

文章编号: 1003-1480 (2022) 05-0072-04

基于空气炮的高过载模拟试验方法研究

孙 轶¹, 杨 莉², 刘小龙³, 麻宏亮⁴, 付东晓⁴, 秦国圣⁴, 王可暄⁴

(1. 海军装备部驻西安地区军事代表局驻西安地区第四军事代表室, 陕西 西安, 710043; 2. 陆军装备部驻西安地区军事代表局驻西安地区第一军事代表室, 陕西 西安, 710032; 3. 空军装备部驻西安地区军事代表局驻西安地区第七军事代表室, 陕西 西安, 710068; 4. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

摘 要: 针对半导体桥火工品高过载模拟试验对加速度峰值 ($15 \times 10^4 g$) 和脉宽 ($200 \mu s$) 的要求, 对现有空气炮高过载模拟试验装置进行了改进, 既改变火工品试样放置位置并将其置于工装靶中, 通过子弹撞击带有整形器的工装靶, 实现对侵彻高过载环境的模拟, 并通过仿真和试验研究了工装靶质量、子弹质量和初速、整形器尺寸等参数对加速度峰值和脉宽的影响。结果表明: 当工装靶质量为 $1\ 000 g$ 、子弹质量为 $1\ 500 g$ 、子弹初速为 $250 m/s$ 、整形器尺寸为 $\Phi 40 mm \times 20 mm$ 时, 仿真得到的加速度峰值为 $16.05 \times 10^4 g$ 、脉宽为 $203 \mu s$; 试验得到的加速度峰值为 $16.3 \times 10^4 g$ 、脉宽为 $204 \mu s$ 。

关键词: 半导体桥火工品; 高过载; 空气炮; 加速度峰值; 脉宽

中图分类号: TJ450.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.05.015

Study on the Simulation Test Method of High Overload Based on Air Cannon

SUN Yi¹, YANG Li², LIU Xiao-long³, MA Hong-liang⁴, FU Dong-xiao⁴, QIN Guo-sheng⁴, WANG Ke-xuan⁴

(1. The Fourth Military Representative Office in Xi'an, Military Representative Bureau of Naval Equipment Department in Xi'an, Xi'an, 710043; 2. The First Military Representative Office in Xi'an, Military Representative Bureau of Army Equipment Department in Xi'an, Xi'an, 710032; 3. The Seventh Military Representative Office in Xi'an, Military Representative Bureau of Air Force Equipment Department in Xi'an, Xi'an, 710068; 4. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: Aiming at the requirements of acceleration peak value and pulse width for high overload simulation test of semiconductor bridge initiating explosive devices, the existing high overload simulation test device of air gun was improved. By changing the placement position of the test sample and placing it in the tooling target, and impacting the tooling target with the shaper by the bullet, the simulation of high overload environment of penetration is realized. The effects of tooling target mass, bullet mass and its initial velocity, as well as shaper size on acceleration peak and pulse width were studied by simulation and test. The results show that when the mass of the tooling target is $1\ 000 g$, the mass of the bullet is $1\ 500 g$, the initial velocity of the bullet is $250 m/s$, and the size of the shaper is $\Phi 40 mm \times 20 mm$, the simulated peak acceleration is $16.05 \times 10^4 g$ and the pulse width is $203 \mu s$, the peak acceleration obtained from the test is $16.3 \times 10^4 g$, and the pulse width is $204 \mu s$.

Key words: Semiconductor bridge initiating explosive devices; High overload; Air cannon; Acceleration peak; Pulse width

侵彻弹药中装载的火工品可能会由于承受的过载太高而提前发火, 或其换能部件在侵彻过程中失效而导致弹药无法达到作战目的^[1]。因此, 设计侵彻弹药的火工品必须考虑火工品承受高过载的能力, 且在

收稿日期: 2022-03-15

作者简介: 孙轶 (1984-), 男, 工程师, 从事舰炮及火工品质量体系监督及质量过程管控。

通讯作者: 刘小龙 (1979-), 男, 工程师, 从事火炸药及火工品质量体系监督及质量过程管控。

实际使用前需对其抗高过载能力进行测试^[2-5]。目前,火工品高过载模拟试验常采用马歇特锤、霍普金森压杆、空气炮等实现^[6-9]。马歇特锤试验加速度最高只能达到 $5 \times 10^4 g$,脉宽为几十微秒。霍普金森压杆试验加速度可达几十万 g ,但其脉宽只有几微秒,通过波形整形后,其加速度可达 $10 \times 10^4 g$,脉宽为几十微秒^[6]。空气炮法通过发射装有试样的子弹,可以实现高速侵彻靶板,但需要充分掌握弹型、靶板材料、尺寸的匹配关系,才能很好地控制加速度波形;同时由于弹丸尺寸限制了加速度传感器及记录仪的装载,导致侵彻过程加速度测试很难实现。半导体桥(SCB)火工品在实际的钢靶板侵彻过载中,其加速度最高可以达到 $15 \times 10^4 g$ 、脉宽 $200 \mu s$,以上试验方法很难模拟出所需的峰值和脉宽。

本文基于现有空气炮高过载模拟试验装置,改变火工品试样放置位置,并将其置于工装靶中,通过子弹撞击带有整形器的工装靶,以模拟侵彻高过载环境;并通过仿真和试验研究了工装靶质量、子弹质量和初速、整形器尺寸等参数对侵彻加速度峰值和脉宽的影响,为 SCB 火工品抗高过载模拟试验设计提供参考。

1 空气炮试验装置与计算模型

1.1 空气炮试验装置及原理

改进后的空气炮高过载模拟试验装置由高压气源、高压气室、子弹、支撑台架、炮管、靶室等组成。靶室中有弹速测试装置、整形器、工装靶、回收缓冲装置、加速度测试装置等,如图 1 所示。

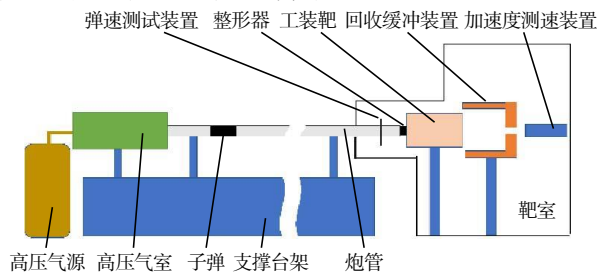


图 1 改进的空气炮高过载模拟试验装置

Fig.1 Improved high overload simulation test device of air cannon

图 1 中,子弹为圆柱型结构,外包聚四氟套,置于炮管中;整形器为圆柱形金属材料,置于工装靶与

子弹的撞击面上,与工装靶同轴。工装靶为中空设计,火工品试样置于工装靶的空心处。

空气炮试验原理为:利用高压气体推动子弹加速,子弹加速到预定速度后与整形器及装载火工品试样的工装靶发生撞击,通过撞击形成的冲击力学环境模拟火工品在实际发射过程中承受的高过载情况。因此,子弹质量和初速、整形器尺寸和工装靶质量对加速度峰值和脉宽有直接影响。采用通断靶法测量子弹速度,采用 PDV 法测量工装靶的加速度。

1.2 计算模型

计算模型由子弹、整形器和工装靶 3 部分组成,如图 2 所示。其中,子弹、整形器和工装靶均为圆柱型,工装靶背面有 $\Phi 30 mm \times 25 mm$ 的圆柱形开口用于放置火工品试样;工装靶与整形器采用螺纹连接。

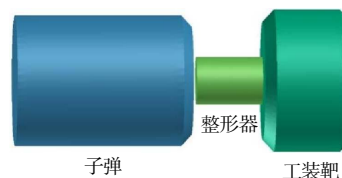


图 2 计算模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of calculation model

为便于仿真,对计算模型进行简单化处理。子弹、整形器和工装靶均采用实体单元划分,子弹和工装靶材料为 T10 钢;整形器材料为 Q235AF 钢。采用 Johnson-Cook (JC) 本构模型描述材料在高速冲击下的力学行为,并忽略温度对材料性能的影响,对 JC 本构模型进行简化,简化后的表达式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + c \ln \dot{\varepsilon}) \quad (1)$$

式(1)中: σ 为真应力; ε 为真应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; A 、 B 、 n 为应变强化效应的拟合参数; c 为应变速率效应拟合参数。材料的 JC 本构参数如表 1 所示。

表 1 材料 JC 本构参数

Tab.1 JC constitutive parameters of material

材料	A	B	n	c
T10 钢	850	450.0	0.9	0.1
Q235AF 钢	720	461.5	1.393	0.077

2 仿真

基于计算模型,对撞击过程中工装靶速度和加速度波形进行仿真,研究了工装靶质量、子弹质量和初

速、整形器尺寸等参数对加速度峰值和脉宽的影响。由于火工品实际受力状态呈现波动性,高频成分振荡对结果读取的准确性有一定影响,因此定义加速度脉冲持续过程中最大值 $a_{\max}$ 的 97% 为加速度峰值 a_p ; 定义从加速度最大值 $a_{\max}$ 的 3% 开始变化的时刻 t_{ini} 到重新变为最大值 $a_{\max}$ 的 3% 的时刻 t_{end} 之间的时间差为加速度脉宽 t_d , 如图 3 所示。

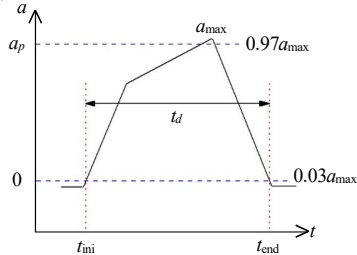


图 3 加速度峰值和脉宽的定义

Fig.3 Definition of acceleration peak and pulse width

为满足不同质量和体积火工品试验需求,仿真中设置了 3 种工装靶质量,分别为 500g、1 000g、1 500g。针对 500g 及 1 000g 工装靶,子弹质量设置为 1 500g; 针对 1 500g 工装靶,可提高子弹质量至 2 000g 以提高撞击能量,从而提高加速度峰值。子弹初速从 $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 起递增,步进为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大不超过 $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整形器直径设置为 $\Phi 30 \text{ mm}$ 、 $\Phi 35 \text{ mm}$ 、 $\Phi 40 \text{ mm}$,优先选择较小直径;整形器长度从 14mm 起递增,步进为 2mm,最大不超过 24mm。通过大量仿真计算得到 3 种工装靶质量下,加速度分别达到 $5 \times 10^4 \text{ g}$ 、 $10 \times 10^4 \text{ g}$ 、 $15 \times 10^4 \text{ g}$,以及脉宽达到 $200 \mu\text{s}$ 的 9 种工况下,对应的子弹质量、初速和整形器尺寸,如表 2 所示。9 种工况对应的速度和加速度波形如图 4~6 所示。

表 2 不同工况下的加速度峰值和脉宽

Tab.2 Acceleration peak and pulse width under different working conditions

工况	工装靶质量/g	子弹质量/g	子弹初速 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	整形器尺寸 /mm	加速度	
					峰值 $\times 10^4 \text{ g}$	脉宽/ μs
1 [#]	500	1 500	110	$\Phi 30 \times 16$	5.07	197
2 [#]		1 500	160	$\Phi 30 \times 16$	10.45	196
3 [#]		1 500	210	$\Phi 35 \times 14$	14.72	212
4 [#]	1 000	1 500	140	$\Phi 35 \times 20$	5.61	223
5 [#]		1 500	200	$\Phi 35 \times 20$	11.18	199
6 [#]		1 500	250	$\Phi 40 \times 20$	16.05	203
7 [#]	1 500	1 500	140	$\Phi 30 \times 22$	5.30	212
8 [#]		1 500	210	$\Phi 35 \times 22$	9.83	198
9 [#]		2 000	250	$\Phi 40 \times 24$	16.20	202

在进行空气炮试验设计时,可针对不同的火工品

试样选择不同质量的工装靶,并根据需要达到的加速度峰值和脉宽,参照表 2 设计子弹及整形器参数,以实现高过载环境的模拟。

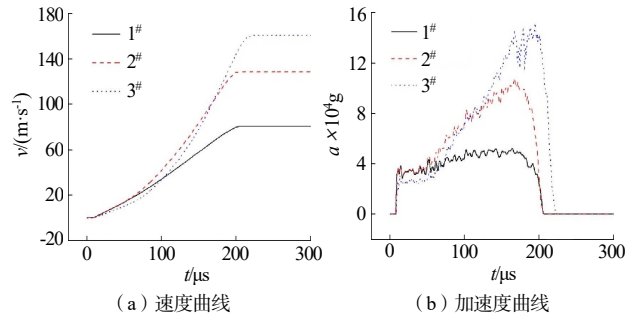


图 4 工装靶质量 500g 时速度和加速度曲线

Fig.4 Velocity and acceleration pulse curves under 500g mass of tooling target

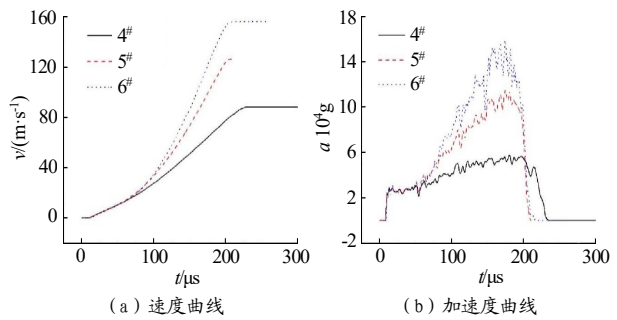


图 5 工装靶质量 1 000g 时速度和加速度曲线

Fig.5 Velocity and acceleration pulse curves under 1 000g mass of tooling target

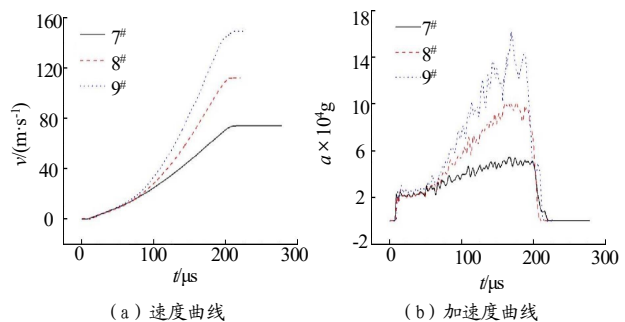


图 6 工装靶质量 1 500g 时速度和加速度曲线

Fig.6 Velocity and acceleration pulse curves under 1 500g mass of tooling target

3 试验

3.1 试验设计

采用空气炮法模拟某 SCB 火工品在侵彻过程中承受的高过载环境,其加速度峰值和脉宽要求达到 $15 \times 10^4 \text{ g}$ 和 $200 \mu\text{s}$ 。SCB 火工品试样长度、直径和电阻等参数如表 3 所示。根据 SCB 火工品参数确定工装

靶质量为 1 000g。由表 2 可知,为达到 $15 \times 10^4 \text{g}$ 、 $200 \mu\text{s}$ 加速度峰值和脉宽要求,空气炮试验中的子弹质量设计为 1 500g,子弹初速设计为 250m/s,整形器尺寸设计为 $\Phi 40 \text{mm} \times 20 \text{mm}$ 。

表 3 半导体桥火工品详细参数

Tab.3 Detailed parameters of the SCB initiating explosive device			
编号	长度/mm	直径/mm	电阻/ Ω
1 [#]	6.75	3.83	6.249
2 [#]	6.84	3.81	6.249

3.2 试验结果

空气炮试验测得工装靶的速度曲线如图 7 所示,加速度曲线如图 8 所示。由图 7 可知,移动工装靶最终速度为 $162 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 8 可知,移动工装靶加速度峰值为 $16.3 \times 10^4 \text{g}$,脉宽为 $204 \mu\text{s}$,可满足 SCB 火工品高过载模拟试验的加速度峰值和脉宽需求。

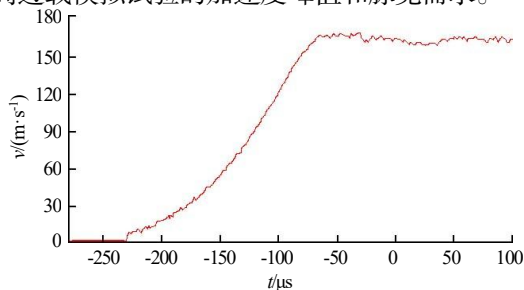


图 7 工装靶速度曲线图

Fig.7 The velocity graph of tooling target

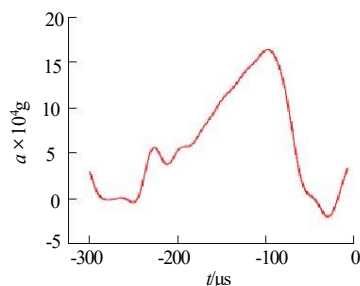


图 8 工装靶加速度曲线图

Fig.8 The acceleration curve of tooling target

4 结论

本研究对现有空气炮高过载模拟试验装置进行了改进,实现了对侵彻高过载环境的模拟,并通过仿真和试验研究了工装靶质量、子弹质量和初速、整形

器尺寸等参数对加速度峰值和脉宽的影响,得到以下结论:

(1) 仿真得到了工装靶质量分别为 500g、1 000g、1 500g,加速度分别达到 $5 \times 10^4 \text{g}$ 、 $10 \times 10^4 \text{g}$ 、 $15 \times 10^4 \text{g}$,以及脉宽达到 $200 \mu\text{s}$ 的 9 种工况下,对应的子弹质量、初速和整形器尺寸,可为空气炮高过载模拟试验的参数设计提供参考。

(2) 当工装靶质量为 1 000g、子弹质量为 1 500g、初速为 250m/s、整形器尺寸为 $\Phi 40 \text{mm} \times 20 \text{mm}$ 时,空气炮试验测得的加速度峰值为 $16.3 \times 10^4 \text{g}$,脉宽为 $204 \mu\text{s}$,实现了对某 SCB 火工品侵彻高过载环境的模拟。

参考文献:

- [1] 陈健.空气炮力学过载模拟试验波形展宽研究[D].南京:南京理工大学,2019.
- [2] 方幸.空气炮力学过载等效模拟试验方法研究[D].南京:南京理工大学,2020.
- [3] 刘卫,张蕊,沈瑞琪,等.高过载条件下火工品装药的响应特性[J].兵工学报,2016,37(S2):191-196.
- [4] 高昌印.过载性能试验台设计及微型涡喷抗过载性能研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [5] 苏红星.高过载空气炮系统实验技术研究[D].太原:中北大学,2018.
- [6] 李创新,沈瑞琪,刘卫,等.高加速度冲击过载下桥丝式电雷管的损伤特性研究[J].火工品,2012(3):1-4.
- [7] 王艳华.火工品过载试验研究及数值模拟仿真[D].太原:中北大学,2010.
- [8] 李雷.对弹丸侵彻过程及火工品过载情况的三维数值模拟[D].太原:中北大学,2008.
- [9] 邓琼,李玉龙,索涛,等.火工品高过载动态力学性能测试方法研究[J].火工品,2007(1):28-31.