

文章编号: 1006-9941(2018)03-0248-07

# 爆炸箔起爆器发火阈值影响因素的数值模拟

钱石川, 甘强, 任志伟, 程年寿, 冯长根

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究由桥箔、飞片和加速膛所组成的换能组件对爆炸箔起爆器(EFI)发火性能的影响,达到降低发火阈值的目的,利用 ANSYS/AUTODYN 软件,模拟了桥箔驱动飞片起爆六硝基芪(HNS-IV)的过程。研究了桥箔厚度对飞片速度的影响,探究了桥区宽度、飞片材料(有机玻璃、陶瓷和聚酰亚胺)、飞片厚度和加速膛长度对 EFI 发火阈值的影响。结果表明,减小桥区宽度有利于降低爆炸箔起爆器的发火阈值。在输入电压相同的条件下,2  $\mu\text{m}$  厚度的桥箔驱动飞片速度最大;爆炸箔起爆器发火电压随着飞片厚度的增加先降低后增大,当厚度为 10  $\mu\text{m}$  时发火电压最低;相比于 0.225 mm、0.250 mm 和 0.275 mm 加速膛,用 0.125 mm 加速膛时发火电压最低,说明减小加速膛长度有利于降低爆炸箔起爆器的发火阈值;在加速膛孔径确定的情况下,“无限型”加速膛发火电压低于“有限型”加速膛。聚酰亚胺力学性能好、发火电压低、撞击动能小,优于其它两种材料(有机玻璃和陶瓷)。

**关键词:** 军事化学与烟火技术;爆炸箔起爆器;流固耦合;数值模拟;发火阈值

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.008

## 1 引言

通常将桥箔、飞片和加速膛称为爆炸箔起爆器(EFI)的换能组件,该核心换能组件影响着 EFI 的发火性能。通过对换能组件参数的优化设计,可以降低 EFI 的发火阈值、提高性能,从而降低系统的耐压要求,减小系统体积,对其应用有着重要的意义。1996 年杨振英等<sup>[1]</sup>从工程设计的角度,探讨了桥箔、飞片和加速膛材料及尺寸等参数对降低 EFI 发火阈值的影响。2004 年 Hwang 等<sup>[2]</sup>,2014 年陈清畴等<sup>[3]</sup>利用升降法分别对 EFI 发火阈值的影响因素进行了研究,结果均表明减小桥箔厚度、飞片厚度和加速膛长度有利于降低 EFI 的发火阈值。通过升降法调节输入电压来研究起爆系统的发火阈值是最主要的方法,但由于当前试验水平的限制,仅仅依靠试验方法是不够的,所以数值模拟逐渐成为一种重要的研究手段。2001 年任玲等<sup>[4]</sup>利用电格尼模型、流体力学模型和一维非定常可压缩流体力学模型对飞片速度进行了数值模拟,模拟结果与实测数据一致性良好。2002 年曾庆轩等<sup>[5]</sup>模

拟了起爆回路电阻对飞片速度的影响,结果表明回路电阻的增加会降低飞片速度。2011 年路禹<sup>[6]</sup>对爆炸箔起爆器的从电能输入到炸药爆轰的全过程进行了数值模拟,探究了飞片厚度对飞片速度的影响。

目前国内利用数值仿真软件研究大多基于飞片速度,对于 EFI 发火阈值影响因素的模拟研究较少,为此,本研究利用 AUTODYN 软件,采用流固耦合算法,模拟了桥箔厚度和桥区宽度、飞片材料和厚度以及加速膛长度对 EFI 发火阈值的影响,以期为 EFI 的工程应用提供理论参考。

## 2 数值仿真

### 2.1 仿真模型的建立

EFI 通过桥箔驱动飞片撞击炸药,实现炸药的冲击起爆,属于接触爆炸。对于接触爆炸问题的研究,常用的是 Lagrange 算法和流固耦合方法,但 Lagrange 算法容易发生炸药网格单元畸变而导致计算中断的现象,流固耦合方法却不存在单元畸变问题,为此本文采用流固耦合的方法进行计算。

有限元模型如图 1 所示,整个模型由基底、桥箔、飞片、加速膛、炸药和空气所组成。其中基底、飞片和加速膛采用 Lagrange 算法,桥箔、炸药和空气采用 Euler 算法,两者通过定义流固耦合进行相互作用。为了便于观测驱动过程中飞片速度和炸药内部压力随时间

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-10-31

**作者简介:** 钱石川(1993-),男,硕士研究生,主要从事冲击片雷管的数值模拟研究。e-mail: 420609435@qq.com

**通信联系人:** 甘强(1984-),男,讲师,主要从事火工品、含能材料理论研究。e-mail: ganqiang@bit.edu.cn

的变化关系,设置了10个观测点,其中炸药内部每隔0.1 mm 设置一个观测点。

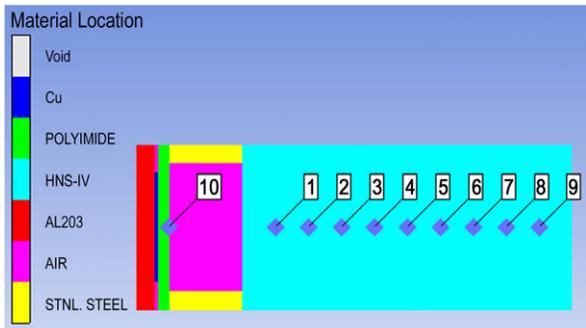


图1 爆炸箔起爆器的有限元模型

Fig.1 The finite element model of exploding foil initiators

### 2.2 材料模型

桥箔在电能作用下发生爆炸,产生高温高压等离子体从而驱动飞片运动。假设桥箔爆炸瞬间将能量注入到等离子体中,由于爆炸瞬间发生了固-液-汽-等离子体四态的相变过程,导致部分能量沉积,因此可以视为电能转化为能量部分注入到等离子体中<sup>[6]</sup>。等离子体内能  $E_m$  和电容储能  $E_0$  之间的关系可以表示为:

$$E_0 = \frac{1}{2} C_0 U^2 \quad (1)$$

$$E_m = \frac{E_0}{m_0} \cdot \delta \quad (2)$$

$$m_0 = \rho V = \rho dL^2 \quad (3)$$

式中,  $m$  为桥箔的质量, g;  $\rho$  为桥箔密度,  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $d$  为桥箔厚度,  $\mu m$ ;  $L$  为桥区尺寸, mm;  $\delta$  为能量利用率;  $C_0$  为电容,  $\mu F$ ;  $U$  为输入电压, kV。数值模型中  $C_0 = 0.2 \mu F$ ,  $\delta = 5\%$ ,  $\rho = 8.9 g \cdot cm^{-3}$ 。

飞片材料分别为陶瓷、有机玻璃和聚酰亚胺,采用冲击状态方程模拟,可以用下式<sup>[7]</sup>表示:

$$\rho = (C_i \mu + D_i \mu^2 + S_i \mu^3) (1 - \gamma \mu / 2) + \gamma \rho E \quad (4)$$

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 \quad (5)$$

式中,  $C_i$  为声速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $S$  为冲击波系数;  $\mu$  为压缩度;  $\gamma$  为 Gruneisen 系数;  $E$  为单位体积内能, J。具体参数由表1所示,有机玻璃和陶瓷参数来源于 AUTODYN Version 6.1 材料库,聚酰亚胺参数来源于文献[8]。

表1 飞片的材料模型参数

Table 1 The material model parameters of the flyer

material	$\rho / g \cdot cm^{-3}$	$C_i / m \cdot s^{-1}$	$S$	$\gamma$
lucite	1.181	2260	1.816	0.75
ceramic	3.9	6900	1.45	0.5
polyimide <sup>[8]</sup>	1.42	2737	1.41	0.76

不锈钢加速膛采用 Johnson-Cook 材料本构模型进行模拟,可以采用下式<sup>[7]</sup>表示:

$$\sigma_y = (A + B \epsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)] (1 - (T^*)^m) \quad (6)$$

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r) \quad (7)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $c$ 、 $n$ 、 $m$  为材料参数;  $\sigma_y$  为材料应力, GPa;  $\epsilon$  为等效塑性应变;  $\epsilon_0$  为参考应变;  $T^*$  为无量纲温度;  $T_m$  为材料的熔点, K;  $T_r$  为参考温度(一般选择为室温), K。不锈钢 Johnson-Cook 模型参数参见 AUTODYN Version 6.1, 其中  $\rho = 7.86 g \cdot cm^{-3}$ ,  $A = 0.792 GPa$ ,  $B = 0.51 GPa$ ,  $C = 0.014$ ,  $n = 0.26$ ,  $m = 1.03$ ,  $T = 1793 K$ 。

炸药 HNS-IV 选择 Lee-Tarver 点火与增长反应模型,该模型由未反应炸药 JWL 方程、反应产物的 JWL 方程和一个三项式反应速率方程来描述。两个 JWL 状态方程可以同时由下式<sup>[9]</sup>表示:

$$\rho = A e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + w C_v T \quad (9)$$

式中,  $V$  为相对体积;  $T$  为温度, K;  $w$  为 Gruneisen 系数;  $C_v$  为平均热容,  $10^5 MPa \cdot K^{-1}$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  是材料常数。

点火-燃烧-快反应三项式点火增长反应速率方程<sup>[9]</sup>表示为:

$$d\lambda / dt = I (1 - \lambda)^b (\rho / \rho_0 - 1 - a)^x + G_1 (1 - \lambda)^c \lambda^d p^y + G_2 (1 - \lambda)^e \lambda^g p^z \quad (10)$$

式中,  $\lambda$  为炸药的反应度,即炸药反应的质量分数, %;  $I$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $x$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $y$ 、 $e$ 、 $g$  和  $z$  是可调参数。表2给出了 HNS-IV 的具体参数<sup>[10]</sup>。

表2 HNS-IV 炸药的点火增长模型参数 ( $\rho = 1.55 g \cdot cm^{-3}$ )

Table 2 The ignition growth model parameters of HNS-IV ( $\rho = 1.55 g \cdot cm^{-3}$ )

JWL	unreacted	product	reaction rate parameters	
$A / GPa$	33318	536.25	$a = 0.266$	$I = 7.46 \times 10^{11}$
$B / GPa$	-2.5	27.02	$b = 0.667$	$z = 3.0$
$R_1$	11.5	5.4	$c = 0.667$	$x = 20.0$
$R_2$	1.5	1.8	$d = 0.111$	$y = 2.0$
$w$	0.5675	0.45	$g = 1$	$e = 0.667$

### 2.3 爆炸箔起爆器发火阈值的判定

图2和图3所示是模拟输入能量为  $1.565 kJ \cdot g^{-1}$  和  $1.566 kJ \cdot g^{-1}$  时,炸药内部各观测点压力和反应度随时间变化情况。仿真模型中,桥箔尺寸为  $0.3 mm \times 3 \mu m$ , 飞片厚  $25 \mu m$ , 加速膛尺寸为  $\Phi 0.33 mm \times 0.2 mm$ , 炸药 HNS-IV 尺寸为  $\Phi 0.45 mm \times 1 mm$ 。

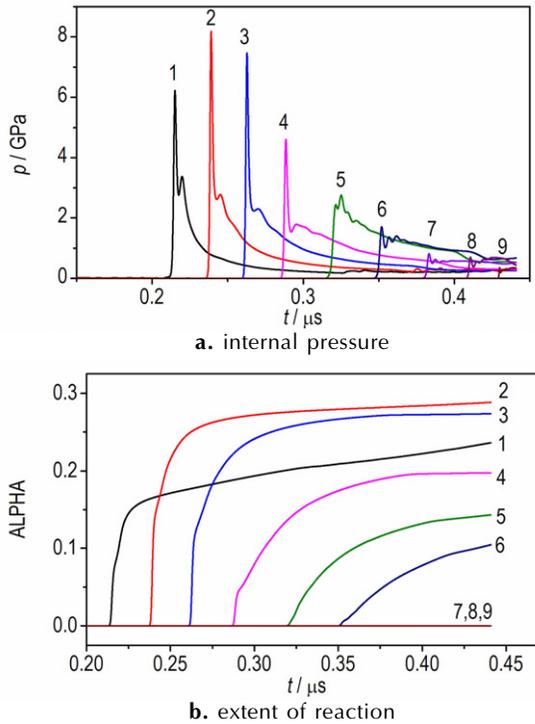


图2 1.565 kJ·g<sup>-1</sup>输入能量下炸药内部压力和反应度随时间的变化曲线

Fig.2 The variation curves of internal pressure and extent of reaction of explosives with time under the input energy of 1.565 kJ·g<sup>-1</sup>

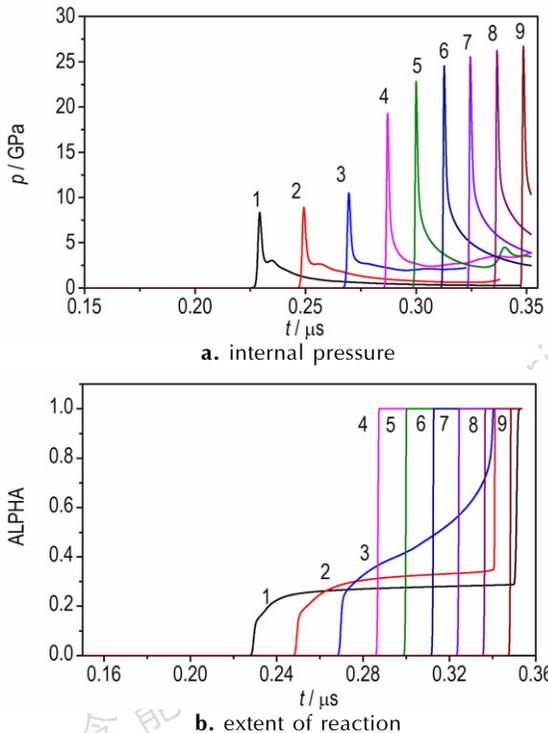


图3 1.566 kJ·g<sup>-1</sup>输入能量下炸药内部压力和反应度随时间的变化曲线

Fig.3 The variation curves of internal pressure and extent of reaction of explosives with time under the input energy of 1.566 kJ·g<sup>-1</sup>

由图2可知,输入能量为1.565 kJ·g<sup>-1</sup>时,炸药内部压力从初始的6.02 GPa开始升高,达到8.35 GPa后不断下降,且反应度均未达到1,表明在1.565 kJ·g<sup>-1</sup>的能量输入下HNS-IV炸药没有发生稳定的爆轰;由图3可知,输入能量为1.566 kJ·g<sup>-1</sup>时,炸药内部压力从6.23 GPa开始逐渐增大,在0.28 μs时压力达到了19.4 GPa,超过了炸药HNS-IV的C-J压力,且反应度均达到了1,表明HNS-IV炸药发生了稳定的爆轰。由此说明0.3 mm×3 μm桥箔驱动25 μm飞片,经过0.2 mm加速腔,起爆Φ0.45 mm×1.0 mm HNS-IV时的发火能量为1.566 kJ·g<sup>-1</sup>。通过式(1)~式(3)可以计算出,1.566 kJ·g<sup>-1</sup>的发火能量对应的发火电压为0.867 kV。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 桥箔厚度对飞片速度的影响

对EFI发火阈值随桥箔厚度的变化进行研究,考虑网格划分过小容易导致计算时间延长和出现中止现象,并且相关研究表明桥箔厚度对EFI发火阈值的影响可以由飞片速度反映<sup>[11]</sup>,为此分别模拟了2000, 2400, 2800 V电压下飞片速度随桥箔厚度的变化情况,飞片速度可由观测点10读取,结果如表3所示。仿真模型中桥箔厚度从1~6 μm变化,桥区尺寸均为0.3 mm,采用相同的材料模型、状态方程和网格划分。由表3可知,在一定的起爆能量下,桥箔厚度存在一个最佳值(2 μm),使得飞片速度达到最大。当桥箔厚度较薄时,所产生的膨胀作用不足以驱动比桥箔厚的多的飞片,飞片速度不能达到最大值;当桥箔厚度过大时,发生电爆炸时沉积的能量少,不足以产生足够的膨胀力驱动飞片,使得飞片速度减小。

表3 飞片速度随桥箔厚度的变化情况

Table 3 Variation situation of the flyer speed with bridge foil thickness

thickness of bridge foil / μm	flyer speed/m·s <sup>-1</sup>		
	2000 V	2400 V	2800 V
1	2424	3011	3303
2	2563	3125	3405
3	2546	3091	3373
4	2519	2958	3354
5	2458	2850	3343
6	2376	2795	3316

由表3可知,对于厚度在3~6 μm桥箔,相同能

量下 3  $\mu\text{m}$  桥箔有最大的驱动速度,换言之要获得相同速度,3  $\mu\text{m}$  桥箔所需要的发火电压更低,与文献结论一致<sup>[4,11]</sup>。对于 EFI 直径为 0.45 mm、桥箔厚度在 3  $\mu\text{m}$  以下的飞片速度尚未见试验报道,但从模拟结果来看,桥箔厚度为 2  $\mu\text{m}$  时驱动速度最大、发火电压最低。

### 3.2 桥区宽度对爆炸箔起爆器发火阈值的影响

仿真模型中桥区宽度分别为 0.24, 0.27, 0.30, 0.33, 0.45 mm, 桥箔厚度均为 3  $\mu\text{m}$ , 其余元件尺寸参数保持不变,在此条件下模拟 EFI 发火阈值随着桥区宽度的变化情况,结果见表 4。由表 4 可知 0.24 mm 桥区尺寸的 EFI 发火电压模拟结果为 0.851 kV, 相比于 0.33 mm 的发火电压降低了 5.4%, 说明减小桥区宽度有利于降低 EFI 的发火阈值,与已有报道结论一致<sup>[2-3]</sup>。

表 4 爆炸箔起爆器发火阈值随桥区宽度的变化情况

Table 4 Variation situation of the exploding foil initiator ignition threshold with bridge zone width

width of the bridge zone/mm	ignition energy of simulated/ $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	ignition voltage of simulated/kV
0.45	1.103	1.092
0.33	1.394	0.900
0.30	1.566	0.867
0.27	1.910	0.860
0.24	2.354	0.851

根据加速膛孔径与桥区宽度的匹配情况,可以将加速膛分为“有限型”和“无限型”两种。当加速膛孔径与桥区宽度相等时,称之为“有限型”加速膛;当加速膛孔径等于桥区宽度的 1.2 倍甚至更大时,称之为“无限型”加速膛<sup>[1]</sup>。仿真模型中加速膛孔径为 0.33 mm,所以桥区尺寸 0.33 mm 的加速膛为“有限型”,桥区尺寸 0.24 mm 的加速膛为“无限型”。由表 4 结果可知,“有限型”加速膛的发火电压高于“无限型”加速膛发火电压,说明在元件设计过程中为了达到降低发火阈值的目的,应该选择“无限型”加速膛更佳,这与文献[12]结果保持一致。

### 3.3 飞片材料对爆炸箔起爆器发火阈值的影响

有机玻璃、陶瓷和聚酰亚胺三种不同材质飞片对 EFI 发火阈值和飞片动能的模拟结果如表 5 所示。由表 5 可知,相比于陶瓷飞片和有机玻璃飞片,聚酰亚胺飞片的发火电压最小,说明三种材料中飞片材料选择为聚酰亚胺有利于降低 EFI 的发火阈值。

表 5 爆炸箔起爆器发火阈值和飞片动能随不同飞片材料的变化情况

Table 5 Variation situation of the exploding foil initiator ignition threshold and the flyer kinetic energy with different flyer materials

flyer material	ignition energy of simulated/ $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	ignition voltage of simulated/kV	kinetic energy of flyer/mJ
lucite	1.920	0.961	1.653
ceramic	16.500	2.815	6.012
polyimide	1.566	0.867	1.456

从力学性能而言,聚酰亚胺的剪切模量为 0.15 GPa<sup>[13]</sup>,比陶瓷(100 GPa)和有机玻璃(2.37 GPa)小,因而其剪切柔量大,容易被剪切,撞击炸药的作用面积最大,从而降低了 EFI 的起爆能量。从撞击炸药时的动能而言,聚酰亚胺飞片撞击炸药所需要的动能为 1.456 mJ,比陶瓷飞片和有机玻璃飞片撞击时的动能小,换言之在输入能量相同的情况下,使用聚酰亚胺更容易达到起爆动能,因此使用聚酰亚胺飞片能够降低 EFI 发火阈值。

### 3.4 飞片厚度对爆炸箔起爆器发火阈值的影响

选择聚酰亚胺飞片,模拟其厚度变化(7.5, 10, 12.5, 25, 37.5  $\mu\text{m}$ )对 EFI 发火阈值的影响,结果见表 6。由表 6 可知,37.5  $\mu\text{m}$  飞片厚度的 EFI 发火电压为 1.068 kV, 而 25  $\mu\text{m}$  飞片厚度的发火电压为 0.867 kV, 降低了 18.8%, 表明减小飞片厚度有利于降低 EFI 的发火阈值,这与文献[3]的结论一致。

表 6 爆炸箔起爆器发火阈值随飞片厚度的变化情况

Table 6 Variation situation of the exploding foil initiator ignition threshold with flyer thickness

flyer thickness/ $\mu\text{m}$	ignition energy of simulated/ $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	ignition voltage of simulated/kV
7.5	1.257	0.777
10.0	1.124	0.735
12.5	1.128	0.736
20.0	1.331	0.800
25.0	1.566	0.867
37.5	2.375	1.068

在表 6 的基础上,模拟了 7.5~37.5  $\mu\text{m}$  飞片厚度在发火电压下所驱动获得的飞片速度,结合 Yadav 的炸药临界起爆判据计算公式<sup>[14]</sup>,对临界起爆压力  $p$  和脉冲持续时间  $\tau$  进行计算和拟合,结果见表 7,拟合曲线如图 4 所示。由图 4 可知,炸药能否可靠的起爆取

决于压力  $p$  和脉冲持续时间  $\tau$ 。飞片厚度越小, 脉冲持续时间越短, 此时炸药发生爆轰所需要的压力越大。在飞片厚度相同的情况下, 脉冲持续时间基本不变, 此时炸药能否稳定起爆主要取决于撞击炸药时的压力。

表 7 不同厚度飞片的临界起爆压力和脉冲持续时间计算结果

Table 7 Calculation results of critical detonation pressure and pulse duration with different flyer thickness

flyer thickness / $\mu\text{m}$	velocity / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	particle velocity / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	detonation pressure /GPa	pulse duration / $\mu\text{s}$
7.5	1.545	0.788	4.08	0.0039
10.0	1.321	0.677	3.33	0.0055
12.5	1.267	0.649	3.16	0.0069
15.0	1.235	0.633	3.06	0.0084
17.5	1.217	0.624	3.01	0.0098
20.0	1.207	0.619	2.98	0.0112
22.5	1.163	0.597	2.84	0.0127
25.0	1.153	0.592	2.81	0.0142
30.0	1.138	0.585	2.76	0.0171
35.0	1.093	0.562	2.63	0.0201
37.5	1.056	0.544	2.52	0.0217

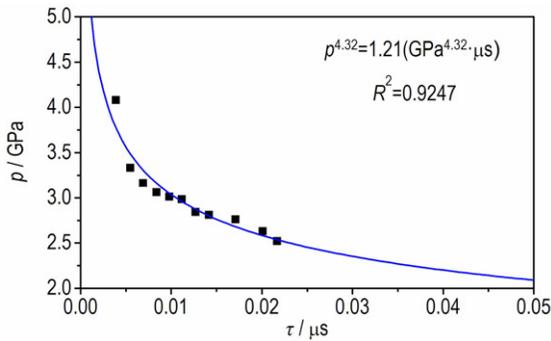


图 4 拟合后的起爆判据曲线

Fig.4 Fitting curve of initiation criterion

为了研究减小飞片厚度对于撞击压力的影响, 在  $1.2 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$  输入能量下对驱动不同厚度飞片的压力计算结果如表 8 所示。由表 8 可知, 飞片厚度从  $37.5 \mu\text{m}$  减小到  $20 \mu\text{m}$  时, 速度从  $0.865 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  增大至  $1.143 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 此时所对应的压力为  $2.78 \text{ GPa}$ , 低于发生稳定爆轰的临界压力  $2.98 \text{ GPa}$ , 没有足够的能量使得炸药发生稳定爆轰。随着飞片厚度减小至  $10 \mu\text{m}$ , 速度从  $1.143 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  上升至  $1.450 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 此时所对应的压力为  $3.76 \text{ GPa}$ , 超过了临界起爆压力  $3.33 \text{ GPa}$ , 炸药能够发生稳定爆轰。当飞片厚度从  $10 \mu\text{m}$  减小到  $7.5 \mu\text{m}$  时, 飞片速度增加了 2%, 而此时临界起爆压力增加了 22.5%, 由速度增大而带来的

压力升高不足以达到临界起爆压力, 炸药不能发生稳定爆轰。对于  $10 \mu\text{m}$  和  $12.5 \mu\text{m}$  飞片而言,  $10 \mu\text{m}$  飞片撞击炸药时的压力超过了临界起爆压力  $12.9\%$ ,  $12.5 \mu\text{m}$  飞片撞击时仅为  $1.9\%$ , 说明了在降低输入能量的情况下,  $12.5 \mu\text{m}$  飞片撞击产生的压力最先低于临界值, 不能发生稳定的爆轰, 这也就是  $12.5 \mu\text{m}$  飞片的发火电压高于  $10 \mu\text{m}$  飞片发火电压的原因。

表 8  $1.2 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$  能量下驱动不同厚度飞片时的压力和脉冲时间计算结果

Table 8 Calculation results of pressure and pulse duration of driving flyer with different thickness under the input energy of  $1.2 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$

flyer thickness / $\mu\text{m}$	velocity / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	shock pressure /GPa	criterion detonation pressure /GPa	duration of shock / $\mu\text{s}$	criterion pulse duration / $\mu\text{s}$
7.5	1.479	3.86	4.08	0.0039	0.0039
10.0	1.450	3.76	3.33	0.0054	0.0055
12.5	1.286	3.22	3.16	0.0069	0.0069
15.0	1.247	3.10	3.06	0.0083	0.0084
20.0	1.143	2.78	2.98	0.0113	0.0112
25.0	1.020	2.41	2.81	0.0144	0.0142
37.5	0.865	1.97	2.52	0.0225	0.0217

### 3.5 加速腔长度对爆炸箔起爆器发火阈值的影响

为了初步探究加速腔长度对 EFI 发火阈值的影响, 采用升降法对不同加速腔长度下 EFI 发火电压进行模拟, 结果如表 9 所示。仿真模型中加速腔长度分别为  $0.125, 0.225, 0.250, 0.275 \text{ mm}$ , 桥箔尺寸为  $0.2 \text{ mm} \times 5 \mu\text{m}$ 。由表 9 可知, 模拟结果中  $0.125 \text{ mm}$  加速腔长度的发火电压为  $0.766 \text{ kV}$ , 相比于  $0.225 \text{ mm}$  加速腔的发火电压降低了  $13.3\%$ , 表明减小加速腔长度有利于降低 EFI 的发火阈值, 与实验报道规律一致<sup>[2-3]</sup>。

表 9 爆炸箔起爆器发火阈值随不同加速腔长度的变化情况

Table 9 Variation situation of the exploding foil initiator ignition threshold with different length acceleration chamber

length of acceleration chamber/mm	ignition energy of simulated/ $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	ignition voltage of simulated/kV
0.125	1.648	0.766
0.225	2.183	0.882
0.250	2.736	0.987
0.275	3.488	1.108

图 5 所示的是飞片经过  $0.125 \text{ mm}$  和  $0.225 \text{ mm}$  加速腔时的飞片形态。由图 5 可知, 飞片被加速腔剪

切出圆弧状撞击炸药,数值模型中得到的飞片形状与实际飞片形状<sup>[3-4,13]</sup>较为相符,能够形象的描述桥箔驱动飞片冲击起爆过程。相比 0.125 mm 加速膛剪切后的飞片,0.225 mm 时的飞片弯曲程度更大。飞片的弯曲使得撞击炸药时中心区域先发生碰撞、产生热点,但由于撞击区域的滞后性,导致了能量侧向耗散,影响热点的集聚,能量不足以支撑炸药达到稳定爆轰,因此需要更高的能量来弥补<sup>[13]</sup>,这也就是 0.225 mm 加速膛的发火电压高于 0.125 mm 的原因。

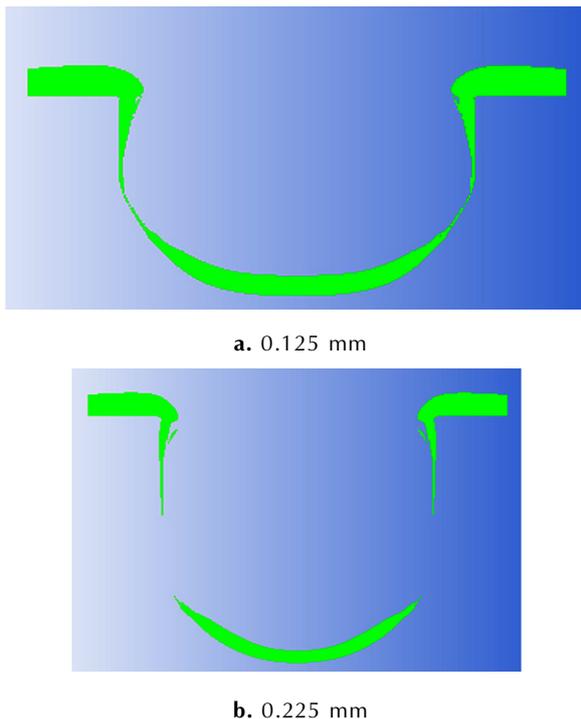


图5 不同长度加速膛内的飞片形态

Fig.5 The flyer form of different length acceleration chamber

## 4 结论

(1)数值模拟中得到的飞片形状和实际情况较为相符,说明了模型能够揭示桥箔驱动飞片冲击起爆这一过程。

(2)相比于有机玻璃和陶瓷,聚酰亚胺由于发火电压小且撞击炸药时所需要的动能小,因此更适合做爆炸箔起爆器中飞片的材料。

(3)在桥箔驱动飞片加速过程中,飞片速度随着桥箔厚度的增加先增大后减小,当桥箔厚度为 2  $\mu\text{m}$  时有最大的驱动速度。

(4)爆炸箔起爆器的发火电压随着飞片厚度的减小先降低后升高,当飞片厚度为 10  $\mu\text{m}$  时有最低的发

火电压。

(5)减小桥区宽度和加速膛长度均有利于降低爆炸箔起爆器的发火阈值。

## 参考文献:

- [1] 杨振英, 马思孝, 邓琼, 等. 冲击片雷管的参数设计[J]. 火工品, 1996 (1): 31-35.  
YANG Zhen-ying, MA Si-xiao, DENG Qiong, et al. Parameter design of slapper detonator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1996 (1): 31-35.
- [2] Hwang J S, Lee M H, Lee S M. A study on the factors affecting the firing sensitivity of exploding foil initiator. 31st International Pyrotechnics Seminar[C] // The Major International Forum for Pyrotechnics, 2004.
- [3] CHEN Qing-chou, FU Qiu-bo, CHEN Lang, et al. Parametric influences on the sensitivity of exploding foil initiators[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(4): 558-562.
- [4] 任玲, 谢高第, 杨振英, 等. 爆炸箔加速飞片的数值模拟[J]. 火工品, 2001 (1): 14-16.  
REN Ling, XIE Gao-di, YANG Zhen-ying, et al. The numerical simulation of explosive foil initiator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001 (1): 14-16.
- [5] 曾庆轩, 袁士伟, 罗承沐, 等. 爆炸箔起爆系统初始电阻对爆发电流和飞片速度影响的数值模拟[J]. 火工品, 2002(1): 43-45.  
ZENG Qing-xuan, YUAN Shi-wei, LUO Cheng-mu, et al. Numerical simulation to the effect of initiao resistance of Exploding foil initiator system to firing current and flying velocity[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2002 (1): 43-45.
- [6] 路禹. 金属桥箔电爆炸等离子体流场特征及驱动飞片起爆炸药分析[D]. 北京:北京理工大学, 2011.  
LU Yu. Analysis of metal foil electric exploding characteristic and explosive initiation by plasma driving flye[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011.
- [7] 张家雷, 刘仓理, 王伟平, 等. 三维显示有限元程序及炸药冲击起爆应用[J]. 计算力学学报, 2017, 34(2): 257-262.  
ZHANG Jia-lei, LIU Cang-li, WANG Wei-ping, et al. Three-dimensional explicit finite element code and shock initiation application[J]. *Chinese Journal of Computation Mechanics*, 2017, 34 (2): 257-262.
- [8] 曹始发, 黄寅生. 小飞片冲击起爆 HNS-IV 的临界速度的研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(4): 23-26,149.  
CAO Shi-fa, HUANG Yin-sheng. Research on threshold velocity of shock initiation of HNS-IV by small flyer[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(4): 23-26,149.
- [9] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[C] // 8th international Symposium on detonation. Albuquerque, 1985.
- [10] 仇裕成, 王健, 同红海. 钝感 HNS-IV 炸药飞片冲击起爆数值仿真[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 59-62, 65.  
QIU Yu-cheng, WANG Jian, TONG Hong-hai. Numerical simulation of flyer impacting initiation insensitive explosive HNS-IV [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2017, 36(3): 59-62, 65.
- [11] 付秋波, 蒋小华, 郭菲, 等. 爆炸箔尺寸对飞片速度的影响[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 434-436.  
FU Qiu-bo, JIANG Xiao-hua, GUO Fei, et al. Effect of exploding foil size on flyer velocity[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31 (4): 434-436.

- [12] Davies H.R, Chapman D J, Vine T A, et al. Characterization of an exploding foil initiator (EFI) system [C] // APS Shock Compression of Condensed Matter Meeting, American Institute of Physics, 2009; 283–286.
- [13] 陈清畴. 冲击片雷管作用特征及影响规律研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
- CHEN Qing-chou. Function characteristic and influence of exploding foil initiators[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [14] Yadav H S. Initiation of detonation in explosives by impact of projectiles[J]. *Defence Science Journal*, 2006, 56(2): 169–177.

## Numerical Simulation of the Factors Affecting the Ignition Threshold of an Exploding Foil Initiator

QIAN Shi-chuan, GAN Qiang, REN Zhi-wei, CHENG Nian-shou, FENG Chang-gen

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the influence of the transducer component composed of bridge foil, flyer and accelerating chamber on the exploding foil initiator (EFI) ignition performance and achieve the goal of reducing the ignition threshold, ANSYS/AUTODYN software was used to simulate the process that bridge foil driven flyer to detonate HNS-IV. The influence of bridge foil thickness on flyer speed was studied, and the influences of bridge area width, flyer material (organic glass, ceramic and polyimide), flyer thickness and accelerating chamber length on EFI ignition threshold were investigated. Results show that reducing the width of bridge area is helpful to reduce the ignition threshold of exploding foil initiator. Under the same input voltage, the speed of flyer driven by bridge foil with thickness of 2  $\mu\text{m}$  is maximum. The ignition voltage of exploding foil initiator decreases firstly and then increases with the increase of flyer thickness, and the ignition voltage is lowest when the thickness is 10  $\mu\text{m}$ . Compared with 0.225 mm, 0.250 mm and 0.275 mm accelerating chamber, ignition voltage of 0.125 mm one is lowest, so reducing the acceleration chamber length is beneficial for reducing ignition threshold of exploding foil initiator. Under the condition of determining the accelerating bore aperture, “infinite” accelerating chamber is better than “finite” accelerating chamber for reducing firing voltage of EFI. Polyimide has better mechanical properties, lower ignition voltage and lower kinetic energy compared with other two materials (organic glass and ceramic).

**Key words:** military chemistry and pyrotechnic technology; exploding foil initiator; fluid-solid coupling; numerical simulation; ignition threshold

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.008