

酸性乙炔银的光起爆特性^{*}

裴明敬, 徐海斌, 王等旺, 姚伟博, 杨 军, 张德志, 张景森

(西北核技术研究所, 强动载与效应重点实验室, 陕西西安 710024)

摘要: 为研究酸性乙炔银作为光敏炸药用于模拟 X 射线热-力学效应的可行性, 开展了酸性乙炔银涂层的闪光起爆性能研究。根据酸性乙炔银的基本性能和实验测定的感度, 分析其光起爆作用机制, 开展了酸性乙炔银涂层的爆轰性能测试, 并实现了高压脉冲闪光条件下的大面积起爆。研究表明: 酸性乙炔银是一种相对安全的光敏感炸药, 在喷涂层表面的爆轰传播速度较低, 可作为低过载瞬态加载源使用; 在低密度条件下, 其爆炸比冲量与喷涂层的面密度近似呈线性关系。

关键词: 光敏炸药; 酸性乙炔银; 闪光起爆; 比冲量

中图分类号: O38 **文献标志码:** A

doi: 10.11858/gywlxb.2017.06.017

1 引 言

强脉冲 X 光作用到壳体上, 会在壳体表面产生瞬时的能量沉积, 局部形成高温高压, 并在壳体材料内形成热冲击波, 冲击波传入壳体内部, 使材料内部形成裂缝和变形; 受辐照的壳体表面层发生熔化、汽化, 使部分材料飞溅出去, 形成反冲喷射现象, 在壳体表面产生反冲冲量。因此, 强脉冲 X 光会影响再入飞行器的飞行姿态或造成壳体结构的永久变形和破坏, 研究 X 光-热冲击波对再入飞行器的冲击与破坏具有重要的军事意义。

当前, 可以采用强流脉冲束流辐照材料研究材料响应, 或采用化爆加载产生等效喷射冲量研究结构响应。脉冲电子束加载在壳体表面产生的热冲击波可以从机理等效上模拟 X 射线的热-力学效应, 从而研究材料响应, 但是由于脉冲电子束束斑面积的限制, 不可能开展壳体全尺寸的结构响应研究。化爆加载技术从效应等效上对 X 射线的热-力学效应进行模拟, 主要有柔爆索加载、薄片炸药加载和光敏炸药及其驱动飞片加载等方式。光敏炸药加载具有脉冲载荷时间短、同步性好等优点^[1-4], 在国外已被应用于考核试验中^[5-8]。有研究人员认为, 光敏炸药加载是唯一可以同时模拟 X 射线引起的材料和结构响应的技术。

国内关于光敏炸药的研究比较少见, 胡明志^[9]用强光引爆结构表面光敏炸药的方法对承受短脉冲均匀外压的锥壳进行了研究, 获取了锥壳内壁的动态应变。褚桂敏^[10]在小模型试验中用光敏炸药实现了余弦载荷分布。为了研究酸性乙炔银光敏炸药的光起爆特性, 本研究采用高压脉冲闪光光源起爆酸性乙炔银, 测试其基本性能, 初步分析其光起爆作用机制, 建立光敏炸药爆炸比冲量与面密度的关系, 以期后续开展 X 射线热-力学效应化爆模拟技术研究提供条件。

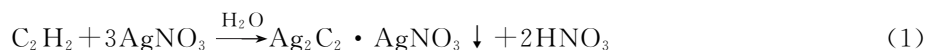
^{*} 收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-04-06

作者简介: 裴明敬(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事炸药应用与爆轰机理研究。

E-mail: peimingjing@nint.ac.cn

2 酸性乙炔银的基本性能

酸性乙炔银 (Silver Acetylide-Silver Nitrate, SASN) 是指乙炔银和硝酸银的络合物, 分子式为 $\text{Ag}_2\text{C}_2 \cdot \text{AgNO}_3$, 不溶于水、乙醇、乙醚、丙酮。传统的合成制备方法比较简单, 往硝酸银的水溶液中通入乙炔气体, 生成的白色絮状沉淀物就是 $\text{Ag}_2\text{C}_2 \cdot \text{AgNO}_3$ 。其反应式为



值得注意的是, 采用不同溶剂的硝酸银溶液, 生成的络合盐中 AgNO_3 的含量不同, 比如采用硝酸银的银氨溶液、乙醇溶液在不同温度及浓度条件下可能生成纯的 Ag_2C_2 或 2 个以上 AgNO_3 , 具体成分需要精确分析才能确定。

酸性乙炔银是一种不稳定的物质, 在强光照射下会分解, 生成大量气体, 并释放热量, 其分解反应式为



将酸性乙炔银与丙酮的悬浊液喷涂到靶板或结构物表面, 待干燥后使用强闪光光源可实现大面积涂层的同时起爆。因此, 可以用作大面积平面波发生器的起爆药, 也可以应用于驱动不同曲面结构的爆炸飞片进行加载实验研究, 比如球面结构的同时加载技术等。

2.1 安全性参数

干燥后的光敏炸药虽然在强光作用下会爆炸, 但在阳光直照下仅发生缓慢分解, 储存在丙酮中的光敏炸药则非常安全。固体酸性乙炔银的压实密度为 5.34 g/cm^3 , 爆速为 4450 m/s , 爆热约 1.67 kJ/g ; 而喷涂状态下酸性乙炔银涂层的自然密度约为 0.6 g/cm^3 , 爆速约 $1200 \text{ m/s}^{[11]}$ 。

针对银质量分数为 78.8% 的酸性乙炔银样品, 试验测定了其部分感度参数。

(1) 冲击感度 将 20 mg 样品压装入火帽内, 用弧形落锤 (1.2 kg) 试验测得样品的冲击感度为 23.9 cm; 用 2.5 kg 落锤测得 PETN 的冲击感度为 28.3 cm。

(2) 摩擦感度 用 20 mg 样品进行摩擦摆试验, 在摆角为 70° 、表压 1.23 MPa 条件下, 测得样品的摩擦感度为 80%; 在摆角为 90° 、表压 2.45 MPa 条件下测得 PETN 的摩擦感度为 0.04%~0.20%。

(3) 火焰感度 将 20 mg 样品压装入火帽内, 测得其 50% 的发火感度为 23.9 cm。

(4) 电火花感度 将 25 mg 样品置于 $0.22 \mu\text{F}$ 平板电容器的正电极上, 测得其 0.01% 的发火能量 ($E_{0.01}$) 为 0.27 J, 99.99% 的发火能量 ($E_{99.99}$) 为 0.76 J; 而 PETN 0.08% 的发火能量 ($E_{0.08}$) 为 0.75 J。

根据冲击感和摩擦感度的数据分析, 酸性乙炔银的冲击感和摩擦感度都比 PETN 更敏感; 而根据电火花感度, PETN 的 $E_{0.08}$ 与酸性乙炔银的 $E_{99.99}$ 相当, 说明酸性乙炔银对静电也比较敏感, 在操作过程中, 尤其在干燥状态下需要特别注意。

上述结果表明, 酸性乙炔银合成制备方法比较简单、成本较低, 可以安全地存储在水或丙酮溶液中, 喷涂后干燥的酸性乙炔银是一种爆速相对较低、密度小且比较敏感的光敏炸药。

2.2 涂层爆速测量

采用片炸药冲击起爆方法测量光敏炸药沿平板方向的爆速, 测试原理如图 1 所示。

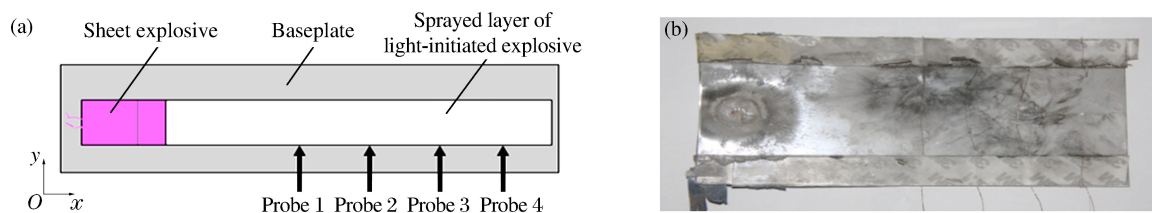


图 1 酸性乙炔银爆速测量原理(a)及爆炸后的靶板(b)

Fig. 1 Detonation velocity measurement of SASN (a) and the target after explosion (b)

测试时在靶板上喷涂了 $60\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的酸性乙炔银涂层,待涂层干燥后,在靶板的一端用雷管起爆,用均布的、间隔 25 mm 的漆包线断路探针测试其沿靶板传播的爆轰波速度。由于后续试验操作都在干态条件下进行,所以并没有测试起爆过程中酸性乙炔银的密度和厚度,此测试数据仅代表某种状态下的滑移爆轰速度。

实际测量中得到 3 个测点的脉冲信号,如图 2 所示。各测点的爆轰波到达时刻分别为: $t_1 = 430\text{ }\mu\text{s}$, $t_2 = 451\text{ }\mu\text{s}$, $t_4 = 495\text{ }\mu\text{s}$; 得到 3 个时间间隔: $\Delta t_{2-1} = 21\text{ }\mu\text{s}$, $\Delta t_{4-2} = 44\text{ }\mu\text{s}$, $\Delta t_{4-1} = 65\text{ }\mu\text{s}$; 由此计算得到 3 个间距的平均传播速度: $v_{1-2} = 1\text{ }190\text{ m/s}$, $v_{2-4} = 1\text{ }136\text{ m/s}$, $v_{1-4} = 1\text{ }154\text{ m/s}$ 。这 3 个速度值的一致性较好,由此得到平均速度 $v_a = 1\text{ }160\text{ m/s}$ 。

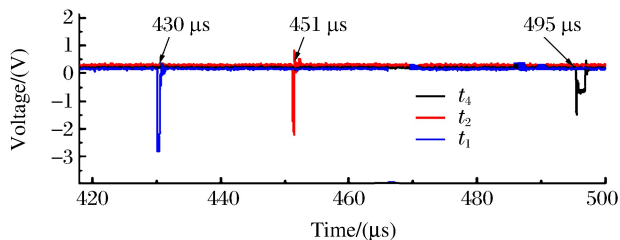


图 2 探针测试的脉冲信号

Fig. 2 Pulse signals measured by electric probes

3 酸性乙炔银的闪光起爆机理及试验

3.1 光起爆机理

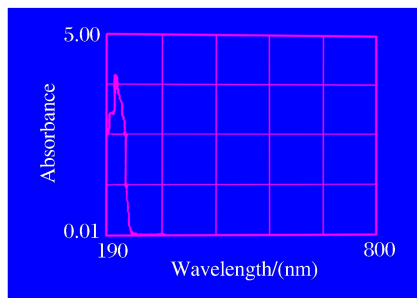
如果把光敏炸药爆炸的快速过程看作单向光化学反应,那么光解化学反应的平衡常数与吉布斯自由能、照射光的波长及光强的关系可表示为^[12]

$$\Delta_r G_m^0 + RT \ln K_p^0 = 0.1196n/\lambda \quad (3)$$

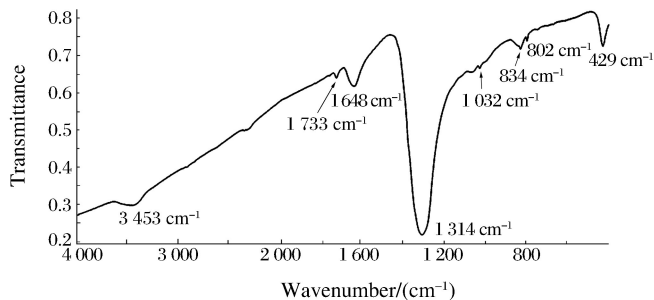
式中: $\Delta_r G_m^0$ 为吉布斯自由能, K_p^0 为化学反应平衡常数, λ 为光解反应光源波长, n 为光子摩尔数, R 为理想气体常数, T 为热力学温度。

由(3)式可看出:光源强度越强,光源脉冲持续时间越长,即吸收光子的摩尔数越多,光解化学反应的平衡常数越大,则光敏炸药的反应过程越迅速;另一方面,光子的波长越短,化学平衡常数也越大,吸收的光能量越多,发生爆炸反应的可能性就越大。

酸性乙炔银的紫外吸收光谱和红外吸收光谱分别如图 3(a)和图 3(b)所示。可见,其紫外吸收峰在 200 nm 左右,而红外吸收光谱则出现多个共振吸收峰。将红外吸收谱线特征与标准谱线比对发现,整个曲线与硝酸银的吸收谱线特征高度吻合,而 Ag_2C_2 的吸收特征非常弱。



(a) Ultraviolet absorption spectrum



(b) Infrared absorption spectrum

图 3 酸性乙炔银的紫外及红外吸收光谱

Fig. 3 Ultraviolet and infrared absorption spectrum of SASN

根据相关文献介绍,炸药基态与激发态能量跃迁的活化能量差约为 $5.844 \sim 6.863\text{ eV}$ ^[13],根据光子能量公式

$$E = hc/\lambda \quad (4)$$

式中: E 为光子能量, h 为普朗克常数, c 为光速。根据(4)式计算得到酸性乙炔银对应的特征吸收波长为 $181 \sim 212\text{ nm}$,恰恰也分布在紫外区。紫外光能量有利于炸药吸收,且易激发分子间反应。

3.2 闪光起爆可靠性试验

在光敏炸药试验安装平台上开展了不同涂层厚度、不同涂层面积的脉冲闪光起爆可靠性试验。

脉冲闪光光源是研究光敏炸药的关键设备,光源辐射光谱的分布应该符合光敏炸药的吸收谱线特征,辐射光强度及闪光持续时间都应该与光敏炸药的起爆特性相匹配,设计这样的光源需要特殊的技术手段。图 4 为单电容储能高压闪光起爆系统,其基本参数为:电容器电容 $6\ \mu\text{F}$ 、耐压 $50\ \text{kV}$,充电器充电电压 $30\ \text{kV}$ 、充电电流 $2\ \text{mA}$,高压输出电缆等效阻抗 $20\ \Omega$ 。产生强闪光的金属丝材料主要有康铜丝、钼丝、钨丝或其他合金丝,金属丝可以采用单丝,也可以用多根丝线组成栅网。

对 $\varnothing 0.3\ \text{mm}$ 、长 $8\ \text{cm}$ 的钨丝电爆炸产生的等离子体辐射光谱进行测量,获得了金属丝电爆炸过程中脉冲电流、负载电压及闪光光谱分布、光功率等参数。脉冲电流、加载电压以及脉冲强闪光功率波形如图 5 所示。可以看出,在第一个脉冲电流产生过程中:首先钨丝通电加载,电流逐渐增大;随着电压的继续上升,钨丝熔断,电阻增加,使电流有所降低;之后光功率幅值迅速增加,说明此时钨丝产生了等离子通道并导致电阻变小,尽管电压在下降,但电流仍然进一步增大。发光峰值在金属丝熔断之后、等离子通道产生过程中,光脉冲宽度(发光持续时间)比脉冲电流的持续时间长,说明等离子体生存时间比脉冲电流的持续时间长。采用光谱分光辐射度计测到的脉冲闪光相对光强分布如图 6 所示。可见,脉冲闪光存在一个功率分布峰值区,其波长为 $200\sim 250\ \text{nm}$,处于紫外光区,有利于酸性乙炔银对光能的吸收。



图 4 闪光光源的储能及控制系统

Fig. 4 Power storage of flash source and its control system

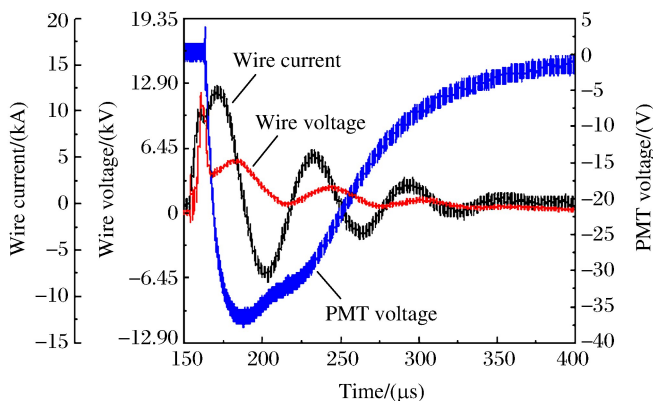


图 5 钨丝上脉冲电流、电压和产生的光脉冲波形

Fig. 5 Relations among light pulse, voltage and current of tungsten wire

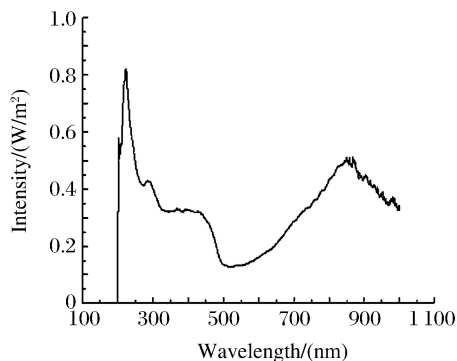


图 6 光谱分光辐射度计测得的相对光强波形

Fig. 6 Relative light intensity measured by spectral spectrophotometer

对涂层厚度(δ)为 50 和 $100\ \mu\text{m}$ 左右的酸性乙炔银进行闪光起爆试验。试验时在靶板涂层和光源之间布置光学玻璃板,以隔开金属丝爆炸时产生的冲击波和小颗粒的影响。靶板材料为 $2\ \text{mm}$ 厚的铝板,酸性乙炔银涂层的面积分别为 $10\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 、 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 、 $100\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$ 。图 7 所示为酸性乙炔银涂层爆炸后靶板的变形情况。从图 7 中可以看出,涂层厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 左右的所有试样均可完全起爆,而厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 左右的较薄涂层在闪光起爆试验中有起爆不完全现象发生,见图 7(d)。

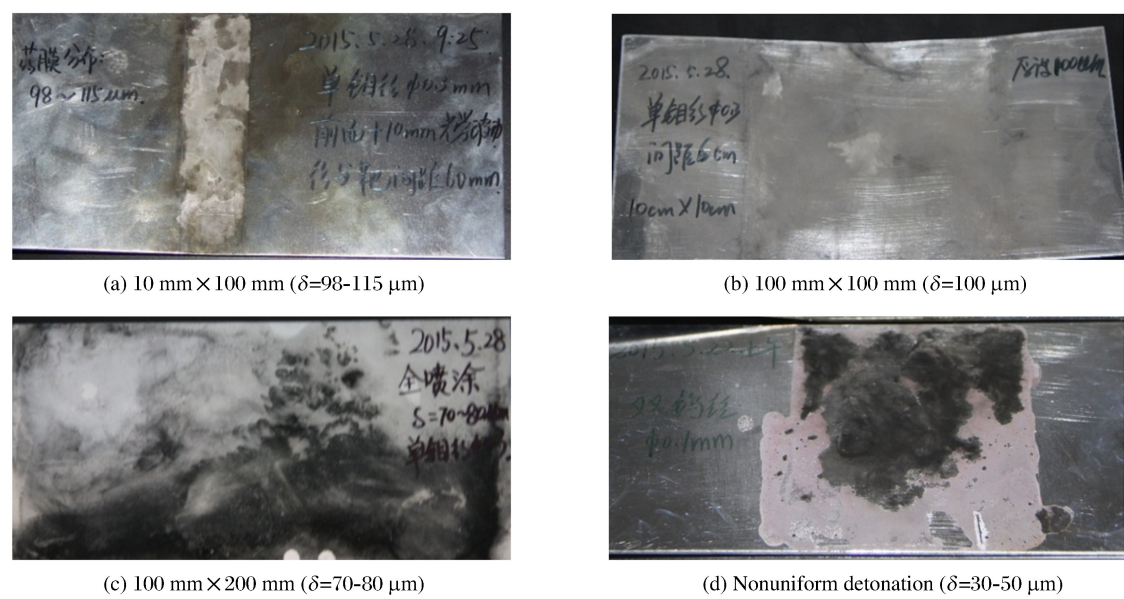


图 7 不同条件下闪光起爆后靶板情况

Fig. 7 Targets after explosion ignited by light under different conditions

3.3 光起爆产生的比冲量

利用激光多普勒冲量传感器测试了涂覆在传感器测量靶板表面的酸性乙炔银在闪光起爆条件下的比冲量,其测试原理是用激光多普勒测速系统(Photonic Doppler Velocimetry,PDV)测量靶板背面的运动速度,由运动速度计算靶板的总动量,即炸药涂层作用在靶板上的总冲量,再除以靶板炸药涂层的面积,由此得到酸性乙炔银在不同面密度条件下爆炸产生的比冲量。

图 8 为冲量传感器安装现场照片,图 9 为试验中的传感器测量用靶板及酸性乙炔银涂层。



图 8 冲量传感器安装图

Fig. 8 Installation diagram of impulse sensor



图 9 冲量传感器前靶板及涂覆药膜

Fig. 9 Impulse sensor's target sprayed with SASN

爆炸比冲量测试共进行了 7 发,图 10 为用 PDV 测量得到的靶板背面典型的速度波形,按照统一的

数据处理方法可以得到靶板初始运动速度,由此可以计算在爆炸结束时刻酸性乙炔银产生的总冲量。试验的测试结果列于表 1。

对各次试验结果进行二项式拟合,可以得到涂层的面密度与爆炸比冲量的关系(见图 11)。在试验范围内,爆炸比冲量和喷涂涂层面密度基本呈线性关系。在图 11 中也绘出了文献[14]的相关数据,与本研究测试曲线的吻合度较好。

表 1 实测不同涂层厚度的酸性乙炔银爆炸产生的比冲量

Table 1 Measured specific impulse of different thicknesses of SASN sprayed layers

Test No.	Mass of explosive/(g)	Areal density/(mg/cm ²)	Velocity of target/(m/s)	Mass of target after explosion/(g)	Specific impulse/(Pa·s)
1	0	0	0	10.3845	0
2	0.1600	22.6	7.05	10.5256	103.4
3	0.2110	29.9	14.30	10.5826	209.8
4	0.2322	32.8	13.28	10.5868	194.5
5	0.1098	15.5	—	10.4852	—
6	0.3322	47.0	19.56	10.6981	286.8
7	0.0729	10.3	3.24	10.4373	47.5

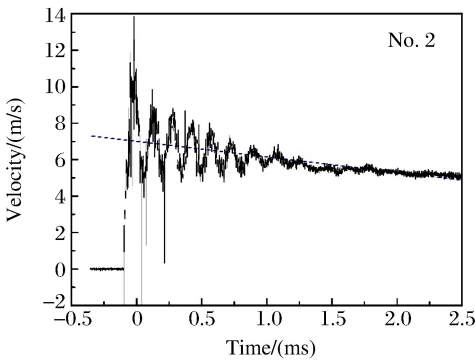


图 10 激光多普勒测速系统记录的
典型靶板背面速度波形

Fig. 10 Typical velocity curve of the target's
back measured by PDV

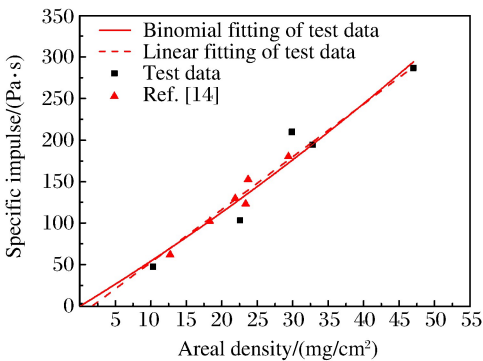


图 11 酸性乙炔银涂层面密度和
爆炸比冲量的关系

Fig. 11 Impulsive load vs. areal
density of sprayed SASN

4 结 论

采用高压脉冲闪光起爆系统进行了不同涂层厚度及面积的酸性乙炔银光起爆试验,初步验证了该方法的可靠性;开展了爆炸比冲量试验,初步确立了酸性乙炔银涂层面密度与爆炸比冲量的关系。得到如下结论:(1) 酸性乙炔银是一种相对安全的光敏感炸药,作为起爆药在强闪光条件下能被可靠地起爆;(2) 酸性乙炔银在喷涂表面的爆轰传播速度较低,可作为低过载瞬态加载源使用,在低密度条件下其爆炸比冲量与喷涂层面密度基本呈线性关系。

研究结果为进一步开展起爆同步性测量、飞片加载技术和结构响应研究奠定了基础。

References:

[1] MATHEWS F H, BENHAM R A. X-Ray simulation with light-initiated explosive [C]//The 45th Shock and Vibration Bulletin. Naval Research Laboratory, 1975: 87-91.

[2] NEVILL G E Jr, HOESE F O. Impulsive loading using sprayed silver acetylide-silver nitrate [J]. Exp Mech, 1965,

- 5(9):294-298.
- [3] HOESE F O, LANGNER C G, BAKER W E. Simultaneous initiation over large areas of a spray-deposited explosive [J]. *Exp Mech*, 1968, 8(9):392-397.
- [4] Benham R A. A new LIHE (Light Initiated High Explosive) test capability for spherical targets: SAND-86-2366C [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1987.
- [5] COVERT T T. Staubli TX-90XL robot qualification at the light initiated high explosives facility (U): SAND2010-7222 [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2010.
- [6] HOLINKA S, MONTTOYA R, TEAM L. Let there be LIHE [N]. *Sandia Lab News*, 2007-03-02.
- [7] COVERT T T. *In-situ* silver acetylide silver nitrate explosive deposition measurements using X-ray fluorescence: SAND2014-17448 [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2014.
- [8] COVERT T. VISAR validation test series at the light initiated high explosive (LIHE) facility: SAND2007-0779 [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2007.
- [9] 胡明志. 锥壳承受短脉冲载荷的实验研究 [J]. *宇航学报*, 1986(3):54-60.
- HU M Z. Experimental investigation on conical shells under short impulsive loading [J]. *Journal of Astronautics*, 1986(3):54-60.
- [10] 褚桂敏. 核爆产生的强脉冲和冲击波载荷的模拟 [J]. *强度与环境*, 1989(5):46-50.
- [11] BENHAM R A. An initiation and gas expansion model for the light-initiated explosive silver acetylide-silver nitrate: SAND79-1829 [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1979.
- [12] 高志崇. 光子的能量在光化学中的应用 [J]. *泰山学院学报*, 2009, 31(6):67-73.
- GAO Z C. The application of photon energy in photochemistry [J]. *Journal of Taishan University*, 2009, 31(6):67-73.
- [13] 刘建, 熊鹰, 蒋小华, 等. 含能材料激光诱导起爆特征波长分析 [J]. *激光技术*, 2013, 37(6):816-819.
- LIU J, XIONG Y, JIANG X H, et al. Characteristic wavelength analysis for laser-induced initiation in energetic material [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6):816-819.
- [14] COVERT T T. *In-situ* silver acetylide silver nitrate explosive deposition measurements using X-ray fluorescence: SAND2014-17448 [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2014.

Detonation Characteristics of Light-Initiated Explosive Silver Acetylide-Silver Nitrate

PEI Ming-Jing, XU Hai-Bin, WANG Deng-Wang, YAO Wei-Bo,
YANG Jun, ZHANG De-Zhi, ZHANG Jing-Sen

(*Key Laboratory of Intense Dynamic Loading and Effect, Northwest Institute of
Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

Abstract: To investigate the feasibility of applying the light-initiated explosive, silver acetylide-silver nitrate (SASN), as an effective simulation of a cold X-ray blow-off event, we carried out experimental researches on the detonation property of SASN ignited by a light flash. First we presented the basic and sensitivity characteristics of SASN, and then based on the analysis of its light-initiated mechanisms, we succeeded in igniting a large area of SASN sprayed layer by a light flash with high voltage, and conducted tests on the detonation characteristics of SASN sprayed layer initiated by light. The results indicate that SASN is a relatively safe agent of light-sensitive explosive with a relatively low detonation velocity of sprayed layer capable of providing low impulsive loads. The test results confirmed that the specific impulse of explosion from SASN is almost linear to the areal density of sprayed layer under the conditions of low-level density.

Key words: light-initiated explosive; silver acetylide-silver nitrate; ignition by light; specific impulse