

文章编号: 1006-9941(2014)02-0259-04

飞片材料对电爆驱动飞片速度的影响

王翔, 谭凯元, 文尚刚, 刘清杰, 叶辉

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用任意反射面激光位移干涉测试技术(Displacement Interferometer System for Any Reflector, DISAR)分别获得了聚酯薄膜飞片、铝/聚酯薄膜飞片及铜/聚酯薄膜飞片在金属箔电爆驱动下的速度历程。结果表明,在充电电压为 25.4 kV 时,聚酯薄膜飞片在加速腔中的有效加速时间为 1.6 μs ,最高速度约 4.4 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$;铝/聚酯薄膜飞片和铜/聚酯薄膜飞片在加速腔中的有效加速时间均大于 3.0 μs ,最高速度均小于 4.0 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。电爆驱动时,飞片材料对其运动特性有较大影响。金属/聚酯薄膜飞片相对于聚酯薄膜飞片更利于保持飞片的运行姿态,但飞行同样距离时其速度要低。

关键词: 应用物理;任意反射面激光位移干涉测试技术(DISAR);飞片速度历程;金属箔电爆

中图分类号: TJ55; O59

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.027

1 引言

电爆驱动飞片是强脉冲电流快速加热金属箔片导致其气化、爆炸并驱动飞片高速运动的一种短脉冲加载技术,它在炸药起爆特性、材料动态力学性能研究领域均有重要应用。可调节飞片速度和厚度来实现其在目标靶中产生的压力大小和脉宽,因此,准确测定飞片运动速度非常重要。电爆驱动下飞片运动速度可由理论预估和实验获得。理论预估主要通过分析电爆驱动飞片运动的物理过程,建立相应的物理模型,用数值或解析的方法求解^[1]。实验研究主要借助光学或光电结合的实验技术获得电爆驱动飞片运动的速度历史。电爆驱动飞片速度的实验测试技术主要分为有机玻璃台阶段法和激光干涉测速方法。1976年,Weingart Lee^[2]首先将有机玻璃台阶段法用于测试电爆驱动飞片速度,其缺点是只能测试飞片飞行过程中飞片某一段飞行距离内的平均速率,无法记录飞片加速、飞行的全过程,而且测试误差较大。20世纪80年代末90年代初,随着激光干涉测试技术的发展,任意反射面激光干涉测速(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)^[3-5]技术在电爆驱动飞片速度测试中发挥了重要作用。但任意反射面激光位移干涉测试技术(DISAR)却是近十年发展起来的波剖面激光位移干涉

测速方法^[6-8],它是应用光的多普勒频移效应,通过记录某一运动介质在不同时间(时间间隔极小)的反射光的差拍频率,从而获得运动介质的位移-时间历程,与VISAR技术相比,不会发生条纹丢失现象且能够测量匀速运动目标。目前国内外对电爆驱动飞片研究大都采用聚酯薄膜(Mylar)或聚酰亚胺薄膜作为飞片材料,而利用其它材料的飞片特别是带有金属材料的飞片进行研究的还鲜见报道。为了研究不同飞片材料对电爆驱动飞片运动特性的影响,本实验采用DISAR测试技术对电爆驱动铝/聚酯薄膜、铜/聚酯薄膜组合飞片及单独的聚酯薄膜飞片运动速度历程进行了测试。

2 实验

2.1 实验原理

DISAR测速系统基本原理如图1所示,它是利用激光照射运动样品时产生的多普勒效应进行速度测试的。

激光器发射一束激光入射到运动样品表面,入射光与样品的运动方向夹角为 θ_1 ,样品的运动速度为 v ,则在 θ_1 方向上放置的探测器接收光频率为:

$$f = f_0 + \frac{v}{c} f_0 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (1)$$

式中, f 和 f_0 分别为反射激光和入射激光频率,Hz; c 为空气中的光速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; θ_1 和 θ_2 分别为入射激光和反射激光与被测物体运动方向的夹角,°。

在位移干涉仪中,入射光与反射光几乎都垂直于运动样品表面,此时,则公式(1)简化为:

收稿日期: 2013-04-02; 修回日期: 2013-06-26

作者简介: 王翔(1974-), 硕士, 助理研究员, 主要从事炸药爆轰性能研究。e-mail: wx5711@21cn.com

$$\Delta f = f - f_0 = \frac{2v}{c} f_0 = \frac{2v}{\lambda_0} \quad (2)$$

式中, Δf 为反射激光对入射激光的频率变化, Hz; λ_0 为入射激光的波长, nm。

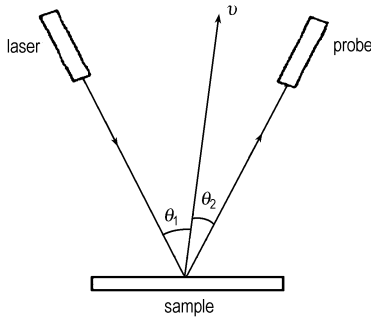


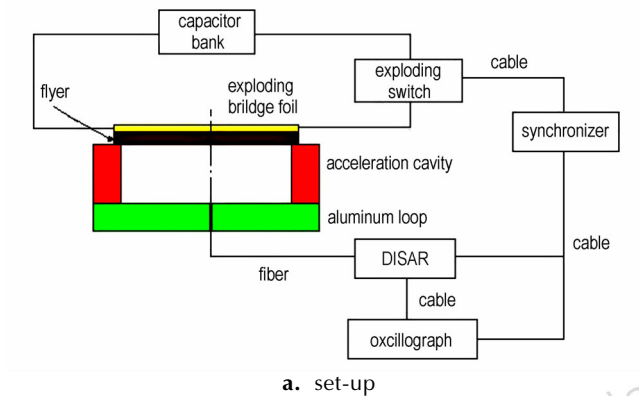
图 1 DISAR 系统基本原理图

Fig.1 Schematic diagram of DISAR system

因此,只要利用光学干涉混频技术检测出光频的变化 Δf ,即可计算得到样品的运动速度。

2.2 实验装置

采用 DISAR 测试技术测量飞片的运动速度试验框图及爆炸桥箔组件照片如图 2 所示。



a. set-up



b. exploding bridge foil

图 2 装置示意图及桥箔组件照片

Fig.2 Sketch of the set-up and photo of the exploding bridge foil

电容器充电完毕后,同步机给出同步触发信号触发爆炸开关(高压引爆雷管,接通开关),接通回路,电容器开始放电,电流使爆炸桥箔熔化、气化并进一步爆炸,剪切出飞片,并在加速腔中被加速到很高的速度。在同步机触发高压开关的同时,也触发 DISAR 测速系统及记录信号的示波器。DISAR 测速系统被触发后,激光由发射光纤输出,由光纤探头发射到飞片的表面,被反射后携带速度信息的光束由接收光纤引到 DISAR 测速系统,并通过光电倍增管转换成电信号,由同步触发的示波器完成电信号的记录,然后采用数据处理程序计算出电爆驱动飞片的自由面速度及在加速腔中的相应位移。本次实验参数如下:电容器放电电容 31.76 μF ,回路电感 30 nH,桥箔尺寸 20 mm \times 20 mm \times 0.05 mm。

2.3 飞片尺寸及表面处理

实验中飞片材料参数及加速腔尺寸见表 1,飞片材料力学参数见表 2。

表 1 飞片材料参数及加速腔尺寸

Table 1 Parameters of flyer materials and size of acceleration cavity

sample	materials and thickness of flyer	areal density of flyer/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	size of acceleration cavity/mm
1	0.2mm Mylar	0.026	$\Phi 10 \times 8$
2	0.2mm Mylar+0.1mm Al	0.056	$\Phi 10 \times 18$
3	0.2mm Mylar+0.2mm Al	0.083	$\Phi 10 \times 18$
4	0.2mm Mylar+0.1mm Cu	0.115	$\Phi 10 \times 10$

表 2 飞片速度测试结果

Table 2 Experimental velocities of flyer

sample	available acceleration time/ μs	available acceleration distance/mm	maximum velocity in available distance/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	velocity of 3 mm distance/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	velocity of 5 mm distance/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
1	1.6	5.6	4.4	4.4	4.4
2	3.2	9.4	3.9	3.6	3.6
3	3.4	7.1	3.1	2.9	2.9
4	3.1	6.1	2.7	2.6	2.6

由于桥箔爆炸时会产生很强的爆炸发光,如果飞片是透明或半透明材料,爆炸发光就会透过飞片,进入测试系统,对系统测试信号产生严重的干扰,甚至淹没测试信号,导致测试失败。在本实验中聚酯薄膜飞片是半透明材料,具有较高的透光率,较低的反射率。透光率高将导致爆炸箔爆炸发光对信号产生很强的干扰,反射率低将导致反射光功率低而无法产生干涉信号。因此,对于半透明的聚酯薄膜飞片,在其表面贴了

一层 1 μm 厚的铝膜来降低透光率、增加反射率,进而提高测试精度;对于金属/聚酯薄膜组合飞片,由于金属层本身是不透明的,为了提高测试精度只需增加金属层自由面的反射率即可。增加金属层自由面的反射率有两种方式可采用:(1)对金属层自由面进行打磨光滑处理;(2)在金属层自由面贴膜(镀膜)。为了与聚酯薄膜飞片进行对比,本实验采用第二种方式,即在金属层自由面贴一层 1 μm 厚的铝膜。

3 实验结果及数据处理

充电电压 25.4 kV 时,采用 DISAR 测试技术测得表 1 所示 4 组飞片的速度历程曲线,如图 3 所示。据图 3 变换后得到的飞片速度-位移曲线如图 4 所示。

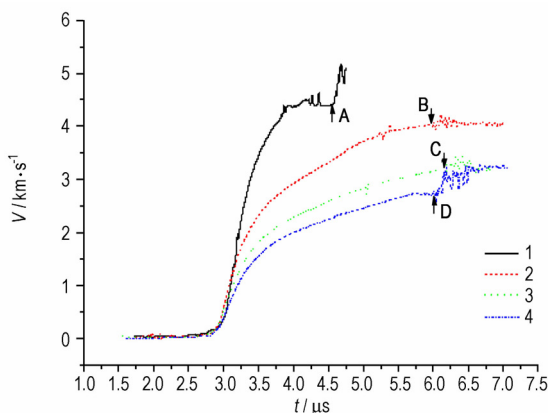


图 3 飞片速度历程曲线

Fig. 3 Velocity-time curves of flyer

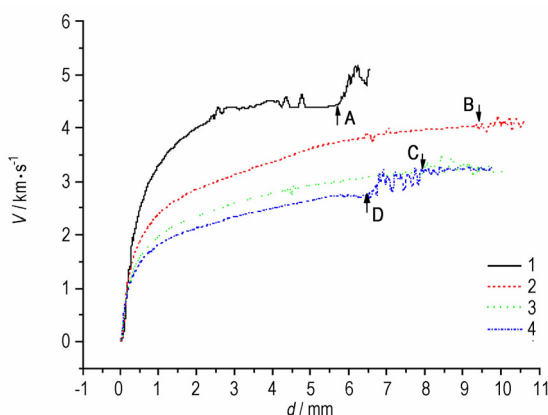


图 4 飞片速度-位移曲线

Fig. 4 Velocity-distance curves of flyer

从图 3 和图 4 可以看出,虽然这 4 组试验充电电压一致,即给飞片提供的能量一致,但是由于飞片材料及厚度不同,飞片的运动特性差别较大。聚酯薄膜飞

片(第 1 组),在加速腔中运行到 4.5 μs 时,飞片速度有一个间断跳跃(图 3 和图 4 中 A 点对应位置),说明此时飞片运动姿态发生明显的变化,飞片的完整性或平面性可能遭到破坏,而对于金属/聚酯薄膜组合飞片(第 2,3,4 组),它们在加速腔中的有效运行时间远大于聚酯薄膜飞片,直到 6.0 μs 以后飞片速度才有明显的震荡((图 3 和图 4 中 B、C、D 点对应位置)。根据图 3 和图 4 得到的结果见表 2。

从表 2 可以看出,铝/聚酯薄膜(第 2 组和第 3 组)、铜/聚酯薄膜(第 4 组)组合飞片在加速腔中的有效加速时间均大于 3 μs,有效飞行距离大于 6 mm,而单独的聚酯薄膜飞片(第 1 组)有效加速时间只有 1.6 μs,其有效飞行距离也只有 5.6 mm,这说明飞片材料对飞片运动特性影响很大,金属/聚酯薄膜组合飞片相对于单独的聚酯薄膜飞片更有利于保持飞片的运行姿态。分析原因可能是由于组合飞片中的金属层 H62 黄铜和 2A12 铝具有良好的延展性,易加工成非常薄的箔片,同时它们也有良好的韧性,较聚酯薄膜有更好的力学强度(其中黄铜 H62 的抗拉强度为 410 ~ 630 MPa^[9],2A12 铝抗拉强度大于 420 MPa^[10],聚酯薄膜抗拉强度为 140 MPa^[11]),因此组合飞片更有利于保持飞片的运行姿态。根据表 1 数据及图 3 速度曲线还可以得到飞片在加速腔中飞行不同距离处速度随面密度的变化关系,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,飞片面密度对飞片运动速度有较大影响,随着飞片面密度增加,飞片速度明显降低。单独的聚酯薄膜飞片面密度最小,在加速腔中飞行 5 mm 时速度最高,达到 4.4 km·s⁻¹,0.1 mm 铜/聚酯薄膜组合飞片面密度最大,同样在加速腔中飞行 5 mm 时速度却只有 2.6 km·s⁻¹。

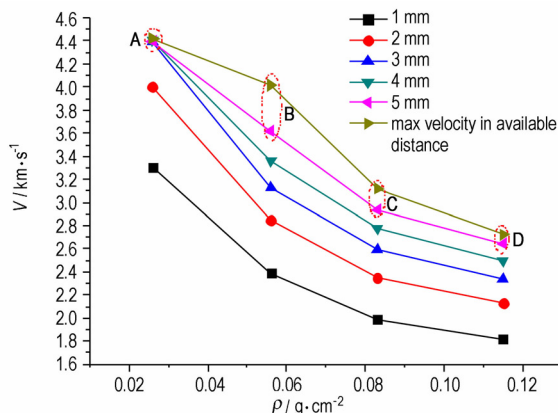


图 5 飞片面密度对其速度的影响

Fig. 5 Influence of areal density of flyer on its velocity

从图 5 还可以看出,对于面密度较低的聚酯薄膜飞片在加速腔中飞行 3 mm 时,其速度就接近最大值(飞片在加速腔中飞行 3,4,5 mm 时速度与最大速度值几乎重合,图 5 中 A 点对应位置),而对于面密度较大的组合飞片即使在加速腔中飞行 5 mm 时,其速度仍没有达到最大值(图 5 中 B、C、D 对应位置),这说明面密度越小,飞片达到最大速度的有效加速距离越短。

4 结 论

采用 DISAR 测试技术分别获得了聚酯薄膜飞片及金属/聚酯薄膜组合飞片在电爆驱动下的速度历程。在充电电压为 25.4 kV 时,对于面密度较小的聚酯薄膜飞片,在加速腔中的有效加速时间为 1.6 μs ,有效飞行距离为 5.6 mm,加速到的最高速度约 4.4 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$;对于面密度较大的金属/聚酯薄膜组合飞片,在加速腔中的有效加速时间均大于 3.0 μs ,有效飞行距离均大于 6 mm,但加速到的最大速度均小于 4.0 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验结果表明飞片材料和面密度对飞片运动特性影响较大:(1)金属/聚酯薄膜组合飞片相对于单独的聚酯薄膜飞片更利于保持飞片的运行姿态;(2)飞片面密度越高,运动速度越低,因此金属/聚酯薄膜组合飞片相对于单独的聚酯薄膜飞片飞行同样距离时速度要低。

参考文献:

- [1] Schmidt S C, Seitz W L, Wachlerle J. An empirical model to compute the velocity history of flyers driven by electrically exploding foils[R]. AD-A277726, 1977.
- [2] Weingart R C, Lee R S, Jackson R K, et al. Acceleration of thin flyers by exploding metal foils; application to initiation studies [C]//6th Symposium (Int.) on Detonation. 1976: 653-663.
- [3] Paisley D L, Montoya N I, Stahl D B, et al. Interferometry and high

- speed photography of laser-driven flyer plate[R]. DE89016990, 1989.
- [4] 何碧, 蒋小华, 李泽仁, 等. 用双灵敏度 VISAR 测试爆炸箔起爆器的飞片速度[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 32-34. HE Bi, JIANG Xiao-hua, LI Ze-ren, et al. Flyer velocity measurement of a exploding foil initiation system using a double-sensitivity VISAR[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(1): 32-34.
- [5] 邓向阳, 赵剑衡, 马冬莉, 等. 电炮驱动薄膜飞片的运动速度[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 382-384. DENG Xiang-yang, ZHAO Jian-heng, MA Don-li, et al. Experimental study on velocity of a film flyer driven by electric gun[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 382-384.
- [6] Tasker D G, Whitley V H, Lee R J. Electromagnetic Field Effects in Explosives [C] // Proceedings of the Conference on Shock Compression of Condensed Matter, AIP Conf. Proceedings 1195, Nashville, TN, 2009.
- [7] Matthew E Briggs, Larry G Hill, Lawrence M Hull, et al. Applications and principles of photon doppler velocimetry for explosive testing [C] // 14th International Symposium on Detonation, Coeur d'Alene (ID), USA, 2010.
- [8] Mercier P, Benier J, Azzolina A, et al. Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments [J]. *J Phys IV France*, 2006, 134: 805-812.
- [9] 全国有色金属标准化技术委员会. GB/T2040-2002 铜及铜合金 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002. National Technical Committee on Nonferrous Metals of Standardization Administration of china. GB/T2040-2002 Sheet copper and copper alloy [S]. Beijing: Standards Press of china, 2002.
- [10] 全国有色金属标准化技术委员会. GB/T3191-1998 铝及铝合金挤压棒材 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998. National Technical Committee on Nonferrous Metals of Standardization Administration of china. GB/T3191-1998 Extrusion rods and bars of aluminium and aluminium alloy [S]. Beijing: Standards Press of china, 1998.
- [11] 全国绝缘材料标准化技术委员会. GB/T13542.4-2009 电器绝缘用薄膜-第 4 部分: 聚酯薄膜 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. National Technical Committee on Insulation materials of Standardization Administration of china. GB/T13542.4-2009 Film for Electrical Insulation-Part 4: Polyethylene Terephthalate Film Used for Electrical Insulation [S]. Beijing: Standards Press of china, 2009.

Influence of Flyer Materials on Flyer Velocity Driven by Electric Explosion

WANG Xiang, TAN Kai-yuan, WEN Shang-gang, LIU Qing-jie, YE Hui

(Institute of Chemical Materials, China Academe of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The velocity histories of the Mylar flyer, Al/Mylar double-layer and Cu/Mylar double-layer driven by electric explosion of metallic foil were recorded by displacement interferometer system for any reflector (DISAR). Results show that at the charging voltage of 25.4 kV, the effective driven time and maximum flyer velocity in acceleration cavity is 1.6 μs and 4.4 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ for the Mylar flyer, and longer than 3.0 μs and lower than 4.0 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ for the Al/Mylar double-layer and Cu/Mylar double-layer, respectively. The materials of flyers play significant roles in their movement when it is driven by electric explosion. In comparison with the Mylar flyer, the metal/Mylar double-layer flyer is more conducive to keep running posture of flyer, but its speed is lower when flying the same distance.

Key words: applied physics; displacement interferometer system for any reflector (DISAR); velocity histories of flyer; electrical explosion of metallic foil

CLC number: TJ55; O59

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.027