

doi: 10.7690/bgzdh.2024.10.011

迫-1 甲引信工作过程仿真模拟

贺磊¹, 傅裕¹, 岳通², 丰婧¹, 王海斌¹

(1. 吉林江机特种工业有限公司研发中心, 吉林 吉林 132021;

2. 中国兵器工业集团航空弹药研究院有限公司前沿技术部, 哈尔滨 150030)

摘要: 为研究迫-1 甲引信运动和作用过程, 对其引信工作进行仿真模拟。使用多体系统动力学仿真软件 MSC.ADAMS 建立引信虚拟样机模型, 模拟其运动过程并得到击针对针刺雷管的撞击动能; 使用显式动力学仿真软件 Ansys Workbench LS-DYNA 对引信传爆序列爆轰作用过程进行仿真模拟, 验证针刺雷管→导爆管→传爆管→主装药之间传爆的可靠性。仿真结果表明, 该仿真模拟可为迫-1 甲引信的改进或智能化改造提供数据支撑。

关键词: 迫-1 甲引信; 虚拟样机; 传爆序列; 显式动力学; 仿真

中图分类号: TJ430.3; TP391.9 **文献标志码:** A

Simulation of Working Process of Force-1 A Fuze

He Lei¹, Fu Yu¹, Yue Tong², Feng Jing¹, Wang Haibin¹

(1. Research and Development Centre, Jilin Jiangji Special Industry Co., Ltd., Jilin 132021, China;

2. Advanced Technology Department, Aviation Amunitions Institute Co., Ltd. of China North Industry Group Corporation Limited, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to study the movement process and action process of F-1 A fuze, the working process of the fuze was simulated. Using the multi-body system dynamics simulation software MSC ADAMS establishes the virtual prototype model of the fuze, simulates its movement process and obtains the impact kinetic energy against the needle detonator. Use the explicit dynamics simulation software Ansys Workbench LS-DYNA to simulate the detonation process of the fuse detonation transmission sequence, and verify the reliability of detonation transmission between the needle detonator → nonel → booster → main charge. The simulation results show that the simulation can provide data support for the improvement or intelligent transformation of F-1A fuze.

Keywords: force-1 A fuze; virtual prototype; implosion sequence; explicit dynamics; simulation

0 引言

迫-1 甲引信能够利用目标反作用力驱动击针撞击针刺雷管并引爆传爆序列, 其结构简单、作用可靠, 广泛应用在各式迫击炮弹中。文献[1]在理论层面详细计算了该型引信炮口安全距离, 得到了关键件在内弹道阶段的运动状态, 但未研究外弹道段和终点弹道段关键件的运动状态。文献[2]利用 MSC.ADAMS 软件对某型引信机构做了详细的动力学分析, 但并未分析引信传爆序列。文献[3]重点分析了针刺雷管结构及材料对其输出威力的影响, 但未对击针撞击雷管的过程进行分析。文献[4]只是对典型传爆序列进行了仿真分析, 并未涉及引信运动过程。

笔者以迫-1 甲引信为研究背景, 运用多体系统动力学软件 MSC.ADAMS 对迫-1 甲引信全弹道运动过程进行了动力学分析; 同时, 利用 Ansys Workbench LS-DYNA 对传爆序列爆轰过程进行仿

真。由仿真结构依次分析了击针→针刺雷管→导爆药→传爆药→主装药的传爆可靠性, 分析结果为迫-1 甲引信进一步改进设计提供了数据支撑。

1 迫-1 甲引信组成与原理

63 式 60 mm 迫击炮杀伤榴弹配用的迫-1 甲引信结构如图 1 所示。

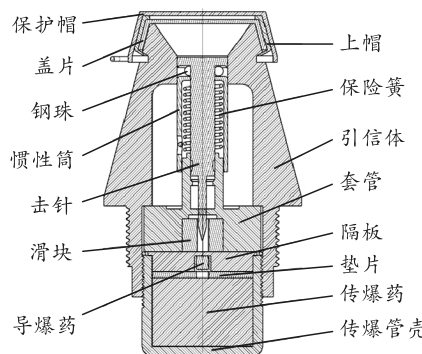


图 1 迫-1 甲引信结构

上图, 在迫击炮弹发射过程中, 惯性筒上的蛇

收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-07-20

第一作者: 贺磊(1994—), 男, 山西人, 硕士。

形槽沿导向销下移到位，在此过程中惯性筒上方的钢珠由于失去侧向支撑而滑落出来；在迫击炮弹出炮口后，迫击炮弹只能靠惯性前进，此时保险簧将惯性筒向上顶起并拖动击针向上运动，钢珠孔内的钢珠在击针侧壁的挤压下被释放出来；同时击针在上移过程中从滑块的盲孔中抽离出来，击针从盲孔中抽出后，滑块在滑块簧的作用下运动到位，使得击针尖与雷管对正，此时迫击炮弹引信处于待发状态；当迫击炮弹落地时，击针在地面反作用力的作用下撞击雷管，依次引爆导爆药、传爆药、主装药，进而使迫击炮弹爆炸^[5]。

2 迫-1 甲引信动力学仿真分析

为便于仿真，在不影响模型合理性的前提下作以下基本假设：

- 1) 除雷管外，其他构件均为刚体；
- 2) 在迫击炮弹下落过程中，不考虑重力对击针和惯性筒的影响；
- 3) 保险簧、滑块簧的弹簧阻尼忽略不计。

迫-1 甲引信由引信体、击针、惯性筒、套管等零件组成。依照各零件尺寸，使用 3 维建模软件 NX 构建该引信 3 维模型并装配，合并引信工作过程中不运动的零件，将装配图导出为 Parasolid 格式文件，并将其导入至动力学仿真软件 MSC.ADAMS 中。建立好的引信虚拟样机模型如图 2 所示。

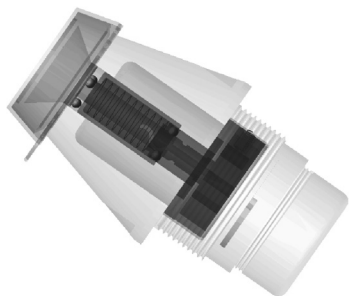


图 2 迫-1 甲引信虚拟样机模型

2.1 添加运动副约束

在引信模型创建好之后，需要为工作过程中的活动构件添加运动副约束，各活动构件的约束关系如表 1 所示。

表 1 活动构件之间的运动副约束

第 1 构件	第 2 构件	运动副约束
引信体	大地	固定副
套管	引信体	固定副
滑块	雷管	固定副
击针	引信体	移动副
惯性筒	击针	移动副
滑块	套管	移动副

2.2 添加接触

MSC.ADAMS 中添加接触有恢复系数 (restitution) 和冲击函数 (inpact) 2 种计算模型，前者用来处理瞬态非持续碰撞，后者用来处理持续碰撞。迫-1 甲引信各构件之间的碰撞均为持续碰撞，故模型中所有接触定义均使用冲击函数模型。除惯性筒与导向销之间的接触考虑库仑摩擦外，其他接触均不考虑摩擦力的影响。

2.3 添加载荷

根据引信的实际工况，需要为活动构件击针和惯性筒添加载荷，载荷分为后坐力、爬行力和碰击力 3 部分。

2.3.1 后坐力

后坐力是迫击炮弹加速运动时，引信零件受到的与轴向加速度方向相反的惯性力^[6]。对于火炮发射的弹丸，引信零件相对弹丸受到的后坐力按下式计算：

$$F_s = (m_f \pi d^2 / 4 \Phi m_p) p \quad (1)$$

式中： m_f 为引信零件的质量； d 为弹丸的直径； Φ 为虚拟系数； m_p 为弹丸质量； p 为膛压。除膛压 p 外，其他参数均为常数，故只需求得内弹道 $p-t$ 曲线，就能得到后坐力 F_s 随时间 t 的变化曲线。

以 63 式 60 mm 迫击炮为例，在不同装药条件下其内弹道压力 P 随时间 t 变化曲线如图 3 所示。

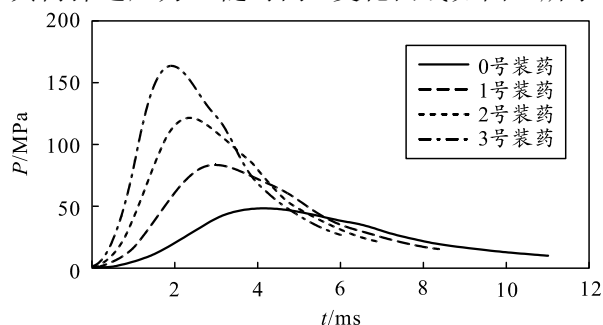


图 3 63 式 60 mm 迫击炮内弹道 $p-t$ 曲线

2.3.2 爬行力

爬行力是载体在空气等非目标介质中做减速运动时，引信零件受到的与载体减速度方向相反的轴向惯性力。爬行力表达式为：

$$F_p = m_f a_J \quad (2)$$

式中： m_f 为引信零件的质量； a_J 为载体的减加速度。

对尾翼式弹，空气阻力产生的减加速度的计算公式为：

$$a_J = R/m_p \quad (3)$$

式中 R 为空气阻力。

空气阻力按下式计算：

$$R \approx 0.393\rho d^2 v^2 C_x \quad (4)$$

式中： ρ 为空气密度； d 为尾翼式弹的直径； v 为尾翼式弹的速度； C_x 为空气的阻力系数。除速度 v 外，其他参数均为常数，故只需求得外弹道 $v-t$ 曲线，就能得到后坐力 F_p 随时间 t 的变化曲线。

以 63 式 60 mm 迫击炮为例，在不同装药条件下其外弹道速度随时间变化曲线如图 4 所示。

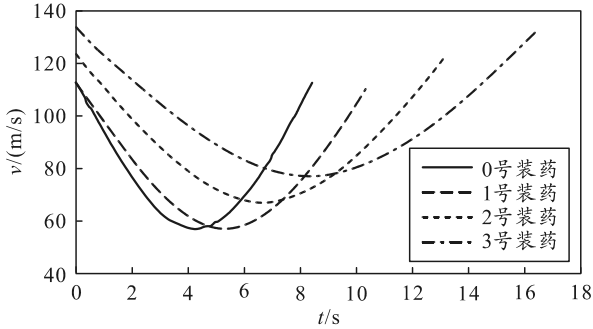


图 4 63 式 60 mm 迫击炮外弹道 $v-t$ 曲线

2.3.3 碰击力

碰击力是目标给予引信侵彻部位的反作用力。一般而言，弹丸在侵彻过程中受到的阻力可根据庞塞来-萨布斯基公式进行计算：

$$F_z = C(\pi D_x^2 / 4)(a_1 + cv_x^2) \quad (5)$$

式中： C 为弹道系数； D_x 为弹丸进入目标的最大直径； a_1 为碰击目标时的静态阻力系数； c 为动态阻力系数； v_x 为弹丸碰击目标时的速度。

2.4 添加弹簧力

保险簧和滑块簧刚度 k 、预压力 F_0 取值如表 2 所列。

表 2 弹簧参数

弹簧名称	$k/(kN \cdot m^{-1})$	F_0/N
保险簧	0.36	5
滑块簧	0.43	3

2.5 雷管柔性化处理

在 Ansys Workbench LS-DYNA 中为雷管模型划分好网格，导出为 .dat 文件；然后将此文件导入 Ansys APDL 中为其定义外接点，输出 .mnf 文件；最后在 MSC.ADAMS 中导入 .mnf 文件，雷管柔性化结构如图 5 所示。

2.6 引信运动过程分析

对构建好的迫-1 甲引信虚拟样机进行动力学仿真，其运动过程如图 6 所示。

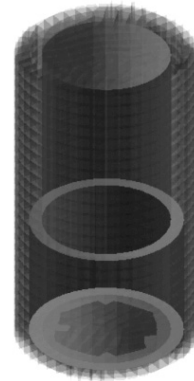


图 5 柔性化雷管结构

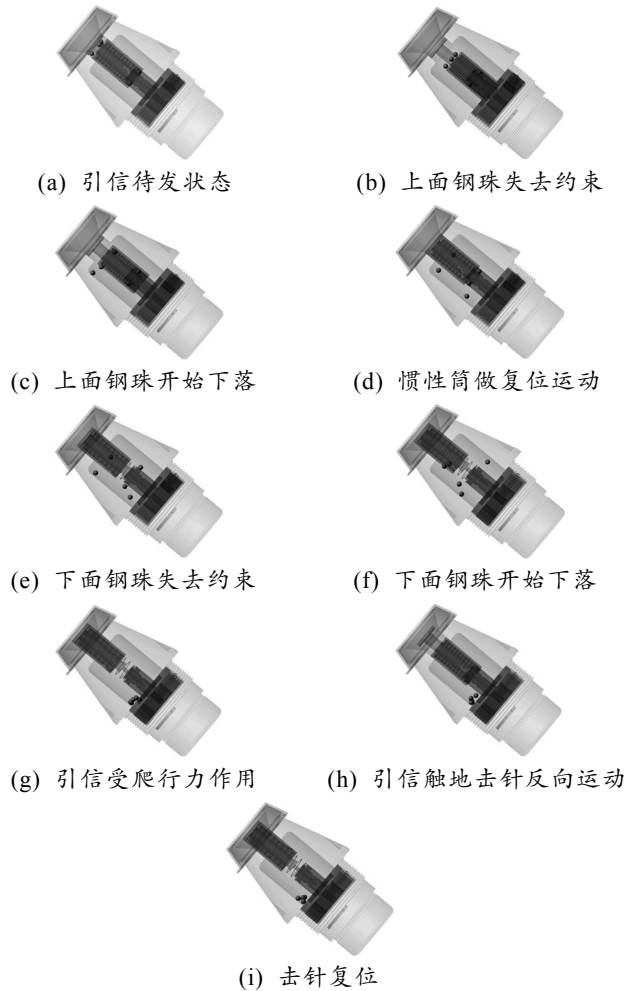


图 6 引信虚拟样机运动过程

图 6(a)为引信的待发状态；引信在内弹道阶段，击针和惯性筒分别运动到位，这样上方的 3 个钢珠失去约束，开始向侧方滑落，如图 6(b)、6(c)所示；引信在外弹道阶段，随着后坐力的消逝，惯性筒在保险簧的作用下做复位运动，同时将套管内的 2 个钢珠挤出，如图 6(d)、6(e)、6(f)；引信在外弹道阶段虽受爬行力作用，但击针和惯性筒只做轻微振动，如图 6(g)所示；引信触地时，碰击力使得击针猛烈

戳击雷管，之后由于反作用力的缘故再次复位，如图 6(h)、6(i)所示。

2.7 击针动能计算

仿真结束之后，得到击针在不同装药条件下的速度如图 7 所示。

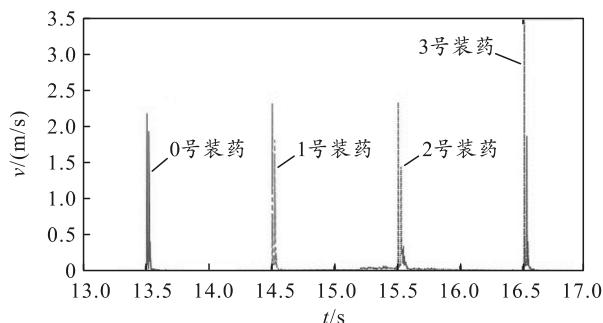


图 7 击针速度

在 0 号装药条件下，击针的最大速度为 2.443 1 m/s；在 1 号装药条件下，击针的最大速度为 2.650 2 m/s；在 2 号装药条件下，击针的最大速度为 2.776 6 m/s；在 3 号装药条件下，击针的最大速度为 3.432 2 m/s。随着装药质量的增加，弹丸速度也逐步增长，击针速度也随之增长，故 0 号装药条件下击针速度 v 最小，为 2.443 1 m/s。在 3 维建模软件 NX 中查得击针的质量 m 为 8.4 g，故击针的最小动能为：

$$E = mv^2/2. \quad (6)$$

代入数据得 $E = 2.506 \times 10^{-2}$ J。LZ-4 雷管灵敏度下限为 2.55×10^{-4} J， E 远大于 2.55×10^{-4} J，故击针在不同装药条件下均能可靠戳爆雷管。

3 迫-1 甲引信传爆序列仿真分析

引信传爆序列一般是通过一系列感度由低到高、威力由小到大的火工品组成的激发系统^[7]。迫-1 甲引信传爆序列爆炸元件由针刺雷管、导爆管(药)、传爆管(药)组成，其结构如图 8 所示。

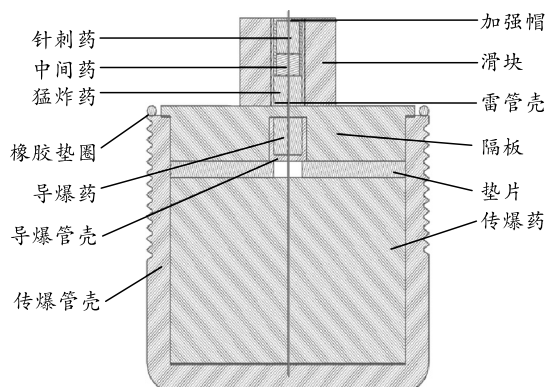


图 8 迫-1 甲引信传爆序列结构

3.1 传爆序列模型简化

为方便在 Ansys Workbench LS-DYNA 中为引信传爆序列划分网格，在不影响传爆序列工作性能的前提下，对迫-1 甲引信传爆序列进行结构简化，添加空气域并为整个模型划分网格，网格划分截面如图 9 所示。

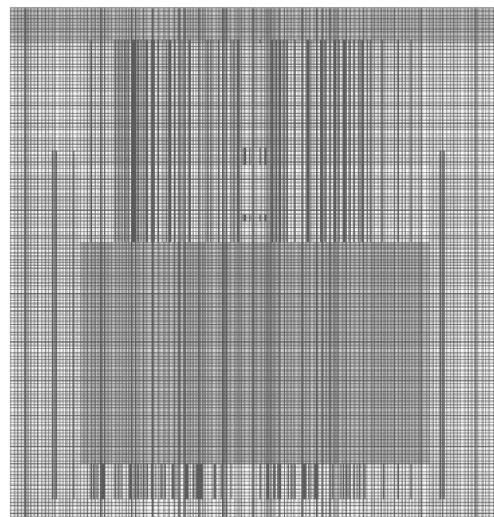


图 9 传爆序列网格截面

3.2 传爆序列模型简化

在引信传爆序列数值仿真中，由于 LZ-4 针刺雷管底层猛炸药为太安，故模型简化后的雷管药也选用太安，材料参数如表 3 所示；导爆药和传爆药选用钝化黑索今^[8]，材料参数如表 4 所示；其中： ρ 为炸药材料密度， D 为炸药材料爆速， P_{CL} 为炸药材料爆压， A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药材料 JWL 状态方程的状态参数， E_0 为炸药材料单位体积爆轰能， V_0 为炸药材料初始相对体积。隔板、雷管壳、导爆管壳、传爆管壳选用 4340 钢，材料参数如表 5 所示；滑块选用 2024 铝合金，材料参数如表 6 所示；其中： ρ 为金属材料密度， E 为金属材料弹性模量， ν 为金属材料泊松比， C_0 、 S 、 γ 为 Gruneisen 状态方程的状态参数， T_m 为金属材料熔融温度， A 为金属材料初始屈服应力， B 为金属材料硬化常数， n 为金属材料硬化指数， c 为金属材料应变速率常数， m 为金属材料热软化指数， C_p 为金属材料比热， D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为 Johnson-Cook 材料失效模型参数。空气域材料参数如表 7 所示^[9]，其中： ρ 为空气密度， PC 为空气截止压力， MU 为空气动态粘度， C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为 Linear-Polynomial 状态方程状态参数， E_0 为空气初始热能， V_0 为空气初始相对体积。

表 3 太安材料参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$D/(\text{m}/\text{s})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa
1 770	8 300	33.5	617	16.926
R_1	R_2	ω	E_0/GPa	V_0
4.4	1.2	0.25	10.1	1.0

表 4 钝化黑索今材料参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$D/(\text{m}/\text{s})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa
1 820	8 300	30	908.47	19.108
R_1	R_2	ω	E_0/GPa	V_0
4.92	1.41	0.31	10	1.0

表 5 4340 钢材料参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	E/GPa	ν	$C_0/(\text{m}/\text{s})$	S
7 850	78	0.29	4 500	1.49
γ	T_m/K	A/MPa	B/MPa	n
2.17	1 720	735	473	0.26
c	m	C_p	D_1	D_2
0.014	1.03	450	-0.80	2.1
D_3	D_4	D_5		
-0.5	0.002	0.61		

表 6 2024 铝材料参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	E/GPa	ν	$C_0/(\text{m}/\text{s})$	S
2 780	73	0.33	5 328	1.338
γ	T_m/K	A/MPa	B/MPa	n
2.0	775	369	684	0.73
c	m	C_p	D_1	D_2
0.008 3	1.7	875	0.13	0.13
D_3	D_4	D_5		
-1.5	0.011	0		

表 7 空气域材料参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	PC/Pa	$MU/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$	C_0/Pa
1.184 5	-10.0	1.844 4E-5	0
C_1/Pa	C_2/Pa	C_3/Pa	C_4
0	0	0	0.4
C_5	C_6	E_0/Pa	V_0
0.4	0	2.533 1E5	1.0

3.3 传爆序列仿真算法选择

在 LS-DYNA 中进行爆炸分析的方法主要有拉格朗日法 (Lagrange)、欧拉法 (Euler)、多物质流固耦合法 (ALE) 和光滑粒子法 (SPH) 4 种。Lagrange 算法建模简单, 可以得到清晰的物质边界, 但在仿真过程中容易导致单元发生严重畸变, 使求解中断; SPH 算法没有单元网格畸变的问题, 能模拟爆炸引起的大变形, 但目前 SPH 算法精度还不够高, 计算效率较差^[10]。ALE 算法吸收了 Lagrange 算法和 Euler 算法的优点, 又克服了其各自的缺点, 在爆炸力学仿真中得到广泛运用^[11]。迫-1 甲引信传爆序列的仿真便采用 ALE 算法。

3.4 针刺雷管爆轰过程仿真分析

在针刺雷管上端面中心处设置一个起爆点, 即冲击撞击针刺雷管的位置点。导爆药和传爆药暂时不设置起爆点, 来观察雷管药爆轰过程对隔板及导

爆药的压力作用, 其压力作用过程如图 10 所示。

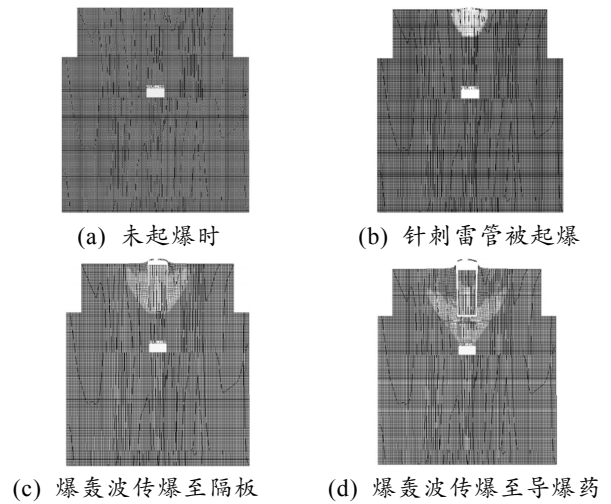


图 10 针刺雷管压力作用过程

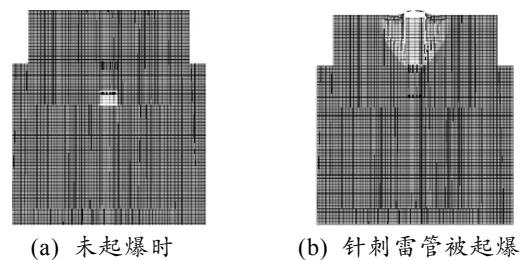
初始状态如图 10(a)所示; 雷管药在爆轰伊始, 针刺雷管加强帽上端面发生破裂, 如图 10(b)所示; 随着爆轰波的继续传播, 波阵面前沿到达隔板上端面, 如图 10(c)所示; 爆轰波经过整个导爆药, 针刺雷管加强帽上端面形成小型破片, 如图 10(d)所示。

3.5 针刺雷管与导爆药爆轰过程仿真分析

分析导爆药中心处单元压力变化情况, 发现当导爆药压力值刚达到 7.17 GPa 时, 对应的时刻为 2.25 μs 。故在导爆药上端面中心位置处添加一起爆点, 起爆时刻为 2.25 μs 。暂时不添加传爆药起爆点, 对雷管药和导爆药爆轰过程进行仿真。仿真结束后, 分析传爆药中心处单元压力变形情况, 发现导爆药中心处压力峰值均远大于钝化黑索今的临界起爆压力 7.17 GPa, 故导爆药能够可靠地起爆传爆药。当传爆药压力值刚达到 7.17 GPa 时, 对应的时刻为 3.21 μs 。故在传爆药上端面中心位置处添加一起爆点, 起爆时刻为 3.21 μs 。

3.6 传爆序列爆轰过程仿真分析

经过 3.4、3.5 节的分析, 确定了针刺雷管、导爆管(药)、传爆管(药)的起爆位置和起爆时刻, 可对整个传爆序列的爆轰过程进行分析, 如图 11 所示。



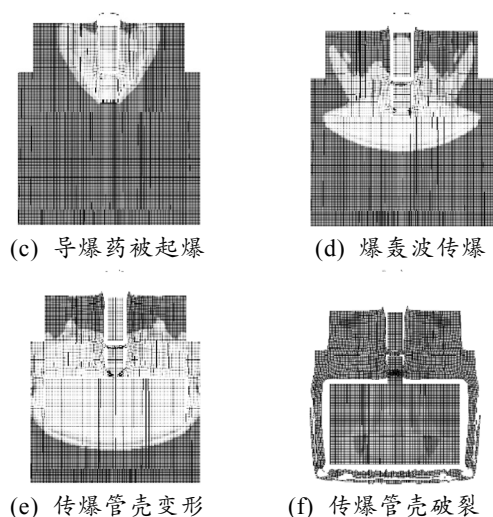


图 11 传爆序列爆轰过程

图 11(a)初始状态时除空气域有自身的气压外,其他构件均无压力;图 11(b)随着针刺雷管被起爆,雷管药生成的爆轰波开始在滑块内传播;图 11(c)随着爆轰波压垮铝制隔板,导爆药被可靠起爆;图 11(d)爆轰波继续传播,起爆传爆药,爆轰波前沿与传爆管壳接触;图 11(e)、11(f)爆轰波作用于传爆管壳使之开始破裂,随着爆轰波的持续作用,传爆管壳继续膨胀破裂。分析传爆管壳底端中心处单元压力变形情况,发现传爆管壳底端中心处峰值压力为 27.4 GPa,63 式 60 mm 迫击炮弹战斗部主装药为梯萘-80 炸药,其临界起爆压力为 3.4 GPa^[12]。峰值压力远大于梯萘-80 炸药临界起爆压力,故战斗部主装药能够被可靠起爆。

4 结论

笔者对迫-1 甲引信工作过程进行仿真模拟。即使用多体系统动力学仿真软件 MSC.ADAMS 对引信进行动力学仿真,分析机械结构运动过程,得到

击针速度随时间变化曲线;利用显式动力学仿真 Ansys WorkBench LS-DYNA 采用 ALE 算法对引信传爆序列进行仿真,分析各级爆炸元件起爆的可靠性,得到引信传爆序列爆轰历程。仿真结果可为迫-1 甲引信的改进或智能化改造提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 康克继. 迫-1 甲引信炮口安全距离的理论计算[J]. 兵工学报(引信分册), 1982(4): 55-79.
- [2] 侯强. 引信机构运动学建模及可靠性分析研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [3] 施绍鲁, 闻泉, 王雨时, 等. 针刺端输出爆轰雷管在传爆序列中起爆特性仿真[J]. 火工品, 2015(5): 1-5.
- [4] 王诚, 杜志明, 张建光, 等. 典型传爆序列分析及其仿真模拟研究[J]. 火工品, 2000(1): 14-19.
- [5] 金浩, 陈勇, 苏永成, 等. 旋翼式空气动力保险机构在迫-1甲引信中的应用设计[J]. 科技传播, 2014, 6(14): 198-199, 173.
- [6] 李世中. 引信概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 20-24.
- [7] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 322-324.
- [8] 胡风年. 引信技术实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 253-255.
- [9] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参考手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 55-340.
- [10] 李利莎, 谢清粮, 郑全平, 等. 基于 Lagrange、ALE 和 SPH 算法的接触爆炸模拟计算[J]. 爆破, 2011, 28(1): 18-22, 27.
- [11] 赵倩. 含铝炸药大隔板试验及数值模拟研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [12] 孙元虎, 黄风雷. 冲击条件下三种典型炸药临界起爆条件的实验研究[J]. 含能材料, 2004, 12(z1): 359-361.