

文章编号: 1003-1480 (2023) 01-0022-06

飞片参数及冲击角度对能量激发的影响研究

王云鹏¹, 郭 晋², 李 帅¹, 王庆华³, 王 斌⁴, 王 端¹

(1. 中北大学, 山西 太原, 030051; 2. 西安机电信息技术研究所, 陕西 西安, 710065; 3. 驻太原地区第三军代室, 山西 太原, 030018; 4. 山西北方兴安化学工业有限公司, 山西 太原, 030003)

摘 要: 为研究飞片参数及冲击角度对冲击片雷管作用性能的影响, 采用 Solidworks 和 LS-DYNA 软件对飞片剪切过程和不同角度冲击炸药的起爆效果进行了仿真, 并通过仿真和试验验证飞片厚度和直径对其冲击速度的影响。结果表明: 加速膛硬度越高, 飞片成形状况越好; 飞片最大速度与飞片直径、厚度呈负相关, 但飞片厚度过小时易发生破碎现象; 入射角度为 0°, 30°, 60°, 90° 的飞片冲击 HNS 药柱均能达到稳定爆轰, 以 0° 入射角冲击时爆轰效果最佳。

关键词: 冲击片雷管; 聚酰亚胺飞片; 有限元模拟; 飞片参数; 冲击角度; 爆轰性能

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.005

Study on the Effect of Flyer Parameters and Impact Angel on Energy Excitation

WANG Yun-peng¹, GUO Jin², LI Shuai¹, WANG Qing-hua³, WANG Bin⁴, WANG Duan¹

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. Xi'an Institute of Mechanical and Electrical Information Technology, Xi'an, 710065; 3. The Third Military Representative Office in Taiyuan, Taiyuan, 030018; 4. Shanxi North Xingan Chemical Industry Co. Ltd., Taiyuan, 030003)

Abstract: In order to study the effect of flyer parameters and impact angle on the action performance of slapper detonator, Solidworks and LS-DYNA were used to simulate the shear process of the flyer and the initiation effect of the explosive under different impact angles. And the influence of thickness and diameter of the flyer on its impact velocity was studied through simulation and test. The results show that the higher the hardness of the accelerator chamber, the better forming of the flyer; The maximum velocity of the flyer is negatively related to its diameter and thickness, but the flyer is easy to break when the thickness is too small; The HNS grain can achieve stable detonation when it is impacted by flyer with impact angle of 0°, 30°, 60° and 90°, and the detonation effect is the best when the impact angle is 0°.

Key words: Slapper detonator; Polyimide flyer; Finite element simulation; Flyer parameters; Impact angle; Detonation performance

飞片作为冲击片雷管的重要部件之一, 在换能过程中主要起传递起爆能量、隔离换能元与钝感装药的作用, 具备剪切成形性能好、耐冲击、不易破碎、绝缘等特点。由于飞片尺度小(厚度多为微米级)且位于冲击片雷管的中心部位, 难以应用仪器捕捉其成形及冲击起爆过程, 需借助模拟手段进行研究。Seokbin

等^[1]采用 ANSYS 格尼模型进行模拟, 与爆震后数据和二维飞行投影数据对比, 分析了飞片宽度对飞行速度的影响规律; 陈清畴等^[2]通过模拟不同形状飞片冲击起爆装药的过程, 分析了飞片形状对雷管输出能力的影响规律; 王寅等^[3]通过摸底试验测试了不同结构飞片的速度, 得到了飞片绝缘程度对其速度的影响规

收稿日期: 2022-05-19

作者简介: 王云鹏(1998-), 男, 在读硕士研究生, 从事先进火工品技术研究。

通讯作者: 王端(1973-), 男, 研高工, 从事先进火工品技术研究。

律;任志伟等^[4]采用 AUTODYN 中 Lee-Tarver 点火增长模型对不同材料飞片冲击 HNS-IV 的过程进行了仿真,得到了 3 种不同材料飞片冲击点火的阈值速度。贺翔等^[5]采用 AUTODYN 建模,分析了装药直径、装药高度、加速膛孔径、钛飞片厚度等参数与飞片速度和能量的关系,并进行了试验验证。Cong Xu 等^[6]对桥箔爆炸驱动甲基 C-Cu 飞片的过程进行了仿真分析,得出 25~3.6 μm 甲基 C-Cu 飞片起爆 HNS-IV 的阈值速度为 2 300 m/s。然而,当前研究大多倾向于飞片参数对冲击片雷管性能的影响,但对飞片成形规律及飞片入射角度对起爆效果的影响研究较少。

本文对飞片剪切成形和不同入射角度飞片冲击起爆炸药过程进行了仿真和试验研究,分析了加速膛材料对飞片剪切效果、飞片直径和厚度对其冲击速度以及不同入射角度飞片对炸药冲击起爆效果的影响,为冲击片雷管的参数设计及优化提供参考。

1 冲击片雷管结构及工作原理

冲击片雷管主要由壳体、电极塞、基片、桥箔、飞片、加速膛、HNS 药柱、密封片等部分组成,其结构示意图如图 1 所示。其工作原理为:通过对电极塞脚线加电,使桥箔在电流作用下迅速升温,达到起爆温度时发生电爆炸,经相态变化形成等离子体;等离子体体积迅速增大,在加速膛和基片的挤压下,剪切形成高速运动的飞片,冲击起爆 HNS 药柱。

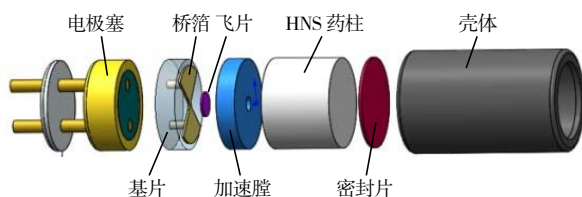


图 1 冲击片雷管结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of slapper detonator structure

2 有限元模型

2.1 网格划分

采用 Solidworks 软件对冲击片雷管建模。由于本文主要研究飞片成形及冲击姿态,为简化计算模型,

不考虑桥箔爆炸过程的影响,采用 Hypermesh 软件划分网格,选用刚度小、精度高的六面体网格单元。为达到更高的精度要求,通过扫描方法控制网格大小和分布,对接触位置和重点观测位置进行网格加密处理,模型共计 1 418 978 个单元。简化后的模型包括飞片、壳体、加速膛、HNS 药柱、空气 5 部分,如图 2 所示。在飞片成形阶段,采用 JWL 状态方程描述炸药爆炸能量等效桥箔爆轰能量,采用流固耦合方式建模,炸药和空气采用欧拉算法,飞片、壳体、加速膛采用拉格朗日算法,设置单点起爆,对飞片等拉格朗日结构体均采用实体方式建模。

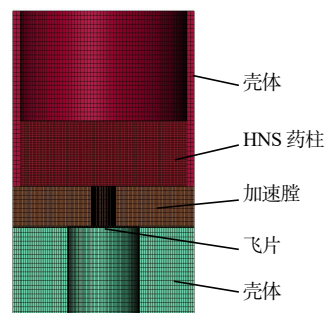


图 2 模型网格示意图

Fig.2 Schematic diagram of model grid

2.2 材料模型

壳体材料为 304 不锈钢,采用塑性及断裂失效 (Johnson-Cook) 模型^[7];飞片材料为聚酰亚胺,采用弹塑性流体材料 (Elastic_Plastic_Hydro) 模型;加速膛材料为陶瓷,采用 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 模型;HNS-IV 炸药采用 Elastic_Plastic_Hydro 模型和三项式点火增长反应模型^[8];空气采用 MAT_NULL 材料模型。304 不锈钢、聚酰亚胺薄膜、HNS-IV 以及空气的模型及状态方程参数见表 1~4。

表 1 304 不锈钢 J-C 模型参数^[9]

Tab.1 J-C model parameters of 304 stainless steel			
参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800	C	0.034
E/GPa	193	m	1.05
v	0.3	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	0.001
A/MPa	310	T_r/K	1 800
B/MPa	1 000	T_m/K	293
n	0.65	$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	450

表 2 聚酰亚胺薄膜状态方程参数^[10]

Tab.2 Equation of state parameters of polyimide films				
材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S	γ
聚酰亚胺	1.42	2 737	1.41	0.76

表 3 HNS-IV 的 JWL 方程参数^[11]

Tab.3 Parameters of HNS-IV charging JWL equation

点火增长模型	$I/\mu\text{s}^{-1}$	a	b	x	$G_1/(\text{Mbar}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1})$	c
	1.4×10^6	0.215 2	0.667	4.0	3 700	0.667
JWL 状态方程	d	y	z	e	$G_2/(\text{Mbar}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1})$	g
	0.667	2.0	3.0	0.667	14 800	0.667
未反应物	ω	A/Mbar	B/Mbar	R_1	R_2	$C/(\text{Mbar} \cdot \text{K}^{-1})$
	0.567 5	331.8	-0.025 15	11.5	1.15	2.704×10^{-5}
爆炸产物	ω	A/Mbar	B/Mbar	R_1	R_2	$C/(\text{Mbar} \cdot \text{K}^{-1})$
	0.45	5.362 5	0.270 2	5.4	1.8	1.0×10^{-5}

表 4 空气模型和状态方程相关参数^[12]

Tab.4 Parameters of air model and equation of state

参数	$P/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
数值	1.29×10^{-3}	2.5×10^{-6}	-1×10^{-6}	0	0	0	0.4	0.4	0

3 飞片成形过程仿真

飞片限制在加速腔与基片之间，桥箔爆炸后，在高温高压等离子体作用下，加速腔对飞片产生剪切作用，剪切效果与加速腔材料相关，剪切后的飞片状态及冲击速度与其直径和厚度相关，而飞片冲击速度对冲击片雷管的爆轰性能有重要影响，因此对飞片成形及加速过程进行仿真。其中，飞片与加速腔的接触算法采用 LS-DYNA 中罚函数约束方法，通过飞片上拉格朗日节点与加速腔之间的相对位移，分析飞片速度、位移和加速度的变化。

3.1 加速腔材料对飞片成形的影响

飞片在加速腔中的状态如图 3 所示。

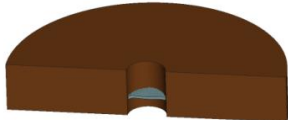


图 3 飞片加速过程状态图

Fig.3 State diagram of flyer acceleration process

不同材料加速腔剪切后的飞片状态如图 4 所示。由图 4 可知，加速腔的硬度及光滑度对飞片成形状态有极大影响。硬度较大的陶瓷加速腔对飞片的剪切效果最好，飞片整体完整、圆形边缘平整、受力均匀。

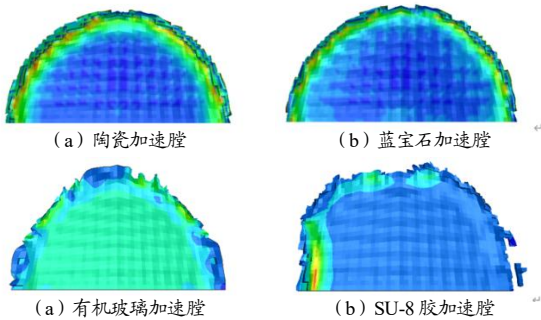


图 4 不同材料加速腔对飞片的剪切效果

Fig.4 Shear effect of accelerating chamber with different materials on flyer

3.2 飞片直径对冲击速度的影响

冲击片雷管作用时，桥箔从中心桥区位置开始作用，由于加速腔的孔径大于桥箔桥区尺寸，因此飞片受压时从中心位置开始作用，飞片直径越大，中心点的加速特征与剪切边缘的差异越大，对飞片状态的影响也越大。为探究飞片直径对冲击速度的影响，选取厚度均为 35 μm ，直径分别为 0.15，0.35，0.55 mm 的飞片进行仿真。不同直径飞片剪切效果如图 5 所示，相应的速度曲线如图 6 所示。

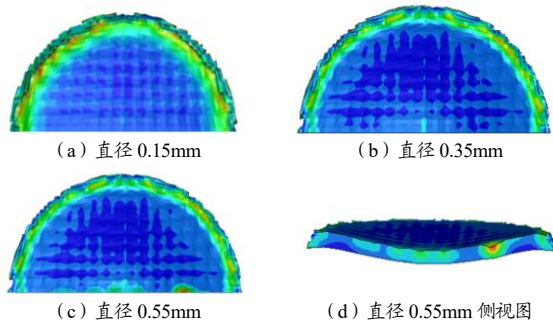


图 5 不同直径飞片剪切效果

Fig.5 Shear effect of flyer with different diameters

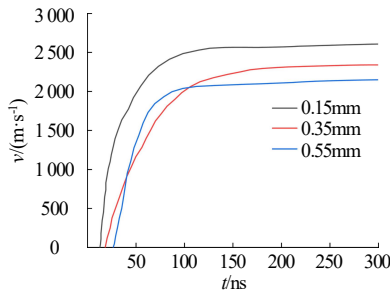


图 6 不同直径飞片速度曲线

Fig.6 Velocity curve of flyer with different diameters

由图 6 可知，直径 0.55 mm 飞片在 70 ns 时最快达到速度转折点（1 700 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），之后速度继续小幅度上升；直径 0.35 mm 飞片最快（约 200 ns）达到稳定速度 2 338 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；直径 0.15 mm 飞片的最大速度最大，在 300 ns 时达到 2 605 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结果表明飞片直径越小速度越快。这是由于当飞片直径过大时，飞片中心区域与边缘区域承受压力的顺序不同，发生迟滞现象，导致飞片中心区域挠度过大，甚至飞片被冲击压力撕裂，如图 5（d）中 0.55 mm 直径飞片在 1/4 直径处发生应力集中现象。因此，在实际作用时，飞片与 HNS 药柱难以视作平面接触，其接触面积减小，能量传递效率降低；且飞片直径越大，其剪切面面积越大，所消耗能量越多。

3.3 飞片厚度对冲击速度的影响

飞片厚度越大,剪切消耗能量越多,剪切过程时间越长,相应飞片质量也越大。为探究飞片厚度对冲击速度的影响,选取直径均为 0.35 mm,厚度分别为 15, 25, 35, 45 μm 的飞片进行仿真。不同厚度飞片剪切效果如图 7 所示,相应的速度曲线如图 8 所示。

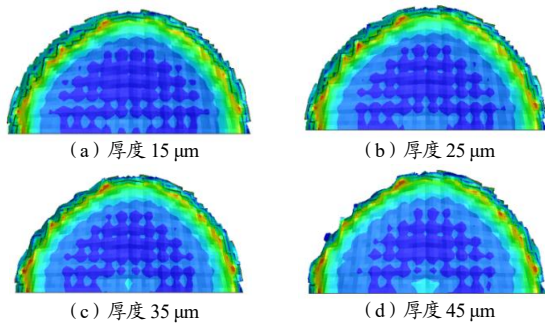


图 7 不同厚度飞片成形情况

Fig.7 Formation of flyer with different thicknesses

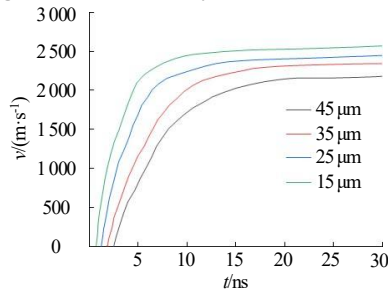


图 8 不同厚度飞片速度曲线

Fig.8 The velocity curve of flyer with different thicknesses

由图 7 可知,飞片剪切形状呈近似圆形,且飞片厚度越薄,剪切出的飞片形状越接近圆形;从图 8 可知,厚度 15 μm 飞片的最终速度最大,达到 2 576 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这是由于随着飞片厚度增大,所需剪切过程时间变长,飞片开始加速时间变晚,导致最终速度减小。但在高温高压等离子体作用下,在剪切和加速过程中,厚度过小的飞片存在破碎的可能,从而影响冲击片雷管的作用效果。

3.4 飞片速度验证试验

由于模拟结果难以表明飞片是否破碎,因此采用 PDV 测试真实飞片速度,并采用高速摄影观测飞片的剪切和加速过程。对不同直径(厚度均为 35 μm)和不同厚度(直径均为 0.35 mm)的飞片测试 5 次,所得峰值速度取平均值,结果如表 5~6 所示。

由表 5 可知,直径为 0.15 mm 飞片的实测速度与模拟速度相差较大。这是由于飞片直径过小时,桥箔

爆炸能量很大一部分作用在加速腔和基片上,能量损耗严重,不足以将飞片速度提升至模拟水平。

表 5 不同直径飞片实测速度

Tab.5 The measured velocity of flyer with different diameters

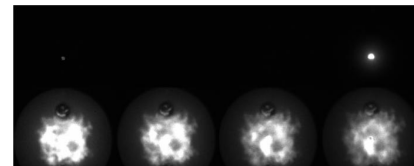
序号	飞片厚度/ μm	飞片直径/mm	实测峰值速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	模拟峰值速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	35	0.15	1 282 $\pm$ 120	2 605
2		0.35	2 289 $\pm$ 100	2 338
3		0.55	2 053 $\pm$ 80	2 149

表 6 不同厚度飞片实测速度

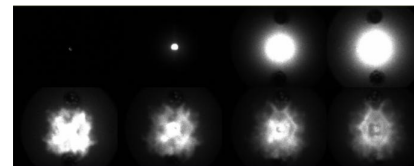
Tab.6 The measured velocity of flyer with different thicknesses

序号	飞片直径/mm	飞片厚度/ μm	实测速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	模拟峰值速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.35	15	-	2 576
2		25	1 976 $\pm$ 100	2 445
3		35	2 289 $\pm$ 100	2 338
4		45	2 088 $\pm$ 90	2 181

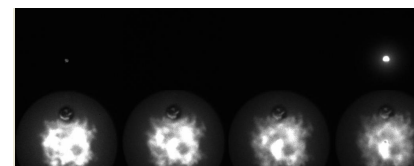
由表 6 可知,厚度为 15 μm 的飞片由于强度不足,在桥箔爆炸能量作用下发生破碎,因此无法测得飞片速度。厚度为 25 μm 的飞片实测速度与模拟速度相差较大。这是由于在剪切与加速过程中可能存在飞片被桥箔爆炸能量部分击碎而导致能量外泄,从而导致飞片实测速度低于模拟结果。对该异常现象通过高速摄影进行验证,试验结果如图 9 所示。



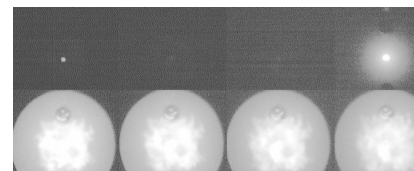
(a) 飞片正常状态



(b) 15 μm 厚度飞片



(c) 25 μm 厚度飞片



(d) 25 μm 厚度飞片高曝光处理

图 9 飞片高速摄影测试

Fig.9 Fly film high-speed photography test

由图 9 (a) 可知,正常状态下,桥箔电爆炸出现

短暂微弱光亮, 飞片形成后遮挡加速膛, 视野全部变暗, 飞片飞出加速膛后, 等离子体喷出, 拍摄到强光。由图 9 (b) 可知, 当飞片厚度为 $15\mu\text{m}$ 时, 飞片因强度不足而被击碎, 拍摄画面持续出现光亮直至消失。由图 9 (c) 可知, 当飞片厚度为 $25\mu\text{m}$ 时, 其高速摄影图像与正常状态无明显差异; 对其进行高曝光处理后, 由图 9 (d) 可知, 在飞片遮蔽加速膛过程中仍有微弱光亮, 表明飞片在能量冲击作用下部分受损, 使桥箔爆炸能量耗散, 从而导致飞片速度降低。由此验证了飞片厚度过小时, 存在飞片被击碎的情况。

3.5 不同入射角度飞片冲击起爆过程模拟

冲击片雷管在实际使用过程中, 由于加速膛形状不规则或破损等情况, 使飞片在剪切和加速过程中的冲击角度易发生变化, 而不同冲击角度的飞片与 HNS 药柱的接触点及接触面积不同, 由此导致不同的爆轰效果。PDV 试验测得直径为 0.35mm 、厚度为 $35\mu\text{m}$ 的飞片的最低速度为 $2189\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 故选取在 $2100\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度 (小于飞片实测速度) 下模拟不同角度飞片冲击炸药的起爆效果。在 HNS 药柱中心轴上等距离选取 10 个观测点, 如图 10 所示。各观测点测得飞片不同入射角度情况下的炸药压力曲线, 如图 11 所示。

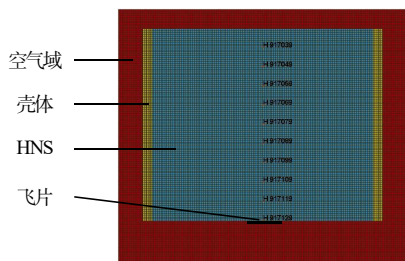
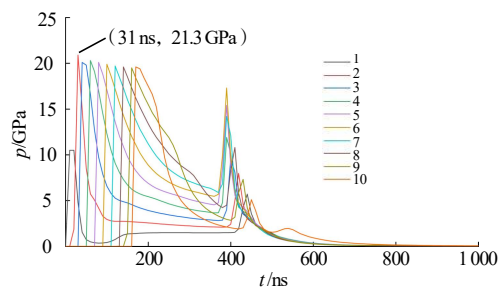


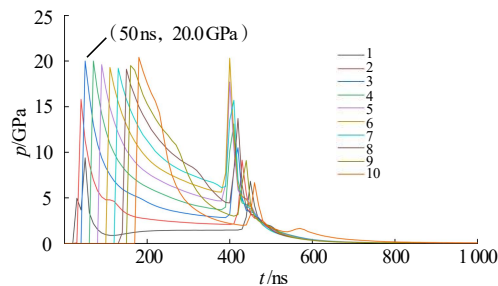
图 10 压力观测点
Fig.10 Pressure observation points

由图 11 可知, $2100\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度下, 4 种入射角度的飞片冲击 HNS 装药后, 炸药内部压力均在一定时间内达到爆轰压力且持续稳定传播, 并在 200ns 时间内完成爆轰。其中, 0° 入射角的飞片在 31ns 时最快达到爆轰压力, 且峰值压力最高达到 21.3GPa , 压力传播最为稳定。随着飞片入射角度的增大, 同一速度下的飞片能量转换效率下降, HNS 达到爆轰的时间增加, 30° , 60° , 90° 入射角相较于 0° 入射角的飞片, 其达到爆轰压力的时间分别迟滞 19 , 39 , 109ns , 且爆轰压力峰值有所降低。因此, 设计冲击片雷管的飞片参

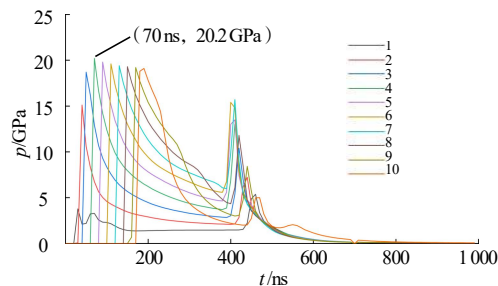
数时, 应着重考虑保持飞片的完整性及平面度。



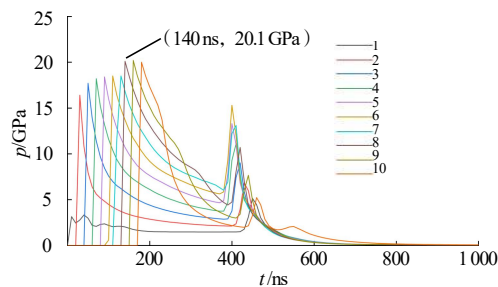
(a) 飞片入射角度 0°



(b) 飞片入射角度 30°



(c) 飞片入射角度 60°



(d) 飞片入射角度 90°

图 11 各观测点压力曲线

Fig.11 Pressure curves of all observation points

4 结论

仿真研究了加速膛材料对飞片成形状态及飞片直径和厚度对其冲击速度的影响, 通过 PDV 测速和高速摄影试验进行了验证, 并对不同入射角度飞片的冲击起爆效果进行了模拟研究。得到以下结论:

(1) 加速膛的硬度越大, 对飞片的剪切效果越好; 飞片的最大速度与飞片直径及厚度呈负相关, 飞

片直径过大时,由于冲击波的分布原因,飞片难以视作平面,易发生撕裂现象,起爆效果不佳;飞片厚度过小时,由于飞片强度不足,易发生破碎现象。

(2) 飞片入射角度越小,冲击起爆 HNS 装药效果越好。当飞片速度为 $2\ 100\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,以 0° , 30° , 60° , 90° 入射角冲击起爆装药均能使 HNS 药柱达到稳定爆轰。当入射角为 0° 时, HNS 药柱最快达到稳定爆轰,且爆轰压力最大。设计飞片时,应尽量使其在作用过程中处于 0° 入射角。

参考文献:

- [1] Seokbin Lim, Philipp Baldovi. Observation of the velocity variation of an explosively-driven flat flyer depending on the flyer width[J]. Applied Science, 2019,9(1):97-110.
- [2] 陈清畴,刘刚,马弢. 飞片初始形状对雷管起爆能力的影响[J]. 火工品, 2020(1): 6-9.
- [3] 王寅,栾前进,同红海,等. 金属飞片对 EFI 起爆能量的影响[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 67-72.
- [4] 任志伟,甘强,钱石川,等. 飞片材料对 HNS-IV 炸药冲击点火的影响研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(2): 9-13.
- [5] 贺翔,严楠,曾祥涛,等. 微尺寸叠氮化铅驱动飞片重要结构参数与飞片速度和能量的关系[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1 363-1 371.
- [6] Cong Xu, Zhi-gang Liu. Numerical analysis on acceleration process and shock initiation of parylene C[J]. Propellants Explos. Pyrotech., 2022(47): 1-10.
- [7] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague, the Netherlands: IBC, 1983.
- [8] 浣石,蒋国平. 用 Lagrange 分析方法确定固体炸药基于 JWLL 状态方程的反应速率方程[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006(3): 33-36.
- [9] 吴先前,杜特专,黄晨光,等. 高温高应变率下激光焊接件力学性能研究[C]//第十届全国冲击动力学学术会议论文摘要集, 2011.
- [10] 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(04): 23-26, 149.
- [11] 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): 044-052.
- [12] Frank Marrs, Mike Heiges. Soil modeling for mine blast simulation[C]//13th International LS-DYNA Conference. Dearborn, 2014.