文章编号:1000-5773(2012)03-0251-08

二级电炮加载技术研究*

罗斌强[1,2],赵剑衡[2],孙承纬[2],莫建军[2],贺　佳[2],
张兴卫[2],王桂吉[2],谭福利[2]

(1.中国科学技术大学,中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽合肥　230027;
2.中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳　621900)

摘要:利用常规电炮发射金属飞片的实验技术,将∅10 mm×0.5 mm、∅10 mm×0.3 mm铝飞片分别发射到300、500 m/s的速度且具有较好的平面度,有效拓展了电炮在相对较低的飞片发射速度和较低应变率下的加载能力(飞片速度约100 m/s、应变率小于10^6 s^{-1}),使之可以在更宽的应变率和加载压力下使用。利用二级电炮技术,对$Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$块体非晶合金进行了平面撞击实验,获得了较好的结果,该工作对电炮加载技术的推广应用有着重要的作用。

关键词:电炮;金属飞片;加载技术
中图分类号:O347.5　　**文献标识码**:A

1　引　言

电炮最早由Keller等[1]在1962年提出,其原理是通过金属箔片电爆炸产生的高温高压等离子体膨胀推动绝缘飞片高速运动。美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)对电炮进行了深入研究,飞片直径从毫米级发展到十几个厘米量级,飞片速度高达18 km/s,加载压力接近太帕量级[2-5]。国内的电炮技术是1981年徐兴海等[6]发展起来的,可将毫米级直径的飞片发射到4.5 km/s的速度。2004年,赵剑衡等[7-9]进一步发展了紧凑、高效能的电炮技术,在储能14.4 kJ电炮装置上将直径10 mm的Mylar膜飞片发射到近10 km/s的高速,同时解决了在强光、强磁场干扰下电炮的相关诊断测试问题。与传统的气炮与化爆加载相比,电炮具有结构紧凑、操作简单、冲击波的压力和脉宽方便可调、测量精度高且平面性好等优点,是状态方程、炸药冲击引爆、超高速碰撞及高应变率加载下材料动态力学性能研究等方面不可或缺的重要的加载手段。

由于电炮是通过电爆炸产生的等离子体驱动飞片,用以获得高的飞片速度和高应变率加载,因而不适合驱动厚的金属飞片(飞片速度较低,难以达到一级气炮和火药炮所能覆盖的相对较低的压力范围和加载应变率)。为了拓展电炮在相对较低应变率加载和低速飞片驱动方面的应用,丰树平、孙承纬[10]等提出了二级电炮的概念,其原理是利用一级飞片撞击衰减板,降低冲击波的幅值并展宽其脉冲宽度,然后驱动紧贴在衰减板后面的金属片,以获得较低速度的二级飞片。利用二级电炮,可将重金属飞片稳定发射到几十至一百多米每秒的速度,这是气炮和火药炮难以做到的。丰树平等已将二级电炮技术成功

* **收稿日期**:2010-11-18;**修回日期**:2011-01-02
基金项目:国家自然科学基金重点项目(10732010);国家自然科学基金仪器专项(10927201);中国工程物理研究院重点基金(2010A0201006)
作者简介:罗斌强(1985—),男,博士研究生,主要从事动态加载技术与材料动力学性能研究.E-mail:lbq@mail.ustc.edu.cn
通讯作者:赵剑衡(1969—),男,研究员,主要从事强激光与物质相互作用、冲击动力学等领域的研究.
E-mail:jhzhao@caep.ac.cn

应用于低速平板撞击下铝的损伤演化研究中，但受当时条件的限制，对冲击波在衰减板内的衰减、二级飞片和衰减板的脱离、二级飞片速度与平面性等问题均未能进行深入研究和分析，给后期的应用带来了许多不确定因素，限制了二级电炮实验技术的推广和应用。本研究采用实验和数值模拟相结合的方法，对影响二级飞片发射的各种因素进行了深入细致的研究，给出了衰减板的优化结构，使之成为一种成熟的加载技术，拓展了电炮的应用范围，并将其成功应用于金属玻璃的动力学响应研究。

2 工作原理

电炮的电路结构是一个典型的 RLC 回路，其工作原理可参考文献[8]。当开关导通后，储存在电容器里的能量瞬间释放，回路产生脉冲大电流。当大电流流经负载区时，搭接在桥区的金属箔片由于横截面积最小，电流密度急剧增大，金属箔片快速熔化并汽化，瞬间使电路断开，从而引起桥区两端产生高压，高压击穿金属蒸汽后形成高温高压等离子体，推动覆盖其上的塑料薄膜（如 Mylar 膜），塑料薄膜经加速腔炮膛孔切割成圆形飞片，飞片加速到接近终态速度时撞击样品。

二级电炮的结构如图 1 所示，高速飞行的一级飞片（Mylar 膜）撞击衰减板并在衰减板中产生冲击波，通过改变衰减板的厚度与材料，可调节冲击波的脉冲幅值与宽度。经衰减板调节后的压缩波进入二级飞片并在飞片自由面反射，反射稀疏波到达衰减板/二级飞片界面时，将二级飞片拉离衰减板并发射出去。由于入射冲击波经衰减板调节后脉冲宽度增大，幅值降低，使得二级飞片的厚度相比一级飞片明显增大，同时二级飞片的速度也远远低于一级飞片。由于不存在电流流通的问题，所以二级飞片的材料可选用金属。

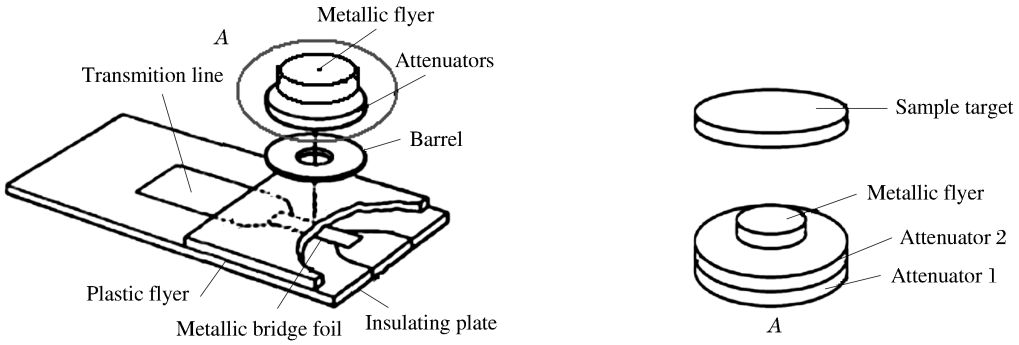


图 1 二级电炮结构图

Fig. 1 Schematic of two-stage electric gun

3 结果与分析

利用波效应发射金属飞片，理想的情况是：进入金属飞片的方波脉宽恰好等于波在飞片中走一个来回的时间，飞片整体将以相同的速度向外飞出，且飞片中不会存在粒子速度的震荡，此时无论进入金属飞片的压缩波幅值有多高，飞片总能保持完整而不发生层裂。因此，选择合适的衰减板和金属飞片，使进入二级飞片的压缩波脉宽和二级飞片厚度尽量匹配，是二级飞片发射过程中极为重要的环节。

不考虑充电电压、桥箔板尺寸等因素对一级飞片发射的影响，将高速飞行的一级飞片（Mylar 飞片）看作二级飞片实验的输入条件。下面从衰减板的材料与尺寸、二级飞片的材料与尺寸、二级飞片与衰减板的脱离、衰减板结构以及二级飞片平面性等方面，对二级电炮实验技术进行分析。

3.1 衰减板

对于确定厚度的二级飞片，调节进入二级飞片压缩脉冲宽度简单而有效的方法是，改变衰减板的材料或厚度。图 2 是采用 LS-DYNA 软件计算出的用 0.15 mm 厚 Mylar 膜撞击铜衰减板，在衰减板不同

厚度处压力脉冲随时间变化的曲线，显然，衰减板越厚，追赶卸载的持续时间越长，压力脉冲宽度与幅值的变化也越明显。图 3 是用有机玻璃和铜作衰减板时，在相同位置处压力脉冲随时间的变化曲线，显然，有机玻璃对入射压缩脉冲宽度与幅值的调整比铜强烈得多。对比图 2 和图 3 可知，衰减板材料的选取对压缩脉冲的调节较为明显。

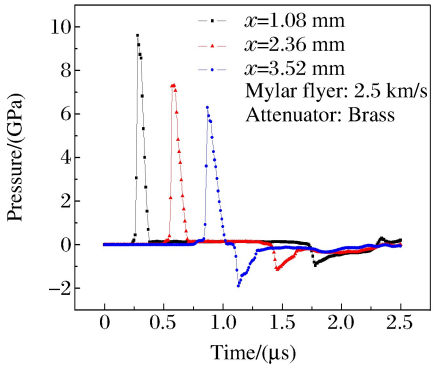


图 2 不同厚度衰减板对压缩脉冲的调整

Fig. 2 Effect of attenuator thickness on pulse shape

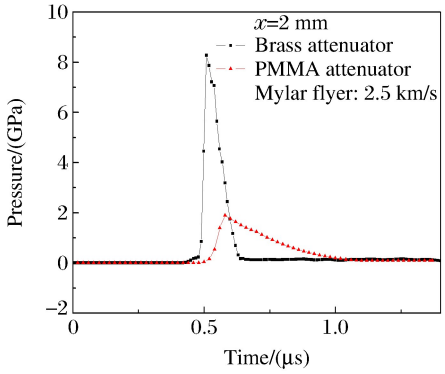


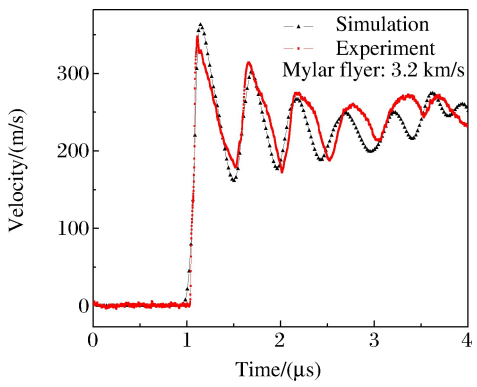
图 3 相同厚度不同材料衰减板对压缩脉冲的调整

Fig. 3 Effect of attenuator materials on pulse shape

图 4 是 0.15 mm 厚 Mylar 膜飞片撞击 3 mm 厚有机玻璃衰减板、驱动 1.5 mm 厚铝飞片的实验与计算结果。由于有机玻璃有较大的冲击粘性，显著拉宽了进入二级飞片的压缩脉冲宽度，1.5 mm 厚的铝飞片未发生层裂。而当 0.15 mm 厚 Mylar 膜飞片撞击 4 mm 厚铜衰减板、驱动 1.0 mm 厚铝飞片时，尽管铜衰减板厚度比有机玻璃衰减板大，但由于铜的粘性比有机玻璃差，未能有效拉宽进入二级飞片的压缩脉冲宽度，导致铝飞片在发射过程中发生了层裂。

3.2 二级飞片

减小二级飞片厚度，使入射脉冲宽度与二级飞片厚度尽量匹配，是避免二级飞片发生层裂的另一个办法。图 5 是 0.15 mm 厚 Mylar 飞片撞击 4 mm 厚铜衰减板、驱动 0.5 mm 厚铝飞片时，通过实验和计算得到的铝飞片自由面速度曲线。由于二级飞片厚度较小，0.5 mm 厚铝飞片不仅没有发生层裂，而且获得了较高的速度，其速度波形的震荡持续时间也较短。若二级飞片的厚度进一步减小，使得压缩波在二级飞片中走一个来回所需时间接近或小于入射脉冲宽度，则二级飞片的速度震荡将进一步减小，同时飞片将获得更高的速度。

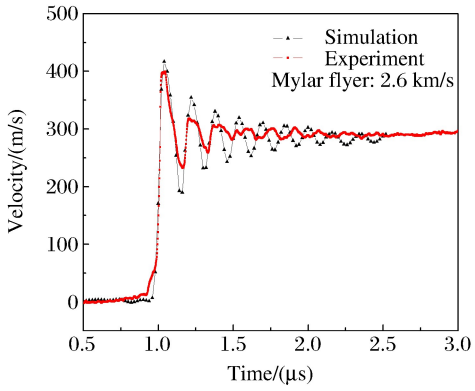


Attenuator: PMMA, thickness 3 mm

Metallic flyer: Aluminum, thickness 1.5 mm

图 4 二级飞片速度历程

Fig. 4 Free surface velocity of secondary flyer



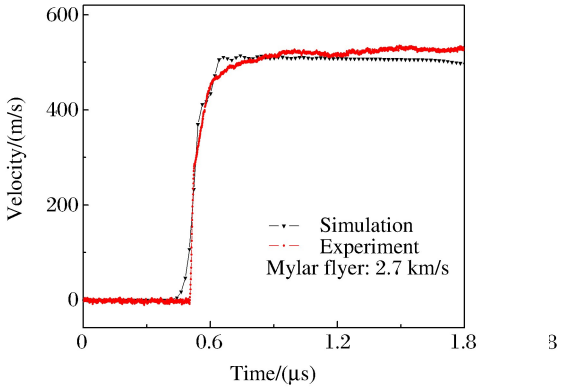
Attenuator: Brass, thickness 4 mm

Metallic flyer: Aluminum, thickness 0.50 mm

图 5 二级飞片速度历程

Fig. 5 Free surface velocity of secondary flyer

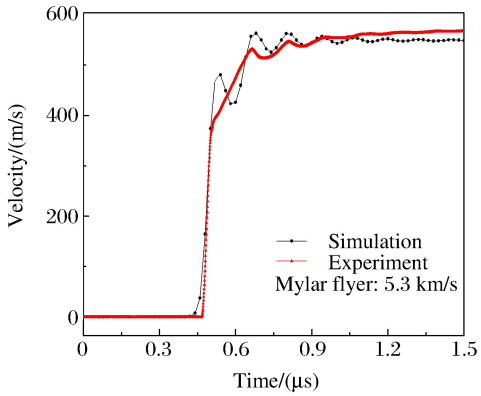
图 6 和图 7 分别是衰减板为 2 mm 厚有机玻璃、二级飞片为 0.3 mm 厚铝和铜实验与计算的二级飞片速度曲线，对比图 4 和图 5 可知，在此实验条件下，二级飞片速度要平稳得多。另外，采用层裂强度较高的金属材料作飞片，也可以有效避免二级飞片在发射过程中发生破坏(图 8)。在相同加载条件下，二级飞片终态速度的大小与其材料相关，飞片单位面积质量越大，其终态速度越小。因此可以利用二级电炮发射低速重金属飞片，计算结果表明，本实验用储能 14.4 kJ 的电炮装置，当充电电压为 10～20 kV 时，其发射 0.5 mm 厚钽飞片的速度范围为 70～180 m/s。



Attenuator: PMMA, thickness 2 mm
Metallic flyer: Aluminum, thickness 0.3 mm

图 6 二级飞片自由面速度曲线

Fig. 6 Free surface velocity of secondary flyer



Attenuator: PMMA, thickness 2 mm
Metallic flyer: OFHC, thickness 0.3 mm

图 7 二级飞片自由面速度曲线

Fig. 7 Free surface velocity of secondary flyer

3.3 二级飞片与衰减板的脱离

在二级飞片发射过程中，由于二级飞片与衰减板波阻抗的差异，可能导致两者不能顺利分离。图 9 是二级飞片发射的波系结构图，由于一级飞片的厚度远小于衰减板，因此一级飞片与衰减板撞击后产生的压缩波在衰减板中传播一段距离后，因后续稀疏波的追赶卸载，矩形压缩波将演变为三角波。假定从二级飞片自由面反射回来的稀疏波到达衰减板与二级飞片接触面后，接触面的应力卸载到零，由图 10 可知，若衰减板波阻抗小于二级飞片，则衰减板和二级飞片将发生再次撞击，两者需要较长的时间才能脱离；若衰减板波阻抗大于金属飞片，则入射压缩波在二级飞片中反射一次即与衰减板脱开。

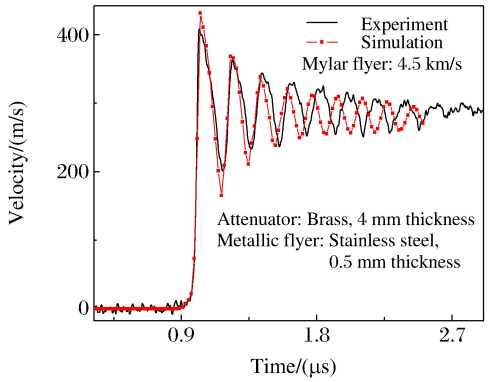


图 8 二级飞片自由面速度曲线

Fig. 8 Free surface velocity of secondary flyer

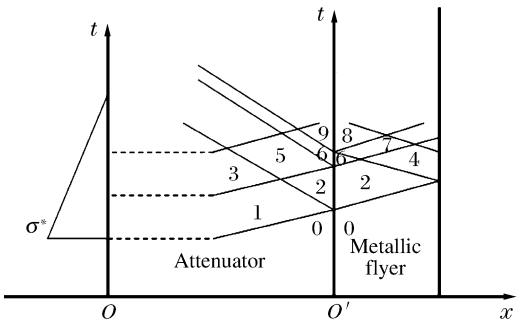


图 9 二级电炮的波系结构

Fig. 9 Wave propagation system of two-stage electric gun

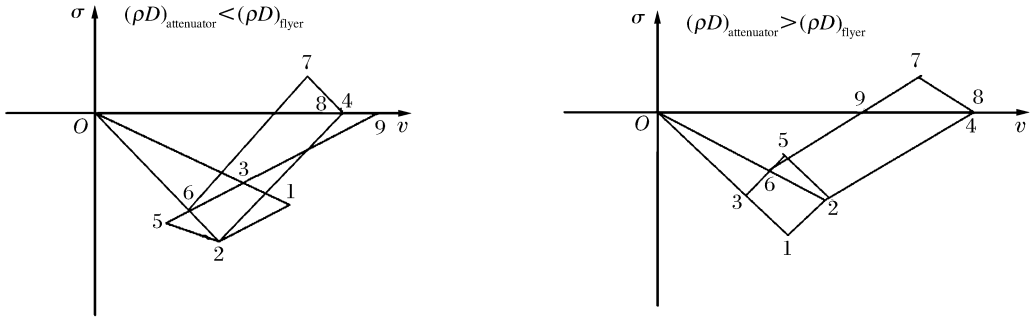


图 10　二级电炮的应力(σ)-速度(v)关系图

Fig. 10　Stress-velocity relation for two-stage electric gun

3.4　复式衰减板

由以上分析可知,用铜作衰减板时,二级飞片和衰减板可以顺利分离,但通过改变衰减板厚度来调节进入二级飞片脉冲宽度的效果不是十分明显;用有机玻璃作衰减板,虽可以有效调节进入二级飞片的脉冲宽度和幅值,但衰减板与二级飞片的分离却并不顺利。若既能有效调节进入二级飞片的脉冲波形,又能使二级飞片与衰减板顺利脱离,可采用如图 1(b)所示的复式衰减板结构,衰减板 1 和衰减板 2 的波阻抗相对大小可自由选取,但需注意两个衰减板厚度的相对大小。图 11 是 0.15 mm 厚 Mylar 飞片撞击复式衰减板、驱动 1.0 mm 厚铝飞片实验的飞片自由面速度历程及计算结果,其中衰减板 1 为 4 mm厚铜板,衰减板 2 为 0.1 mm 厚聚酯薄膜,铝飞片不但没有发生层裂,而且飞片速度的震荡也明显减小。图 12 是计算得出的 0.15 mm 厚 Mylar 膜撞击复式衰减板、驱动 1.0 mm 厚铝片的飞片速度。计算结果表明,不同材料组合的复式衰减板对二级飞片末端速度影响不大,但却能显著影响飞片速度的震荡历程。

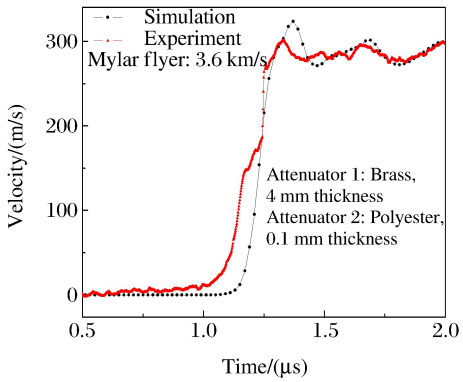


图 11　采用复式衰减板时二级飞片速度波形

Fig. 11　Free surface velocity of secondary flyer when combined attenuator is used

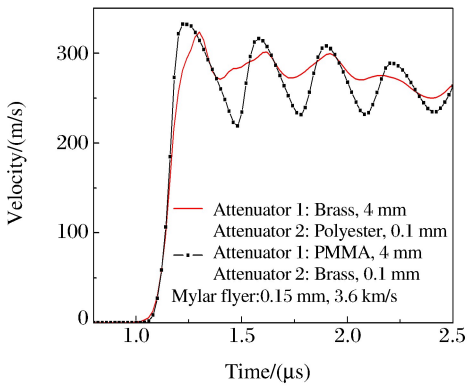


图 12　复式衰减板组合结构对二级飞片速度的影响

Fig. 12　Effects of different attenuator structures on secondary flyer velocities

3.5　二级飞片的平面性

受边侧稀疏波影响,二级飞片在发射过程中将产生变形,飞片整体不再保持为平面。由于电炮放电回路电流震荡持续时间较长,用电探针方法测量二级飞片的平面性存在较大的电磁干扰;另外,由于二级飞片速度较低,用光探针测量飞片的平面性较难得到有效的发光信号。因此对二级飞片平面性的估计采用数值计算的方法。图 13 是计算得到的二级飞片撞靶前后的变形图,撞靶前飞片周边略低于中心区域,但二级飞片的中心区域仍保持为平面。计算结果表明,对⌀14 mm×0.5 mm 的铝飞片,当其飞行速度稳定时,飞片中心直径 10 mm 的区域,仍能保持相当好的平面性。图 14 是实验回收到的二级飞片

和衰减板，对比图 13、图 14 可见，计算与实验结果相吻合。在实验过程中，应当合理选择一级飞片、二级飞片和衰减板尺寸的相对大小，以确保进入二级飞片的冲击波是完整的平面冲击波。此外，二级飞片的直径与厚度之比不宜太小，否则边侧稀疏波会影响二级飞片末态速度的稳定。

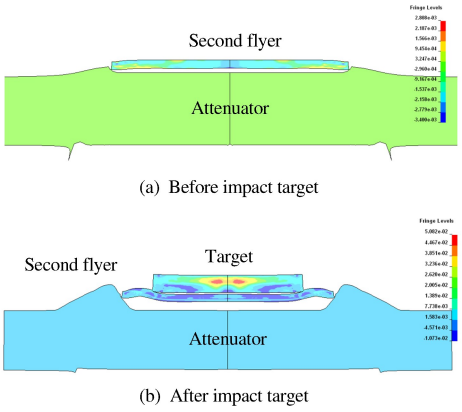


图 13 二级飞片的变形

Fig. 13 Deformation of attenuator and secondary flyer



图 14 实验回收的飞片与衰减板

Fig. 14 Deformation of secondary flyer and attenuator after target impact

4 应 用

4.1 靶的安装结构

利用二级电炮进行平面撞击实验，可采用如图 15 所示的装靶结构。二级加速腔放置在衰减板上方，样品放置在二级加速腔顶端。图 15(a)结构紧凑，靶安装简单，可用于靶板较大的情形；若靶板的尺寸较小，可以采用图 15(b)的结构，将靶板反向嵌入二级加速腔顶端并用胶水粘接。

对于图 15(a)所示结构，二级加速腔内径比二级飞片直径稍大，可避免因二级加速腔发生大的变形而影响二级飞片的飞行姿态。计算给出的黄铜和有机玻璃二级加速腔在二级飞片发射过程中的变形如图 16 所示，加速腔和二级飞片之间预留缝隙为 0.1 mm。由图 16 可知，黄铜加速腔的变形对飞片姿态的影响要小的多。对图 15(b)结构，二级加速腔套在衰减板外围，避开加速腔内径变化对二级飞片飞行姿态的影响，同时也放宽了对二级加速腔材料的限制，但由于二级加速腔搭接在一级加速腔上端，电爆炸扰动将通过一级加速腔传递给二级加速腔，难以准确估计该扰动对靶姿态的影响，。

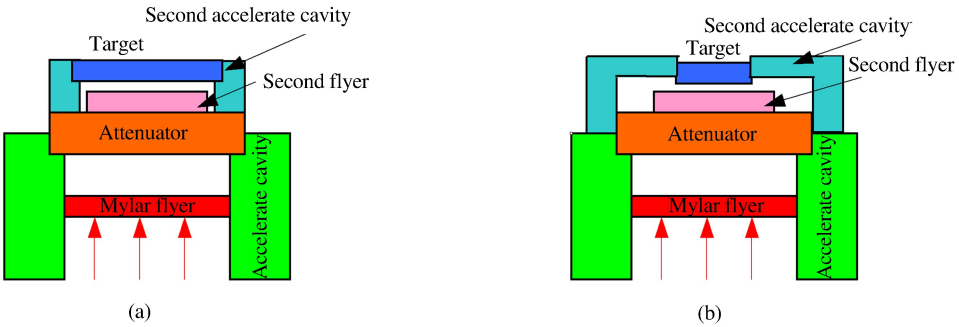


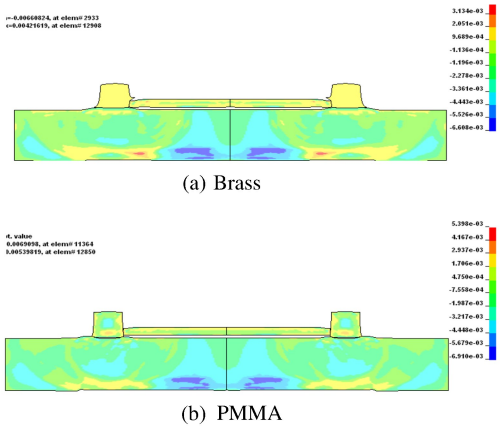
图 15 二级电炮靶的安装结构

Fig. 15 Target configuration of two-stage electric gun

4.2 Zr 基非晶合金层裂实验

利用二级电炮，对 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ 非晶合金进行了平面撞击实验。受靶材料尺寸的限制，采用图 15(b)的装靶结构。二级飞片实验结果表明，用 4 mm 厚的铜作衰减板发射 0.5 mm 厚的不

锈钢飞片,可将飞片发射到 300 m/s 速度且保持飞片完整(见图 8),因此非晶材料的平面撞击实验采用了较为简单的铜衰减板,而不是复合衰减板。一级飞片为∅19 mm×0.15 mm 厚 Mylar 膜,衰减板为∅30 mm×4 mm 黄铜,二级飞片为∅14 mm×0.5 mm 不锈钢,样品为∅10 mm×0.9 mm Zr 基块体非晶合金。不锈钢飞片和衰减板之间用硅油粘接,以排除两者接触面间的空气;不锈钢飞片和靶之间预留 0.6 mm 间隙,以确保飞片有足够的运动时间使其速度稳定。实验过程中没有抽真空,但由于二级飞片在空气中运动时间很短(以 300 m/s 速度估计,飞片运动 0.6 mm 距离仅需 2.0 μs),因此空气阻力不会对二级飞片的姿态造成大的影响。图 17 是用 VISAR 测得的样品自由面速度曲线,由图可见明显的双波结构和层裂信号,由此判断材料的 Hugoniot 弹性极限为 4.1 GPa,层裂强度为 1.4 GPa,与 Yuan 等人[11]给出的 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ 非晶合金结果有所不同,相关差异将另作分析。



Cavity material:(a) Brass,(b) PMMA

图 16　不同材料二级加速腔的变形

Fig. 16　Deformation of secondary acceleration cavity

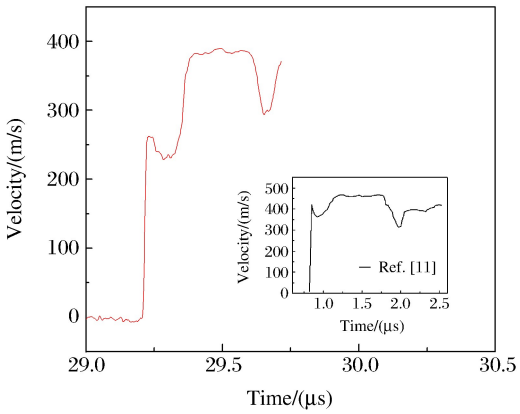


图 17　二级电炮加载下非晶靶的层裂

Fig. 17　Spall signal of a Zr-based amorphous alloy target loaded by the two-stage electric gun

5　结　论

采用二级电炮结构,研究了影响二级金属飞片发射的主要因素,获得了速度稳定的金属飞片,并将其成功应用于平面撞击实验。对比不同实验条件下二级飞片的速度历程和平面撞击实验结果,可以得出以下结论。

(1) 进入二级飞片的压缩脉冲宽度和二级飞片的厚度是否匹配,是影响二级电炮发射的关键环节,压缩脉冲宽度可通过选择合适材料的衰减板及其厚度进行调节。采用组合形式的衰减板既能有效调节压缩脉冲宽度,又能使衰减板与二级飞片顺利脱离,其使用效果好于单一材料的衰减板。

(2) 改变二级飞片厚度可显著影响二级飞片的速度大小和飞片速度震荡的持续时间。二级飞片越薄,则飞片速度越高,速度震荡越小。采用层裂强度较高的材料作二级飞片或采用薄飞片,对避免二级飞片在发射过程中产生破坏是有益的。

(3) 不考虑靶的安装偏差,二级飞片的平面性主要取决于一级飞片、衰减板和二级飞片间的尺寸匹配。应该尽量满足进入二级飞片的压缩脉冲是完整的平面波,使二级飞片获得尽可能大的平面区域,同时应注意二级飞片的直径与厚度比不宜太小。尽管未能实验测量二级飞片的平面性,但 Zr 基非晶合金层裂实验表明,二级飞片的平面性可满足平板撞击实验的要求。

(4) 二级电炮加载技术是完全可行的。采用二级电炮结构,可以驱动比常规电炮飞片(Mylar 飞片)厚得多的低速金属飞片(∅10 mm×0.5 mm、∅10 mm×0.3 mm 铝飞片分别发射到 300、500 m/s),也可用二级电炮发射几十至一百多米每秒速度的重金属飞片。该方法拓展了电炮的加载压力和加载应变率范围,并为平板撞击实验提供了一种新的加载手段。

References:

[1] Keller D V, Penning J R. Exploding foil—The production of plane shock waves and the acceleration of thin plates [A]//Chace W G, Moore H K. Exploding Wires(2) [C]. New York: Plenum Press, 1962: 263-277.

[2] Steinberg D, Chau H, Dittbenner G, et al. The electric gun: A new method for generating shock pressures in excess of 1 TPa [R]. UCID 17943, 1978.

[3] Chau H H, Dittbenner G, Hofer W W. Electric gun: A versatile tool for high-pressure shock-wave research [J]. Rev Sci Instrum, 1980, 51(12): 1676-1681.

[4] Osher J, Gathers R, Chau H, et al. Hypervelocity acceleration and impact experiments with the LLNL electric guns [J]. Int J Impact Eng, 1990, 10: 439-452

[5] Lee R S, Osher J E, Chau H H, et al. 1 MJ electric gun facility at LLNL [A]//Proceeding of the 6th Symposium on Electromagnetic Launch Technology [C]. Austin, 1992.

[6] Xu X H, Chen S N, Gao S H, et al. Thin flyer driven by electric detonation [A]//Proceeding of the Second Explosive Mechanics Conference in China [C]. Yangzhou, 1981. (in Chinese)
徐兴海, 陈素年, 高顺受, 等. 电爆炸金属箔推动下的薄飞片运动 [A]//第 2 届全国爆炸力学学术会议 [C]. 扬州, 1981.

[7] Wang G J, Zhao J H, Tang X S, et al. Study on the technique of electric gun loading for one dimensionally planar strain [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3): 269-274. (in Chinese)
王桂吉, 赵剑衡, 唐小松, 等. 平面一维应变电炮加载技术研究 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(3): 269-274.

[8] Zhao J H, Sun C W, Tang X S, et al. Development of electric gun with high performance [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(3): 369-375. (in Chinese)
赵剑衡, 孙承纬, 唐小松, 等. 高效能电炮实验装置的研制 [J]. 实验力学, 2006, 21(3): 369-375.

[9] Wang G J, Zhao J H, Tang X S, et al. Experimental study on the integrality of Mylar flyer driven by electric gun [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(4): 454-458. (in Chinese)
王桂吉, 赵剑衡, 唐小松, 等. 电炮驱动 Mylar 膜飞片完整性实验研究 [J]. 实验力学, 2006, 21(4): 454-458.

[10] Feng S P, Sun C W. The Measurement and loading of second stage electric gun [A]//Proceeding of Thermal and Mechanical Response of Materials under Laser Beam Irradiation-1991 [C]. Shanghai, 1991. (in Chinese)
丰树平, 孙承纬. 电炮二次飞片冲击加载及测量 [A]//1991 年激光的热和力学效应学术会议论文集 [C]. 上海, 1991.

[11] Yuan F P, Prakash V, Lewandowski J J. Spall strength of a zirconium-based bulk metallic glass under shock-induced compression-and-shear loading [J]. Mech Mater, 2009, 41: 886-897.

Experimental Technique of Two-Stage Electric Gun

LUO Bin-Qiang[1,2], ZHAO Jian-Heng[2], SUN Cheng-Wei[2],
MO Jian-Jun[2], HE Jia[2], ZHANG Xing-Wei[2],
WANG Gui-Ji[2], TAN Fu-Li[2]

(1. *Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*;
2. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: A newly designed configuration based on an electric gun (namely two-stage electric gun) was used to launch metallic flyer, and dimension of ∅10 mm×0.5 mm, ∅10 mm×0.3 mm aluminum flyers can be accelerated to 300 m/s and 500 m/s, respectively. Using the two-stage electric gun, dynamic response of Zr-based amorphous alloy was investigated under planar impact and good results were obtained. This work extended the capability of electric gun to contain wider range of planer flyer velocity(0.1-10 km/s) and loading strain rates(10^5-10^6 s^{-1}), and it may be helpful to planer-impact experiments.

Key words: electric gun; metallic flyer; experimental technique