

文章编号: 1001-1455(2013)06-0620-05

# 带空腔爆轰产物驱动准等熵加载技术与反积分数据处理技术\*

王刚华, 钟 敏, 赵剑衡, 张红平, 范锐锋

(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重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 化爆加载技术常用来研究材料在冲击作用下的动态响应特性。通过在炸药与样品之间留一段空隙的办法, 实现爆轰产物驱动的无冲击加载飞片技术用于研究材料在弱冲击或无冲击加载条件下的动态响应特性, 利用二维程序模拟了整个实验过程, 提出了装药直径对实验结果的影响。并利用反积分数据处理技术对实验数据进行了处理与分析。

**关键词:** 爆炸力学; 准等熵压缩; 流场反演方法(反积分方法); Lagrange 分析

**中图分类号:** O381; TN249

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

利用化爆加载装置研究材料的动态响应特性已被广泛应用, 一般是将飞片直接粘附在炸药后表面, 这种做法使得飞片中载荷的上升时间较短, 获得的飞片速度较高, 难以获得弱冲击或无冲击加载。为了研究材料在弱冲击或无冲击加载条件下的动态响应特性, 研究材料在脉宽为几微秒、幅值覆盖几吉帕至十几吉帕的压力脉冲加载下的性能, И. Цыпкин<sup>[1]</sup> 提出了在炸药和飞片之间留一段空隙, 从而利用爆轰产物驱动飞片的办法来避免强冲击作用, 给出了空气间隙厚度对飞片速度、飞片飞行姿态等的影响。金柯等<sup>[2]</sup>、赵剑衡等<sup>[3]</sup> 也对该技术进行了实验和数值模拟研究, 获得了飞片的速度历史与空气间隙厚度的关系, 但并未能获取爆轰产物驱动在材料内部产生的压力波形。

本文中利用流场反演技术将实验测得的飞片自由面速度历史数据进行反演计算<sup>[4-5]</sup>, 获得飞片内部物理量的演化过程, 试图更加准确地描述带空腔爆轰驱动飞片的物理过程。

## 1 实 验

带空腔爆轰产物驱动准等熵加载实验的装置示意图如图 1 所示, 在炸药与样品材料之间有一段空

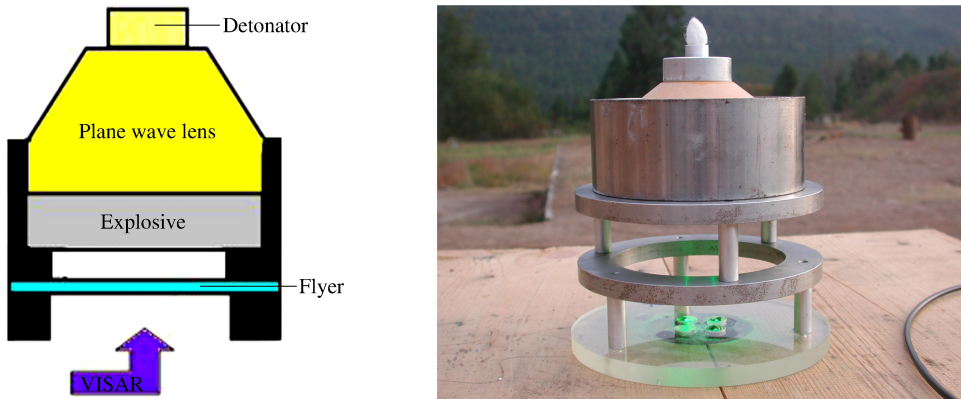


图 1 带空腔的爆轰产物驱动飞片加载装置示意图与实物照片

Fig. 1 Sketch map and photo of a flyer accelerated by explosive device with a cavity

\* 收稿日期: 2012-06-29; 修回日期: 2012-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172277, 11176002); 中国工程物理研究院科学基金项目(2010A0201006)

作者简介: 王刚华(1976—), 男, 博士, 副研究员。

腔,炸药经平面波发生器起爆后,爆轰波不能直接作用于飞片表面,爆炸产生的爆轰产物在空腔中膨胀,经过一段距离后作用在样品表面,这样可以使冲击作用大大减弱,通过控制间隙的厚度可以使样品上的加载过程为弱冲击加载或接近于等熵加载。

实验中,直接使用平面波发生器产生的爆轰产物驱动飞片,没有另外加入其他炸药。装置的波形发生器选用 $\varnothing 100$  mm 平面爆轰波炸药透镜,由高、低爆速 2 种炸药构成。外层是 TNT/RDX(40/60), $\rho=1.684$  g/cm<sup>3</sup>、 $p_{CJ}=18.77$  GPa、 $D_{CJ}=7.786$  km/s、多方指数 2.787。内层是 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>/TNT(78/22), $\rho=2.66$  g/cm<sup>3</sup>、 $p_{CJ}=10.45$  GPa、 $D_{CJ}=4.7$  km/s、多方指数  $\gamma=4.62$ 。飞片材料为 Cu, $\rho=8.9$  g/cm<sup>3</sup>、 $E=117$  GPa、 $\nu=0.374$ ,飞片厚度  $h=6,7$  mm,空腔长度  $L=20$  mm,利用 VISAR 测量飞片的后自由面速度历史。

图 2 所示为其中一发铜飞片实验中 VISAR 的测量结果,可以看到,其速度的上升比较平滑,没有形成明显的冲击,利用反积分方法反演出的加载面压力历史也可证明该实验的压力加载波形无冲击现象,如图 3 所示。

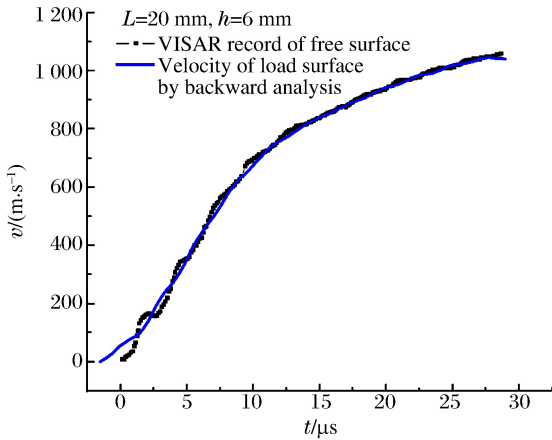


图 2 铜飞片自由面、加载面速度历史

Fig. 2 Velocity profiles of rear free surface and load surface of copper flyer

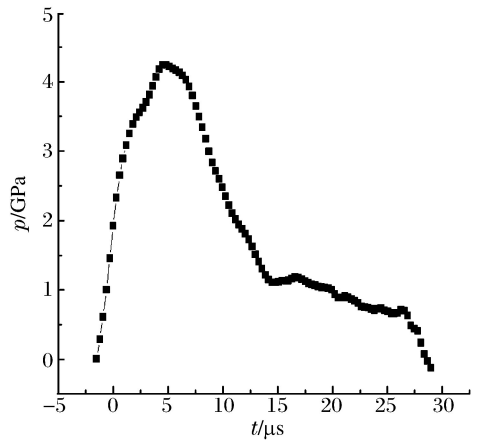


图 3 铜飞片加载面压力历史

Fig. 3 Pressure profile of rear free surface of copper flyer

## 2 驱动过程二维模拟

采用钟敏等自行研制的二维爆轰驱动动力学计算程序 LSFC2D 对该过程进行模拟计算,该程序沿用原有 HELP 程序的思想,采用欧拉方法,将空间划分为固定的网格,网格间通过格边相互作用,计算这些网格的质量、动量和能量的变化模拟物理过程,引入 Level Set(LS)方法描述并处理混合物质的界面推进问题,取得了良好的效果;利用贴体坐标系和 DSD 结合计算非理想爆轰波阵面的传播。

计算中采用了等效药柱和平面起爆的方法来近似描述平面波发生器的起爆过程。图 4 中给出了 2 种不同装药直径下流场内质量分布,其中  $D_{TNT}$  为 TNT 装药直径, $H$  为药柱高度, $L$  为空腔长度, $h$  为飞片厚度。从图 4(a)、(b)中  $t=8$   $\mu$ s 时刻可以看出,炸药爆炸后产生的爆轰产物在其向铜飞片运动过程中受到了侧向稀疏波的作用,其一维平面区域迅速缩小。对于装药直径为 100 mm 的情况,爆轰产物在驱动飞片时其本身的未受侧向稀疏波扰动区域已经大大缩小(见图 4(b)中  $t=12$   $\mu$ s 时刻),因此,铜飞片在后期飞行过程迅速变成了弧形(见图 4(b)中  $t=20$   $\mu$ s 时刻),几乎没有平面未扰动区域。当使用 150 mm 直径的装药时,爆轰产物在驱动飞片时,在与飞片接触的大部分范围内保持了较好的平面度,飞片受侧向稀疏波的影响区域也就较小,在 20  $\mu$ s 时刻,飞片仍保持了较好的平面性。因此,在实验中,适当增大装药直径是必要的。

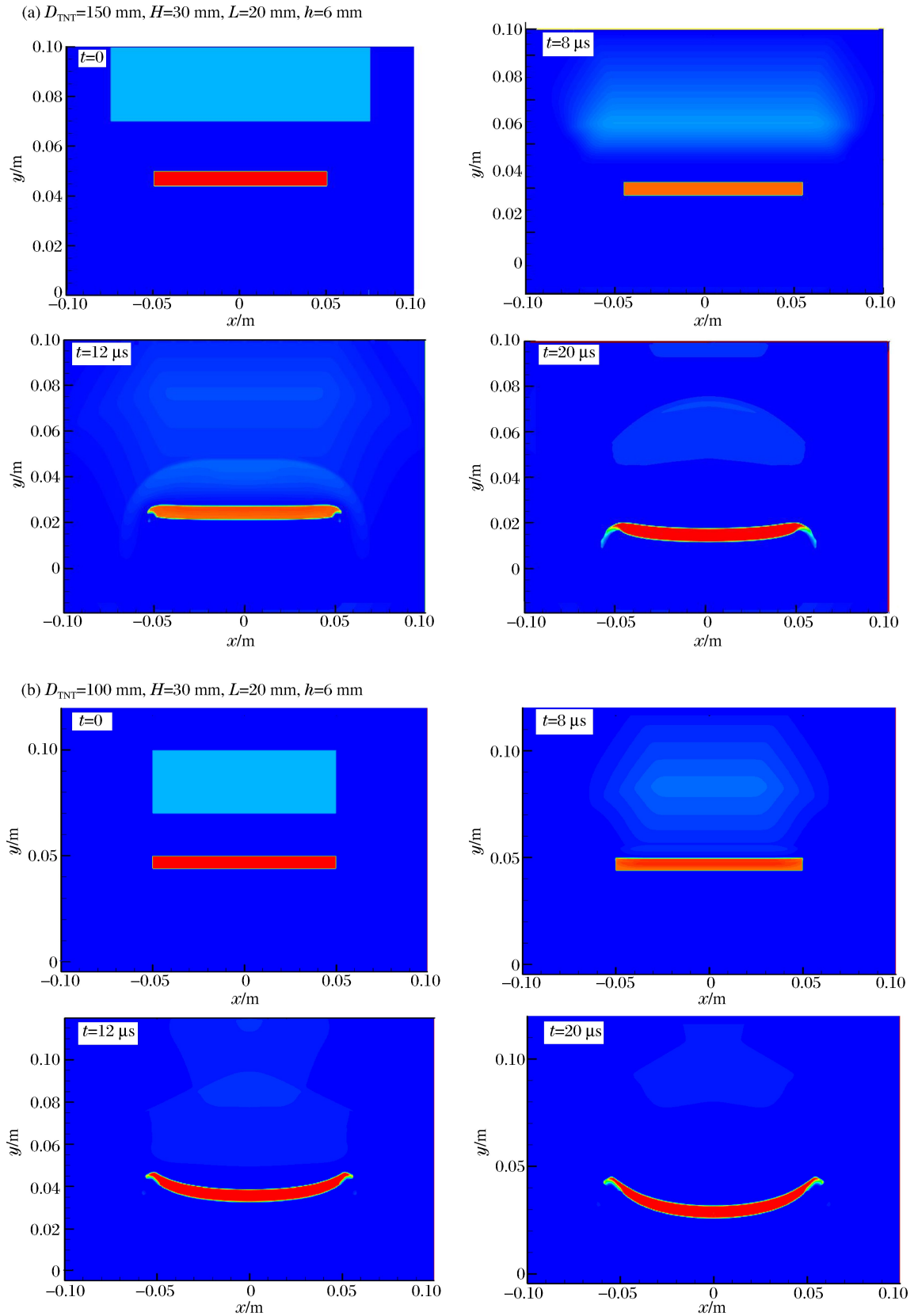


图 4 飞片飞行姿态演化

Fig. 4 Evolvement of flyer shapes

### 3 流场反演数据技术

在爆轰产物驱动飞片无冲击压缩实验中,由于压缩波在样品后自由面或低阻抗窗口材料的界面处反射稀疏波,并与压缩波后续部分相互作用,使得应用 VISAR 等激光干涉技术测量到的样品自由面、样品/透明窗口界面(或者贴附于样品表面反光金属膜)的速度历史不是相应于原始压缩波的自由面(或界面)的速度历史,而是受到自由面或窗口扰动之后的结果,如果利用原位粒子速度约为自由面速度的 1/2 来近似,进而通过简单波假设来获得样品内部信息,则会带来较大误差。为了获取样品加载表面处的压力波形以及样品内部的流场演化历史,引入了流场反演方法来进行数据处理。流场反演方法由 D. Hayes 等<sup>[4]</sup>提出,将流体力学方程组进行时间离散,然后将 VISAR 测量得到的样品后自由面速度历史作为输入数据,再进行空间的反演计算。这一做法避免了复杂的波传播过程分析,还能有效地考虑自由面或窗口界面的影响,目前该方法已被广泛采用<sup>[6-7]</sup>。

由于压力比较低,计算中状态方程使用冲击 Hugoniot 线性表达式

$$p = p_0 + \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - \lambda \eta)^2}$$

式中:  $\eta = 1 - (\rho_0/\rho)$  为体应变,  $c_0 = 3.94 \text{ km/s}$ ,  $\rho_0 = 8.93 \text{ g/cm}^3$ 。通过反演计算给出了加载面上的速度(见图 2 中实线)和加载压力历史数据(见图 3)。在爆轰产物的驱动下,铜飞片在  $6.3 \mu\text{s}$  的时间内压力平滑上升到  $4.3 \text{ GPa}$ ,没有形成明显的冲击,接近于等熵压缩过程。

图 5 给出了飞片内部压力波的演化过程,可以清晰地看出在飞行过程中,飞片内部压力经过了多次震荡,压缩过程峰值在  $5 \mu\text{s}$  附近。在整个加载过程中,飞片的温度上升很小,温度最高上升只有不到  $20 \text{ K}$ (见图 6,材料初始温度为  $300 \text{ K}$ ),这也说明这一加载过程的熵增很小,接近于等熵压缩。

实验中飞片的应变率较低,最高约  $12\,000 \text{ s}^{-1}$ ,如图 7 所示。

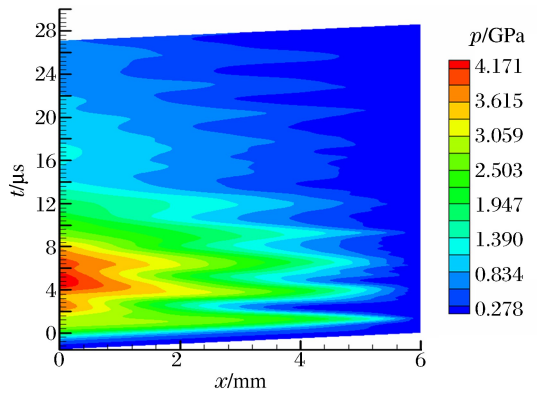


图 5 铜飞片内压力波形演化过程

Fig. 5 Evolvement of pressure wave in copper flyer

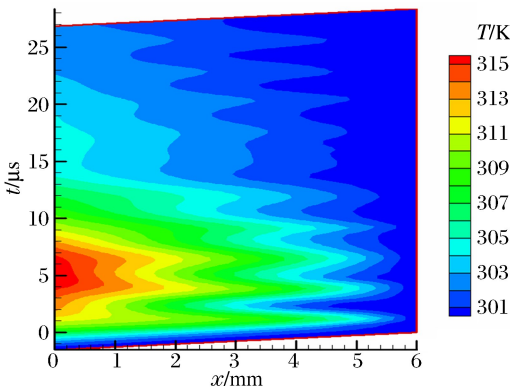


图 6 铜飞片内温度波形演化过程

Fig. 6 Evolvement of temperature in copper flyer

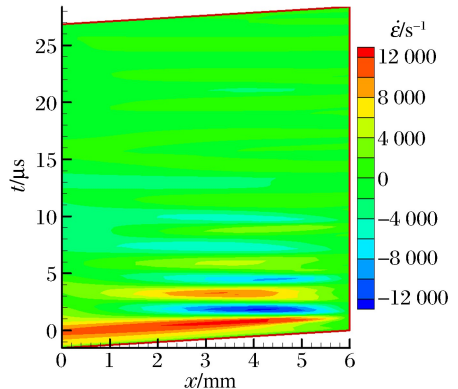


图 7 铜飞片内应变率演化过程

Fig. 7 Evolvement of strain rate in copper flyer

### 4 结 论

利用带空腔爆轰产物驱动飞片技术实现了对材料的弱冲击或无冲击加载实验,测量结果显示,飞片

在加载过程中没有形成冲击波。利用二维程序模拟了整个实验过程,提出了适当的增大装药直径能保证飞片较好的平面性。利用反积分数据处理技术对实验数据进行了处理与分析,获得了飞片内部流场的演化图像。

### 参考文献:

- [1] ЦыпкнВ И. Исследование процесса разгона медных пластин продуктами взрыва через зазор [J]. Журнал Технический Физики, 1975, XLV(3):624-629.
- [2] 金柯,李平,吴强,等. 爆轰产物驱动飞片运动数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5):419-424.  
Jin Ke, Li Ping, Wu Qiang, et al. Numerical simulation on acceleration process of flyer driven by detonation product through an air cushion[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5):419-424.
- [3] 赵剑衡,赵锋,文尚刚,等. 带空腔爆轰加载装置对驱动飞片的影响[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4):307-310.  
Zhao Jian-heng, Zhao Feng, Wen Shang-gang, et al. The effects of explosive device with a cavity on flyer driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4):307-310.
- [4] Hayes D. Backward integration of the equations of motion to correct for free surface perturbation[R]. SAND2001-1440. Sandia National Laboratories, 2001.
- [5] 王刚华,孙承伟,王桂吉,等. 带窗口准等熵压缩试验的流场反演技术[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1):101-104.  
Wang Gang-hua, Sun Cheng-wei, Wang Gui-ji, et al. Backward analysis for isentropic compression experiments with windows backed on samples[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1):101-104.
- [6] Hawke R S, Duerre D E, Huebel J G, et al. Method of isentropically compressing materials to several Megabars [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(6):2734-2741.
- [7] Asay J R, Hall C A, Holland K G, et al. Isentropic compression on iron with the Z accelerator[C]//Furnish M D. Shock Compression of Condensed Matter-1999. Utah: Snowbird, 2000:1151-1154.

## Quasi-isentropic compression techniques driven by detonation products with a cavity and data processing\*

Wang Gang-hua, Zhong Min, Zhao Jian-heng, Zhang Hong-ping, Fan Rui-feng  
(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** Quasi-isentropic compression techniques driven by detonation products with a cavity were used to study material dynamic response characteristics in weak shock or no shock conditions. The entire experiments were simulated by a two-dimensional program. It was proposed that the charge diameter should be large enough to maintain the flyer plane before impact. A backward integration method was used for experimental data processing and analysis.

**Key words:** mechanics of explosion; isentropic compression; backward integration method; Lagrange analysis

\* Received 29 June 2012; Revised 2 November 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11172277, 11176002)

Corresponding author: Wang Gang-hua, wanggh@caep.cn