起爆是一种较优起爆方式，该结论已在 086 专项中得到应用。

参考文献：

- [1] 周保顺, 王少龙, 罗永锋, 等. 壳体对燃料近区抛撒速度影响的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2010(4): 53-56.
- [2] 宋志东, 李运华, 周伦, 等. 壳体对云爆弹药燃料抛撒影响的仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5868-5870.
- [3] 第五机械工业部第二〇四研究所. 火炸药手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1981: 112-119.
- [4] 张奇, 覃彬, 白春华. 中心装药对燃料成雾特性影响的试验分析[J]. 含能材料, 2007, 15(5): 447-450.
- [5] 薛社生. 液体燃料爆炸分散研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1997: 258-264.
- [6] Gardner D.R. Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air-explosives[R]. SAND 90-0686. 1990.