

文章编号: 1006-9941(2018)06-0495-07

HNS-IV炸药一维冲击起爆判据的研究

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: 为了探究 p - τ 判据、James 判据和 Π - τ 判据对六硝基芪(HNS-IV)炸药一维冲击起爆判据的适用性, 以及利用飞片冲击起爆模型研究 HNS-IV 一维冲击起爆的可行性, 结合已报道实验数据对三种判据进行了拟合, 得到了最佳判据方程。通过 AUTODYN 软件模拟了不同厚度聚酰亚胺飞片对 HNS-IV 速度阈值的影响, 基于模拟结果进行判据曲线的拟合, 探究了利用飞片冲击起爆模型研究 HNS-IV 一维冲击起爆的可行性。模拟结果表明, 速度阈值的模拟结果与实验结果存在偏差, 这是由飞片驱动过程中形态和厚度变化所引起。拟合结果中 p - τ 判据、James 判据和 Π - τ 判据的 R^2 分别为 0.9813, 0.8715 和 0.9940, 其中 Π - τ 判据拟合效果最佳, 模拟结果与文献结果一致。根据 Π - τ 判据, 文献数据和模拟数据得到的最佳判据方程分别为 $\Pi=0.156+0.013/\tau$ 和 $\Pi=0.175+0.012/\tau$, 二者曲线基本重合, 说明通过数值模拟研究 HNS-IV 一维冲击起爆是可行的。

关键词: 起爆判据; 六硝基芪(HNS-IV); 数值模拟; 起爆阈值; 冲击起爆

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.06.006

1 引言

六硝基芪(HNS-IV)炸药具有良好的安全性、热安定性以及冲击起爆性能, 常作为二级装药应用于冲击片雷管和微机电系统(MEMS)微装药器件中。研究 HNS-IV 在冲击条件下的爆轰性能, 对火工品的设计具有重要的指导意义^[1]。1981 年 Schwarz^[2] 利用爆炸箔起爆器对密度为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ HNS-SF 的临界起爆速度进行了测试, 并确定了其判据形式为 $p^{2.06}\tau > K$ ($0.01 \mu\text{s} < \tau < 0.1 \mu\text{s}$, $3.8 \text{ GPa} < p < 9.8 \text{ GPa}$)。2011 年 Bowden 等^[3] 对脉冲持续时间 τ 的计算公式进行了修正, 并结合 Schwarz 的计算结果拟合得到了 HNS 的 James 判据形式 $0.2042/\Sigma + 0.0879/E = 1$ 。2015 年郭俊峰等^[4] 结合 Schwarz 和 Bowden 的数据, 拟合得到了 HNS-IV 冲击起爆判据 $p^{2.06}\tau = 1.26 \text{ GPa}^{2.06} \cdot \mu\text{s}$ ($0.0016 \mu\text{s} < \tau < 0.1 \mu\text{s}$, $3.8 \text{ GPa} < p < 27.1 \text{ GPa}$)。

目前关于 HNS-IV 炸药冲击起爆判据适用范围的研究较少, 对于利用数值仿真软件研究炸药冲击起爆

判据的报道也较少。本研究结合 Schwarz 测试所得的速度阈值数据^[2] 对 p - τ 判据、James 判据和 Π - τ 判据分别进行拟合。利用 AUTODYN 软件模拟了不同厚度的聚酰亚胺飞片冲击起爆 HNS-IV 的速度阈值, 对速度阈值的模拟值和实验值之间存在的偏差进行了讨论。同时按照 p - τ 判据、James 判据和 Π - τ 判据进行了曲线拟合, 对比模拟数据和实验数据所拟合的曲线, 探究了飞片冲击起爆模型研究 HNS-IV 一维冲击起爆的可行性。

2 HNS-IV 的冲击起爆判据

1969 年 Waller 等^[5] 首次提出了经典刺激量起爆判据:

$$K = p^n \tau \quad (1)$$

式中, p 为冲击入射的压力, GPa; τ 为脉冲持续时间, μs , 在特定的炸药和压力范围内 n 和 K 为常数。 τ 的表达式^[1]为:

$$\tau = \frac{2d}{C_i + a(V_i - U_p)} \quad (2)$$

式中, d 为飞片厚度, μm ; U_p 为飞片中质点速度, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; V_i 为飞片速度, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; C_i 为飞片中声速, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; a 为飞片材料的线性系数。

1996 年 James^[6] 在 Waller 等研究的基础上, 提出以质点比动能 Σ 来表征炸药内部冲击波阵面上质点

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2017-12-17

基金项目: 北京理工大学爆炸科学与技术重点实验室自主课题资助(YBKT18-05)

作者简介: 钱石川(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸箔起爆器的数值模拟研究。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

的动能, 可以反映出炸药爆轰成长过程, 并提出了 James 判据:

$$\frac{E_c \Sigma_c}{E + \Sigma} = 1 \quad (3)$$

式中, E 为能量密度, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$; Σ 为质点比动能, $\text{MJ} \cdot \text{kg}$, 在特定的炸药中 E_c 和 Σ_c 为常数。质点比动能 Σ 和能量密度 E 的表达式^[6]为:

$$\Sigma = \frac{U_p^2}{2} \quad (4)$$

$$E = \rho U_p \tau \quad (5)$$

2016 年 Kim 等^[7]的研究表明, 功率通量 Π 可以表征冲击过程中加载面单位面积的输入速率, 因此提出了以功率通量 Π 和脉冲持续时间 τ 共同界定的 Π - τ 判据:

$$\Pi = \Pi_c \left(1 + \frac{E_c / \Pi_c}{\tau} \right) \quad (6)$$

式中, Π 为功率通量, $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; Π_c 为临界功率通量, 在特定的炸药中为常数。 Π 的表达式^[7]为:

$$\Pi = \rho U_p \quad (7)$$

本研究在计算过程中所用参数取值为: $\rho_f = 1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[8], $\rho_e = 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[9], $C_f = 2.737 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[8], $C_e = 2.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[9], $a = 1.41$ ^[8], $b = 1.45$ ^[9]。本研究对冲击入射压力和脉冲持续时间的计算结果与文献^[2]

的对比结果见表 1。由表 1 可知, 对于冲击入射压力和脉冲持续时间, 本文计算值与文献值相差不大, 说明了参数选择的合理性。

表 1 冲击压力 p 和脉冲持续时间 τ 的计算值与文献值的对比
Table 1 Comparison of the calculation results with literature ones for shock pressure and pulse duration time

d / μm	V_f / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	reference ^[2]		this work	
		p / GPa	τ / μs	p / GPa	τ / μs
25	2.84	9.8	0.011	9.62	0.011
76	1.84	5.3	0.038	5.23	0.038
140	1.51	4.0	0.075	4.04	0.074
165	1.53	4.1	0.097	4.10	0.087
254	1.46	3.8	0.137	3.85	0.135

Note: d is the flyer thickness. V_f is the threshold velocity. p is the shock pressure. τ is the pulse duration time.

表 2 为在不同厚度的聚酰亚胺飞片冲击起爆 HNS-IV 的速度阈值^[2]的基础上, 按照式(1)~式(7)计算 p 、 τ 、 E 、 Σ 、 Π , 并分别按照 p - τ 判据、 Π - τ 判据和 James 判据进行拟合, 拟合曲线如图 1 所示。由图 1 可知, 三种拟合曲线中 Π - τ 判据的拟合度最高为 0.9950, James 判据的拟合度最低为 0.8753, 说明相比于 James 判据和 p - τ 判据, Π - τ 判据更适用于文献^[2]实验数据。

表 2 Schwarz 实验速度阈值经计算得到的不同参数值

Table 2 The values of different parameters obtained by calculation using Schwarz experimental velocity threshold data

$d/\mu\text{m}$	$V_f/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	p/GPa	$\tau/\mu\text{s}$	$E/\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$	$\Sigma/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\Pi/\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
25	2.84	9.62	0.011	0.150	1.000	1.360
76	1.84	5.23	0.038	0.184	0.427	0.483
140	1.51	4.04	0.074	0.228	0.291	0.308
165	1.53	4.10	0.087	0.275	0.298	0.317
254	1.46	3.85	0.135	0.383	0.272	0.284

Note: E is the energy per unit area. Σ is the specific kinetic energy. Π is power flux.

3 数值仿真

3.1 仿真模型的建立

以 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 HNS-IV 为研究对象, 采用非线性有限元计算软件 AUTODYN, 通过 Lee-Taver 点火增长模型, 对飞片冲击起爆 HNS-IV 过程进行数值模拟。图 2 所示为计算所用的模型图, 整个模型由飞片、炸药和空气域所组成, 其中飞片采用 Lagrange 算法, 炸药和空气采用 Euler 算法, Lagrange 算法和 Euler 算法之间采用流固耦合进行相互作用^[10]。为了便于观

测炸药内部压力变化, 沿着装药轴线方向每隔 0.3 mm 设置一个观测点, 共设置了 7 个观测点。

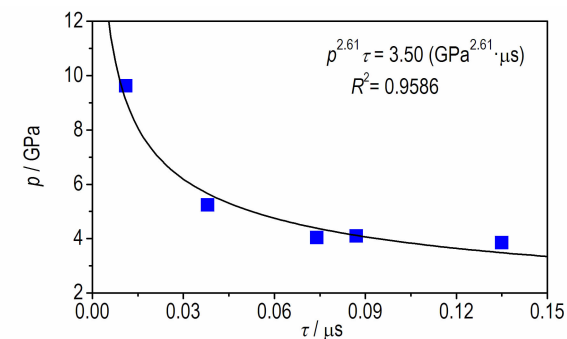
3.2 材料状态方程的选择

聚酰亚胺飞片采用冲击状态方程进行模拟, 参数由文献^[8]提供, 其中 $\rho = 1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $s = 1.41$, $C = 2.737 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

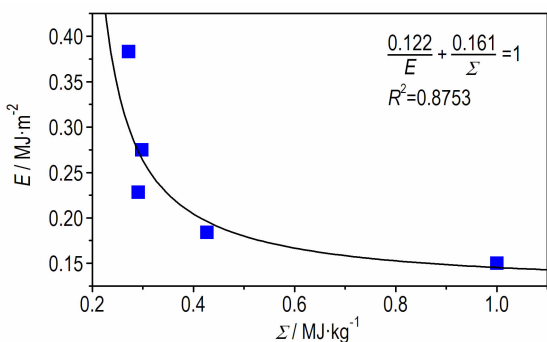
HNS-IV 炸药采用三项式点火与增长反应模型。该模型由未反应炸药 JWL 状态方程、爆轰产物的 JWL 方程和三项式点火增长反应速度方程来描述。未反应炸药 JWL 状态方程和爆轰产物状态方程^[10]为:

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + wC_v T \quad (8)$$

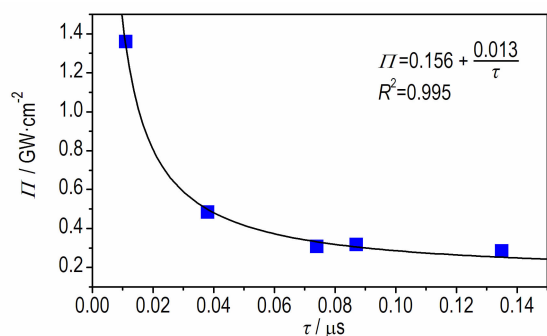
式中, V 是相对比容; T 为温度, K; w 为 Gruneisen 系数; C_v 为平均热容, $10^5 \text{ MPa} \cdot \text{K}^{-1}$; A, B, R_1, R_2 是待定参数。



a. p - τ criteria



b. James criteria



c. II - τ criteria

图 1 三种不同判据的拟合情况

Fig. 1 The fitting situations of three different criteria

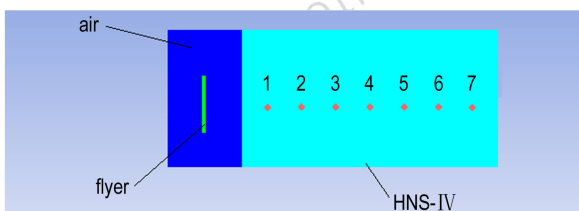


图 2 飞片冲击起爆 HNS-IV 仿真模型

Fig. 2 The simulation model of initiating HNS-IV by flyer impact

点火-燃烧-快反应三项式点火增长反应速率方

程^[11]为:

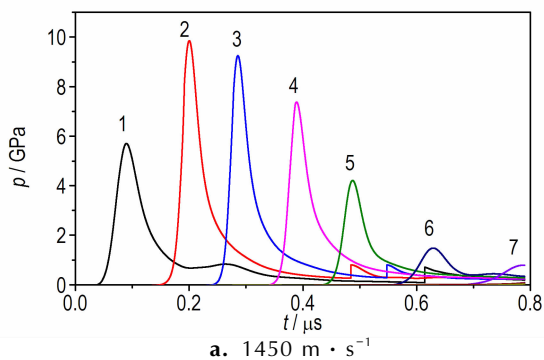
$$d\lambda/dt = I(1-\lambda)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1(1-\lambda)^c F^d P^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g P^z \quad (9)$$

式中, λ 为炸药的反应度; t 为时间, μs ; ρ 为密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_0 为初始密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $I, G_1, G_2, a, b, x, c, d, y, e, g$ 和 z 是常数, HNS-IV 的点火与增长反应模型参数来源于文献[8]。

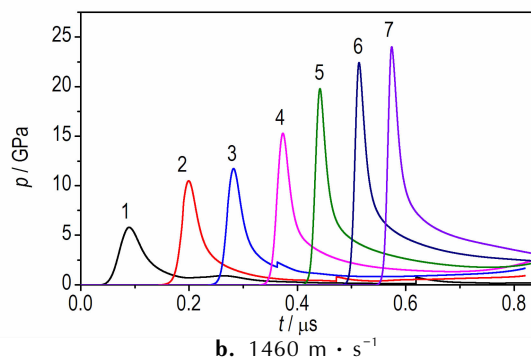
3.3 HNS-IV 临界起爆速度的判定

相关研究表明, 在研究飞片冲击起爆 HNS-IV 作用过程中, 可以用飞片速度来表征 HNS-IV 炸药的起爆阈值^[1]。结合文献[2]所报道的飞片尺寸, 利用升降法不断调整飞片撞击 HNS-IV 时的速度, 通过观测炸药内部压力变化来判定炸药是否发生爆轰, 来获得不同厚度聚酰亚胺起爆 HNS-IV 的速度阈值。

如图 3 所示的是 $\Phi 1.57 \text{ mm} \times 140 \mu\text{m}$ 尺寸聚酰亚胺飞片, 分别在 $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1460 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度下撞击 HNS-IV, 各观测点的压力变化情况。由图 3 可知, 当飞片以 $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度冲击 HNS-IV 时, 压力从初始的 5.94 GPa 开始升高, 达到 9.85 GPa 后开始不断下降, 由此说明飞片在 $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下冲击 HNS-IV 没有形成稳定的爆轰, 炸药没有被起爆。当飞片以 $1460 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度冲击 HNS-IV 时, 炸药内部



a. $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



b. $1460 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图 3 飞片以不同速度冲击时的压力变化情况

Fig. 3 The change situation of pressure during flyer impact with different velocity

压力从初始的 6.12 GPa 开始逐渐增大, 在 0.47 μs 时压力为 20.2 GPa, 超过了 HNS-IV 的 C-J 压力, 且压力不断升高, 表明炸药内部发生了稳定的爆轰。由此可以说明 1460 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是 $\Phi 1.57 \text{ mm} \times 140 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺飞片冲击起爆 HNS-IV 的阈值速度, 相比于实验值^[2] (1510 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 相差 3.3% 左右, 说明了仿真参数的合理性。

4 数值模拟结果分析

4.1 飞片厚度对 HNS-IV 起爆速度阈值的影响

模拟了不同厚度的聚酰亚胺飞片冲击起爆 HNS-IV 的速度阈值, 并与文献[2]中的实验数据进行对比, 结果见表 3, 数值模型中飞片直径均为 1.57 mm。由表 3 可知, 随着飞片厚度的增大, 速度阈值下降; 当飞片厚度超过 140 μm 时, 速度阈值变化缓慢。这主要是因为随着飞片厚度的增大, 脉冲持续时间增大, 此时炸药所需要的起爆压力减小, 因而速度阈值下降; 随着飞片厚度的进一步增大, 脉冲持续时间的增大对起爆压力变化的幅度减小, 因而速度阈值下降缓慢。

表 3 不同厚度的聚酰亚胺飞片起爆速度阈值变化情况

Table 3 The change situation of initiation velocity threshold of polyimide flyer with different thickness

d_i / μm	simulation velocity threshold / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	experimental velocity threshold / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[2]	deviation /%
25	2920	2840	2.8
76	1900	1840	3.3
140	1460	1510	-3.3
165	1420	1530	-7.2
254	1370	1460	-6.2

由表 3 可知, 实验的速度阈值和模拟速度阈值存在一定的偏差。为了研究产生偏差的原因, 根据文献^[2]实际所使用的爆炸箔起爆器进行建模, 对桥箔电爆炸驱动飞片加速过程进行数值模拟, 研究了爆炸箔分别驱动 25, 76, 140, 165 μm 和 254 μm 飞片时, 飞片形态和厚度的变化。由于其余厚度 (76, 140, 165 μm 和 254 μm) 飞片的形态和厚度变化与 25 μm 飞片情况相似, 为了避免重复赘述, 因此只对 25 μm 飞片进行具体分析。

图 4 所示的是 25 μm 的聚酰亚胺飞片在驱动过程中形态的变化情况。由图 4 可见, 当 $t=0.03 \mu\text{s}$ 时, 飞片被加速腔剪切完成, 形成一维平板状飞片在加

速腔中加速; 当 $t=0.186 \mu\text{s}$ 时, 飞片恰好从加速腔中飞出, 可以发现飞片靠近加速腔孔径一侧发生了一定的弯曲。这主要是因为数值模型中爆炸箔桥区宽度和加速腔孔径尺寸一致, 使得飞片能够均匀受力, 从而在初始阶段被剪切出平板状飞片, 与文献[12]中所描述的情况一致; 随着飞片在加速腔中的飞行, 等离子体压力降低, 加速腔内孔阻力对于飞片形态的影响逐渐出现, 飞片受到了非均匀力作用, 造成了飞片形态发生变化, 与文献[13]观点一致。

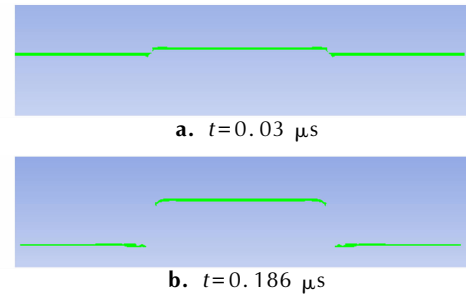


图 4 25 μm 飞片在加速腔中加速时飞片形态

Fig. 4 The flyer shapes in accelerating chamber of 25 μm flyer

25 μm 的聚酰亚胺飞片在驱动过程中厚度的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知, 飞片厚度从开始被等离子体驱动到撞击炸药为止, 厚度发生了动态变化, 当 $t=0.009 \mu\text{s}$ 时厚度最小。这是因为聚酰亚胺飞片属于有机材料, 在驱动过程中存在一个材料的动态响应过程。在冲击压缩波作用下, 飞片发生塑形变化, 厚度逐渐减小至 19.4 μm ; 当冲击波达到飞片自由面时, 飞片在反射形成的稀疏波作用下回弹, 厚度又逐渐增大, 与文献[13]的观点一致。

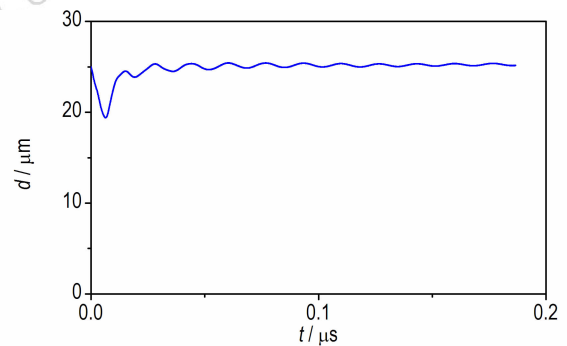


图 5 驱动 25 μm 飞片加速过程中厚度的变化

Fig. 5 The change in thickness during the acceleration process of 25 μm flyer

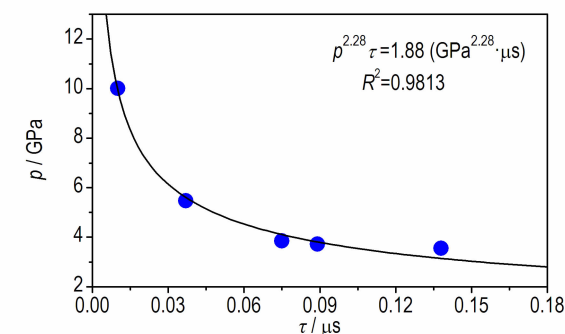
飞片形态的变化导致撞击炸药时发生能量侧向耗散, 影响热点集聚^[12]; 飞片厚度的变化影响了撞击炸

药时的作用面积,从而影响热点数量变化^[13]。根据本文对于爆炸箔驱动飞片过程的数值模拟研究可知,由于飞片形态和厚度的变化,使得实验数据和模拟数据存在一定的偏差。

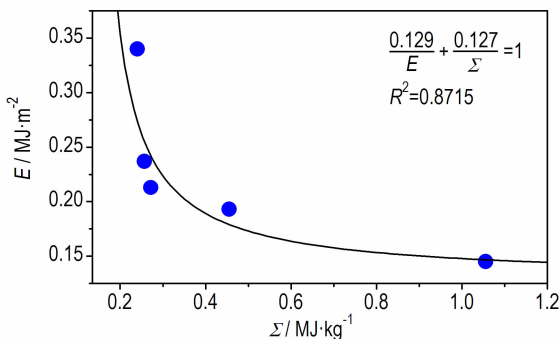
表 4 模拟的速度阈值经计算得到的不同参数值

Table 4 The values of different parameters obtained by calculation using the simulation velocity threshold

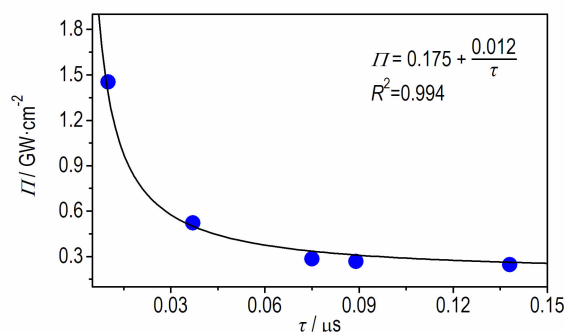
$d/\mu\text{m}$	$V_f/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	p/GPa	$\tau/\mu\text{s}$	$E/\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$\Sigma/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\Pi/\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$
25	2.92	10.01	0.010	0.145	1.056	1.454
76	1.90	5.47	0.037	0.193	0.455	0.522
140	1.46	3.85	0.075	0.213	0.272	0.284
165	1.42	3.72	0.089	0.237	0.257	0.267
254	1.37	3.55	0.138	0.340	0.240	0.246



a. p - τ criteria



b. James criteria



c. Π - τ criteria

图 6 三种不同判据的拟合情况

Fig. 6 The fitting situations obtained by three different criteria

4.2 HNS-IV 冲击起爆判据的模拟结果

表 4 所示的是根据模拟得到的速度阈值经计算所得的不同参数,并按照 p - τ 判据、 Π - τ 判据和 James 判据进行拟合,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,三种判据中 Π - τ 判据的拟合效果最佳,而 James 判据拟合效果最低。这主要是因为数值模拟中采用的是平板型飞片,属于一维冲击起爆。James 判据主要是建立在弯曲飞片冲击起爆的基础上,因而对于弯曲飞片冲击起爆的解释更为合适,对于一维冲击起爆解释尚显不足; p - τ 判据在脉冲时间较小的情况下契合度较高,随着脉冲时间的增大,契合度降低,故 p - τ 判据更适合一维短脉冲起爆; Π - τ 判据的方程形式上与 p - τ 判据相似,从本研究拟合情况来看,其对于一维冲击起爆适用性更好。

4.3 HNS-IV 冲击起爆判据的讨论

表 5 所示是文献数据^[2]和模拟数据依照三种判据形式所拟合得到的曲线方程及拟合度情况。由表 5 可知,文献实验数据的拟合结果和模拟数据的拟合结果均表明 Π - τ 的拟合情况最佳。实验数据和模拟数据拟合的 Π - τ 曲线对比情况如图 7 所示。由图 7 可见,两条曲线基本重合,说明了通过平板飞片冲击起爆 HNS-IV 数值模型来研究 HNS-IV 一维冲击起爆问题是可行的。

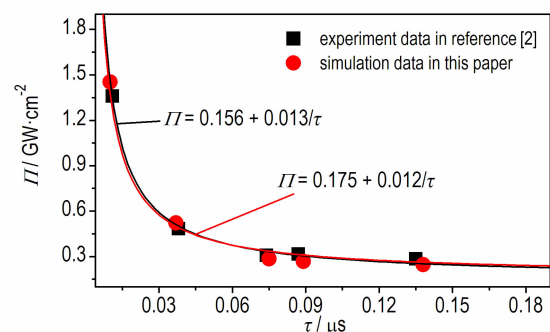


图 7 实验速度阈值和模拟速度阈值拟合的 Π - τ 曲线对比情况

Fig. 7 Comparison of the Π - τ curves obtained by fitting the experimental and simulated velocity threshold

表 5 不同判据曲线拟合结果

Table 5 The results of fitting curves using different criteria

criterion name	experiment data ^[2]		this work	
	fitting criterion curve	R^2	fitting criterion curve	R^2
James	$0.122/E+0.161/\Sigma=1$	0.8753	$0.129/E+0.127/\Sigma=1$	0.8715
$p-\tau$	$p^{2.61}\tau=3.50(\text{GPa}^{2.61}\cdot\mu\text{s})$	0.9586	$p^{2.28}\tau=1.88(\text{GPa}^{2.28}\cdot\mu\text{s})$	0.9813
$\Pi-\tau$	$\Pi=0.156+0.013/\tau$	0.9950	$\Pi=0.175+0.012/\tau$	0.9940

5 结 论

(1) 利用 AUTODYN 软件能够模拟聚酰亚胺飞片冲击起爆 HNS-IV 这一过程, 仿真结果与实验研究结果一致性较好, 说明仿真结果真实可靠。

(2) 随着飞片厚度的增加, HNS-IV 炸药的速度阈值降低; 当飞片厚度超过 140 μm 后, 速度阈值变化缓慢。说明了当飞片厚度超过一定程度后, 脉冲持续时间的影响程度减弱。

(3) 在电爆炸驱动过程中, 飞片受加速膛内孔阻力影响会发生一定的弯曲, 受材料动态响应影响飞片厚度会发生变化。

(4) 对实验速度阈值依照 $p-\tau$ 判据、James 判据和 $\Pi-\tau$ 判据进行拟合, 结果表明采用 $\Pi-\tau$ 判据对 HNS-IV 一维冲击起爆研究更合适, 数值模拟结果与文献结果一致。

(5) 实验速度阈值和模拟速度阈值分别按照 $\Pi-\tau$ 判据进行拟合, 所得曲线基本重合, 说明了通过飞片冲击起爆 HNS-IV 模型研究 HNS-IV 一维冲击起爆是可行的。

参考文献:

- [1] 同红海, 奥成刚, 韩克华, 等. 超细 HNS-IV 炸药的窄脉冲击起爆判据研究[J]. 火工品, 2011 (2): 32-36.
TONG Hong-hai, AO Cheng-gang, HAN Ke-hua, et al. Study on the short pulse initiation criterion of ultrafine HNS-IV explosive[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011 (2): 32-36.
- [2] Schwarz A C. Study of factors which influence the shock initiation sensitivity of Hexanitrostilbene (HNS)[R]. Sandia National Labs, 1981.
- [3] Bowden M D. Determination of critical energy criteria for Hexanitrostilbene using laser-driven flyer plates[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2008, 7070: 707004-707004-7.

- [4] 郭俊峰, 曾庆轩, 李明愉, 等. 叠氮化铜驱动飞片起爆 HNS-IV 的研究[J]. 火工品, 2015(6): 1-4.
GUO Jun-feng, ZENG Qing-xuan, LI Ming-yu, et al. Study on HNS-IV initiation by flyer driven by cupric azide[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(6): 1-4.
- [5] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of Heterogeneous explosive[J]. *Explosivestoffe*, 1969, 17(1): 9.
- [6] James H R. An extension to the critical energy criterion used to predict shock initiation thresholds[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21: 8-13.
- [7] Kim S, Miller C, Horie Y, et al. Computational prediction of probabilistic ignition threshold of pressed granular octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 2, 3, 5-tetrazocine (HMX) under shock loading[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(11): 734-744.
- [8] Tarver C M, Chidester S K. Ignition and growth modeling of short pulse shock initiation experiments on fine particle Hexanitrostilbene(HNS)[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(5): 52044-52049.
- [9] Ebenhoch S, Nau S, Haring I. Validated model-based simulation tool for design optimization of exploding foil initiators[J]. *Journal of Defense Modeling & Simulation*, 2014, 12(2): 189-207.
- [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] 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.
- [12] 张玉若, 金丽, 高艳, 等. 爆炸箔特征参数匹配关系研究[J]. 火工品, 2011(1): 20-22.
ZHANG Yu-ruo, JIN Li, GAO Yan, et al. Study on matching relationship of characteristic parameter of exploding foil[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011 (1): 20-22.
- [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.

Study on One-dimensional Shock Initiation Criterion of HNS-IV Explosive

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)

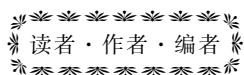
Abstract: To explore the applicability of the p - τ criterion, James criterion and Π - τ criterion to the one-dimensional shock initiation criterion of 2,2',4,4',6,6'-hexanitrostilbene (HNS-IV) explosive, and study the feasibility of one-dimensional shock initiation of HNS-IV by flyer shock initiation model. The three criteria were fitted combined with reported experimental data and the best criterion equation was obtained. The influence of polyimide flyer with different thickness on HNS-IV velocity threshold was simulated by AUTODYN software, and the fitting of criterion curves were carried out based on the simulation results. The feasibility of investigating the one-dimensional shock initiation of HNS-IV was explored by flyer shock initiation model. The simulation results show that there is a deviation between the simulation result of the velocity threshold and the experimental one, which is caused by the change of shape and thickness during the flyer driving. In the fitting results, The R^2 of p - τ criterion, James criterion and Π - τ criterion are 0.9813, 0.8715 and 0.9940, respectively. The fitting result of Π - τ criterion is the best, and the simulation result is consistent with the literature ones. According to Π - τ criterion, the best criterion equation obtained by literature data and simulation data is $\Pi=0.156+0.013/\tau$ and $\Pi=0.175+0.012/\tau$, respectively, two curves basically coincide with each other, indicating that investigating the one-dimensional shock initiation of HNS-IV is feasible through numerical simulation.

Key words: initiation criterion; 2,2',4,4',6,6'-hexanitrostilbene (HNS-IV); numerical simulation; detonation threshold; shock initiations

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.06.006



《含能材料》“含能共晶”征稿

含能共晶是不同含能分子通过氢键等相互作用力形成的具有稳定结构和性能分子晶体。含能共晶充分组合了单质含能分子的优点,呈现出感度低,综合性能优良的特点,具有潜在的应用前景,共晶研究已经引起国内外含能材料学界的高度关注。为推动含能共晶的研究和交流,本刊特推出“含能共晶”专栏,主要征稿范围包括含能共晶晶体设计与性能预测、含能共晶的制备、结构解析、性能等。来稿请注明“含能共晶”专栏。

《含能材料》编辑部