

文章编号: 1006-9941(2014)06-0813-06

## 激光冲击片雷管中飞片的结构优化及性能测试

王 猛, 覃文志, 付秋菠, 何 碧, 蒋 明

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 为有效提升激光冲击片雷管的能量利用率, 需对雷管中的飞片结构进行设计和优化。在对飞片进行结构设计的基础上, 采用磁控溅射和扫描电镜(SEM)的方法完成了C/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al飞片的制备和表征, 获得了飞片各层的制备速率和表面形貌; 采用光子多普勒测速系统(PDV)测试了不同参数C/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al飞片的加速历程, 发现在相同激光入射能量下, 不同参数飞片的加速历程有所不同, 设计制备的0.05/0.7/0.7/20.0 μm复合飞片(Φ1.0mm)能量利用率最高, 飞片速度达到2301 m·s<sup>-1</sup>。结合飞片各层材料的物理特性分析得到, 石墨吸收层的反光系数、汽化能与导热性能, 及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>隔热层的表观致密度、电离势能和导热性能直接影响飞片的速度, 而飞片加速时间与石墨吸收层较高的导热率相关。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 激光冲击片雷管; 复合飞片; 光子多普勒测速系统(PDV); 飞片速度

中图分类号: TJ55; O69

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.019

### 1 引 言

激光冲击片雷管是基于激光驱动飞片起爆技术的发展而设计的, 它不仅具有抗电磁干扰的特点, 还具有时间控制精度高, 飞片冲击起爆太安(PETN)、六硝基芪(HNS)等猛炸药相对容易的优点<sup>[1-3]</sup>。激光冲击片雷管以飞片作为转换激光能量的换能元。镀在光学窗口或光纤端部的金属薄膜在高功率激光的辐照下, 受热升华、汽化、产生高温高压等离子体, 薄膜中残余薄片被等离子体膨胀推动, 产生高速飞片, 冲击炸药实现起爆<sup>[4]</sup>。

当前, 受限于高功率固体激光器小型化的不足, 以及起爆系统能量利用率较低, 激光冲击片雷管尚未实现工程化应用<sup>[5]</sup>。改进飞片结构, 是提升能量利用率、降低起爆系统对激光器能量阈值需求的关键之一。国外对激光冲击片雷管中飞片的设计与性能测试研究均较为成熟, 已掌握复合飞片的稳定制备和速度测试技术。Paisley<sup>[6]</sup>在金属飞片中增加一层绝缘材料, 有效提升了飞片的能量利用率。在其基础上, Stahl<sup>[7]</sup>在金属飞片的前端加入了一层碳黑, 减少了激光的反射, 使飞片速度提高了10%。Bowden<sup>[8]</sup>等人研究发现,

飞片各层的厚度对其速度和能量利用率也有很大影响。尽管国外在改进飞片结构方面开展了较多工作, 但实验参数不全, 相关参数飞片的效果也需要实验验证。国内的赵翔<sup>[9]</sup>、吴立志<sup>[10]</sup>针对激光驱动复合飞片的平均速度、飞片平整度、冲击压力等展开了相关研究, 但对于飞片各层材料和厚度的选择优化、飞片性能测试方面的研究不多。

飞片速度是激光冲击片雷管能量利用率的重要表征指标, 其对于可靠性设计与评估、性能优化具有重要的参考意义。在飞片速度的测试上, 国外已经非常成熟, 激光速度干涉仪(VISAR)和Fabry-Perot速度干涉仪是最常用的测速工具, 近年来, 逐步向光子多普勒测速系统(PDV)发展。PDV是一种新的位移和速度测量技术, 其利用的外差频方法能够弥补VISAR和F-P系统结构复杂、调试难度大、易于丢波的缺点。Strand<sup>[11]</sup>最早提出了PDV, 在此基础上, Jensen<sup>[12]</sup>、Dlan<sup>[13]</sup>等人做了大量工作, 对PDV的可行性进行了验证, 提高了测量精度, 扩大了测速范围。国内对PDV的研究比国外稍晚。于涛<sup>[14]</sup>、项红亮<sup>[15]</sup>对PDV测速系统的结构、检测原理、涉及公式等展开了探讨, 在此基础上, 完成了PDV的搭建和调试过程。目前, 国内对PDV的相关研究主要集中在理论层面, 对该系统在小飞片速度测试应用的报道不多。采用PDV测量飞片的加速历程, 能够为激光冲击片雷管的优化设计提供依据。

本研究在对飞片进行结构设计的基础上, 采用磁

收稿日期: 2013-12-06; 修回日期: 2014-03-03

基金项目: 中国工程物理研究院化工材料所青年人才培养基金(QNRC-201303)

作者简介: 王猛(1988-), 硕士, 研究实习员, 主要从事激光火工品及先进火工品研究。e-mail: icmwangmeng@163.com

通信联系人: 覃文志(1985-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事火工品设计与研究。e-mail: qinwenzhifrank@sina.com

控溅射和扫描电镜(SEM)的方法完成了四种参数的直径1.00 mm C/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 飞片的稳定制备和表征,并采用PDV对制得的不同参数 C/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 飞片的加速历程展开了测试。

## 2 飞片的结构优化和性能测试

### 2.1 飞片的结构设计

飞片是激光冲击片雷管的关键,飞片结构的不同将导致飞片性能的差异。飞片结构采用单层薄膜的较多,但是由于激光烧蚀飞片材料产生等离子体的高温高压作用易让飞片破碎,影响飞片与激光能量的耦合,飞片速度、冲击压力不能得到有效提升。

为了显著提高起爆系统的能量利用率,国外目前激光冲击片雷管中的飞片多为“三明治”结构<sup>[16]</sup>,即在原有单层飞片的基础上,在光学窗口末端首先增加一层吸收层材料,并在原有飞片层中增加了一层隔热层。增加吸收层的飞片,能够吸收更多激光能量,吸收层还能避免激光直接作用到薄膜上产生汽化和烧蚀。石墨的反射率低、激光吸收率高,因此可选用石墨作为复合飞片的吸收层。隔热层的增加对于提高飞片速度是有利的,主要原因是隔热层普遍采用高电离势能、高剪切强度和低导热性的难熔介电材料,它可以增加等离子体高温持续时间以便提高等离子体推动残余薄膜的压力,在材料选择上多为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。Hatt<sup>[17]</sup>认为由于金属材料密度较大、阻抗较高,能够提供更大的冲击压力,因此飞片层多选用金属材料,如 Cu、Al,而 Al 膜具有更低的飞片发射能量,因此,选用 Al 作为飞片层。为了便于对复合飞片的各层厚度展开测试,将复合飞片(C/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al)设计为图1所示台阶式飞片。

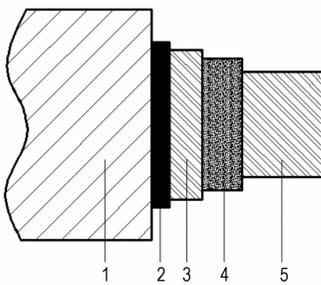


图1 复合飞片剖面示意图

1—蓝宝石基底, 2—石墨吸收层, 3—Al 烧蚀层, 4—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 隔热层, 5—Al 飞片层

Fig.1 Diagrammatic cross-section of composite flyer

1—sapphire substrate, 2—graphite absorption layer, 3—aluminum ablation layer, 4—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> insulation layer, 5—aluminum impactor layer

### 2.2 飞片的制备及形貌表征

为了得到性能稳定的 C/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 飞片,需要选择合适的成膜方式、优化镀制工艺条件。磁控溅射镀膜是一种广泛应用的镀膜技术,具有溅射镀膜针孔少、纯度高、致密性好、膜厚易于控制等显著优点,可用于多层飞片的镀制。影响溅射成膜质量的主要参数有基底温度、工作压强、溅射功率、沉积时间,因此有必要对复合飞片各层制备参数展开探讨。以蓝宝石玻璃作为基片,进行表面清洗后,放入真空磁控溅射镀膜机中。采用直流溅射方式,镀制 Al 膜。由于吸收层、隔热层采用非金属材料,因此采用射频镀膜方式制备。应用台阶仪对复合飞片各层厚度和材料的沉积速率进行分析,如表1所示。设计、制备得到的飞片参数见表2。

表1 不同制备条件下靶材沉积速率

Table 1 Deposition rate of target with different preparation conditions

target material	preparation method	preparation conditions	deposition rate /nm · h <sup>-1</sup>
graphite (C)	high vacuum magnetron sputtering (radio frequency)	125 °C, 230 W, 1.6 Pa	43
alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	high vacuum magnetron sputtering (radio frequency)	150 °C, 230 W, 1.6Pa	120
aluminum (Al)	high vacuum magnetron sputtering (direct-current)	245 °C, 90 W, 0.8 Pa	1670

表2 所制得的飞片参数

Table 2 Parameters of flyers

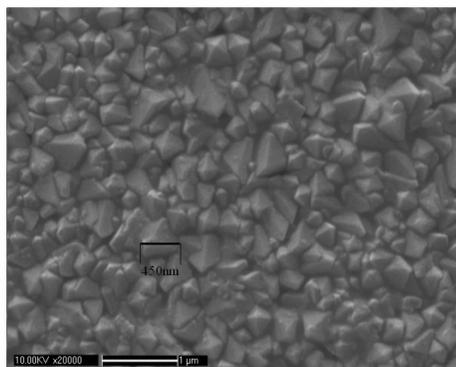
No.	absorption layer /μm	ablation layer /μm	insulation layer /μm	impactor layer /μm
1#	/	/	/	20.0(Al)
2#	/	0.70(Al)	0.70(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	20.0(Al)
3#	0.05(C)	/	/	20.0(Al)
4#	0.05(C)	0.70(Al)	0.70(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	20.0(Al)

利用扫描电镜(SEM)对制成的复合飞片表面展开形貌表征(图2)。对比图2a和图2b,可以发现磁控溅射镀成的 Al 膜和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜表面,有明显的形貌差异: Al 层有明显的颗粒状晶体, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>层没有明显的结晶; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜比 Al 膜整体致密程度好,没有孔洞缺陷。

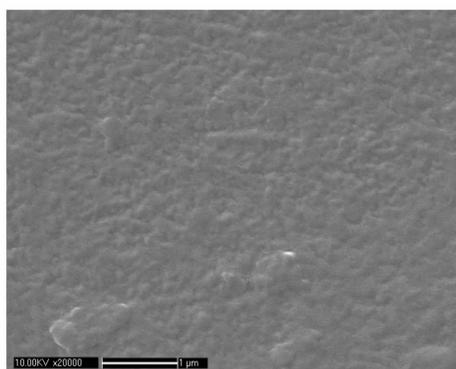
### 2.3 光子多普勒测速系统(PDV)

PDV对物体速度的测试是基于物体运动产生的光学多普勒效应,具体原理如图3。光纤探头的端面

反射光不发生多普勒频移,称为参考光  $f_0$ ; 由于飞片运动,激光束透过光纤探头后会有部分打在飞片上反射回来,这路光会产生多普勒频移,称为信号光  $f_d$ ,飞片运动速度的高低与频移大小有关。两次反射的光被探头收集,经过1号端口入射到探测器,探测器记录两次反射光产生的差拍信号,采集的数据通过示波器显示,应用数据处理软件即可得到飞片运动的加速历程。



a. Al film



b.  $Al_2O_3$  film

图2 磁控溅射镀成Al膜和 $Al_2O_3$ 膜表面的SEM照片

Fig.2 SEM photograph of Al and  $Al_2O_3$  films prepared by magnetron sputtering

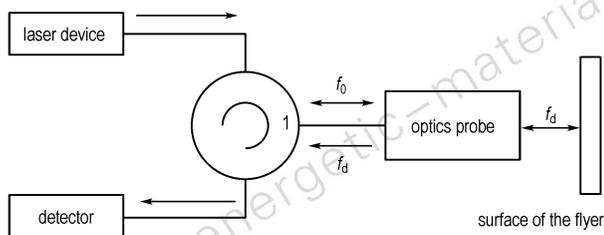


图3 PDV测试原理图

Fig.3 Schematic of photonic doppler velocimetry (PDV) test

设计了一种激光驱动小飞片测试装置,其主要结构如图4所示,其中飞片尺寸(直径×厚度)为 $\Phi 1.0\text{ mm} \times 20.0\text{ }\mu\text{m}$ ,加速膛材料为45#钢,膛口尺寸为 $\Phi 1.0\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 。固体激光器为INNOLAS生

产的Nd:YAG脉冲激光器,激光波长为1064 nm,脉宽为8.0 ns,输出能量为0~1.5 J,能量稳定度<5%。凸透镜焦距为100 mm,经聚焦后的光斑直径约1.1 mm。PDV系统中选用的激光器为全光纤激光器,输出的测速用激光波长为1050 nm;为了采集到真实有效的信号,PDV系统需选用高采样率的示波器。测试前,需要确保实验装置固定,避免装置的移动造成飞片表面的偏转,从而影响反射光路;使用可见He:Ne激光将光纤探头与飞片中心对准,确保飞片表面反射光线能顺利反射回光纤探头。

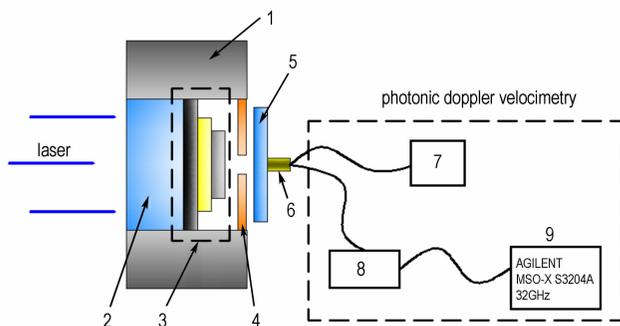


图4 PDV测速装置图

1—固定座,2—蓝宝石基底,3—多层飞片,4—加速膛,5—载玻片,6—光纤探头,7—全光纤激光器,8—探测器,9—安捷伦高采样率示波器

Fig.4 Set-up diagram of velocity measurement system with PDV 1—fix, 2—sapphire substrate, 3—flyer, 4—barrel, 5—glass slice, 6—optics probe, 7—all fiber-optics laser device, 8—detector, 9—agilent high sampling rate oscilloscope

激光烧蚀多层飞片中的烧蚀层,产生高温高压等等离子体,薄膜中残余飞片被等离子体膨胀推动,经加速膛剪切产生高速飞片。飞片反射的光信号通过光纤及光电转换器由示波器记录,其原始信号如图5所示。示波器采集的原始信号通过快速傅里叶变换(SFFT)可获得飞片速度历程。

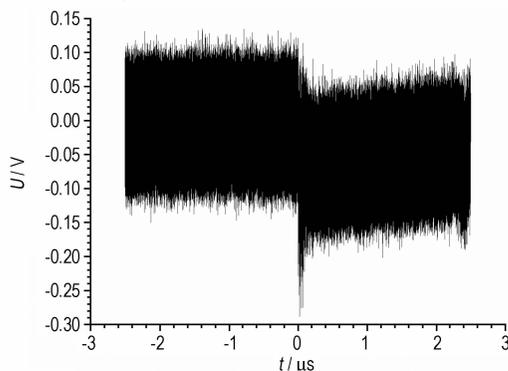


图5 示波器所获得的原始信号

Fig.5 Original signal obtained by oscilloscope

### 3 实验结果及讨论

为了分析石墨膜、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜的增加对飞片性能的影响,应用 PDV 测试了表 2 中不同结构飞片的加速历程。由于激光入射能量太高会使窗口破损,导致飞片速度降低,而激光能量太低又无法得到理想的完整飞片,因此将聚焦后激光入射能量定为 203.5 mJ,对飞片加速历程展开探讨。激光为单脉冲发射,波长为 1064 nm,脉宽为 8.0 ns,能量稳定度 < 5%,经 100 mm 透镜聚焦后的光斑直径约为 1.1 mm。同时为了实验结果具有对比性,除了飞片参数(表 2)不同,其余包括激光入射参数、加速腔参数、实验装置位置等应保持完全一致。

为了保证实验结果的真实有效,对同一飞片测试 3 发数据,结果见表 3。可以看出采用 PDV 测得的实验数据一致性较好,产生偏差的主要原因是镀制飞片有一定厚度偏差。图 6 为经过相应程序计算后,经 Origin 处理,去除噪声干扰信号,读入有效数据后得到的不同参数飞片的加速历程曲线。

表 3 飞片加速历程测试实验结果

Table 3 Test results for acceleration process of flyers

No.	velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			average / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	deviation / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	coefficient of variation / %
1 <sup>#</sup>	727	1027	694	816.0	149.8	18.36%
2 <sup>#</sup>	1938	1453	1695	1695.3	198.0	11.68%
3 <sup>#</sup>	1695	1211	1514	1473.3	199.6	13.55%
4 <sup>#</sup>	2301	2038	2059	2132.7	119.3	5.59%

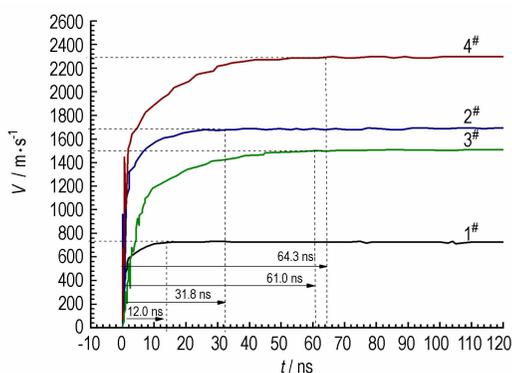


图 6 不同飞片加速历程对比曲线

Fig. 6 Acceleration process curves for different flyers

分析图 6,发现不同飞片运动初期速度都增加很快,在 60 ns 以内均能加速到飞片最大速度的 90% 以上。单层飞片(1<sup>#</sup>)加速时间最短,在 12 ns 左右飞片

已完成其加速过程。对比增加了隔热层的飞片(2<sup>#</sup>),飞片加速时间增至 31.8 ns。增加了吸收层后(3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>),飞片加速时间与单层飞片、仅增加隔热层的飞片相比大幅增加(约 60 ns)。按照飞片速度的高低依次排序为:同时增加吸收、隔热层的飞片(4<sup>#</sup>)>仅增加隔热层的飞片(2<sup>#</sup>)>仅增加吸收层的飞片(3<sup>#</sup>)>单层飞片(1<sup>#</sup>)。4<sup>#</sup>复合飞片速度最大达到  $2301 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

上述结果表明,增加吸收层会使飞片的速度有所提升。为进一步分析石墨膜与金属 Al 膜对飞片性能的影响,将石墨膜与金属 Al 膜的物理性质相比于表 4,由表 4 可见,石墨膜比 Al 膜的反光系数低,这使激光烧蚀薄膜形成等离子体前,飞片表面反射的激光能量减少程度较大。然而,石墨膜有相对较高的汽化能,这会使激光烧蚀薄膜形成等离子体所需能量大幅地增加,导致飞片的速度有所降低。同时,石墨膜有较高的导热率,并且以一种无组织形态存在,在激光烧蚀下的无序膨胀会使飞片加速时间成倍延长。因此,仅增加石墨膜作为吸收层的复合飞片(3<sup>#</sup>)的速度性能不是最优异的。

表 4 石墨膜与金属 Al 膜的物理性质对比

Table 4 Physical properties of graphite and aluminum film

parameter	aluminum	graphite
density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.70	amorphous: 1.95
reflectivity <sup>[18-19]</sup>	0.95	amorphous: 0.25
reflectivity at high irradiance <sup>[20-21]</sup>	0.1 ~ 0.2	~0
overall absorptance	0.8 ~ 0.9	~1
enthalpy of vaporization / $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[22]</sup>	10.89	29.62
thermal diffusivity / $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[23-24]</sup>	97.1	composite: 216.5

隔热层的增加会导致飞片速度的进一步提升, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜和金属 Al 膜的物理性质差异,会导致飞片性能的不同。由图 2 可知, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜比 Al 膜整体致密程度好,没有孔洞缺陷。相较于单层 Al 膜飞片,复合飞片中增加致密性好的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜作为隔热层,能减少等离子体的过渡烧蚀,提升飞片的完整性,减少等离子体的过度烧蚀,提升飞片速度。进一步地,对比  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜与金属 Al 膜的物理性质(表 5),可以发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜具有高电离势能、高剪切强度和低导热性的特征。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜的高电离势能和低导热性保证了隔热层可以有效隔绝烧蚀层产生的高温高压等离子体,避免了等离子体对飞片层的过度烧蚀,保证了飞片厚度的可控和保持飞片良好的完整性。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜的高剪切强度导致了等离子体驱动复合飞片从加速腔中剪切形成的时间有所

增加,使复合飞片的加速时间相比单层飞片有所延长。增加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜作为隔热层的同时,会导致飞片整体密度的增加,使飞片的速度又有降低。因此,仅增加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜作为隔热层的复合飞片的速度性能不是最优的。

表 5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜与金属 Al 膜的物理性质对比

Table 5 Physical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and Al film

parameter	Al	$\text{Al}_2\text{O}_3$
density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.70	3.97
ionization energy/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ [25]	577.5	1675.7
thermal conductivity/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [26]	237	30
shear strength/ $\text{MPa}$ [27]	207	330

进一步地对 PDV 测试结果展开分析,发现同时增加石墨吸收层与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  隔热层的复合飞片(4<sup>#</sup>)速度最高,飞片加速时间最长。分析认为,这是吸收层与石墨层共同作用的结果,而飞片加速时间的增加是石墨吸收层的作用。综合上述分析可以认为,复合飞片中的各层对飞片性能的提升起着不同的作用,激光驱动复合飞片的换能机理大致如下:复合薄膜中的吸收层吸收激光能量,将光能转换为热能,吸收层的金属材料在热烧蚀下升华、汽化、产生等离子体,将热能转化为等离子体能量,高温高压等离子体进一步膨胀,驱动剩余薄膜从炮筒中剪切形成飞片,最终将等离子体能量转化为飞片动能。

## 4 结 论

(1) 采用磁控溅射的制备方法制得了复合飞片,获得了复合飞片各层选用材料的制备参数和沉积速率,其中 C 膜在  $125\text{ }^\circ\text{C}$  镀膜温度,230 W 射频功率,1.6 Pa Ar 气压下的沉积速率为  $43\text{ nm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜在  $150\text{ }^\circ\text{C}$  镀膜温度,230 W 射频功率,1.6 Pa Ar 气压下的沉积速率为  $120\text{ nm} \cdot \text{h}^{-1}$ , Al 膜在  $245\text{ }^\circ\text{C}$  镀膜温度,90 W 直流功率,0.8 Pa Ar 气压下的沉积速率为  $1670\text{ nm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,采用 SEM 对复合飞片表面形貌进行了表征,发现制得的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜比 Al 膜整体致密程度好,没有孔洞缺陷。

(2) 应用 PDV 测速系统对四种复合飞片的加速历程展开了测试,发现在相同激光入射能量下,不同飞片的加速历程有所不同,设计制备的 C/Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Al (0.05/0.7/0.7/20.0  $\mu\text{m}$ ) 复合飞片( $\Phi 1.0\text{ mm}$ )性能最优,飞片速度最高能达到  $2301\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3) 结合飞片中各层材料的物理性能进行分析,发现复合飞片的速度与石墨吸收层的反光系数、汽化能、导热性能,及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  隔热层的表观致密度、电离势能和导热性能相关,飞片加速时间的增加与石墨吸收层较高的导热率相关。

结合试验结果,可以认为复合飞片中的各层对飞片性能的提升起着不同的作用。在复合飞片各层材料的选择上,吸收层应选用具有低反光系数、低汽化能与高导热性能的材料,如可以选用碳的纳米材料;而隔热层应选用具有高致密程度、高电离势能和低导热性能的材料。同时,还应借助其他先进试验手段(如等离子体光谱仪、热电偶快速测温装置、导热率测试仪等)对材料的物理性能与飞片速度的相关规律及换能机理进行系统研究。

致谢:感谢南京理工大学沈瑞琪教授提供的光子多普勒测速系统(PDV)实验平台,以及吴立志老师、陈少杰博士在激光驱动飞片的速度测试、数据处理方面的指导和帮助。

## 参考文献:

- [1] Yong L D, Nguyen T, Waschl J. Laser ignition of explosives, pyrotechnics and propellants: a review, Report NO. AD-A299465 [R], 1995.
- [2] Kennedy J E. Motivation for laser detonator and firing system developments[C] // Proceedings of SPIE. San Diego: CA, 2006, 6287: 62870807-62870809.
- [3] 吴立志, 沈瑞琪, 徐姣, 等. 激光驱动飞片技术的研究进展[J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 219-228.  
WU Li-zhi, SHEN Rui-qi, XU Jiao, et al. Research advance in laser-driven flyer technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(2): 219-228.
- [4] Bowden M D, Drake R C. The initiation of high surface area PETN using fiber-coupled laser-driven flyer plates[C] // Proceedings of SPIE. San Diego: CA, 2007, 6662: 66620D1-66620D12.
- [5] 王猛, 何碧, 蒋明. 激光冲击起爆炸药关键技术研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(4): 527-532  
WANG Meng, HE Bi, JIANG Ming. Review on key technologies of laser-driven miniflyer system[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4): 527-532
- [6] Paisley D L. Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives. DE89016587 [R], 1989.
- [7] Stahl D B, Paisley D L. Carbon assisted flyer plates: US-5301612 [P]. 1994.
- [8] Bowden M D, Knowles S L. Optimisation of laser-driven flyer velocity using photonic Doppler velocimetry [C] // Proceedings of SPIE: Optical technologies for arming, safing, fuzing and firing: San Diego: CA, 2009, 7434: 1-11
- [9] 赵翔. 激光驱动飞片点火设计技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.  
ZHAO Xiang. The technology research on initiation design of laser-driven flyer plates[D]. Mianyang: CAEP, 2009.
- [10] 吴立志. 激光驱动金属飞片冲击起爆技术研究[D]. 南京: 南京

- 理工大学, 2010.
- WU Li-zhi. Shock Initiation Technology of Explosives by Laser-driven Metal Flyer[D]. Nanjing: NJUST, 2010.
- [11] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R. Velocimetry using heterodyne techniques. UCRL-CONF2206034[R]. 2004.
- [12] Jensen B J, Holtkamp D B, Rigg P A, et al. Accuracy limits and window corrections for photonic doppler velocimetry[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 013523.
- [13] Dlan D H, Jones S C. Push-pull analysis of photonic doppler velocimetry measurements [J]. *Review of Science Instruments*, 2007, 78: 076102.
- [14] 于涛. 光子多普勒速度测量系统的研制及其应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- YU Tao. Development and the application of the photonic doppler velocimetry[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [15] 项红亮. 光子多普勒速度测量系统的数据处理方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- XIANG Hong-liang. Data processing of photonic doppler velocimetry system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [16] Miller W. Set-up and Evaluation of Laser-driven Miniflyer System [D]. Master Degree. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009.
- [17] Hatt D J, Waschl J A. A study of laser-driven flyer plates[C]// Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. UK: NASA, 1996, 370: 1221-1224.
- [18] Rakic A D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum [J]. *Applied Optics*, 1995, 34 (22): 4755-4767
- [19] Palik E D. Handbook of optical constants of solids II[M]. Boston: Academic, 1991.
- [20] McMordie J A, Roberts P D. Interaction of Pulsed CO<sub>2</sub> Laser Radiation With Al[J]. *Applied Physics*, 1975, 8(7): 769-781.
- [21] Benavides O, Lebedeva O, Golikov V. Reflection of nanosecond Nd:YAG laser-pulse in ablation of metals [J]. *Optical Express*, 2011, 19: 21842-21848
- [22] Podesta M D. Understanding the properties of matter[M]. London: Taylor & Francis, 2002, 2nd edn.
- [23] Cengel Y A. Introduction to thermodynamics and heat transfer [M]. Reno: McGraw-Hill, 2008, 2nd edn.
- [24] Casalegno V, Vavassori P, Valle M, et al. Measurement of thermal properties of a ceramic/metal joint by laser flash method[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2010, 407(2): 83-87.
- [25] Watanabe A, Kato H, Yoshikawa K. Properties of alumina/Al/alumina joints produced in air atmosphere[J]. *Materials Science and Technology*, 1993, 9(2): 155-160.
- [26] Catalogue. Metals, alloys, compounds, ceramics, polymers, composites[M]. Cambridge: GoodfellowMetals Ltd, 1994.
- [27] Zumdahl, Steven S. Chemical principles[M]. Houghton: Mifflin Company, 2009, 6th Edn.

## Structure Optimization and Velocity Measurement of Flyer in Laser Slapper Detonator

WANG Meng, QIN Wen-zhi, FU Qiu-bo, HE Bi, JIANG Ming

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** In order to increase the utilization efficiency of laser slapper detonator, it's necessary to improve and optimize the flyer structure. On the basis structure of flyer, the C/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al multi-flyers were prepared by the magnetron sputtering, and the performances of flyers were studied by scanning electron microscope. Taking advantage of photonic doppler velocimetry(PDV), it is found that the accelerating processes of flyers with different parameters are not same, and multi-flyer with the 0.05/0.7/0.7/20.0 μm thickness 1.0 mm diameter reaches a maximum velocity of 2301 m · s<sup>-1</sup>. Combined with the analysis of physical properties, the influence of each material used in multi-flyers were discussed. Results show that the velocity of multi-flyer is influenced by reflectivity, vaporization enthalpy and thermal diffusivity of graphite layer, as well as the compactness, ionization energy and thermal conductivity of alumina layer. The accelerating time of multi-flyer is determined by the physical properties of thermal conductivity of graphite layer.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics technique; laser slapper detonator; multiple flyer; photonic doppler velocimetry (PDV); velocity of flyer

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.019