文章编号：1000-5773(2009)04-0261-05

点起爆炸药驱动平板飞片运动的数值模拟研究*

姜 洋，孙承纬，李 平，柏劲松

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：为研究点起爆发散爆轰波驱动飞片的运动特性，自行研制了二维流体动力学程序 TDY2D，采用由实验所标定炸药的状态方程参数，对 3 种长径比相差较大的点起爆炸药驱动平板飞片运动的模型进行了数值模拟计算，并对结果进行了分析。计算所得的飞片运动历史和击靶波形均与实验符合较好，具有较高的计算精度，从而验证了该程序的准确性和有效性。

关键词：爆炸力学；爆轰驱动；数值模拟

中图分类号：O383 **文献标识码**：A

1 引 言

点起爆圆柱或圆片形炸药块驱动圆形飞片的装置广泛应用于起爆器件、爆炸成型和爆炸作用件，是军事应用的基础，在军事工程和材料动态研究中具有重要的实际应用价值。随着精密物理实验思想的深入提出，要求爆轰加载装置小型化、标准化、系列化，并对冲击加载波形提出了更高的标准。由于对该类问题进行实验研究涉及的因素太多，很难进行“单一因素”实验，仅仅通过实验方式获得某些系统的规律性认识是比较困难的。因此，与实验相结合，利用数值模拟方法研究类似问题是十分必要和有效的。许多学者对这一问题进行过研究。孙承纬[1]利用修正的瞬时爆轰驱动模型，得到了滑移爆轰驱动平板运动最大速度的解析解，建立了滑移爆轰驱动平板、长圆管的膨胀运动、短圆柱壳的膨胀运动和长圆管的会聚运动的微分方程；美国利弗莫尔国家实验室的 P. C. Souers[2] 等人通过大板实验，研究了 LX-14、LX-04 及 LX-17 的二维爆轰性能，将流体动力学编码 DYNA2D、VHEMP 和热化学编码 Cheetah 相耦合来描述炸药爆轰产物的状态方程等。国内在此方面进行数值模拟研究时多采用商用软件，使用自行开发的程序较少，但是，用商用软件模拟某些具体问题时，难免存在一定的局限性。本工作采用自行开发的二维流体动力学程序 TDY2D，对几个点起爆驱动平板飞片的实验模型进行了数值模拟计算，并将计算结果与实验值进行了比较。

2 TDY2D 程序简介

使用自行研制的二维流体力学有限差分 Largrange 编码 TDY2D，对实验模型中爆轰驱动飞片的运动过程进行模拟。该程序可以处理流体弹塑性物质、高能炸药、理想气体以及多孔物质等的本构关系，具有单向滑移面功能，可以对任意形状的物质区自动生成初始计算网格。

2.1 流体力学方程组

由于 TDY2D 程序采用的是 Largrange 有限差分方法，可以认为质量守恒自动满足，取每个 Largrange网格上的质量为一简单常数。

* **收稿日期**：2008-07-03；**修回日期**：2009-04-29

作者简介：姜 洋(1976—)，女，博士研究生，助理研究员，主要从事计算流体力学、计算爆炸力学研究.
E-mail：jiangyang1016@sina.com

动量守恒方程

$$\begin{cases}\rho a^x=\dfrac{\partial T^{xx}}{\partial x}+\dfrac{\partial T^{xz}}{\partial z}+(\alpha-1)\dfrac{T^{xx}-T^{yy}}{x}\\ \rho a^z=\dfrac{\partial T^{xz}}{\partial x}+\dfrac{\partial T^{zz}}{\partial z}+(\alpha-1)\dfrac{T^{xz}}{x}\end{cases}\tag{1}$$

能量守恒方程

$$\rho\frac{\partial e}{\partial t}=P_{\mathrm{s}}+P_{\mathrm{d}}+q_{\mathrm{s}}+q_{\mathrm{d}}+q\tag{2}$$

在 x、y、z 坐标系中，z 轴为旋转轴；$\alpha=1,2$，分别对应于平、柱几何。ρ 为密度，t 为时间，a^x、a^z 分别为 x、z 方向的加速度，T^{xx}、T^{xz}、T^{yy} 和 T^{zz} 为有效应力(即应力＋人为粘性)，e 为比内能，P_{s}、P_{d} 分别表示压力对体积变化的做功率及应力偏量对形变的做功率，q_{s}、q_{d} 分别代表粘性应力球量及偏量的做功率，q 是由外源做功的比功率，方程(2)中未计及热传导的影响。

人为粘性

$$\eta=\begin{cases}\rho b_1^2\left(\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial\rho}{\partial t}\right)+b_2 c\left(\dfrac{\partial\rho}{\partial t}\right) & \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial\rho}{\partial t}>0\\ 0 & \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial\rho}{\partial t}\leqslant 0\end{cases}\tag{3}$$

式中：c 为声速，b_1、b_2 为具有长度量纲的常数。

2.2 本构关系

金属材料的本构关系采用流体弹塑性模型描述，与弹性应变相关的应力服从增量型 Hooke 定律，屈服条件使用 von Mises 屈服条件。炸药的爆轰由简单的开关函数 F 控制，见(4)式

$$F=\begin{cases}0 & t\leqslant\tau\\ \min\left(1.0,\dfrac{(t-\tau)D}{A_A}\right) & t>\tau\end{cases}\tag{4}$$

式中：τ 为某一位置处炸药的起爆时刻，由该处与起爆点之间的距离和炸药爆速 D 确定，A_A 为与该位置网格大小及粘性系数有关的参量。炸药或产物中的压力可以由 $p=F(\gamma-1)\rho e$ 计算。

3 实验模型

3.1 实验模型 1

实验模型 1[3] 如图 1 所示，用雷管在中心轴对称位置引爆 JOB9003 主装药，驱动铜飞片运动。实验中采用 VISAR 测试技术，测量平面飞片的自由面速度，光纤探头布置在飞片中心垂直于引爆轴线的平面上。

表 1 实验装置 1 概况

Table 1 Experimental assembly for model 1

Size of JOB9003 /(mm×mm)	Size of flyer /(mm×mm)
∅200×25	∅196×1.0

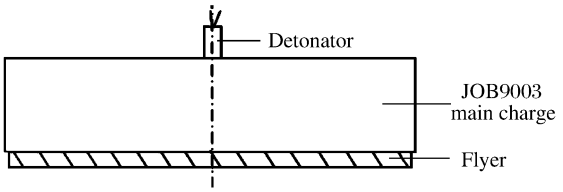


图 1 实验模型 1

Fig. 1 Experimental set-up for mode l

3.2 实验模型 2

实验模型 2 是以雷管依次经传爆药 PETN、35TNT/65RDX 引爆圆柱形装药 TATB，铜平板飞片在爆轰驱动下，作用在平面光探板上，飞行空腔的高度为 h。实验中采用光学测试方法，用 GSJ 高速转镜扫描相机记录飞片撞击到光探板上的波形。

表 2　爆轰驱动实验模型 2 概况

Table 2　Experimental assembly for model 2

Size of PETN /(mm×mm)	Size of 35TNT/65RDX /(mm×mm)	
∅20×5	∅42.8×10	
Size of TATB /(mm×mm)	Size of flyer /(mm×mm)	h/(mm)
∅50×52	∅50×2	10

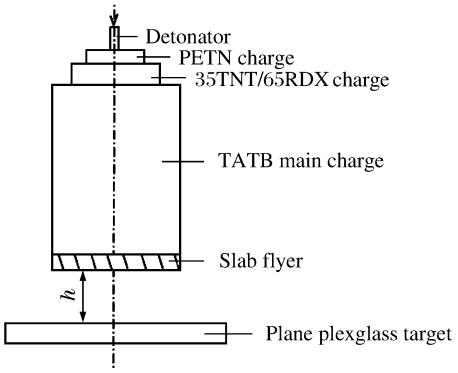


图 2　实验模型 2

Fig. 2　Experimental set-up for model 2

3.3　实验模型 3

实验模型 3 也是以雷管经传爆药 PETN 引爆圆柱形装药 35TNT/65RDX,驱动铜平板飞片,作用在半径为 R 的凹面(半圆形)光探板上,对称轴处飞片底部与光探板的空腔距离为 h。实验中同样采用光学测试方法,用 GSJ 高速转镜扫描相机记录飞片撞击到光探板上的波形。

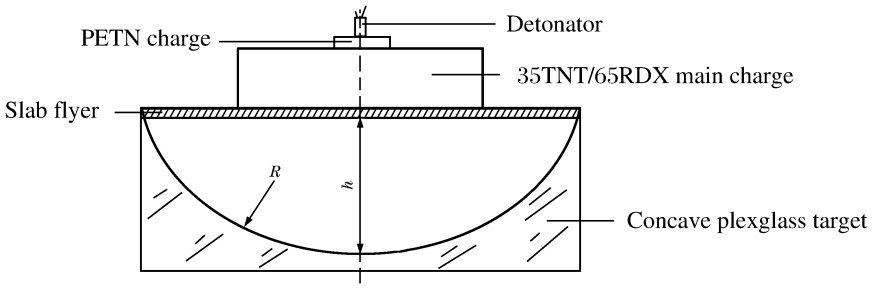


图 3　实验模型 3

Fig. 3　Experimental set-up for model 3

表 3　爆轰驱动实验模型 3 概况

Table 3　Experimental assembly for model 3

Size of PETN/(mm×mm)	Size of 35TNT/65RDX/(mm×mm)	Size of flyer/(mm×mm)	h/(mm)	R/(mm)
∅20×2	∅100×20.86	∅169×0.81	31.88	124

4　计算模型和参数

由于实验模型具有轴对称性,取结构的二分之一进行计算。计算网格按实验模型中不同的物质区域由程序 TDY2D 自动生成;计算时炸药与金属界面设置滑移线;忽略雷管的影响,设置模型初始时刻为点起爆。

对于 3 种模型的材料参数如下:铜飞片采用各向同性弹塑性流体动力学模型和 Grüneisen 状态方程描述,见表 4,其中 c_0 为声速,λ 为冲击雨贡纽参数,γ_0 为 Grüneisen 因数,G 为剪切模量,Y_0 为屈服强度。炸药产物采用 γ 律状态方程描述,γ 根据实验标定所得,见表 5。

表 4　飞片的材料参数

Table 4　Parameters of flyer

Material	ρ_0/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ	γ_0/(GPa)	G/(GPa)	Y_0/(GPa)
Steel	8.4	3.726	1.434	1.87	46.0	0.45

表 5 炸药参数

Table 5 Parameters of explosives

Material	ρ_0/(g/cm^3)	D/(km/s)	γ	Material	ρ_0/(g/cm^3)	D/(km/s)	γ
JOB9003	1.844	8.74	2.99	35TNT/65RDX	1.715	7.9	2.37
PETN	1.77	8.6	3.0	TATB	1.868 2	7.655	3.5

5 计算与实验结果对比分析

5.1 计算结果与实验结果对比

采用 TDY2D 程序对实验模型 1～实验模型 3 进行数值模拟计算。计算结果中 R_0 是指飞片微元所在初始位置的半径，Δt 是指飞片击靶时不同半径 R 处微元的碰靶时间与对称中心位置微元碰靶时间的差值。计算与实验结果的对比见图 4～图 6。因模型的对称性，图 5 和图 6 仅给出了二分之一模型的击靶波形。

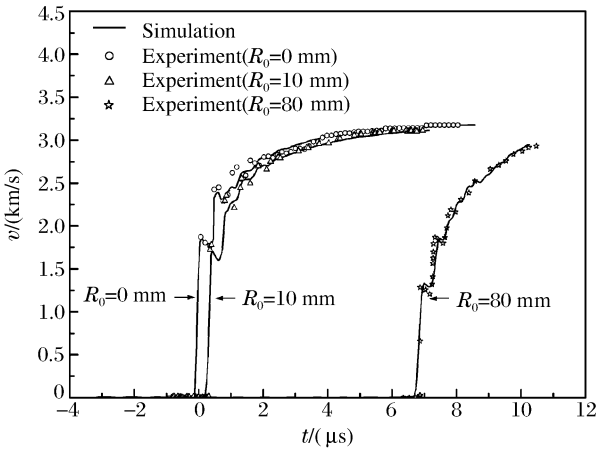


图 4 模型 1 飞片初始位置为 R_0 处测试点速度历史的实验值与计算值对比

Fig. 4 Comparison of computational and experimental results of velocities as a function of time for the points on the flyer for model 1

5.2 结果分析

模型 1 的计算结果图 4 分别给出了飞片在散心爆轰驱动(R_0=0 mm)、滑移爆轰驱动(R_0=80 mm)以及从散心向滑移的过渡区域(R_0=10 mm)驱动下的速度历史。从飞片的 3 个测试点的运动历史的对比可见，第一跳速度依次降低，其主要因素是在爆轰波从散心爆轰过渡到滑移爆轰的过程中，随着入射角度的增加，爆轰波的反射逐渐减弱，入射到飞片的压力依次降低。3 个测试点分别加速运动了约 4 μs 后，其速度相差不多，但 R_0=0 mm 和 R_0=10 mm 的测试点，飞片速度已经基本稳定；而 R_0=80 mm 处的测试点，飞片还在继续加速。滑移爆轰区(R_0 很大处)飞片终速比散心爆轰区高。

飞片碰靶波形将取决于爆轰波的斜入射和侧面、背面稀疏变化趋势影响的强弱和飞片初始飞行状态的特点，以及飞片微元的飞行距离。从图 5 和图 6 可以看出，对于模型 2 和模型 3，因为其长径比相

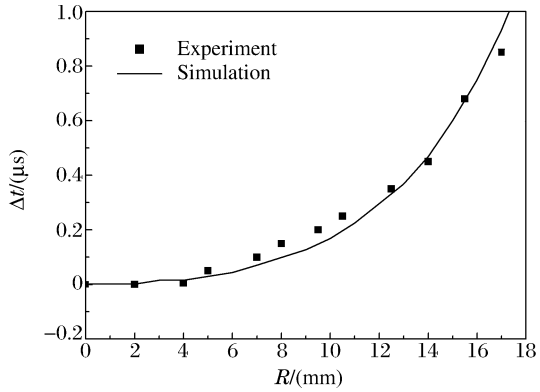


图 5 模型 2 飞片击靶波形的实验值与计算值对比

Fig. 5 Comparison of computational and experimental results of relative time of the flyer impacting on the target for model 2

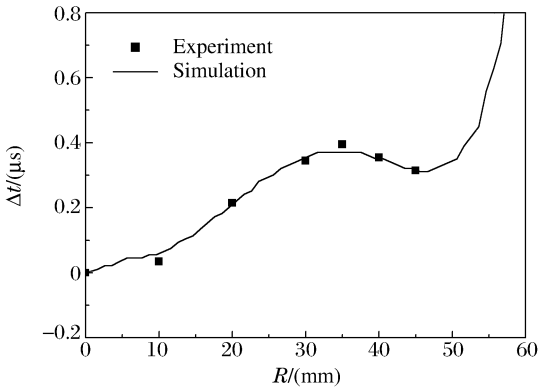


图 6 模型 3 飞片击靶波形的实验值与计算值对比

Fig. 6 Comparison of computational and experimental results of relative time of the flyer impacting on the target for model 3

差较大且光探板几何形状不同,各个因素的影响程度也不一样,导致飞片击靶波形存在差异;模型 2 中沿径向方向飞片碰靶时间单调滞后;而模型 3 的碰靶波形在靠近飞片边缘处出现了局部超前。

运用 TDY2D 程序,不仅能够对爆轰驱动飞片的速度进行较精确的描述,而且对于这两种差异较大的模型,其计算结果能够很好地重现实验击靶波形;采用通过实验所标定的一组炸药状态方程参数的计算结果,可以同时与多个实验结果较好得吻合。这说明该程序在处理爆轰驱动问题上是行之有效的,具有一定的优越性。从而可以运用该程序,采用数值模拟和实验验证相结合的方法,探索爆轰装置参数对飞片速度和波形影响的一般规律,加深对爆轰驱动飞片运动的动力学过程的认识。

6　结 束 语

采用二维流体动力学程序 TDY2D 对 3 种点起爆炸药驱动飞片的运动过程进行了数值模拟,通过对计算值与实验值的对比分析,得到如下结论:

(1) 对于长径比相差较大的各个实验模型,TDY2D 程序对飞片速度历史和击靶波形的计算值与实验值符合较好,验证了该程序的正确性和有效性;

(2) 计算中对爆轰产物采用 γ 律状态方程描述,所标定的参数 γ 能够较好地再现各个实验结果。下一步工作是通过对实验的数值模拟计算,获得应用范围较广的 JWL 状态方程参数。

References:

[1] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 610-622. (in Chinese)
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,2000:610-622.

[2] Vitello P, Souers P C. Stability Affects of Artificial Viscosity in Detonation Modeling [A]//12th Symp (Int) on Detonation [C]. San Diego, California, 2002: 377-384

[3] Yu D S, Zhao F, Tan D W, et al. Experimental Studies on Detonation Driving Behavior of JOB-9003 and JB-9014 Slab Explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 140-144. (in Chinese)
虞德水,赵　锋,谭多望,等. JOB-9003 和 JB9014 炸药平面爆轰驱动飞片的对比研究 [J]. 爆炸与冲击,2006,26(2):140-144.

Numerical Simulation of the Motion of Flyer Driven by Slab Explosive Initiated at Centered Point

JIANG Yang, SUN Cheng-Wei, LI Ping, BAI Jin-Song

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: In order to study the characteristics of flyer's acceleration by divergent detonation wave, a 2D numerical code TDY2D was developed. By using the equation of state of detonation products which are got by computing for the experimental models, the TDY2D is used to compute the motion of flyers driven by slab charge that initiated at centered point for three experimental models which are three kinds of explosive-flyer assemblies with different length/diameter ratio. The simulation results about the velocity of some points on the flyers and the front surface shape of the flyers impacting on target agree well with the experimental data. The precision in calculation is high. These prove that the code TDY2D is correct and effective.

Key words: mechanics of explosion; acceleration by detonation products; numerical simulation