文章编号：1000-5773(2004)04-0315-04

低真空条件下炸药强爆轰驱动超高速飞片实验研究*

文尚刚，赵 锋，孙承纬，邓文荣，张振涛，庞 勇，黄文斌，张小琳

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900）

摘要：采用 X 光照相和电探针技术进行低真空条件下炸药强爆轰驱动超高速飞片实验研究，得到了在不同时刻超高速飞片撞击静止靶的图像。实验结果表明，在低真空条件下，通过多级爆轰驱动方法得到次级飞片速度较高，而且具有相当好的平面性。

关键词：炸药；强爆轰；超高速飞片；低真空

中图分类号：O383 **文献标识码**：A

1 引 言

炸药化爆增压技术是一种比较常用的加载手段。在化爆增压技术中除了接触爆炸、空腔增压、多层增压以及变截面、二维产物会聚等方法外，还可利用炸药强爆轰方法增压。在炸药中形成强爆轰，可以利用高速炸药引爆低速炸药、对炸药的冲击预压、飞片撞击炸药、爆轰波的马赫反射、曲面炸药的收敛爆轰等。其中利用飞片撞击炸药在炸药中形成的强爆轰波与其它方法相比，具有易操作、强爆轰波作用面积大且平面性较好的特点。

二级炸药强爆轰驱动超高速飞片的作用基本过程如下：第一级炸药爆轰驱动初级飞片撞击第二级炸药/飞片组合，在次级炸药中形成强爆轰，使其爆轰产物流动区成为较均匀分布的高压区，从而使得强爆轰驱动的次级飞片速度达到中高速或超高速。这里除了要求高质量的平面波发生器、密度很均匀的药柱以及精密装配工艺外，恰当的理论设计对于装置参数选择、能量转换效率的提高和飞片完整性的保持，都是十分重要的。使用这样的简易爆轰驱动装置可以较容易地将厚度为 1 mm 的钢飞片驱动到 6～7 km/s，且在较大面积范围内具有较好的平面度。用该次级飞片再去撞击组合或梯度飞片，就可能构成结构简单、体积较小、成本不高、操作简便的超高速飞片装置，作为高动压加载的撞击器，具有重要的应用前景[1～3]。

超高速飞片的使用价值主要在于其高速度及平面度，强爆轰驱动装置的优化设计将主要从这两方面考虑。我们曾经作过空气中的强爆轰驱动实验，得到了较高速度的次级飞片或末级飞片，这些飞片的平面度还不太令人满意。本研究尝试在低真空条件下进行强爆轰驱动实验，以改善次级飞片的平面度。此外，这个实验的另外一个目的是研究超高速飞片与不同静止靶的撞击过程，这一部分内容将有另文介绍，本文只作简单叙述。

2 实验装置

为了得到次级飞片的速度与飞行姿态，采用了 X 光照相和电探针技术进行实验测试。实验装置如图 1 所示，在初级炸药的驱动作用下，初级飞片撞击次级炸药，在次级炸药中形成的超压强爆轰

* **收稿日期**：2003-08-25；**修回日期**：2004-03-02

基金项目：国家自然科学基金(19882003)；中国工程物理研究院预研基金(YKXJ-970106)

作者简介：文尚刚(1968—)，男，博士.

驱动次级飞片高速撞击固定在支板上的静止靶(靶杆或靶球)。使用 X 光照相技术得到次级飞片加速飞行姿态及撞靶过程,使用电探针测量初级飞片撞击次级炸药前的速度及次级飞片撞靶时的速度。

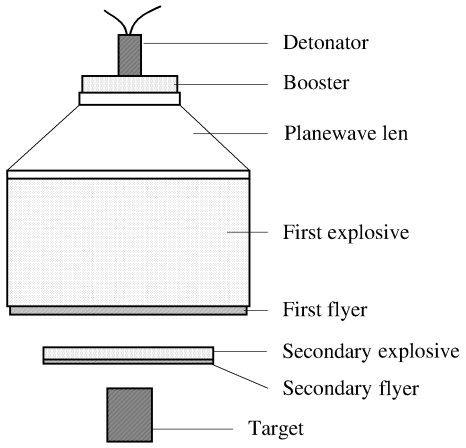


图 1 实验装置示意图

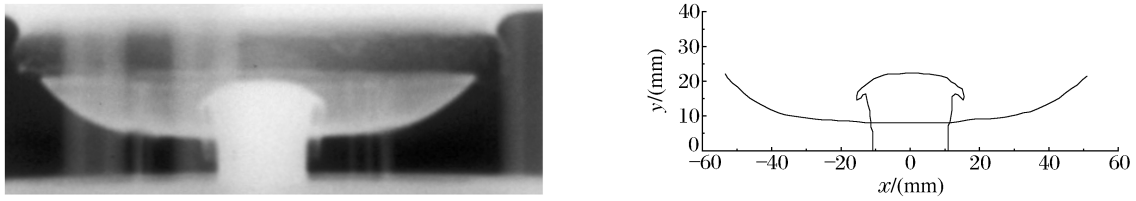
Fig. 1 Diagram of experimental set-up

实验的主要参数为:传爆药柱为∅32 mm×11 mm 的特屈儿,∅200 mm×80 mm 的 JO9159 炸药由∅200 mm×37°的 T/R 平面波透镜起爆,初级飞片为∅196 mm×2.5 mm 的钢,次级炸药为∅120 mm×5 mm 的 JO9159 炸药,次级飞片为∅118 mm×1.0 mm 的钢,靶杆为∅22.2 mm×25 mm 的钨。为了减小空气阻力的影响,将整个实验装置放在一个聚氯乙烯真空筒内(真空度约为 70 Pa),真空筒壁厚为 15 mm,X 光照相区域的壁厚为 5 mm。由于高速飞片在飞行过程中可能在飞片前方形成一个较强的冲击波,此冲击波有可能使电探针提前导通,此外,在真空环境中,有可能存在电离气体使电探针提前导通,因此,在电探针头部贴上一层 0.02 mm 厚的绝缘胶纸防止电探针提前导通,从而使所获得的电探针信号真实准确。初级飞片与次级炸药之间的距离约为 45 mm,次级飞片与靶的顶端距离约为 15 mm。

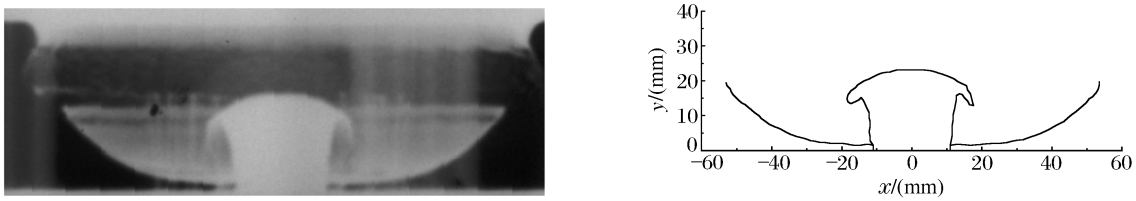
在进行正式真空爆轰实验之前,在空气中进行了一发系统联试的预备实验,进行了初级炸药驱动初级飞片撞击静止靶实验,实验所用的平面波透镜是∅100 mm×37°的 T/R 炸药。初级炸药为∅100 mm×50 mm的 JO9159 炸药,初级飞片为∅100 mm×1.5 mm 的钢。

3 实验结果及分析

在空气中初级炸药驱动一级飞片实验得到的飞片速度为 4.85 km/s,该飞片撞击钨靶的过程如图 2 所示,左图为 X 光图像,右图为经过图像处理后得到的飞片与靶的轮廓线。本图及其它 X 光图片中列出的时间起始时刻为 X 光机触发时刻。可以看出,整个飞片呈锅底状,在边部弯曲比较严重,只在飞片中部相对较平。飞片弯曲变形主要由以下两个因素引起:(1) 旁侧稀疏效应的影响,在稀疏波的作用下,爆轰波到达 JO9159 药柱底面时已不是平面波,其波形本身就是一个锅底状,这就决定了在爆轰产物驱动后的飞片的基本形状;(2)由于飞片在飞行过程中,飞片两端面各处气体流场不一致,使得飞片



(a) t=4.005 μs



(b) t=6.055 μs

图 2 在空气中炸药爆轰驱动飞片击靶姿态(实验号:030314-1)

Fig. 2 The shape of first flyer impacting on the target in the air (Test No. 030314-1)

两端面的压力差不均匀,使飞片两侧受到的空气阻力比中间的阻力要大,从而使飞片形状继续向凹向上趋势发展。

低真空条件下强爆轰驱动实验测得的初级飞片和次级飞片的速度分别为 4.27 km/s 和 6.40 km/s。图 3 为在低真空状态下(实验装置的真空度约为 70 Pa),炸药强爆轰驱动的超高速飞片(速度约为 6.40 km/s)撞击钨靶的过程。在直径为 126 mm 的范围内,第一级飞片在飞行约 45 mm 处(速度约为 4.27 km/s)各点到达的时间差最大值仅为 63 ns,均方差为 26 ns。由图 3 可以看出,在低真空条件下,直径为 118 mm 的次级飞片在飞行约 20 mm 后仍具有非常好的平面度。在直径为 60 mm 的范围内,飞片飞行 15 mm 处各点到达的时间差最大值为 57 ns,均方差为 24 ns,飞片飞行 17.5 mm 处的到达时间差最大值为 70 ns,均方差为 29 ns。关于次级飞片的平面度问题,将在第四节中进行讨论。从图 3 还可以看到超高速飞片与靶的相互作用过程,由于钨靶的直径远小于飞片的直径,所以这个过程可以看成高速平头弹体(钨靶)与薄板(次级飞片)的高速撞击过程。钨杆穿过了薄板后,一个塞柱将从孔中抛射出来,塞柱直径稍大于钨杆直径,与钨杆通过飞片时已经撞击镦粗的部分基本相同。两个主要过程消耗了飞片的动量,其一是塞柱得到了加速,其二是克服塞柱周围与板的剪切阻力。钨杆通过撞击在界面上发生了很大的塑性变形,头部变钝变粗。飞片与钨杆作用后,在撞击的部位发生穿孔现象,被破坏的部分以崩溅的形式向外飞散。

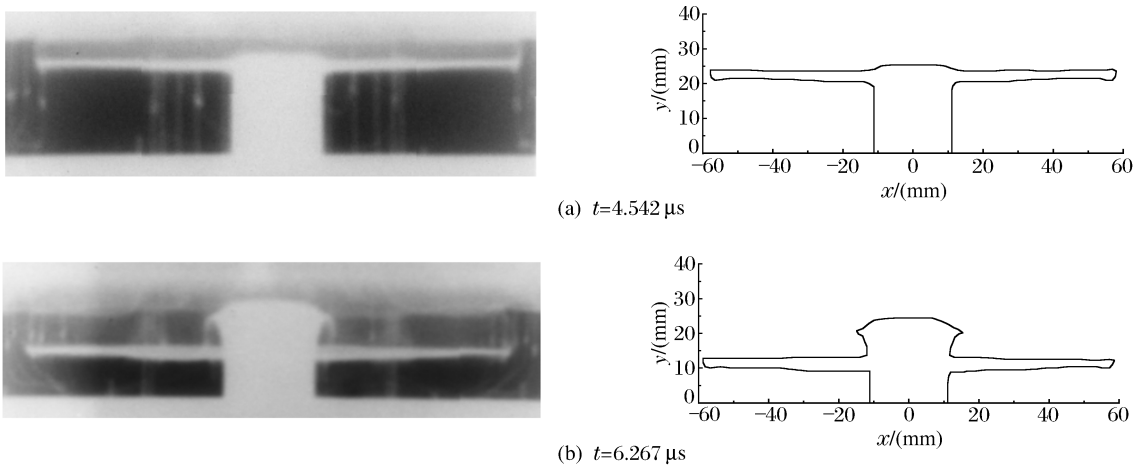


图 3　在低真空中炸药强爆轰驱动飞片击靶姿态(实验号:030314-2)

Fig. 3　The shape of secondary flyer impacting on the target in the low vacuum condition (Test No. 030314-2)

4　几点讨论

4.1　次级飞片平面度问题

通过比较可以看出,在低真空中二级爆轰驱动实验得到的次级飞片平面度明显优于在空气中初级炸药驱动一级飞片实验得到的一级飞片平面度。其主要原因有以下几点:

(1) 初级飞片的直径为 196 mm,而次级炸药和次级飞片的直径分别为 120 mm 和 118 mm,初级飞片与次级炸药碰撞的地方是初级飞片中间相对较平的区域,从而在次级炸药中形成一个平面度较好的爆轰波;

(2) 在低真空中,由于空气比较稀薄,在飞片飞行过程中难以在飞片背面形成湍流,空气对飞片的阻力体现在气体分子与飞片的碰撞,而这种碰撞可以近似认为是均匀的,从而飞片两侧受到的压力差是均匀的。故在低真空中,初级飞片和次级飞片受到的空气阻力非常小,空气阻力对飞片飞行过程中的形状几乎没有影响;

(3) 次级炸药较薄,只有 5 mm,而初级飞片的厚度为 2.5 mm,在次级炸药中形成的强爆轰速度较高,这样在初级飞片背面反射回来的稀疏波不会影响次级飞片的形状,此外,次级炸药大部分埋在托板

中,从而旁侧稀疏效应对爆轰波与次级飞片作用之前的波形影响很小。

4.2 次级飞片速度问题

由于考虑到 X 光测试的防护问题,这次二级爆轰驱动实验使用的炸药量是有限的,并且平面波透镜与初级炸药都没有加约束以减少破片,这在一定程度上影响了初级及次级飞片的速度。如果想进一步提高次级飞片的速度,可以采取如下几个措施:

(1) 增加初级炸药量;

(2) 用一定厚度的金属筒将平面波透镜与初级炸药套住,金属筒的材料尽可能使用密度较高的金属,厚度最好在 1 cm 以上,以减小旁侧稀疏波对爆轰波形状的影响,提高初级炸药的能量利用率;

(3) 采用较薄的次级飞片,并且次级飞片与次级炸药及初级飞片的厚度存在较好的匹配关系。

因为炸药强爆轰驱动次级飞片的物理过程比较复杂,影响次级飞片的平面度及速度的因素较多,以上分析只是作者的浅薄见解,可能存在不足之处,欢迎指正。

5 结 论

实验结果表明,在低真空条件下,通过多级爆轰驱动方法得到次级飞片速度较高,而且具有相当好的平面性。

实验工作得到何 智、李 强、温上捷、谷新容、浦正美、吴宏光、孙永强等人协助,特此致谢。

References:

[1] Zhao F, Wen S G, Sun C W, et al. Experimental Studies on Multi-Stage Flyers [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 13－16. (in Chinese)
赵 锋,文尚刚,孙承纬,等. 多级串联式超高速飞片装置实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2001,21(1):13－16.

[2] Sun C W, Zhao F, Wen S G, et al. High Velocity Flyers Accelerated by Multistage Explosive Slabs [A]. Proc of 1997 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter [C]. New York: AIP, 1998. 971－974.

[3] Wen S G, Sun C W, Zhao F, et al. Multi-Stage Detonation System—A New Loading Technology for Studying Hypervelocity Impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(1): 22－27. (in Chinese)
文尚刚,孙承纬,赵 峰,等. 多级爆轰驱动——研究超高速碰撞的一种新的加载技术 [J]. 高压物理学报,2000,14(1):22－27.

Experimental Study on Hypervelocity Flyer Driven by Strong Detonation at Low Vacuum Conditions

WEN Shang-Gang, ZHAO Feng, SUN Cheng-Wei, DENG Wen-Rong,
ZHANG Zhen-Tao, PANG Yong, HUANG Wen-Bin, ZHANG Xiao-Lin

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The problem of accelerating metallic flyers to ultra-high speed by multi-stage detonation system at low vacuum conditions is studied in this paper by means of X-rays photography and electrical-pins technique. The pictures of the secondary flyer impacting static target at different time are obtained. The experimental results show that the secondary flyer accelerated by multi-stage detonation system at low vacuum conditions has an advantage of high velocity and good planarity.

Key words: explosive; strong detonation; hypervelocity flyer; low vacuum