

doi: 10.7690/bgzd.2013.07.017

引信飞片起爆多方案动态特性仿真对比

张磊, 王雨时, 闻泉

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对引信传爆管输出飞片远距离引爆弹丸主装药优化设计问题, 应用 ANSYS/LS-DYNA 软件研究了 12 种飞片起爆方案, 模拟出炸药驱动飞片起爆过程, 并得出不同形状、不同厚度飞片冲击起爆炸药时炸药端面爆轰压力与时间的曲线。结果表明: 在飞片厚度设计经验范围内, 平板型飞片冲击炸药的爆轰压力随飞片厚度增加而增大; 碟型飞片冲击炸药的爆轰压力随飞片厚度增加而减小; 锥型飞片越厚越不易引爆炸药, 而球缺型飞片越薄越不易引爆炸药, 并且对飞片厚度极为敏感。

关键词: 引信; 飞片起爆; 计算机仿真; 传爆序列; 冲击起爆

中图分类号: TJ51 **文献标志码:** A

Simulation Contrast for Dynamic Characteristics of Flyer Initiation Schemes in Fuze

Zhang Lei, Wang Yushi, Wen Quan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problem for optimization design of flyer from fuse booster initiating main charge of projectile in remote distance, twelve groups of flyer initiation schemes were simulated and researched with ANSYS/LS-DYNA software, modeling the entire initiating process of explosive driving flyer and obtaining the detonation pressure and time curve with the different shapes, different thickness flyers impacting explosive. The results show that, in flyer thickness empirical design range, the detonation pressure increases for plate flyer impacting explosive with flyer thickness increasing, but it decreases for saucer flyer; it is not easier to detonate explosive with cone flyer get thicker, and with ball-gap flyer get thinner, ball-gap flyer is very sensitive to flyer thickness.

Key words: fuse; flyer initiation; computer simulation; explosive train; impacting initiation

0 引言

飞片在引信传爆管与弹丸主装药之间远距离传递爆轰具有特殊意义和作用。例如, 小口径破甲弹弹头触发引信对破甲装药的起爆。又如, 为有助于弹丸和战斗部实现破片高毁伤效能分布, 将引信传爆管爆轰输出通过飞片传递到弹丸战斗部装药中心, 实现弹丸战斗部装药中心引爆。

文献[1]研究了微小直径装药驱动不同材料密度、厚度和直径飞片时, 飞片的运动规律。文献[2]对炸药驱动飞片通过空气隙撞击起爆带壳装药进行了初步理论研究; 文献[3]通过实验、理论分析及二维数值模拟系统地研究了曲面、球缺型飞片及自锻破片 3 种不同的飞片在球面散心爆轰波作用下的变形和运动过程; 文献[4]利用数值模拟方法研究了主装药与飞片之间的空气隙厚度变化对飞片速度和飞片变形量的影响, 得出有空气隙时飞片速度下降, 变形量增大; 文献[5]通过研究传爆序列中飞片起爆计算模型及飞片衰减效应, 得到了受主装药的临界起爆压力和能量。

这些文献多是从飞片冲击起爆机理角度进行的研究, 未能系统、深入研究飞片的优化设计问题, 特别是引信传爆管输出飞片远距离引爆弹丸主装药的性能稳健与可靠问题。笔者提出 4 种飞片形状共计 12 种设计方案, 并应用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟炸药驱动飞片起爆过程, 对这些方案进行对比研究。

1 飞片冲击起爆装置

设计飞片冲击起爆系统时需要考虑的主要因素包括: 飞片材料、飞片形状、飞片厚度及空气隙。

飞片的材料一般选用具有一定刚性和驱动时不易拉断的金属, 该结构选择铝作为飞片材料。

飞片形状采用如图 1 所示的 4 种形状: 平板型飞片、锥型飞片、球缺型飞片和碟型飞片。除平板型飞片外, 其他 3 种飞片口部切线交角都大于 100° , 这些飞片也称为自锻破片药型罩^[3]。



图 1 飞片形状

收稿日期: 2013-01-12; 修回日期: 2013-02-28

作者简介: 张磊(1987—), 男, 山西人, 硕士, 从事弹药设计及其动态特性研究。

飞片厚度 δ 一般取装药直径 d 的 0.06~0.1 倍, 即 $\delta \approx (0.06 \sim 0.1)d$, 该结构 d 选为 5 mm, 因此 δ 选为 0.2 mm、0.3 mm 和 0.4 mm。

空气隙 x 一般取装药直径 d 的 1~3 倍, 即 $x=(1 \sim 3)d$, 该结构 x 选为 10 mm。

飞片冲击起爆装置如图 2 所示, 主要由引爆药、副装药、飞片、主装药和壳体等 5 部分构成。

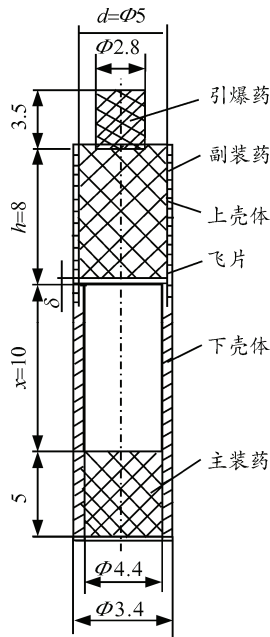


图 2 飞片冲击起爆装置

2 飞片冲击起爆理论

飞片激发猛炸药以“热点”理论为基础。当高速飞片撞击压缩非均相猛炸药时, 炸药局部产生热点, 即爆炸活化中心。如果这些热点温度足够, 经过各自所需的延滞期后发生局部爆炸反应。其中温度很高延滞期极短的热点放出热量快, 能跟上冲击波并加强冲击波; 即使延滞期较长的热点经过一段时间后放出的热量也能补充给初始冲击波, 使衰减缓慢。这样相当于有许多不同温度与不同延滞期的局部爆炸, 在不同时间加强冲击波, 形成越来越多的热点, 最后加强到全部爆轰^[6]。

在一定压力范围内, 常用炸药的温度 T 和冲击波压力 p 呈线性关系, 即

$$T - T_0 = \beta p \quad (1)$$

式中: $\beta = RT_c / E$, β 为炸药热起爆参量, R 为气体参数, E 为活化能, T_c 为静热爆炸时的临界温度; T_0 为炸药初始温度; T 为冲击波后炸药的温度; p 为冲击波压力。根据文献[7]可知

$$\delta_c = \frac{4Ea\rho\sqrt{\pi t_0}}{eR\beta\rho t_0 D} \quad (2)$$

式中: δ_c 为弗兰克-卡门涅茨基判据临界值, 表示化学反应中释放热量与传热失去热量之比;

$a = \sqrt{\lambda / (\rho c_p)}$, λ 为炸药的热传导系数; ρ 为炸药装填密度; 根据文献[7]有

$$e = \frac{\alpha SRT_c^2}{EQk_0 e^{-E/RT_c}} \quad (3)$$

式中: α 为周围介质面上的热传导系数; S 为炸药表面积; Q 为单位体积内的分解反应热; k_0 为指数前常数。式 (3) 中只有 p 、 D 、 t_0 是变量, 因此炸药起爆临界条件为

$$p^2 D^2 t_0 = \text{常数} \quad (4)$$

在一定压力范围内, 如果 p 变化 5~6 倍时, D 变化小于 20%, 则认为 D 是常数; 因此, 非均相炸药的起爆判据为

$$p^2 t_0 = \text{常数} \quad (5)$$

当高速飞片冲击炸药时, 临界起爆判据为 $p^2 t_0 = E_c$, 其中 E_c 为炸药在冲击波作用下的临界起爆能量, $p^2 t_0$ 为高速飞片与炸药碰撞产生的冲击波能量。当 $p^2 t_0 < E_c$ 时, 飞片完全不能引爆炸药; 当 $p^2 t_0 > E_c$, 飞片可能引爆炸药。

3 飞片冲击起爆数值模拟

3.1 有限元模型及仿真方案

飞片冲击起爆装置是轴对称模型, 为了节省计算时间, 建立三维 1/4 实体有限元模型。该有限元模型包括引爆药、副装药、主装药、飞片和壳体 5 部分, 如图 3 所示。

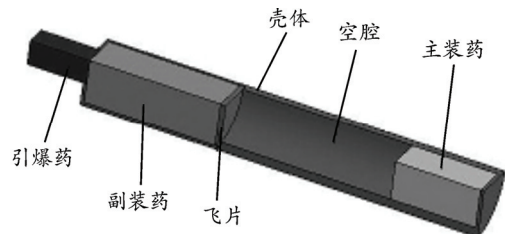


图 3 飞片冲击起爆有限元模型

在该飞片冲击起爆装置进行有限元分析时, 给出如下假设: 引爆药、副装药、主装药、飞片和壳体为均匀连续介质, 整个燃烧过程为绝热过程, 起爆方式采用中心点起爆。其数值模拟计算方案如表 1, 副装药质量为 0.235 g。

表 1 计算方案

计算方案	飞片类型	飞片厚度 d/mm
方案 1	平板型	0.2
方案 2	平板型	0.3
方案 3	平板型	0.4
方案 4	锥型	0.2
方案 5	锥型	0.3
方案 6	锥型	0.4
方案 7	球缺型	0.2
方案 8	球缺型	0.3
方案 9	球缺型	0.4
方案 10	碟型	0.2
方案 11	碟型	0.3
方案 12	碟型	0.4

3.2 材料模型及参数

1) 引爆药选用聚黑-14。

聚黑-14 采用高能炸药燃烧模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 JWL 状态方程描述, 主要参

数如表 2。

表 2 聚黑-14 高能炸药爆轰模型参数^[8]

密度 $\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	爆速 $D / (\text{m}/\text{s})$	压力 $P_{\text{CJ}} / \text{GPa}$	A / GPa	B / GPa
1.55	6 812	17.4	735	17.1
R_1	R_2	ω	E_0	V_0
5.63	1.87	0.3	0.09	1

2) 副装药和主装药选用聚黑-14。

副装药和主装药均采用点火与增长模型 MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 和 EOS_IGNITION_AND_GROWTH_OF_REACTION_IN_HE, 聚黑-14 的主要参数: 副装药密度 $\rho=1.60 \text{ g}/\text{cm}^3$, 主装药密度 $\rho=1.65 \text{ g}/\text{cm}^3$, 剪切模量 $G=4.7 \text{ GPa}$, 屈服应力 $\sigma_s=0.2 \text{ GPa}$, 具体参数如表 3。

表 3 聚黑-14 点火与增长模型参数^[9]

A/GPa	B/GPa	X_{p1}	X_{p2}	b	G	R_1/GPa	R_2/GPa	R_3	R_5
589.2	16.926	4.4	1.2	0.222	0.25	3 746	-131.3	2.46×10^{-5}	7.2
R_6	λ_{igmax}	I/s^{-1}	$G_1/\text{GPa}\cdot\text{s}^{-1}$	y	d	c	$C_{\text{vg}}/(\text{MJ}/\text{kg}\cdot\text{K})$	$C_{\text{vs}}/(\text{MJ}/\text{kg}\cdot\text{K})$	x
3.6	0.3	20	0.061	1	0.11	0.667	1×10^{-5}	2.781×10^{-5}	4
a	Q	初始温度 T_0/K	$G_2/\text{GPa}\cdot\text{s}^{-1}$	g	e	z	$\lambda_{G1\text{max}}$	$\lambda_{G2\text{min}}$	
0	0.101	298	400	0.666	0.222	1.4	0	0	

3) 飞片材料选用 1050A 纯铝带, 壳体材料选用 45 钢。

飞片和壳体材料模型均采用弹塑性随动模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC, 具体参数如表 4。

表 4 飞片和壳体弹塑性随动模型参数^[10]

材料	密度 $\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 λ	屈服应力 σ_s/MPa	切线模量 E_t/GPa	失效应变 f_s
1050A	2.70	70	0.31	1 600	75.0	0.2
45 钢	7.81	207	0.30	295	81.5	0.8

3.3 有限元仿真结果及分析

3.3.1 飞片冲击起爆爆轰过程

平板型飞片、锥型飞片、球缺型飞片和碟形飞片冲击起爆主装药的爆轰过程如图 4~图 7 所示。

图 4~图 7 清晰地展现了爆轰波的传递过程。首先引爆药起爆, 当引爆药爆轰压力达到副装药的临界起爆压力时, 引爆副装药; 副装药由燃烧转为爆轰后, 爆轰波驱动飞片, 使飞片达到足够大的速度冲击主装药; 当飞片冲击压力超过主装药的临界起爆压力时, 主装药爆炸。

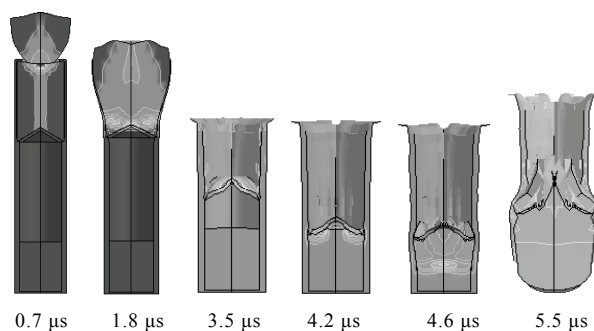


图 5 锥型飞片冲击爆轰过程

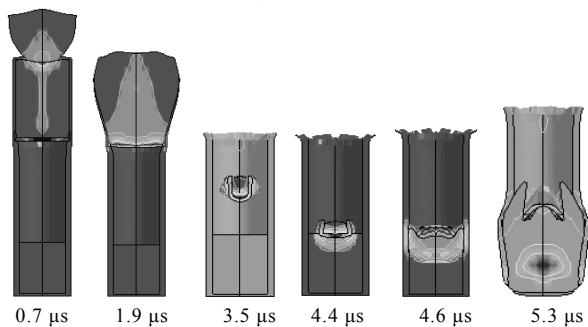


图 4 平板型飞片冲击爆轰过程

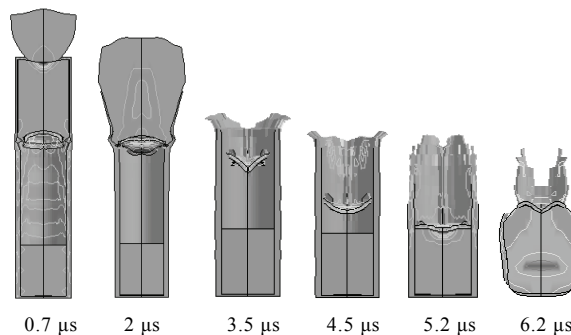


图 6 球缺型飞片冲击爆轰过程

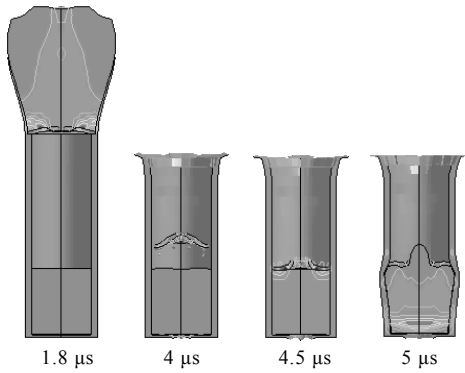


图 7 碟型飞片冲击爆轰过程

从图 4~图 7 可以看出,从副装药起爆驱动飞片到达主装药端面的时间分别为 2.5 μs、2.4 μs、3.2 μs 和 2.7 μs。在驱动飞片作用过程中,副装药为环形起爆,使飞片沿着径向各微元的速度存在梯度,从飞片的中心向边缘速度逐渐增大。在飞片冲击主装药时,主装药的边缘区域的爆轰压力大于中心区域的爆轰压力,边缘区域先起爆。

3.3.2 不同方案飞片冲击起爆的分析

飞片冲击主装药时,主装药端面爆轰压力 p 是判定主装药能否起爆的重要指标。根据文献[3],密度 $\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 的聚黑-14 在冲击波作用下的临界起爆压力 $p_c = 1.85 \text{ GPa}$, 临界起爆冲能 $E_c = 140 \times 10^{10} \text{ Pa}^2 \cdot \text{s}$ 。笔者对 12 种方案进行数值模拟,仿真结果如下:

图 8 和图 9 所示为方案 6 和方案 7 主装药端面爆轰压力。从图 8 和图 9 中可以看出,方案 6 和方案 7 主装药端面爆轰压力最大分别为 0.48 GPa 和 0.74 GPa。这是因为: 1) 方案 6 和方案 7 主装药端面爆轰压力小于 p_c ; 2) 根据数值模拟结果可知: 方案 6 和方案 7 冲击波往返传播的时间 t_0 分别为 4.4 μs 和 2.1 μs, 由式 (6) 可得, 方案 6 和方案 7 高速飞片与主装药碰撞产生的冲击波能量 $p^2 t_0$ 分别为 $101 \times 10^{10} \text{ Pa}^2 \cdot \text{s}$ 和 $115 \times 10^{10} \text{ Pa}^2 \cdot \text{s}$, 小于临界起爆冲能, 所以方案 6 和方案 7 主装药不能起爆。

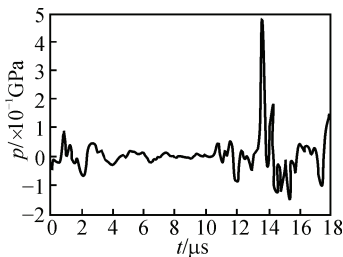


图 8 方案 6 主装药端面爆轰压力

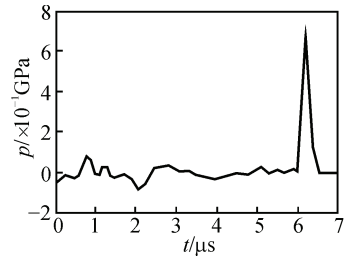


图 9 方案 7 主装药端面爆轰压力

方案 6 是 0.4 mm 的锥型飞片冲击主装药, 由于厚度为 0.4 mm 的锥型飞片端口内外半口径之差为 0.8 mm, 是飞片厚度的 2 倍, 并且副装药是环形起爆, 所以副装药驱动飞片时, 飞片边缘爆轰压力远大于中心爆轰压力, 以致于飞片边缘区域向轴线缩进, 飞片在运动过程中无法展开, 速度下降, 无法达到主装药的临界起爆压力, 无法引爆主装药。

方案 7 是 0.2 mm 的球缺型飞片冲击主装药, 副装药驱动飞片时, 由于飞片厚度较小, 副装药为环形起爆, 使飞片边缘区域向轴线缩进, 直至完全贴近中心, 形成直径减半的双层飞片, 副装药爆轰波绕过飞片, 没有完全作用于飞片, 使飞片速度越来越小, 无法达到主装药的临界起爆压力, 所以无法引爆主装药。

图 10~图 12 所示为方案 1~5、方案 8~12 的飞片冲击主装药爆轰压力图。图 10~图 12 中最小爆轰压力为 40 GPa, 大于主装药临界起爆压力。由式 (6) 计算可得: 高速飞片与主装药碰撞产生的冲击波能量 $p^2 t_0$ 均大于主装药临界起爆冲能; 因此, 均能起爆主装药。

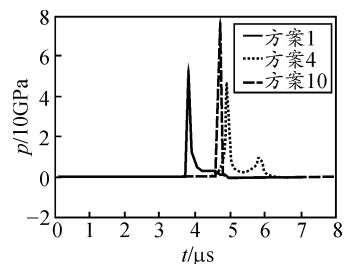


图 10 $\delta=0.2 \text{ mm}$ 飞片冲击主装药爆轰

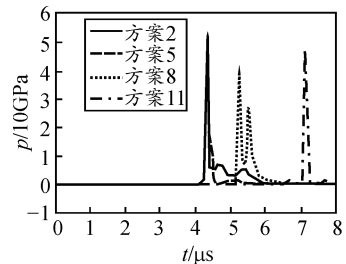


图 11 $\delta=0.3 \text{ mm}$ 飞片冲击主装药爆轰

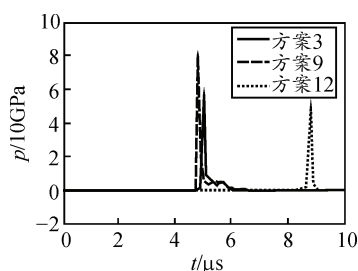


图 12 $\delta=0.4$ mm 飞片冲击主装药爆轰

从图 10~图 12 可以看出:

1) 方案 1~3 飞片冲击主装药爆轰压力分别为 48 GPa、53 GPa 和 57 GPa, 飞片冲击主装药端面时间分别为 4 μ s、4.4 μ s 和 5.1 μ s。随着飞片厚度的增加, 飞片冲击主装药的时间延长; 飞片冲击主装药端面爆轰压力增大。

2) 方案 4 和方案 5 飞片冲击主装药爆轰压力分别为 51 GPa 和 43 GPa, 飞片冲击主装药端面时间分别为 5.1 μ s 和 4.4 μ s。随着飞片厚度的增加, 飞片冲击主装药的时间缩短; 飞片冲击主装药端面爆轰压力减小, 尤其方案 6 中飞片冲击主装药爆轰压力约为方案 4 和方案 5 的 1/100, 由此可见, 锥型飞片冲击主装药时, 对飞片厚度较为敏感。

3) 方案 8 和方案 9 飞片冲击主装药爆轰压力分别为 40 GPa 和 86 GPa, 飞片冲击主装药端面时间分别为 5.3 μ s 和 4.8 μ s。随着飞片厚度的增加, 飞片冲击主装药的时间逐渐缩短; 飞片冲击主装药端面爆轰压力大幅度减小, 由此可见, 球缺型飞片冲击主装药时, 对飞片厚度极为敏感。

4) 方案 10~12 飞片冲击主装药爆轰压力分别为 79 GPa、48 GPa 和 46 GPa, 飞片冲击主装药端面时间分别为 4.8 μ s、7.2 μ s 和 8.9 μ s。随着飞片厚度的增加, 飞片冲击主装药的时间延长; 飞片冲击主装药端面爆轰压力逐渐减小。

5) 从图 10 可以看出, 厚度 $\delta=0.2$ mm 飞片冲击主装药爆轰压力从大到小依次是碟型飞片、锥型飞片、平板型飞片和球缺型飞片 (0.74 GPa); 从图 11 可以看出, 厚度 $\delta=0.3$ mm 飞片冲击主装药爆轰压力从大到小依次是平板型飞片、碟型飞片、锥型飞片和球缺型飞片; 从图 12 可以看出, 厚度 $\delta=0.4$ mm 飞片冲击主装药爆轰压力从大到小依次是球缺型飞片、平板型飞片、碟型飞片和锥型飞片 (0.48 GPa)。

综上所述, 4 种飞片中, 平板型飞片和碟型飞片冲击主装药时, 3 种厚度的飞片均能引爆主装药, 主装药端面爆轰压力变化不大; 锥型飞片冲击主装

药时, 较厚的飞片 (0.4 mm) 不能引爆主装药, 其他厚度能引爆, 爆轰压力较大; 球缺型飞片冲击主装药时, 较薄的飞片 (0.2 mm) 不能引爆主装药, 其他厚度能引爆, 爆轰压力变化极大。

4 结束语

1) 在飞片厚度经验设计范围内, 碟型飞片和平板型飞片冲击炸药时, 随着飞片厚度的变化, 冲击炸药爆轰压力逐渐变化, 没有大幅度改变, 并且能达到炸药的临界爆轰压力和临界起爆冲能; 因此, 选择飞片时, 应首选碟型飞片或平板型飞片。

2) 球缺型飞片和锥型飞片冲击起爆炸药时, 对飞片厚度敏感, 尤其是球缺型飞片, 工程应用中应慎重选择。

3) 飞片冲击起爆装置中, 飞片的设计尤为重要, 可直接影响飞片冲击起爆炸药的能力。飞片冲击起爆方式能较好实现爆炸波形控制, 使波阵面中心区域压力增高。该研究可为引信传爆管输出飞片远距离引爆弹丸主装药的稳健与可靠提供参考。

参考文献

- [1] 张少明. 微小直径装药起爆与传爆特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2009: 45-69.
- [2] Austing J L. The shock initiation of covered explosive and pyrotechnic charge by flyer plate impact across an air gap: Proceeding of 14th International Pyrotechnic Seminar[C]. Fort Halstead: RARDE, 1989: 583.
- [3] 庄仕明. 点引爆炸药驱动飞片的实验及计算研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1989: 9-19.
- [4] 金柯, 李平, 吴强, 等. 爆轰产物驱动飞片运动数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 419-424.
- [5] 王凯民, 于宪峰, 蔡瑞娇, 等. 传爆序列飞片起爆理论研究及应用[J]. 探测与控制学报, 2007, 29(4): 57-60.
- [6] 杨伟苓, 姜春兰, 李明, 等. 飞片冲击起爆系统设计与数值模拟[J]. 火箭与制导学报, 2012, 3(32): 89-92.
- [7] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 89-127.
- [8] 蒋小华, 陈清畴, 李敏, 等. 一种小型炸药驱动飞片装置的试验与数值模拟研究[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 670-673.
- [8] LSTC. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL Version 971[M]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 38-420.
- [9] Century Dynamics Inc. Century Dynamics Autodyn Theory Manual Version 6.1[M]. Houston: Century Dynamics Inc. 1986: 160-171.
- [10] 《中国航空材料手册》编辑编委会. 中国航空材料手册[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 9-17.