

文章编号:1006-9941(2021)05-0381-08

# 亚毫米气隙和垫层对爆轰驱动飞片的影响规律

舒俊翔,张旭,裴红波,郑贤旭,刘仓理

(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621900)

**摘要:** 为了获取亚毫米气隙、垫层对三氨基三硝基苯(TATB)基炸药爆轰驱动飞片的影响规律,设计了亚毫米尺度气隙、垫层的精密爆轰实验,利用光子多普勒激光干涉测试技术获取了TATB基炸药在亚毫米气隙、垫层影响下的爆轰驱动飞片运动历程。实验结果表明,相较于飞片炸药紧贴状态,有亚毫米硅泡沫垫层时,飞片的起跳速度降低,最终速度反而有所提高(约 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、占比1%);而气隙对飞片运动的影响更大,最终速度提高更多( $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、2%)。同时开展了亚毫米气隙影响的数值模拟研究,结果表明,点起爆和线起爆的不同起爆方式对于飞片的运动速度历程有一定影响,但是在不同起爆方式下,气隙增大均有利于提高飞片的最终速度。亚毫米气隙对爆轰驱动飞片影响规律的理论分析结果显示,亚毫米气隙的引入使爆轰产物经过等熵膨胀后再与飞片相互作用,作用强度降低,系统熵增减小,驱动飞片的能量增加,造成了飞片最终速度的提高。不同气隙尺度下,主导机制的不同会带来对飞片运动速度历程影响规律的差别。

**关键词:** 三氨基三硝基苯(TATB)基炸药;爆轰;气隙;垫层;飞片;驱动

**中图分类号:** TJ55; O38

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2020329

## 1 引言

爆轰驱动过程的研究一直是爆轰领域所关注的重点,滑移爆轰驱动<sup>[1-3]</sup>,对碰<sup>[4-6]</sup>、飞片高速加载引起的强爆轰<sup>[7-8]</sup>驱动过程等各种爆轰加载条件下的研究均有一定的开展,不同加载条件会带来爆轰驱动过程的差异。而实际工程应用中,炸药与金属飞片之间还经常存在气隙、垫层等结构,带来了加载条件的不同,引起爆轰驱动过程的差异,并且这种影响对于精密的爆轰装置是不可忽略的,因此研究带气隙、垫层条件下炸药的爆轰驱动过程,具有重要的工程应用意义。

关于气隙对爆轰驱动过程的影响研究,前期研究<sup>[9-10]</sup>主要关注气隙引入时,可以有效避免进入飞片中的冲击载荷过强造成飞片的层裂问题,并获得较低

的飞片速度,关注的气隙尺度较大( $>10\text{ mm}$ )。对于毫米级间隙,V A Ogorodnikov<sup>[11]</sup>等认为气隙厚度在 $0\sim 10\text{ mm}$ 时,铁飞片最终速度维持不变。刘尔岩<sup>[12]</sup>等数值模拟研究表明,空腔加塑料作用时,会使得飞片熵增的大幅度下降以及炸药对飞片做功能力的增强。近年来,也开展了一些亚毫米气隙、垫层的影响研究,如李涛<sup>[13]</sup>等对比了装配垫层和间隙对爆轰加载金属飞片运动特征的差别,相比于空气间隙区域,泡沫垫层区域金属飞片的速度起跳幅值较高,末速度较低。但是对于亚毫米气隙、垫层影响下钝感炸药爆轰驱动飞层的影响规律和机理还没有较为系统的研究。

因此,本研究利用高精度的光子多普勒激光干涉测试技术,结合亚毫米尺度气隙、垫层的精密爆轰实验设计,获得了亚毫米尺度气隙、垫层对钝感炸药爆轰驱动飞层的影响规律,并结合数值模拟分析得到了亚毫米气隙和垫层对爆轰驱动过程的主要影响机理。

## 2 爆轰驱动飞片实验

为了获得亚毫米尺度气隙、垫层对三氨基三硝基苯(TATB)基炸药爆轰驱动飞片的影响规律,设计了精密的爆轰驱动飞片实验,实验装置示意图见图1,通过

收稿日期:2020-12-24;修回日期:2021-02-25

网络出版日期:2021-04-12

基金项目:挑战计划(TZ2018001)

作者简介:舒俊翔(1992-),男,助理研究员,从事炸药基础爆轰性能研究。e-mail:shujx678@163.com

通信联系人:张旭(1972-),男,研究员,博士,从事爆轰反应动力学研究。e-mail:caepzx@sohu.com

引用本文:舒俊翔,张旭,裴红波,等.亚毫米气隙和垫层对爆轰驱动飞片的影响规律[J].含能材料,2021,29(5):381-388.

SHU Jun-xiang, ZHANG Xu, PEI Hong-bo, et al. Influence of the Submillimeter-sized Gap or Cushion on the Behavior of Flyer Driven by Detonation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(5):381-388.

雷管起爆 XX01 传爆药,传爆药输出压力为 27 GPa, TATB 基主炸药的密度为  $(1.895 \pm 0.005) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,传爆药引爆主炸药的到爆轰距离小于 2 mm。飞片与主炸药之间有两种状态:紧密接触,如图 1a;存在等厚的硅泡沫垫层/气隙,如图 1b。用光子多普勒激光干涉测速技术(PDV)测量飞片自由面不同位置处的粒子速度历程,测试精度优于 1%。共开展两轮实验,第一轮实验采用较小尺寸的主炸药对有无气隙、垫层的差异进行摸底,实验编号 1-1, 1-2;第二轮实验对有无气隙、垫层的差异进行重复验证,并对亚毫米尺度气隙、垫层厚度变化引起的差异进行研究,实验编号 2-1, 2-2, 2-3。PDV 探头对称布置,第一轮实验的测点分别距中心距离 0, 30, 40 mm,第二轮实验的测点分别距中心距离 0, 50, 60, 70 mm,从垫层侧到气隙侧依次编号 1-7 号,测点布置可以同时获取爆轰波正碰(中心处)和滑移加载条件下飞片的自由面速度历程。通过改变飞片与主炸药之间的接触状态共完成了五发实验,具体实验工况见表 1。由于装上垫层后飞片对垫层有一定压缩量,为了保障垫层、气隙厚度尺寸的测量精度,采用游标卡尺对垫层安装前后的总厚度变化进行多次测量,并结合塞尺结果给出平均值。

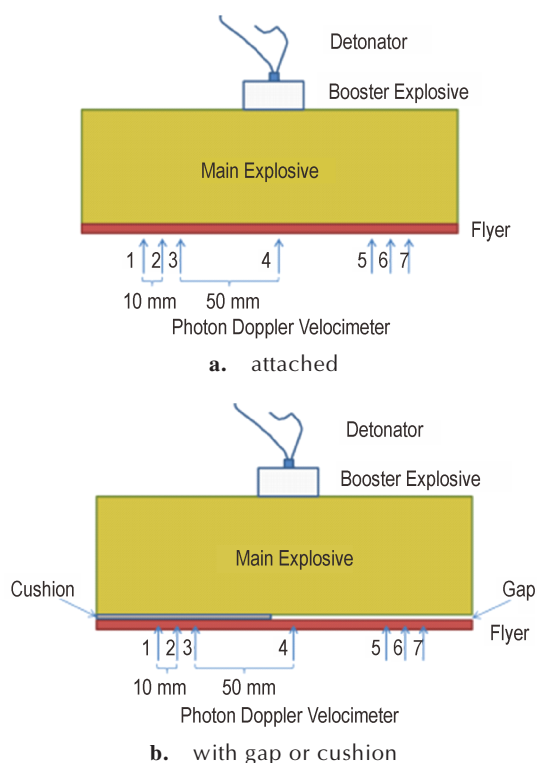


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of the experimental setup

表1 实验工况明细表

Table 1 Detail list of the tests

No.	$D_1$ / mm	$D_2$ / mm	$H$ / mm	$D_3$ / mm
1-1	$\Phi 32 \times 11$	$\Phi 120 \times 80$	0	$\Phi 120 \times 3$
1-2	$\Phi 32 \times 11$	$\Phi 120 \times 80$	0.34	$\Phi 120 \times 3$
2-1	$\Phi 32 \times 11$	$\Phi 200 \times 50$	0	$\Phi 200 \times 3$
2-2	$\Phi 32 \times 11$	$\Phi 200 \times 50$	0.42	$\Phi 200 \times 3$
2-3	$\Phi 32 \times 11$	$\Phi 200 \times 50$	0.78	$\Phi 200 \times 3$

Note:  $D_1$  is size of booster explosive,  $D_2$  is size of main explosive,  $H$  is size of gap or cushion between main explosive and flyer,  $D_3$  is size of flyer.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 飞片自由面速度及位移曲线

实验得到各个测点的粒子速度曲线及积分位移曲线如图 2~图 3。结果显示,各种情况下的速度曲线特征相似,都是起跳后迅速下降且有小波振荡过程,符合形成层裂的特征。本研究重点关注气隙、垫层影响下的爆轰驱动过程,从紧贴状态实验结果(图 2a 与图 3a)来看,对称位置处的速度起跳时刻有微小差异(小于 30 ns),速度历程几乎一致,说明爆轰波对称性较好。平移对称位置速度曲线,使起跳时间重合,仅对比气隙、垫层对飞片运动历程的影响差异。从 0.4 mm 左

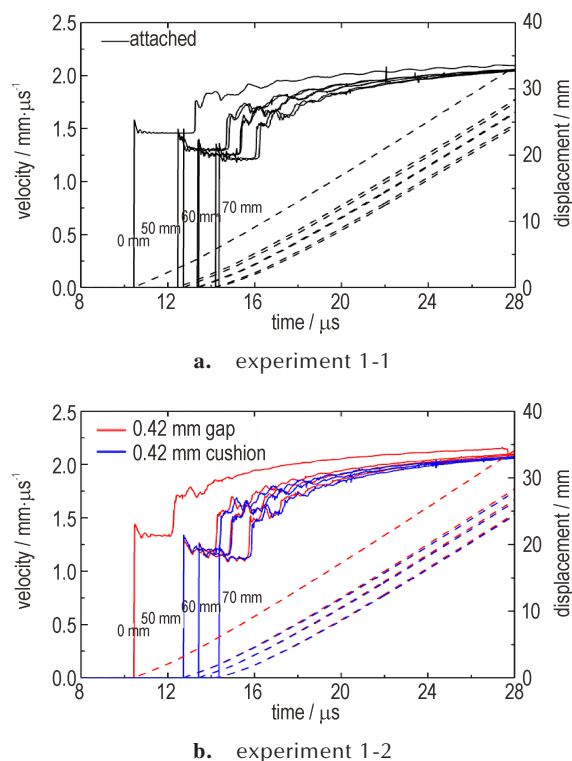


图2 实验 1-1 和 1-2 的自由面速度、位移曲线

Fig.2 Free surface velocity and displacement profiles of tests 1-1 and 1-2

右的气隙/垫层实验结果(图 2b 与图 3b)来看,在同一位置处:相较于气隙影响侧,垫层侧的飞片起跳速度偏高约  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,二次起跳时间间隔较长,最终速度略低(约  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、占最终速度的百分比约为 1%)。0.78 mm 气隙、垫层实验结果的速度差异更为明显(图 3c),相较于气隙影响侧,垫层侧的飞片起跳速度偏高约  $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最终速度偏低约  $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1.4%)。由速度积分得到的位移曲线表明,受点起爆和钝感炸药非理想爆轰传播曲率效应的影响,飞片自由面呈现中部凸起的特征,且受后期速度影响,飞片两侧的形变量不一致,气隙侧的位移略高于对称位置垫层侧的位移。

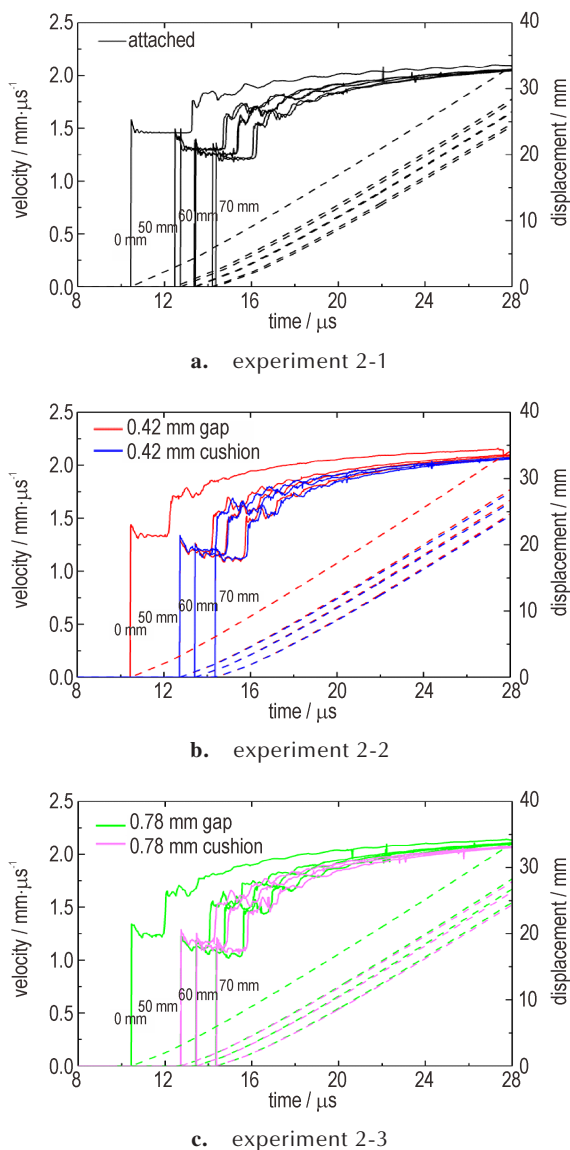


图 3 实验 2-1、2-2、2-3 的自由面速度-位移曲线(紧贴状态,实线表示速度、虚线表示位移)

Fig.3 Free surface velocity and displacement profiles of tests 2-1, 2-2 and 2-3

### 3.2 气隙/垫层对爆轰驱动过程的影响规律对比

滑移爆轰情况下相同/对称位置处气隙、垫层、紧贴三种状态对比如图 4,结果显示:起跳速度和二次起跳时间间隔均为:紧贴>垫层>气隙;而最终速度为:紧贴<垫层<气隙。起跳速度由传入飞片中入射冲击波的强度决定:相对于紧贴状态,冲击波经垫层衰减后强度有所降低,带来起跳速度的降低;而冲击波经空气衰减更为严重,起跳速度更低。最终速度由炸药做功能力及转换为飞片动能的比例决定:在炸药做功能力相同的条件下,相对于气隙区域,垫层材料分走的能量更多,转换为飞片动能的比例更少,末速度更低。

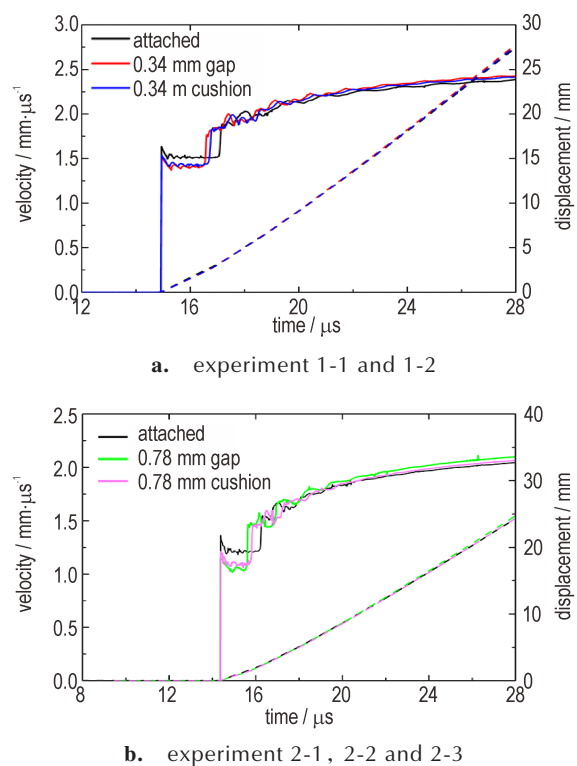


图 4 三种状态对比图

Fig.4 Comparison of velocity and displacement profiles in difficult cases

### 3.3 垫层厚度变化对爆轰驱动过程的影响规律

依据实验 2-1、2-2、2-3 结果,提取同一测点处不同厚度垫层影响下的自由面速度曲线,分析垫层厚度变化对爆轰驱动过程的影响规律,数据处理时平移起跳点至同一位置处以便对比。

滑移爆轰情况下、不同厚度垫层对比结果如图 5,结果显示:有垫层时,飞片的起跳速度和二次起跳时间间隔明显减小,最终速度较紧贴状态略微增加(约  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、1%)。而垫层厚度增加时,起跳速度略微减

小,最终速度无明显变化。

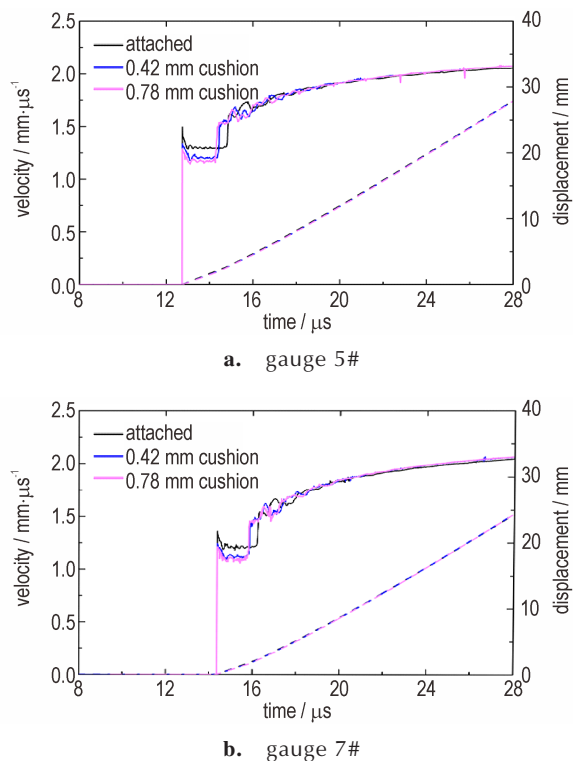


图5 垫层厚度变化对比图

Fig.5 Comparison of velocity and displacement profiles as the cushion size varies

### 3.4 气隙厚度变化对爆轰驱动过程的影响规律

依据实验 2-1、2-2、2-3 结果,提取同一测点处不同厚度气隙影响下的自由面速度曲线,分析气隙厚度变化对爆轰驱动过程的影响规律。中心测点处对比结果如图 6,结果显示:爆轰波与飞片正碰时,气隙越大,飞片的起跳速度越小,粒子速度波剖面更平缓,主体追上层裂片后引起自由面速度二次起跳的时间间隔越短;且有气隙时的飞片最终速度高于紧贴状态,中心测点处 0.42 mm 气隙的飞片终速最高(比紧贴高 50~70  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、2%~3%)。位移曲线显示,在运动初期,紧贴状态的飞片自由面位移较为超前,但是在主体追上层裂片引起自由面速度二次起跳后,有气隙的飞片自由面位移会逐渐超过紧贴状态的飞片自由面位移。

滑移爆轰情况下、不同厚度气隙对比结果如图 7,结果显示:气隙越大,飞片的起跳速度越小,二次起跳时间间隔越短,最终速度反而越高;且随着测点外移(测点 3-2-1),气隙厚度变化带来的差异更大。

### 3.5 气隙厚度变化对爆轰驱动过程影响的数值模拟

首先对空气的影响进行简单的估计:以空气冲击

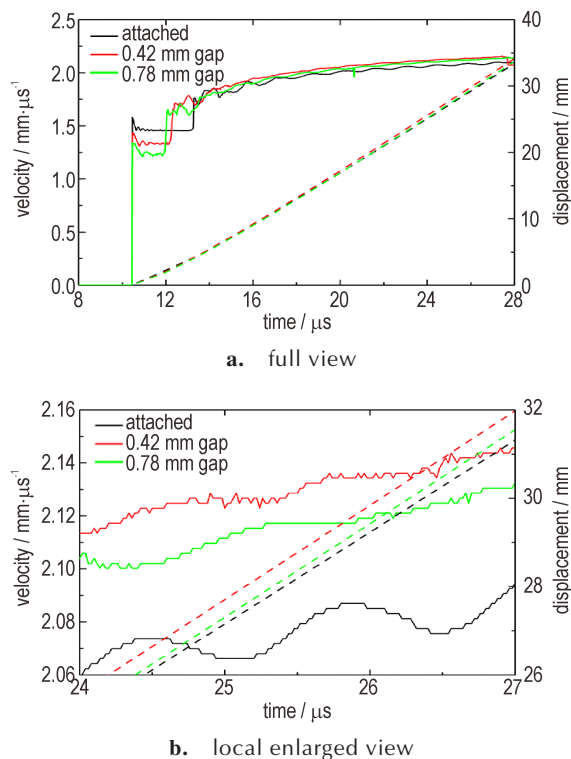


图6 中心测点处气隙厚度变化对比图

Fig.6 Comparison of velocity and displacement profiles for the central gauge as the gap size varies

波速度  $8.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  来算,空气中压力最大不超过 0.1 GPa,假设将飞片与炸药间亚毫米级的空气全部压实,产物单位面积做功不超过  $10^5 \text{ J}$ ,即使将能量全部用于飞片动能的增加,引起最终速度改变量也不超过  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。即将空气作真空处理,几乎不会对飞片运动速度产生影响,因此数值模拟中直接将空气当做真空处理。采用 autodyn 对气隙/真空影响下的爆轰驱动飞片实验进行了数值模拟,轴对称模型如图 8 所示,传爆药采用 PBX-9407 炸药参数模型,主炸药为 PBX-9502 炸药,飞片为无氧铜,起爆方式分别为点起爆和 4 mm 线起爆,测点从中心到边侧编号 1-4,分别距中心 0, 50, 60, 70 mm。模拟中未考虑飞片材料层裂模型,只是对气隙厚度变化时的飞片运动过程进行研究。

模拟结果表明(见图 9),两种起爆条件对飞片的运动速度历程有影响,即使是中心位置处,也会由于线起爆的起爆区域更大,产生更小曲率的爆轰波阵面,带来更高的飞片速度。

计算结果表明两种起爆方式下,气隙厚度变化对飞片起跳速度、最终速度的影响规律与实验结果一致,



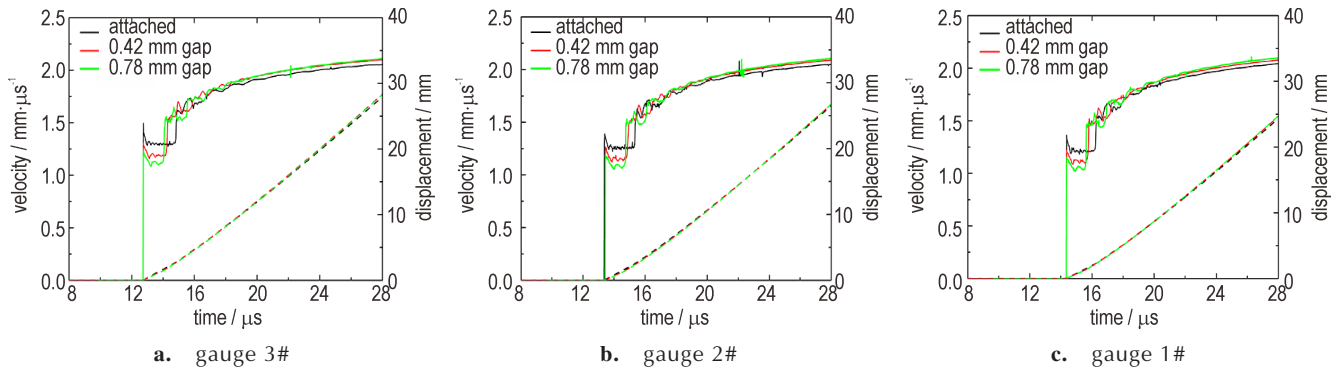


图7 边侧测点气隙厚度变化对比图

Fig.7 Comparison of velocity and displacement profiles for the side gauges as the gap size varies

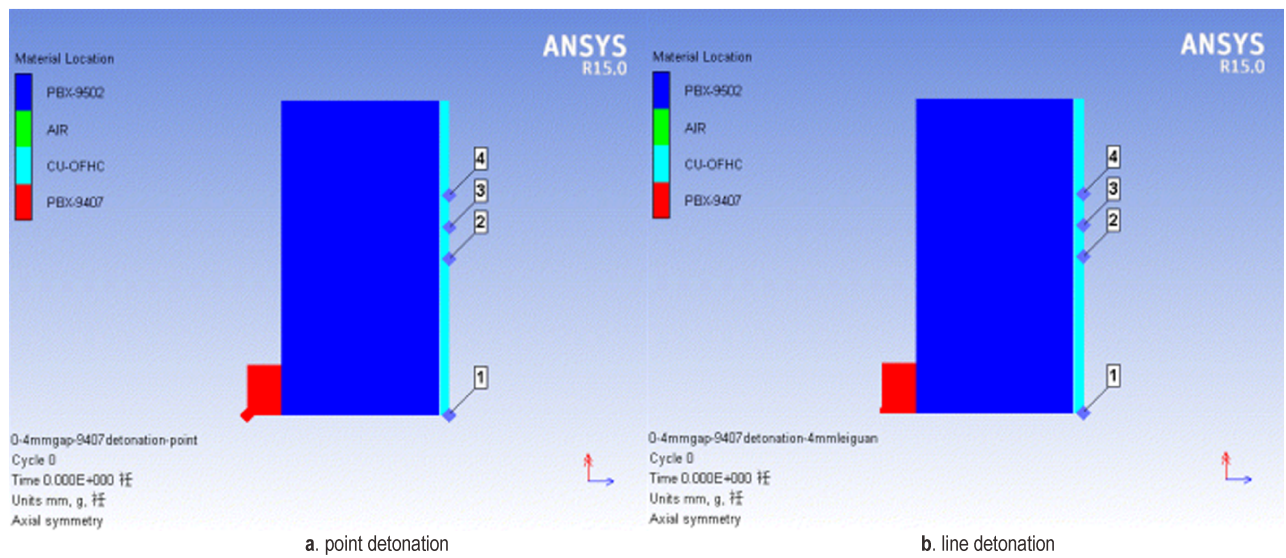


图8 Autodyn 计算建模图

Fig.8 Autodyn simulation model

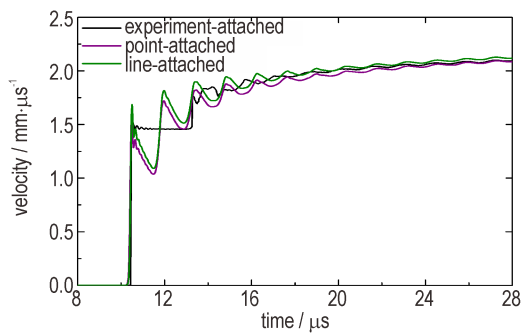


图9 点起爆、线起爆模拟结果与实验对比图

Fig.9 Comparison between experimental and calculated velocity profiles

此处列出为点起爆情况下不同气隙厚度影响下的飞片自由面速度历程曲线,如图10~图11。中心点和边侧位置处,均是气隙厚度越大最终速度越高。但是数值模拟结果显示的最终速度差异(最大  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )较实验

实测值( $50 \sim 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )偏低,主要原因是计算中未考虑层裂模型而忽略了层裂吸能。从实验结果看,气隙厚度越大,飞片自由面速度曲线显示的第一个小波下降更加平缓,层裂吸能更少,转换为飞片动能的比例更高,考虑层裂模型是有助于提高气隙与紧贴状态速度差异的。

垫层对爆轰驱动过程的影响与气隙类似:一方面,垫层位于产物和飞片之间可以起到类似气隙一样的减缓冲击强度的作用,有利于飞片最终速度的提高;另一方面,垫层材料密度较大,垫层运动分走的动能反而会带来飞片最终速度的减少。实际上,垫层对爆轰驱动过程的影响受垫层材料参数影响较大,不同阻抗的材料可能带来不一样的影响规律,由于实验使用的硅泡沫垫层材料无实测的冲击雨贡纽参数,因而未开展相应的数值模拟研究。

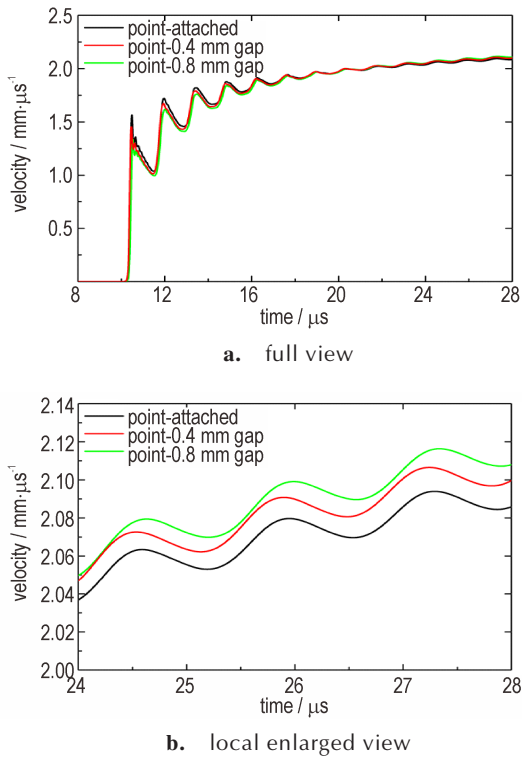


图 10 气隙厚度变化时中心点自由面速度历程计算结果  
 Fig.10 Calculated free surface velocity histories for the central gauge as the gap size varies

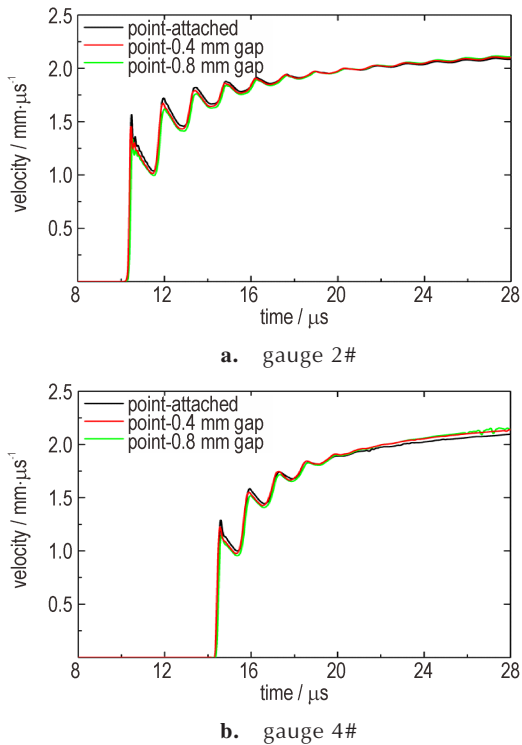


图 11 气隙厚度变化时边侧测点的自由面速度历程计算结果  
 Fig.11 Calculated free surface velocity histories for the side gauges as the gap size varies.

### 3.6 气隙厚度变化对对爆轰驱动过程影响规律的理论分析

本试验结果表明,有气隙时的飞片最终速度反而高于紧贴状态,和文献[11-12]的试验数据及数值模拟结果的规律性不同,主要原因是由于气隙尺寸的不同带来主要影响因素的变化。

首先对一维情况气隙影响下的飞片运动速度历程进行理论分析。考虑真空情况下,产物及飞片的  $p-u$  曲线示意图见图 12,为分析简单,此处忽略冲击波在材料中的衰减和炸药反应区宽度,认为爆轰波阵面后的状态为 CJ 态。炸药与飞片直接接触时,与飞片接触前的爆轰产物初始状态为 CJ 态,与飞片相碰后的状态为以 CJ 点为起始点的冲击雨贡纽线 H1 和飞片材料冲击雨贡纽线 H 的交点 1;而炸药与飞片之间有一定间隙时,与飞片接触前产物初始状态为等熵膨胀线上 CJ 点以后的某一状态 S1,与飞片相碰后状态为以 S1 点为起始点的冲击雨贡纽线 H2 和飞片材料冲击雨贡纽线 H 的交点 2。冲击雨贡纽线及冲击雨贡纽反射线公式如下:

$$P = \rho Du = \rho(C_0 + \lambda u)u \tag{1}$$

$$P = \rho [C_0 + \lambda(2u_i - u)](2u_i - u) \tag{2}$$

式中,  $P$  为压力, GPa;  $\rho$  为密度,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $C_0$  为材料冲击雨贡纽参数,  $\text{mm}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ;  $\lambda$  为材料冲击雨贡纽参数,无量纲;  $D$  为冲击波速度,  $\text{mm}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ;  $u$  为粒子速度,  $\text{mm}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ;  $u_i$  为冲击雨贡纽与反射线交点的粒子速度,  $\text{mm}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。由式(1)、式(2)可知,密度  $\rho$  变小会引起冲击雨贡纽线的曲率  $2\rho\lambda$  变小,由于 S1 点为 CJ 点后经等熵膨胀后的状态,产物密度更低,因此以 S1 点为起始点的冲击雨贡纽线 H2 较以 CJ 点为起始点的冲击雨贡纽线 H1 曲率更低,且由于与材料雨贡纽曲线 H 相距较远, H1 线与 H2 线相交后再分别与 H 线相交,交点状态 2 位于状态 1 下方,再经过自由面反射后的飞片自由面速度  $2'$  低于状态  $1'$ ,即有气隙时的自由面起跳速度更低。而最终速度由飞片自由面以及飞片与产物界面产生的冲击/稀疏波来回反射决定,如紧贴情况下飞片自由面状态  $1'$ ,经自由面与产物界面若干次来回反射后趋近于 H1 线与  $u$  轴交点状态 3,而有气隙情况下最终状态趋近于状态 4,飞片自由面最终速度更高。从能量角度分析,在炸药释能一定的情况下,相对于状态 1,状态 2 的相互作用强度较低,飞片和产物熵增更小,即有气隙时产物经等熵膨胀运动后再与飞片相互作用,系统熵增较少,转换为飞片动能的比例更

多,飞片最终速度更高。

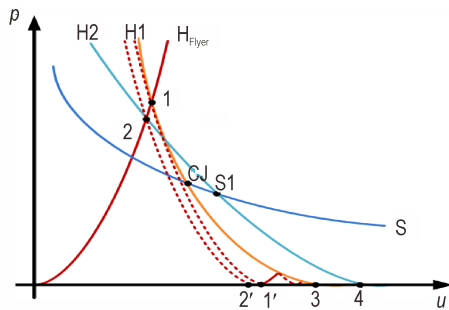


图 12 爆轰驱动过程中  $p-u$  关系示意图

Fig.12 Schematic of the  $p-u$  relation for the detonation driving process

以上为一维平面情况下分析结果,实际上在非一维情况下,中心处的产物及能量会向边侧逸散,且逸散的快慢受出炸药表面的爆轰波阵面形状影响,气隙增大带来逸散效应的增强。由于气隙尺寸大小变化时,气隙对爆轰驱动过程的主要影响机制不同,会带来气隙对爆轰驱动过程的影响规律差异:较大气隙存在时,爆轰产物逸散强烈,为主要影响因素,间隙越大,逸散越强,被产物带走的能量越多,驱动飞片的能量越少,飞片最终速度越低。而亚毫米气隙存在时,逸散不明显,反而是由于产物经过等熵膨胀后再与飞片相互作用,冲击强度降低,使得系统熵增减小,驱动飞片的能量增加,相较于直接接触驱动,飞片最终速度反而有所提高。

## 4 结论

1)开展了亚毫米尺度气隙、垫层的精密爆轰实验,研究了亚毫米尺度气隙、垫层对钝感炸药爆轰驱动的影响规律,结果表明:相较于飞片炸药紧贴状态,有亚毫米硅泡沫垫层时,飞片的起跳速度降低,最终速度反而有所提高(约  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、1%);气隙对飞片运动的影响更大,最终速度提高更多( $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、2%以上),并且在滑移爆轰加载下,亚毫米尺度内气隙厚度的增加会带来最终速度的进一步提高。

2)数值模拟结果显示,起爆方式也会对飞片的起跳速度、最终速度等运动状态产生影响,但是在不同起爆方式下,亚毫米气隙对于爆轰驱动飞片的影响规律一致,即气隙增大均有利于提高飞片的最终速度。

3)理论分析表明,气隙对爆轰驱动过程的主要影响机制包括产物逸散效应和作用强度衰减效应:产物逸散效应是由于产物向边侧逸散,带走了产物能量,使

得飞片动能减少;作用强度衰减效应是由于产物等熵膨胀后再与飞片相互作用,作用强度更低,使得系统的能量耗散、熵增更低,转换为飞片动能更多。在不同的气隙尺度下,主导机制的不同带来了气隙对飞片运动速度历程影响规律的差别。

## 参考文献:

- [1] Taylor G I. Analysis of the explosion of a long cylindrical bomb detonated at one end[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1963: 277-286.
- [2] Chou P C, Carleone J, Hirsch E, et al. Improved formulas for velocity, acceleration, and projection angle of explosively driven liners[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1983, 8: 175-183.
- [3] 郭佑雄, 赵福兴, 周祖荣. 滑移爆轰作用下飞板运动规律的研究-双P-M法[J]. *爆炸与冲击*, 1998, 18(2): 123-130. GUO You-xiong, ZHAO Fu-xing, ZHOU Zu-rong. An approximate method on describing the movement of plate under sliding detonation- twin P-M method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(2): 123-130.
- [4] Singh M, Sunja H R, Bola M S, et al. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates [J]. *Int J Impact Eng*, 2002, 27(9): 939-954.
- [5] 陈军, 孙承伟, 蒲正美, 等. 爆轰波对碰区产物驱动金属圆管的研究[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(5): 442-447. CHEN Jun, SUN Cheng-wei, PU Zheng-mei, et al. Expansion of metallic tubes driven by detonation product behind two head-on colliding detonation waves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 442-447.
- [6] 袁帅, 胡海波, 张崇玉, 等. 应用SPH方法对平板铅飞层对碰凸起动载行为的数值模拟研究[J]. *高压物理学报*, 2010, 24(5): 383-387. YUAN Shuai, HU Hai-bo, ZHANG Chong-yu, et al. Simulation on head-on bulging dynamic behavior of lead flyer with SPH method [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(5): 383-387.
- [7] 赵峰, 孙承伟, 文尚刚, 等. 炸药强爆轰的研究[J]. *高压物理学报*, 2000, 14(1): 47-53. ZHAO Feng, SUN Cheng-wei, WEN Shang-gang, et al. Researches on strong detonation of high explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(1): 47-53.
- [8] 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. WEN Shang-gang, DENG Wen-rong, ZHAO Feng, et al. Analysis of two stages explosive/flyer system [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(4): 343-347.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Ogorodnikov V A. Experimental and numerical investigation of the acceleration of plates by detonation products through a gap [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1981, 17 (1): 133–136.
- [12] 刘尔岩, 王元书. 爆轰驱动的飞片熵增[J]. 计算物理, 1991, 8 (2): 211–215.
- LIU Er-yan, WANG Yuan-shu. The entropic increase of the plate driven by explosive [J]. *Chinese Journal of Computation Physics*, 1991, 8(2): 211–215.
- [13] 李涛, 刘明涛, 王晓燕, 等. 装配垫层与间隙对爆轰加载下金属飞片运动特征的影响 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 044202
- LI Tao, LIU Ming-tao, WANG Xiao-yan, et al. Effects of explosive device with foam cushion and air clearance on kinetic characteristic of steel flyer under detonation loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(4): 044202

## Influence of the Submillimeter-sized Gap or Cushion on the Behavior of Flyer Driven by Detonation

SHU Jun-xiang, ZHANG Xu, PEI Hong-bo, ZHENG Xian-xu, LIU Cang-li

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** To obtain the influence of submillimeter-sized gap or cushion on the behavior of flyer driven by the detonation of a triaminotrinitrobenzene (TATB)-based explosive, the precise detonation tests with submillimeter-sized gap or cushion were designed. The velocity histories of flyer driven by the triaminotrinitrobenzene(TATB)-based explosive and influenced by the submillimeter-sized gap or cushion were recorded by a laser interferometer (photon Doppler velocimeter). The results show that the jump-up velocity of the flyer with the influence of submillimeter-sized cushion is lower than the case of flyer attached to explosive, but the final velocity is higher (around  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  or 1% of the final velocity). While the influence of submillimeter-sized gap is greater than that of submillimeter-sized cushion that, the final velocity is  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (2%) higher than the case of flyer attached to explosive. Simultaneously conducted numerical simulations show that both the point and line initiation conditions do affect the velocity history of the flyer, and the final velocity increases with the influence of submillimeter-sized gap and with either initiation condition. The theory analysis indicates that the introduction of submillimeter-sized gap between flyer and explosive results in weaker interaction between detonation products and flyer for the isentropic expansion of detonation products, and then leads to less entropy increasement of the system, higher energy for driving the flyer, and higher final velocity of the flyer. Additionally, different gap sizes result in different influences as the dominant mechanism varies.

**Key words:** triaminotrinitrobenzene(TATB)-based explosive; detonation; gap; cushion; flyer; drive

**CLC number:** TJ55; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2020329

(责编: 高毅)