文章编号：1000-5773(2011)05-0451-06

平面爆轰波驱动金属飞片运动的数值模拟研究*

栾广博[1]，郝　莉[2]，张　柱[1,3]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081；
2.北京建筑工程学院理学院，北京　100044；
3.太原科技大学应用科学学院，山西太原　030024)

摘要：在材料动力学特性的实验研究中，采用平面爆轰波驱动金属飞片对靶体实施加载是一种重要的实验手段。飞片在爆轰载荷作用下的平整度以及最终的宏观极限速度决定对靶体的加载效果，前者决定靶体尺寸，而后者决定对靶体的压力。采用 ALE 与 Lagrange 耦合方法，模拟了爆轰载荷驱动飞片的动力过程，给出了飞片达到极限速度时刻的平整度，并将数值模拟得到的极限速度与基于解析法计算的极限速度进行了对比分析。结果表明，采用流固耦合方法分析爆轰载荷作用下飞片的运动过程是有效并实用的。

关键词：平面爆轰波；飞片；靶体；流固耦合
中图分类号：O382.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

在材料的动态特性实验研究中，Hopkinson 压杆和轻气炮是最常用的两种加载装置，二者分别基于一维平面应力波理论和平面应变波理论，如今二者已广泛应用于各类材料的动态加载实验研究中，如金属、岩石、复合材料等。Hopkinson 压杆只能对试件进行小应变率的加载实验；而轻气炮则可以实现对试件的高应变率加载，但是结构复杂，实验成本很高。比较而言，爆轰驱动技术结构简单，体积小，成本较低，工作可靠，容易与测试仪器同步工作，是一种有前途的高速度、高动压实验手段[1]。爆轰加载装置中最重要的组成部分是平面波发生器，它的设计基础是惠更斯-菲涅耳原理，爆轰波传播与光波传播有类似的性质，在同一种介质中保持恒定速度，当从一种介质进入另外一种介质时，会改变传播路径，即产生折射现象。典型的平面波发生器的结构如图 1 所示，其分界面方程为

$$x=\frac{nh}{n+1}+\frac{\sqrt{(n^2-1)y^2+h^2(n-1)^2}}{(n^2-1)} \quad (1)$$

完整的爆轰加载装置还应包括主药柱、金属飞片及其它辅助装置或设备。

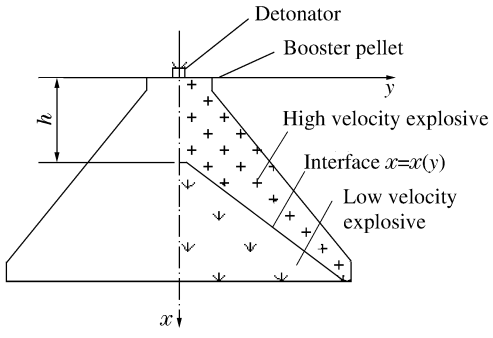


图 1　平面波发生器结构

Fig. 1　The structure of plain wave generators

在爆轰加载研究方面，中国工程物理研究院的工作具有代表性，特别是在多级爆轰加载方式的实验[2-3]和理论[4-5]研究方面做了大量工作。在数值模拟方面，多集中在爆轰波阵面的平整度的研究，模拟飞片运动过程的文献并不多见，Liu 等人[6]基于二维有限元方法模拟了二级爆轰加载装置对飞片的驱

* **收稿日期**：2010-07-28；**修回日期**：2010-11-26
基金项目：国家自然科学基金(11032002，11072025)
作者简介：栾广博(1974—)，男，博士，博士后，主要从事计算力学与工程仿真研究. E-mail：luanguangbo@126.com

动过程。

本研究基于流固耦合数值模拟方法，研究单级平面爆轰载荷对飞片的加载过程，加载装置的相关设计参数取自文献[7]。计算中炸药采用 ALE 网格，飞片采用 Lagrange 网格。如果炸药和飞片全部采用 Lagrange 网格，则计算中炸药会产生严重的变形，从而导致计算精度下降甚至计算终止；若炸药和飞片都采用 Euler 网格，飞片的变形又无法真实地反应出来，故采用 ALE 网格和 Lagrange 网格耦合的处理方法。

2 ALE 算法

ALE 数值算法的特点是其网格既不是随物体变形的 Lagrange 网格，也不是固定空间位置不动的 Euler 网格，而是兼有二者的某些性质，在特定条件下又可以退化为二者之一，这种算法既保留了二者的优点，又克服了纯 Lagrange 和纯 Euler 算法的缺陷和不足。ALE 算法的基本思想是引入一个参考构型，独立于 t_0 时刻的连续体的初始构型和当前时刻的当前构型。如将初始构型记为 Ω_X，当前构型为 Ω_x，参考构型记为 Ω_ξ，则参考构型中各点的位置由其在参考坐标中的位置矢量 $\boldsymbol{\xi}$ 决定，于是 ALE 描述下的随体导数记为

$$\left.\frac{\partial F}{\partial t}\right|_X = \left.\frac{\partial F(\xi)}{\partial t}\right|_\xi + c_i \frac{\partial F}{\partial x_i} \tag{2}$$

式中：F 为某一物理量，可以是标量，也可以是张量；$c_i = u_i - w_i$，为 ALE 描述下的对流速度，其中 u_i 为 X 点的物质速度或材料速度[8]，w_i 为 ξ 点的物质速度或网格速度，根据(2)式可以获得 ALE 描述下的质量、动量和能量守恒方程，形式如下

$$\left.\frac{\partial \rho}{\partial t}\right|_\xi + c_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

$$\rho \left.\frac{\partial v_i}{\partial t}\right|_\xi + \rho c_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \tag{4}$$

$$\rho \left.\frac{\partial e}{\partial t}\right|_\xi + \rho c_i \frac{\partial e}{\partial x_i} = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \tag{5}$$

3 计算模型

爆轰加载装置的结构及其在 ANSYS/LSDYNA 前处理环境下所建立的分析模型如图 2 所示，爆轰装置由平面波发生器、主药柱和飞片组成。高、低爆速炸药的类型分别为 HMX/TNT(78/22)和 PETN，采用 JWL 状态方程，参数由表 1 给出。平面波发生器的低爆速炸药和主药柱炸药类型相同。JWL 状态方程的形式为

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \frac{\omega e}{V} \tag{6}$$

式中：A、B、R_1、R_2、ω 为 JWL 状态方程参数，$V = \rho_0/\rho$为相对体积。考虑到飞片在变形过程中需具有较好的延展性，故选用低碳钢作飞片材料，其参数见表 2。其中 ρ_0 是飞片的密度，E 为杨氏模量，μ 为泊松比，σ_y 是屈服应力，E_t 是进入塑性强化后的切线模量，β 是硬化参数，C 和 P 与 Cowper-Symonds 应变率模型有关，ε_s 是失效应变。起爆点设置在(0，0，0)处，$t=0$ 时刻起爆，低爆速炸药与飞片共用节点。

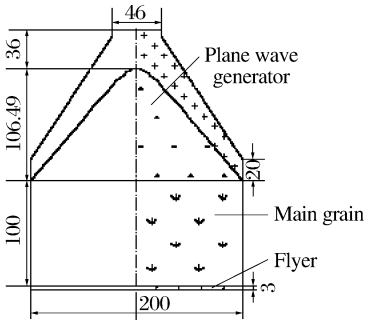


图 2 爆轰加载装置结构及其分析模型

Fig. 2 The explosive loading structure and the computational model

表 1 炸药的材料参数

Table 1 Material parameters of explosives

Explosives	C-J parameters			JWL parameters				
	ρ_0/(g/cm^3)	p_{CJ}/(GPa)	D/(km/s)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω
HMX/TNT(78/22)	1.821	34.2	8.48	748.6	13.380	4.5	1.2	0.38
PETN	1.260	14.0	6.54	537.1	20.106	6.0	1.8	0.28

表 2 钢的材料参数

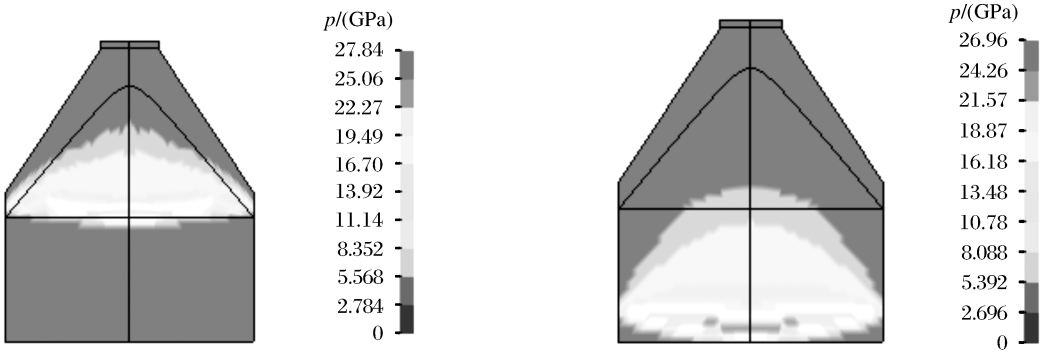
Table 2 Material parameters of steel

ρ_0/(g/cm^3)	E/(GPa)	μ	σ_y/(GPa)	E_t/(GPa)	β	C	P	ε_s
7.8	210	0.3	0.35	2	1	40	5	1.2

4 结果分析

4.1 爆轰波压力分析

高爆速炸药在 $t=0$ 时刻起爆后，在 $t=20$ μs 时刻爆轰波阵面到达主药柱与低爆速炸药的交界面，如图 3(a)所示，经平面波发生器整形后波形明显趋于平整。在 $t=32.9$ μs 时爆轰波传播到主药柱与飞片的接触面，爆轰压力在 27 GPa 左右，如图 3(b)所示，大于低爆速炸药的爆压，这个压力是由高爆速炸药透射的压力与低爆速炸药自身爆炸所产生压力的叠加。在爆轰波传播到主药柱与飞片的交界面时，爆轰载荷只在近似于拱形区域内的压力不为零，而在其它区域压力基本为零，这与有效装药的概念是一致的，下表面类似于锅底状，其中心区域的压力最大，边缘处的压力远小于中心压力。出现上述现象的原因在于，炸药爆炸产生的压力波在炸药表面反射后，对后继的压缩波产生卸载作用，使得接近炸药表面部分的应力降为零。爆轰波波阵面底部的压力不均匀对飞片的变形会产生不良影响，即飞片的边缘滞后效应。



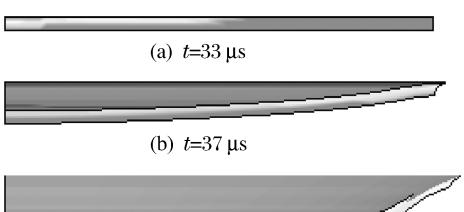
(a) $t=20.0$ μs (b) $t=32.9$ μs

图 3 爆轰波阵面的压力

Fig. 3 Pressure of the detonation wave front

4.2 飞片变形分析

图 4(a)～图 4(d)是飞片从开始受到爆轰载荷的作用到飞片整体速度稳定后的变形图，从图中可以看到，飞片中间较为平整，边缘的运动和变形明显滞后，边缘的质点速度明显落后于飞片中心的质点速度，与爆轰波阵面的形状相似，上述飞片变形与爆轰波阵面的形状密切相关。飞片只在距轴线一定距离 l 之内相对较平，因此在加载实验中，只能用这一部分对靶体实施冲击加载。飞片的最大塑性变形区域发生在飞片的边缘部分，而且带有不同程度的破坏，表明这部分的变形最为严重，这是由飞片的边缘滞后效应造成的，由于边缘的质点速度远小于中间部分的质点速度，速度的不协调导致飞片边缘部分产生了较大的剪切应力，该剪切应力不断作用使飞片边



界的塑性应变不断积累，进而超过失效应变，使边缘部分发生破坏。

飞片的变形程度影响飞片的平整度，因此有必要考察当飞片速度达到稳定时，飞片上同一半径内各点的速度和位移的差异，以确定飞片宏观速度达到极限时刻飞片的平整度。具体方法是在飞片底面距轴线一定距离 l 内选择节点，考察其速度和位移。根据计算结果可知，飞片只在距轴线大约 1/4 直径范围内相对较平，故只考察这一部分的平整度。图 5是 $t=40\ \mu s$ 时距轴线大约 60 mm 范围内的 13 个节点的位移 s，在这一范围内飞片的变形大约为2.2 mm；在 $t=40\ \mu s$ 时刻，13 个节点的速度在 3～3.2 km/s 之间，如果这些节点的速度按3 km/s计算，则可大体估计距轴线 60 mm 内飞片的平整度，如图 6 所示，在距轴线 40 mm 范围内平整度基本在 300 ns 以下，在 60 mm 以上时，飞片的变形已经非常严重，这时与中心的时间差 Δt 已接近 1 μs。

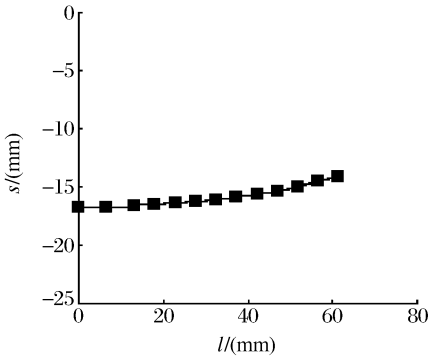


图 5 距轴线 60 mm 范围内节点的位移

Fig. 5 Displacement of nodes with off-axis distance less than 60 mm

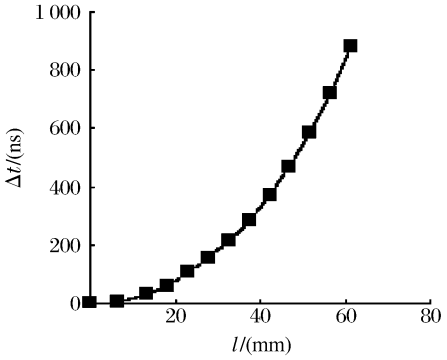


图 6 距轴线 60 mm 范围内的节点的平整度

Fig. 6 Smoothness of nodes with off-axis distance less than 60 mm

4.3 飞片极限速度分析

在爆轰波作用下，飞片经过一段距离后，经过波的均匀化作用，最终趋近于一个稳定的宏观速度，这个速度决定飞片对靶体的加载能力，根据一维应力波理论[9]，飞片的速度越高，对靶体的冲击压力越大。由数值模拟结果可知，爆轰波大约在 $t=33\ \mu s$ 时传到飞片，飞片开始响应并发生变形，在 $t=40\ \mu s$ 时飞片达到极限速度，约为 2.7 km/s，飞片的速度时程曲线如图 7 所示。

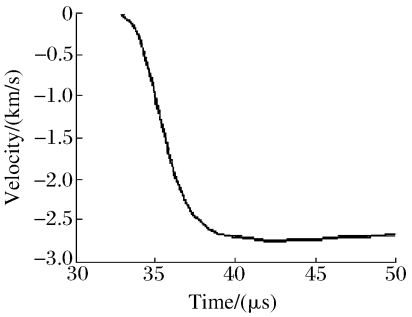


图 7 飞片在爆炸载荷作用下的速度时程曲线

Fig. 7 The velocity-time history curve of the flyer by explosive loading

文献[7]给出了飞片的极限速度的估算公式，其形式为

$$\frac{u_{\max}}{D}=1+\frac{1}{\eta}-\sqrt{\frac{2}{\eta}+\frac{1}{\eta^2}} \tag{7}$$

其中

$$\eta=16m/27M \tag{8}$$

式中：m 为装药质量，这里 m 只考虑主药柱的质量；M 为飞片质量。公式(7)基于以下 3 个基本假定：(1) 飞片是一个刚体；(2) 爆轰波自飞片后界面反射的冲击波是弱激波；(3) 爆轰产物状态方程的绝热指数 K 的数值近似取 3。

本研究中主药柱的质量为 4 kg，飞片质量为 0.73 kg，通过(8)式可计算出 $\eta=3.2$。由表 1 可知，主药柱炸药的爆速为 6.540 km/s，由(7)式计算出飞片的极限速度为 3.008 km/s，比数值模拟给出的极限速度略高一些，其主要原因可能源于(7)式所依赖的假设(1)，即飞片为刚性的假定，该假定忽略了飞片

在爆轰载荷作用下的变形,意味着爆轰载荷对飞片所做的功完全转化为飞片的动能,而没有变形能。因此,在爆轰载荷做功一定的条件下,刚性飞片的极限速度大于考虑变形的飞片速度。

5 结　论

针对平面波发生器组成的爆轰加载装置,对钢飞片的驱动过程进行了数值模拟研究,给出了平面爆轰波的形成过程,分析了飞片的变形、平整度及飞片的极限速度,特别是在极限速度分析方面,理论计算与数值模拟结果非常接近,证明在研究爆轰载荷对飞片加载过程方面数值模拟方法的有效性。因此,在爆轰加载装置设计初期,采用数值模拟方法对爆轰加载过程进行初步研究,不仅对了解爆轰载荷对飞片加载过程的机理,而且对逐步优化爆轰加载装置的设计参数都具有重要的意义。

在飞片的平面度方面,本研究的模拟结果表明,只有大约在 80 mm 直径范围以内飞片的平面度较好,在这个范围以外平面度较差,可能的原因是高、低爆速炸药的爆速比较接近,致使平面波透镜的高度较大,这样使得爆轰波受边界稀疏效应的影响加大。此外,本模拟中飞片的材料模型选用的是塑性等向硬化模型,在高速冲击载荷作用下,金属飞片的材料可以按流体弹塑性材料处理,比如 Johnson-Cook 材料模型,下一步工作将利用该材料模型对整个爆轰加载过程进行数值模拟研究,并与本研究的计算结果进行对比分析。

References:

[1] Zhao F. The Theory and Experiment Techniques of Accelerating Metallic Flyers to Ultra High Speed by Strong Detonation or Multi-Stage System [D]. Mianyang:China Academy of Engineering Physics,2005. (in Chinese)
赵　锋. 炸药强爆轰驱动高速金属飞片的实验和理论研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2005.

[2] 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　锋,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.

[3] Zhao F,Wen S G,Sun C W,et al. Experimental Studies on Multiple-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.

[4] Wen S G,Deng W R,Zhao F,et al. Analysis of Two Stages Explosive/Flyer System [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2005,19(4):343-347. (in Chinese)
文尚刚,邓文荣,赵　锋,等. 二级装药强爆轰驱动次级飞片的分析 [J]. 高压物理学报,2005,19(4):343-347.

[5] Sun C W,Wen S G,Zhao F. An Optimal Analysis of Multi-Stage Explosive Accelerated High Velocity Flyers with the Improved Gurney Model [J]. Explosion and Shockwaves,2004,24(4):299-304. (in Chinese)
孙承纬,文尚刚,赵　锋. 多级炸药爆轰高速驱动技术的Gurney模型优化分析[J]. 爆炸与冲击,2004,24(4):299-304.

[6] Liu Z Y,Shiro K,Shigeru I. Numerical Study of Hypervelocity Acceleration of Flyer Plates by Overdriven Detonation of High Explosive [J]. Int J Impact Eng,2001,26(1):443-452.

[7] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,1999. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 第 2 版. 北京:科学出版社,1999.

[8] Belytschko T,Liu W K,Moran B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures [M]. Translated by Zhuang Z. Beijing:Tsinghua University Press,2002.
Belytschko T,Liu W K,Moran B. 连续体和结构的非线性有限元 [M]. 庄茁,译. 北京:清华大学出版社,2002.

[9] Wang L L. Foundation of Stress Wave [M]. 2nd ed. Beijing:National Defence Industry Press,2005. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 第 2 版. 北京:国防工业出版社,2005.

Numerical Study on the Acceleration of Metallic Flyers Driven by Planar Detonation Wave of Explosives

LUAN Guang-Bo[1], HAO Li[2], ZHANG Zhu[1,3]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Science School, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing* 100044, *China*;
3. *School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: As regards the experimental study on the dynamic properties of materials, planar detonation wave driving flyers to impact target is an important technique. The smoothness and limit speed of flyers under detonation load determine the loading effects. The former determines the target size, and the later determines the pressure to the target. Consequently, based on the coupling ALE and Lagrange method, the simulation for the process of detonation wave driving the flyer is performed, and the smoothness of the flyer is given when it approaches the limit speed. The limit speeds of the flyer from numerical results and analytical solution are comparatively analyzed. Finally, we summariz the numerical results and point out the practicality and effectiveness of the fluid-structure coupling method in studying the motive process of flyers under detonation load.

Key words: planar detonation wave; flyer; target; fluid-structure coupling