

文章编号: 1001-1455(2004)05-0419-06

爆轰产物驱动飞片运动数值模拟研究*

金柯, 李平, 吴强, 金孝刚

(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: 利用数值模拟方法, 研究了主装药与飞片之间的空气隙厚度变化对飞片中载荷幅度和载荷上升时间、飞片速度和飞片变形量的影响。数值模拟与验证实验结果吻合得较好。结果表明, 带空气隙的化爆加载装置可以在飞片中获得较小的载荷幅度和较长的载荷上升时间, 并且可以降低飞片击靶速度, 从而实现较低的冲击压力, 但飞片变形量随着空气隙厚度增大而增大。

关键词: 爆炸力学; 爆轰驱动; 数值模拟; 飞片; 空气隙

中图分类号: O383

国标学科代码: 130°3520

文献标志码: A

1 引言

化爆加载装置是研究材料动态响应特性的重要冲击加载装置之一。如果炸药与飞片直接贴附, 将难以获得较低的飞片速度, 而且飞片中载荷的上升时间较短。为了进行材料在冲击压缩低压状态和准等熵压缩条件下的动态响应特性研究, 中国工程物理研究院的研究人员对利用爆轰产物经过空气隙驱动飞片运动的加载装置进行了研究, 获得了部分实验结果, 但并未对空气隙厚度变化对飞片撞击靶板时刻的速度和飞片自由面变形量、飞片中载荷幅度和载荷上升时间的影响进行系统的探索^[1]。俄罗斯的研究人员对此类加载装置也进行了实验研究和数值模拟, 给出了空气隙厚度对飞片击靶速度、飞片击靶波形差的影响、飞片加速运动的历史轨迹等研究成果^[2]。基于数值模拟和实验结果, Yu. V. Bat'kov 等^[3]测量了铝合金在准等熵压缩条件下的剪切强度, 铝合金样品中载荷上升时间约 $2\mu\text{s}$, 而 J. R. Asay 等^[4~5]利用 Sadia 实验室的 Z 加速器进行的准等熵压缩实验, 样品中载荷上升时间小于 $0.3\mu\text{s}$ 。

由于爆轰驱动过程非常复杂, 利用数值模拟和实验相结合的方式研究类似问题是十分必要和有效的。本文中爆轰产物经过不同厚度的空气隙驱动飞片运动过程进行了一维、二维数值模拟, 试图为准等熵压缩实验技术和低压化爆加载装置设计提供参考。

2 计算模型的建立

2.1 计算模型

爆轰产物经过空气隙驱动飞片运动具有轴对称特性, 图 1 给出了计算模型, 令 z 、 r 分别代表轴向和径向。采用 Euler 格式的有限元体积方法描述爆轰产物的流动, 整个 Euler 计算区域 z 、 r 方向步长均为 0.5mm , 共 80000 个单元, 各面均为压力透射边界。采用 Lagrange 格式的有限元方法描述飞片的运动过程, z 、 r 方向步长均为 0.75mm , 共 210 个单元, 轴线上的网格点 z 方向约束。爆轰产物和飞片接触面自由耦合^[6]。

另外, 由于引爆主药柱的平面波发生器是由高、低爆速炸药组合而成, 完全进行数值模拟比较困难, 计算中将爆轰系统等效为具有一定有效装药长度的主药柱^[7]。计算开始时在主药柱顶面平面起爆, 向炸药柱内传入一个平面爆轰波。

* 收稿日期: 2003-09-10; 修回日期: 2004-01-15

基金项目: 中国工程物理研究院重大基金项目(2002Z01041)

作者简介: 金柯(1976—), 男, 硕士研究生, 研究实习员。

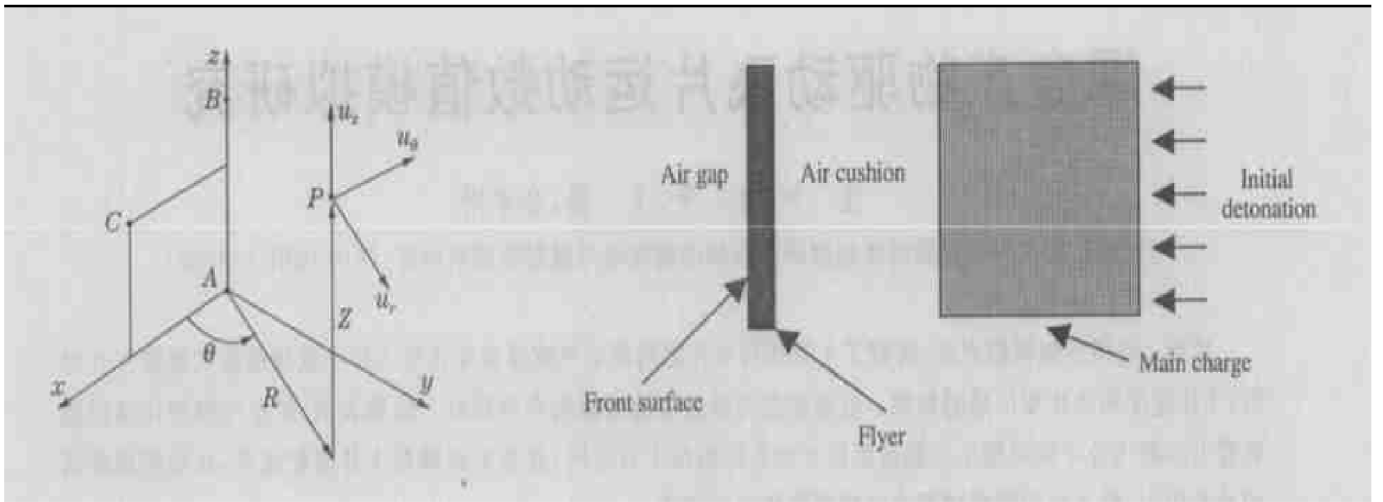


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculated model

飞片材料采用弹塑性流体模型, 采用多项式形式的状态方程, 服从 Von Mises 屈服准则, 爆轰产物选用 JWL 状态方程, 其表达式为

$$p = A \left[1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right] e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left[1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right] e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \eta \rho_0 e$$

式中: e 为单位质量比内能, 压缩度 $\eta = \rho / \rho_0$, ρ_0 为炸药初始密度, ρ 为爆轰产物密度。表 1 给出了计算中使用的参数^[8-9]。

表 1 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 1 Equation-of-state parameters of detonation products

炸药	C-J 参数			状态方程参数				
	$\rho / (\text{g/cm}^3)$	$D / (\text{km/s})$	$e / (\text{MJ/kg})$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω
TNT	1.640	6.93	4.07	371.2	3.231	4.15	0.95	0.30
RHT-901	1.684	7.79	4.20	524.2	7.678	4.20	1.10	0.34
JO-9159	1.860	8.86	5.36	852.4	18.02	4.55	1.30	0.38

2.2 计算结果与实验结果的比较

为检验程序模拟爆轰驱动飞片运动过程的可靠性, 对文献[10]列举的部分实验进行了一维计算, 进而基于对称碰撞推算出样品内冲击压力。计算值与实验值列于表 2, 其中, l_e 为 RHT-901 等效装药长度, l_p 为 PMMA 厚度, l_f 为 LY12 铝飞片厚度, h 为空腔高度, ϵ_r 为相对误差。由表可见, 数值模拟结果与实验结果吻合得很好。对等效装药长度为 71mm 的 RHT-901 主药柱的爆轰产物经过 20mm 空气隙驱动 7mm 黄铜飞片飞行 13mm 的过程进行了二维计算和验证实验, 实验光测试系统采用五狭缝、150000r/min 转速的高速相机进行扫描照相, 获得飞片击靶波形和无氧铜样品中冲击波速度(反推得到飞片击靶速度)。

表 2 LY12 铝样品中冲击压力实验值与计算值

Table 2 Experimental data and computed results of the aluminum sample

l_e / mm	l_p / mm	l_f / mm	h / mm	$p_{\text{exp}} / \text{GPa}$	p_c / GPa	$\epsilon_r / \%$
71	1.0	3	45	52	52.57	1.1
71	1.0	2	45	57	59.69	3.7
105	1.0	3	45	62	59.55	3.9
128	1.0	2	45	71	70.66	0.5

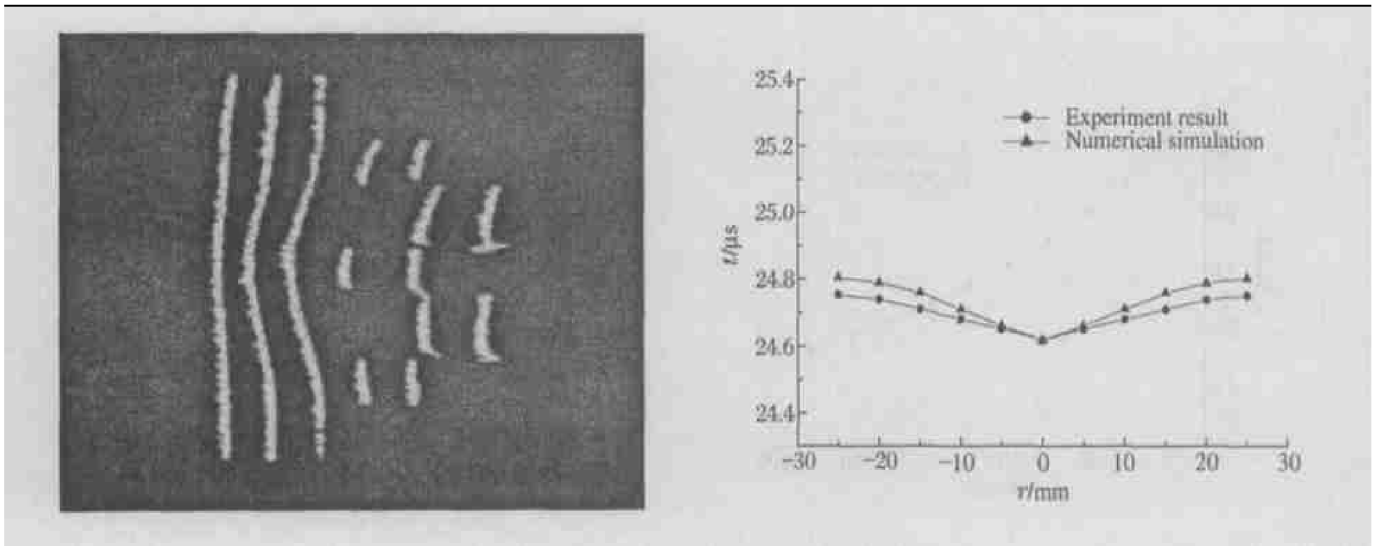


图 2 飞片击靶波形计算与实验结果

Fig.2 Experimental results and calculated distortion of the flyer front surface

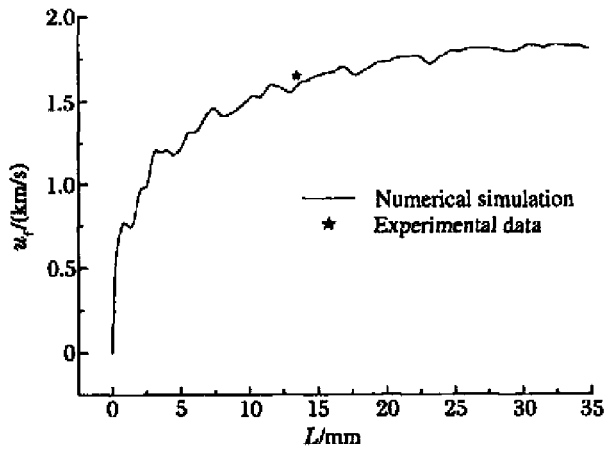


图 3 飞片中心速度实验与计算结果

Fig.3 The Calculated and measured velocity of the flyer center

图 2 分别列出了 $\varnothing 70\text{mm}$ 范围击靶波形的实测结果(其中中心一条为加载装置中心击靶波形)和计算结果。图 3 给出了飞片中心速度-位移曲线的计算结果和飞片击靶速度实验值。飞片击靶波形差在 $\varnothing 50\text{mm}$ 范围内实测值为 186ns, 计算值为 134ns, 计算结果与实验结果基本吻合, 且变形趋势两者符合得很好。飞片击靶速度实验值为 1.65km/s, 计算值为 1.57km/s, 计算误差小于 5%。综上所述, MSC. Dytran 软件系统是可信的, 可以较好地再现爆轰驱动过程。

3 数值模拟结果及分析

3.1 空气隙厚度对飞片击靶速度的影响

为得到空气隙厚度对飞片击靶速度影响的一般规律, 分别对 40mm 厚 TNT (模型 1)、RHT-901 (模型 2)、JO-9159 (模型 3) 三种炸药的爆轰产物经过 0~90mm 空气隙后, 驱动 2.0mm 无氧铜飞片运动 40mm 空腔的过程进行了一维计算。三个计算模型的计算结果基本相似。表 3 给出了三个模型的计算结果, 图 4 为模型 3 的空气隙厚度与飞片速度关系和不同空气隙厚度下飞片速度-位移曲线。可以看出, 随着空气隙厚度的增加, 飞片击靶速度随之下降, 但飞片速度减小量并不与空气隙厚度增量呈线性关系, 速度下降逐渐趋缓。因而在低压化爆加载装置设计中不能片面地通过增加空气隙厚度以降低飞片击靶速度; 另一方面, 由于应力

表 3 计算结果

Table 3 Calculated results

h/mm	$w_f / (\text{km/s})$		
	TNT	RHT-901	JO-9159
0	2.0544	2.4590	3.0385
10	2.0260	2.4279	2.9067
20	1.9597	2.3360	2.7980
30	1.9000	2.2523	2.6999
40	1.8457	2.1758	2.6142
50	1.8019	2.1184	2.5460
60	1.7616	2.0653	2.4856
70	1.7288	2.0189	2.4287
80	1.6964	1.9837	2.3818
90	1.6644	1.9555	2.3298

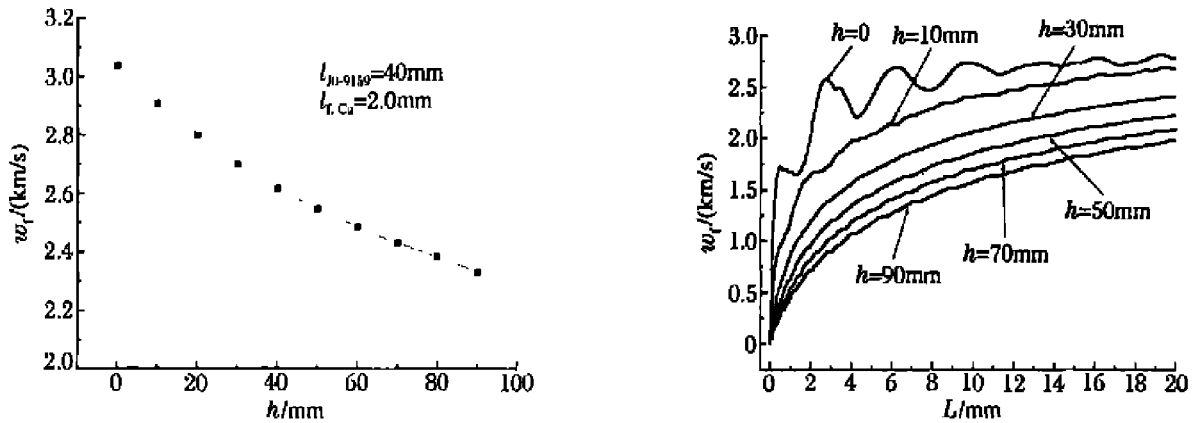


图 4 模型 3 计算结果

Fig.4 Simulation results of model 3

波在飞片中的来回反射造成飞片自由面速度振荡,对比图 4 中各条速度-位移曲线,可以看出空气隙厚度越大,飞片加速过程越平缓。

3.2 空气隙厚度对样品中载荷幅度和上升时间的影响

将上述装置的飞片作为待测样品,可以实现对飞片(样品)材料的准等熵压缩。图 5 给出了模型 3 中样品中心自由面速度历史曲线。可以看到,无空气隙时,样品自由面速度即载荷幅度在 $0.41\mu\text{s}$ 左右上升到第一峰值 1.70km/s ;空气隙厚度为 10mm 时,其样品自由面速度上升到第一峰值 1.10km/s 的时间大于 $1.10\mu\text{s}$,此与文献[5]的结论相一致。空气隙厚度越大,样品中载荷幅度越小、载荷上升时间越长。经过数值模拟和实验定型后的此类加载装置,可为开展准等熵压缩条件下材料动态响应特性研究提供加载平台。

3.3 空气隙厚度对飞片击靶波形的影响

虽然增加空气隙厚度可以降低飞片击靶速度,但是空气隙厚度太大,将会导致爆轰产物流场产生严重的边侧稀疏效应,从而造成飞片严重偏离一维运动,飞片将发生较大弯曲。

为说明空气隙对飞片击靶波形的影响,对 TNT(模型 4)、RHT-901(模型 5)的爆轰产物经过 $0\sim 50\text{mm}$ 空气隙,驱动 2mm 无氧铜飞片的动力学过程进行了二维数值模拟,得到了不同时刻击靶波形。表 4 给出了击靶波形差的计算结果,图 6 分别给出了模型 4、模型 5 在不同空气隙厚度下的击靶波形(10mm 空腔处)。无空气隙时,飞片击靶波形差在 $\varnothing 50\text{mm}$ 范围内小于 100ns ,但随着空气隙厚度增加到 50mm ,飞片击靶波形差小于 100ns 的范围减小到 $\varnothing 20\text{mm}\sim\varnothing 30\text{mm}$,而爆轰实验中样品布局区域($\varnothing 30\text{mm}\sim\varnothing 50\text{mm}$ 环带)内的波形差也从 $40\sim 60\text{ns}$ 急剧增加到 $350\sim 450\text{ns}$ 。因此,在利用爆轰产物经过空气隙驱动飞片达到降低飞片速度目的的同时,必须考虑空气隙厚度对飞片击靶波形的影响。低压化爆加载装置设计中应选择两者的最佳结合点。

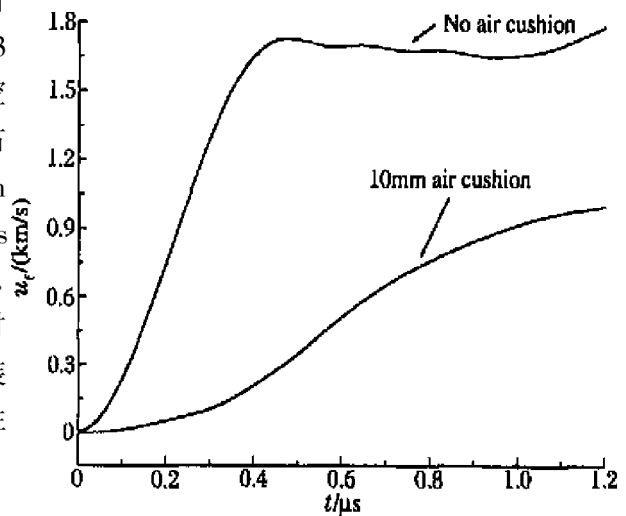


图 5 样品中心自由面速度历史曲线

Fig.5 Free surface velocity history of sample center

表 4 计算结果

Table 4 Calculated results

主装药	h/mm	$\Delta t/ns$				
		$\varnothing 10mm$	$\varnothing 20mm$	$\varnothing 30mm$	$\varnothing 40mm$	$\varnothing 50mm$
TNT 40mm	0	8	23	43	71	106
	10	12	27	50	85	144
	20	20	78	106	158	254
	30	26	82	125	200	351
	40	32	76	139	253	472
	50	38	98	175	326	609
RHT-901 40mm	0	8	24	44	70	99
	10	10	27	49	79	134
	20	15	58	84	130	218
	30	24	82	119	188	323
	40	30	81	136	238	432
	50	34	81	152	285	530

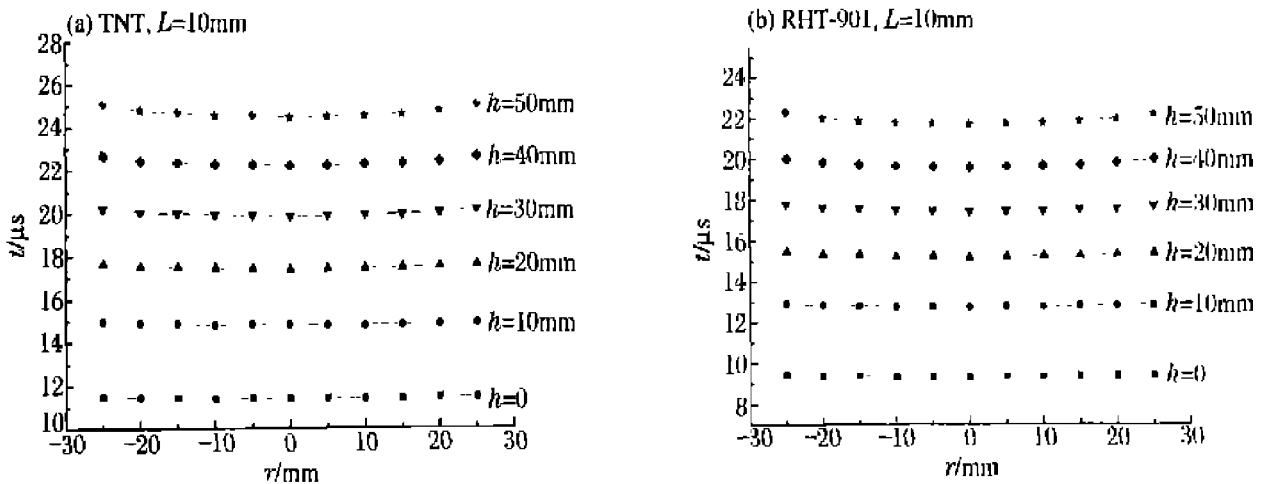


图 6 不同空气隙厚度下飞片击靶波形

Fig. 6 The flyer front surface with different thickness of air cushion

4 小 结

(1) 利用数值模拟方法可以较好地再现爆轰驱动飞片运动过程，并可为适用于材料低压动态响应特性研究和准等熵压缩实验的化爆加载装置设计提供参考。

(2) 在主装药和飞片之间预留空气隙，可以降低飞片击靶速度从而实现样品的低压冲击压缩，但飞片击靶波形差随着空气隙厚度的增加而增加，击靶波形平面范围逐渐减小。

(3) 飞片(样品)中载荷幅度随着空气隙厚度的增加而减小，载荷上升时间增长，此类加载装置可以应用于准等熵压缩实验。

参考文献：

[1] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 1999: 141—152.
 [2] Цыпкин В И. Исследование процесса разгона медных пластин продуктами взрыва через зазор [J]. Журнал Технической Физики, 1975, XLV (3): 624—629.

- [3] Bat'kov Yu V, Knyazev V N, Novikov S A, et al. Shear strength of aluminum[A]. Furnish M D, et al. Shock Waves in Condensed Matter—1999[C]. New York, 1999:501—504.
- [4] Asay J R. Isentropic compression experiments on the Z accelerator[A]. Furnish M D, et al. Shock Waves in Condensed Matter—1999[C]. New York, 1999:261—266.
- [5] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, et al. Recent advances in quasi-isentropic compression experiments (ICE) on the Sandia Accelerator[A]. Furnish M D, et al. Shock Waves in Condensed Matter—2001[C]. New York, 2001:1163—1168.
- [6] MSC. User's Manual of Dytran 4.7[Z].
- [7] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000:597—598.
- [8] 董海山. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989:289.
- [9] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL Explosive Handbook[M]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985:8—23.
- [10] 李大红. 化爆加载装置系列[S]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1997:8.

Numerical simulation on acceleration process of flyer driven by detonation product through an air cushion

JIN Ke^{*}, LI Ping, WU Qiang, JIN Xiao-gang

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The influence of an air cushion between the main charge and the flyer was studied by numerical simulation. The magnitude of load and the width of wave front in the flyer, the flyer velocity and the shape of the flyer front surface are investigated in detail. The calculated results are in good agreement with the experimental data. The results show that the explosive-loading device with an air cushion can be used to get a lower magnitude of load and a longer width of wave front in the flyer. The velocity of the flyer is decreased too. But the deformation of the flyer increases with the thickness of the air cushion.

Key words: mechanics of explosion; detonation drive; numerical simulation; flyer; air cushion

* Corresponding author: JIN Ke

E-mail address: jinnee-jinks@163.com

Telephone: 0816-2485100