

带空腔爆轰加载装置对驱动飞片的影响*

赵剑衡^{1,2}, 赵 锋¹, 文尚刚¹, 孙承纬¹

(1. 中物院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要:结合实验和数值模拟技术,研究了在炸药透镜和飞片之间引入空腔对爆轰躯体的定量影响。计算和实验结果基本一致,表明引入空腔的爆轰加载装置可以推动厚度 6mm 以上的厚飞片,并可以避免飞片中出现层裂现象,从而可以实现较低的冲击压力和较长的压力脉宽,在推动厚飞片和较严格地控制作用时间方面也有明显的优点。

关键词:爆轰; 飞片; 空腔

中图分类号: O381 **文献标识码:** A

1 引 言

通过爆轰躯体实现一维平面应变加载,对研究材料的动力学本构关系或状态方程、冲击相变及动态断裂和损伤等是非常重要的。但是目前这种装置只适用于驱动厚度为 2~3mm 的薄飞片,产生几十吉帕的冲击压力和较短的压力脉冲。这是因为炸药起爆后进入飞片中的是一个三角冲击波,飞片太厚会导致其内部发生层裂,从而影响飞片击靶前的波形,并给实验测试带来一些虚假的信号。目前产生几吉帕的压力和较宽的压力脉冲的加载装置多由气炮完成。但是在许多情况下,如研究炸药的冲击动力学性能,或对整个作用时间要求只有十几微秒时,因测试技术(如高速摄影)的限制,气炮是无法适用的。可见改进目前的平面爆轰驱动飞片的实验装置,使其产生的冲击压力可以覆盖几吉帕以下的低压段,脉冲宽度达到 5~6 μ s,具有较准确的作用时间是非常重要的。

赵锋等^[1]在炸药和飞片之间增加空腔,靠爆轰产物自由膨胀一段时间后来推动飞片以避免其层裂和严重的损伤。但空腔引入后也带来许多问题,例如:空腔对飞片的终极速度、平面度等的影响如何定量?多大的空腔能有效避免层裂现象出现?飞片的加速运动轨迹,飞片固定距离所需的时间等。对不带空腔的爆轰躯体的研究,无论是实验、理论推导还是数值计算都是成熟的^[2-3],但对带空腔的爆轰加载装置的研究工作报道很少,这方面的数值模拟工作尚没有见到文献报道,实际使用时具有较多的经验性。在本文中,我们结合实验和数值模拟工作,系统和深入研究带空腔的爆轰加载装置驱动下飞片的运动规律和空腔引入后对其运动、平面度等方面的定量影响。

2 实 验

图 1 给出了接触爆轰驱动飞片的示意图。图 2 为带空腔爆轰驱动飞片实验装置。可以发现,在飞片和炸药透镜之间增加了一个空腔后,靠产物自由膨胀一段距离再由产物推动飞片,这样推动力会相对比较柔和,可避免爆轰产生的三角冲击波在飞片界面反射时,向飞片内部入射一个较强的冲击波。

实验装置的波形发生器选用 $\phi 100$ mm 平面爆轰波炸药透镜,这是一种将点起爆球面爆轰波转换为平面爆轰波的装置,由高、低爆速两种炸药构成。外层是 TNT/RDX(40/60), $\rho_0 = 1.684\text{g/cm}^3$, $p_0 = 18.77\text{GPa}$, $D_0 = 7.786\text{km/s}$, 多方指数 $\gamma = 2.787$ 。内层是 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2/\text{TNT}(78/22)$, $\rho_0 = 2.66\text{g/cm}^3$, $p_0 =$

* 收稿日期: 2000-10-08; 修回日期: 2001-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(19772048); 中国工程物理研究院基金项目(980103)

作者简介: 赵剑衡(1969—), 男, 博士, 副研究员。

10.45 GPa, $D_G = 4.7 \text{ km/s}$, 多方指数 $\gamma = 4.62^{[4]}$ 。飞片材料为 Cu, $\rho = 8.6 \text{ g/cm}^3$, $E = 117 \text{ GPa}$, $\nu = 0.374$ 。在实验中, 飞片厚度 $h = 6 \text{ mm}$, 空腔长度 $L = 20, 26 \text{ mm}$, VISAR 测量点分别为 1、3。

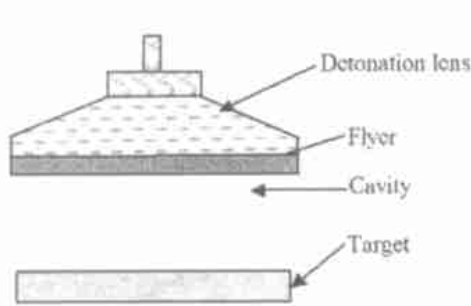


图 1 接触爆轰驱动飞片示意图

Fig. 1 Setup of a flyer accelerated by explosive device

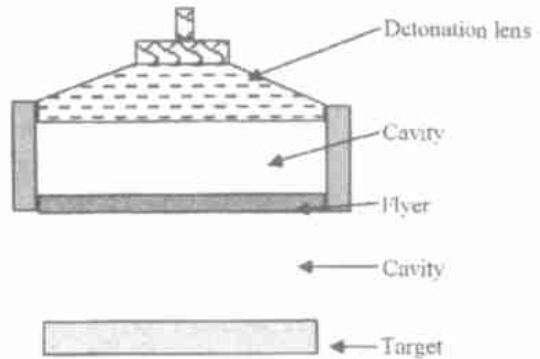


图 2 带空腔的爆轰驱体加载装置

Fig. 2 Setup of a flyer accelerated by explosive device with a cavity

3 数值模拟

计算中采用一维 SSS 有限差分程序^[5], 其 Lagrange 形式的流体力学方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -R^{-1} \frac{\partial}{\partial M} - (\gamma - 1) \frac{V}{R} \\ V &= R^{-1} \frac{\partial R}{\partial M} \\ \frac{\partial E}{\partial t} &= -\frac{\partial(uR^{-1})}{\partial M} + \frac{\partial}{\partial M} \left(R^{-1} \frac{\partial T}{\partial R} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u 为粒子速度, R 为欧拉坐标, t 为时间, M 为线质量或立体角质量, P 为总压力; γ 为几何指数, 平面时为 1; 总比能量 $E = I + U^2/2$, I 为粒子比内能; T 为应力偏量的函数, $T = 2S_x + S_z$, S_x 和 S_z 分别为 x 和 z 方向的应力偏量。

在固态时材料的本构关系采用 HOM 状态方程, 炸药的产物状态方程选用 JWL 状态方程, 炸变方法采用 G 体积炸变率, 样品中是否发生层裂由最大拉应力和最大应力梯度判据相结合的方法来判断, 上述方程的具体表达式由文献[5]给出, 相关材料参数见文献[4]。图 3 给出了本文一维的计算模型。特别说明的是, 这里利用爆轰头的概念^[2], 将炸药透镜简化为一个等效药量的主药柱。孙承纬^[3]估算的 $\phi 100 \text{ mm}$ 炸药透镜爆轰头的有效药量为低爆速炸药 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2/\text{TNT}(78/22)$ 长度为 1.352 倍。



图 3 简化一维计算模型

Fig. 3 Simplified simulation model

4 结论分析

图 4 给出了在 20mm 空腔的爆轰加载装置的作用下, 6mm 厚铜飞片后自由表面的速度时间关系。可以看到飞片的实际加速过程相当光滑, 数值计算和实验曲线也基本吻合。两者在初始时的速度上升有差异, 主要是由于计算中采用的爆轰产物的 JWL 状态方程不能完全描述产物从高压到低压的状况

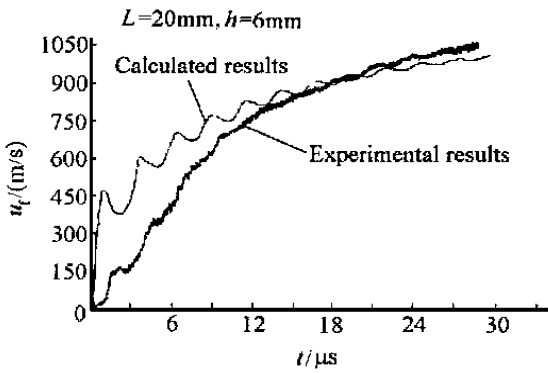


图 4 铜飞片后自由表面速度时程
Fig. 4 Velocity profile of rear free surface of copper flyer driven by explosive device

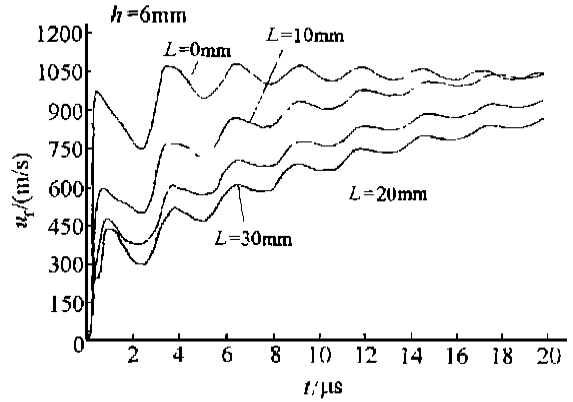


图 5 不同空腔长度下铜飞片后自由表面的速度
Fig. 5 Velocity of flyer of rear surface with different length of cavity

(自由膨胀的状况)。另外,计算得到的速度时程曲线显示,速度的振荡明显比实验严重,因此计算预测飞片发生层裂比实际情况保守。

改变图 2 的爆轰加载装置中的空腔长度,通过数值模拟计算可以得出不同空腔条件下 6mm 厚铜飞片的后自由表面的速度时程关系(见图 5)。可以看到所有曲线均以 2.47μs 为周期作振荡,振幅越来越小。造成后自由表面粒子速度振荡的原因

是由于应力波在飞片中的来回反射。由于进入飞片中的压力波形剖面不是方波而是近似三角形的,因此这个三角形的压力波形极易造成飞片层裂。对比图 5 中的各条速度时间曲线,可以看到没有空腔时冲击波进入飞片可以使其后自由表面的粒子速度在 0.6μs 上升到第一峰值 975m/s,在 2.47μs 时回到低点 750m/s,两者相差 225m/s。当空腔长度为 20mm 时,其后自由表面的粒子速度在 0.6μs 上升到 470m/s,第一峰值与低点相差 80m/s。空腔越长,飞片速度在整个加载过程中上升越平缓,且在飞片飞行 20μs 时,炸药透镜和飞片之间空腔越长,飞片的速度越小。由此可以看出,在爆轰装置的炸药透镜和飞片之间增加一个空腔,靠产物自由膨胀来推动飞片,而不是靠爆轰产生的冲击波直接来推动飞片,可以有效避免进入飞片中的冲击载荷过强和由于三角形的压力波形易造成厚飞片的层裂问题,并获得较低的飞片速度,表 1 的计算结果也说明了这个问题。需要说明的是,并非空腔越长越好,因为空腔太长会导致旁侧稀疏严重,使爆轰产物及飞片的运动状况严重偏离一维状况,从而影响飞片碰靶的平面度。

图 6 给出了具有 20mm 厚空腔的爆轰装置推动不同厚度铜飞片时得到的后自由表面速度时间关系。从图中可以看到,飞片越厚,其终速度越低。由此表明该装置可以使厚飞片获得相对较低的飞行速度。进一步增加飞片的厚度,会导致飞片后自由表面粒子速度第一峰值与低点之间的差值增大,也就是说飞片中层裂的可能性增大,因此该装置驱动的厚飞片的厚度存在上限。

图 7 是用 VISAR 测量飞片的中心点、距中心 16、24mm 处两点全程加速过程和时间位移图。从图中可以看到在整个加速过程中,飞片无层裂发生。同时飞片在飞行 32μs 后,速度基本接近其极限值,同时它内部的冲击波也基本衰减完了。在整个飞行过程中这三点的速度和位移相差不大,在飞片飞行 32μs 时,三点的位移相差 0.14mm,表明此时飞片至少在 φ48mm 的范围内具有较好的平面度。

表 1 不同加载条件下铜飞片的层裂情况的计算结果
Table 1 Simulation results of pallation of copper flyer in different experimental conditions

h/mm	L/mm	层裂状况
2	0	无
2	20	无
10	0	有
10	20	无

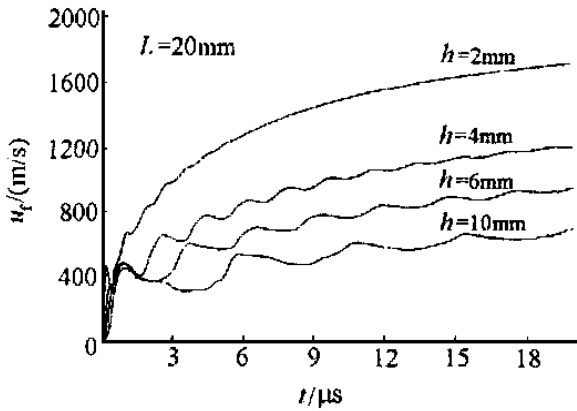


图6 爆轰装置作用下不同厚度飞片后自由表面速度-时间关系

Fig. 6 Velocity history of flyer driven by explosive device

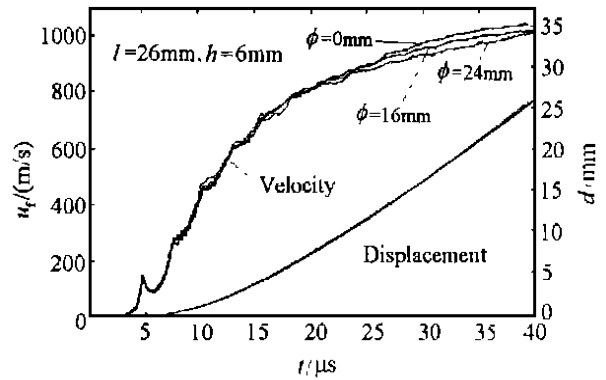


图7 爆轰装置驱动下飞片的速度和位移与时间关系

Fig. 7 The displacement and velocity vs. time driven by explosive set

5 结论

在炸药和飞片之间增加一个空腔,可以使进入飞片的第一个冲击波强度较小,避免飞片中产生层裂现象,并使飞片的加速过程变得非常平滑,较好地保持了飞片初始的热力学状态和力学性质。这种装置可以产生比以往装置小得多的碰撞压力和较长的压力脉宽,并使飞片击靶时具有较好的平面度。

流体物理研究所 109 室刘俊、马如超、陈光华、刘元昆等参加本文的实验工作,在装置设计过程中得到卫玉章、赵同虎研究员的指导,特此致谢。

参考文献:

- [1] 赵锋,池家春,邓文荣. JOB-9003 炸药的反应速率研究[J]. 爆轰波与冲击波, 1992, (4): 1—6.
- [2] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 131—140.
- [3] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 556—609.
- [4] 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 289.
- [5] 孙承纬. 一维冲击波和爆轰波计算程序 SSS[J]. 计算物理, 1986, 3(2): 142—154.

The Effects of Explosive Device with a Cavity on Flyer Driving

ZHAO Jian-heng^{1,2}, ZHAO Feng¹, WEN Shang-gang¹, SUN Cheng-wei¹

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper presents the influence of a cavity between explosive lens and flyer on flyer driving. The study is carried out by experiments and calculation. The simulation results are consistent with experimental ones. They show that the explosive device with a cavity can drive thicker flyer, and avoid spallation in flyer under detonation loading. This device can be used to get lower load and longer duration, and has advantage in controlling loading time.

Key words: detonation; flyer; cavity