

文章编号: 1006-9941(2018)06-0517-07

冲击加载下梯度密度飞片系统产生准等熵压缩过程的实验技术

赵康¹, 张旭², 刘俊明¹, 钟斌², 张蓉²

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621999; 2. 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: 为研究固体炸药准等熵压缩过程, 采用“钉床”形梯度密度飞片, 通过改变飞片尖峰高度并结合火炮加载技术和铝基组合式电磁粒子速度计技术, 测试并捕捉了飞片尖峰撞击缓冲层后缓冲层继而冲击固体炸药时炸药前表面及内部产生的准等熵压缩过程, 用组合式电磁粒子速度计测试了炸药前表面及内部不同深度处的粒子速度, 用冲击波示踪器捕捉了冲击波到达炸药内部各深度处的时刻, 进行了不同尖峰高度的对比实验。结果表明, 2.5 mm 飞片尖峰高度下 JB-9014 靶和聚四氟乙烯 (PTFE) 靶前表面准等熵压缩时间分别为 0.37 μs 和 0.22 μs 。发现靶前表面有完整的准等熵压缩过程, 靶内已经完成准等熵压缩到冲击的过程。冲击波 $x-t$ 图显示靶内冲击波速度前期稳定, 后期衰减。发现当“钉床”(BON) 飞片尖峰高度和缓冲层厚度合理配置时, 才会在靶样品内部产生较宽时间的准等熵压缩过程。

关键词: 准等熵压缩; 梯度密度飞片; 冲击加载装置; 铝基组合式电磁粒子速度计技术; JB-9014 炸药

中图分类号: TJ55; O38

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.06.009

1 引言

固体炸药在冲击加载过程中易发生明显的熵增, 获得高压的同时也伴随着高温。等熵压缩是测量偏离冲击压缩状态 (off-Hugoniot) 的一种实验技术, 与加载速率较高的冲击加载相比, 准等熵压缩下固体炸药内可以产生显著的准等熵压缩过程。准等熵压缩过程熵增较小并且有利于抑制热点的形成, 通过解耦温度建立压力为独立变量的状态方程能够对固体炸药状态方程更全面地描述。

斜波发生器技术^[1] 凭借其易于调控的加载速率、简单的结构和较低的实验成本等优点, 已经成为一种广泛使用的动态加载技术。压力较高时, 利用变阻抗飞片技术或多层组合飞片技术^[2], 当飞片平面撞击靶材料后可以产生几微秒的准等熵压缩过程。变阻抗飞片能在靶内产生平稳攀升的压缩波, 而多层组合飞片则产生一系列多重冲击波, 即阶梯式攀升的压缩波, 两

者虽然攀升效果不同但产生的压缩波都具有准等熵压缩的特点。考虑到金属材料的高阻抗性, 采用金属材料生产的飞片密度梯度较宽并可以获得更高的冲击压力, 但是金属飞片在磁场中会影响电磁粒子速度计的测量结果。铝基组合式电磁粒子速度计技术在炸药靶的测试实验中已经得到了较为普遍的应用, 刘杰^[3] 等通过组合式电磁粒子速度计精确测量 HMX 基高聚物粘结炸药 (PBX) 冲击起爆过程的 Lagrange 粒子速度历史。近些年国外出现一种新的飞片技术, 即“钉床” (‘bed of nails’, BON) 飞片装置^[4]。BON 飞片装置由飞片 (flyer) 和缓冲层 (buffer plate) 组成, 飞片由飞片基 (flyer base) 和飞片尖峰 (flyer spike) 构成, 飞片采用陶瓷光固化技术 (ceramic stereolithography, CSL) 成形。2014 年 Taylor^[5] 等基于气炮平面冲击技术 (gas gun plate impact technique), 采用 BON 飞片撞击 Kel-F 聚合物靶, 通过电磁粒子速度计技术 (electromagnetic particle velocity gauge technique) 在靶样品中成功捕捉到无冲击压缩到冲击波的过程, 在飞片速度为 $536 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 准等熵压缩过程持续约 6 μs 。2015 年 Goff^[6] 等进一步将 BON 飞片技术成功应用到快速成型氧化铝陶瓷 (rapid prototyped alumina ceramic) 聚合物靶, 通过在靶中嵌套粒子速度计捕捉到一维准等熵压缩过程。

综合目前国内外研究现状, BON 飞片在火炮加载

收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2017-12-19

基金项目: 科学挑战专题资助 (TZ2018001); 国防科工局技术基础项目 (JSZL 2015212c001); 国家自然科学基金 (11602248)

作者简介: 赵康 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事炸药状态方程的研究。e-mail: zhaokangchn@hotmail.com

通信联系人: 张旭 (1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体力学研究。e-mail: caepzx@sohu.com

实验装置中实现非炸药靶准等熵压缩过程的实验研究刚刚起步,而对于炸药靶的实验研究缺乏公开的研究成果。为此,本研究采用梯度密度 BON 飞片,通过调控飞片尖峰高度探讨 BON 飞片在火炮加载装置中实现固体炸药准等熵压缩过程的可能性,以期推进 BON 飞片在炸药靶中产生准等熵压缩过程的实验技术研究。

2 实验装置及测试原理

2.1 火炮加载技术

采用火炮加载技术通过控制初始火药量使飞片获得一定的初速度,在飞片撞击缓冲层前通过激光测速技术可以计算飞片撞击前的初速度。铝基组合式电磁粒子速度计技术可以测量靶内不同深度处的粒子速度历史,同时也捕捉到靶和缓冲层交界面粒子速度历史。实验中分别对 JB-9014 炸药靶和聚四氟乙烯 (PTFE) 靶进行测试,研究飞片尖峰高度对 PTFE 靶准等熵压缩过程的影响,同时对比了两种靶对同一飞片装置的响应特征,三发实验的 BON 飞片装置参数如表 1 所示。

表 1 BON 飞片装置参数

| shot No. | 1 [#] | 2 [#] | 3 [#] |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| target material | PTFE | PTFE | JB-9014 |
| flyer base thick | 5 | 5 | 5 |
| flyer spike height | 5 | 2.5 | 2.5 |
| buffer plate thick | 5 | 5 | 5 |

采用文献 [7-8] 的火炮加载技术对 PTFE 和 JB-9014 炸药分别进行一维平面冲击试验。整体实验装置如图 1 所示,主要包括:加载装置、真空靶室、 $\Phi 57$ mm 的 Lexon 弹托、 $\Phi 55$ mm 的 BON 飞片装置、激光测速环、永磁铁(产生 0.14 T 的均匀磁场)、待测靶样品以及铝基组合式电磁粒子速度计和示波器等。

图 1 中已经略去示波器组示意图,固定在弹托上的飞片在炮管内被加速后进入激光测速环,激光测速环最后一根激光束被飞片遮挡后飞片速度示波器会触发同步机,同步机同时触发组合式电磁粒子速度计装置中所有示波器,同步记录靶样品表面及内部各位置处粒子压力历史。通过法拉第电磁感应定律,可以计算靶样品不同深度处的粒子速度历史。

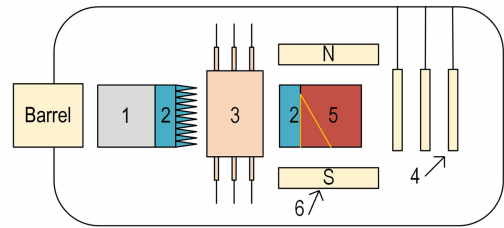


图 1 一维平面冲击实验装置示意图^[7-8]

1—弹托,2—飞片装置,3—测速环,4—靶缓冲层,5—靶样品,6—永磁铁

Fig. 1 Sketch map of one-dimensional plane shock equipment^[7-8]

1—lexon, 2—BON flyer device, 3—vel-measuring ring, 4—target buffer, 5—target sample, 6—permanent magnet

2.2 BON 飞片装置

BON 飞片由中国工程物理研究院流体物理研究所加工制造,考虑到金属材料对磁场的影响,飞片选用 PTFE 材料制成。BON 飞片装置由飞片基、飞片尖峰以及缓冲层三部分组成,如图 2 所示。飞片尖峰高度有 5 mm 和 2.5 mm 两种,飞片基和缓冲层厚度均为 5 mm。由于硅油具有温粘系数小、电绝缘性和疏水性等特点,平面电磁粒子速度计通过硅油固定在缓冲层与靶前表面之间,组合式电磁粒子速度计通过硅油粘结在靶内部 30°楔形面表面。

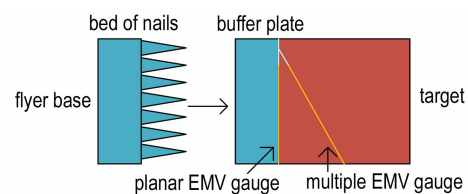


图 2 “钉床”示意图

Fig. 2 Sketch of ‘bed of nails’

BON 飞片固定在弹托上,如图 3 所示,在炮管内弹托与引爆火药之间增加空腔^[9],主要目的在于减弱初始火药的不稳定冲击,在爆炸产物自由膨胀一段时间后加速弹托,可以避免飞片层裂和严重损伤。飞片尖峰穿过测速环后首先撞击缓冲层,各尖峰在撞击缓冲层表面后会产生一系列球面波,球面压缩波点源即各尖峰与缓冲层前表面的撞击点。缓冲层不仅承受着尖峰冲击产生的结构毁伤,而且有利于各球面压缩波干涉后形成稳定的准等熵压缩波包络面,如图 4 所示。



图3 带飞片的弹托

Fig. 3 Lexon fixed with flyer

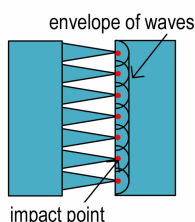


图4 准等熵压缩波包络面

Fig. 4 Envelope of waves on quasi-isentropic compression

2.3 铝基组合式电磁粒子速度计技术

组合式电磁粒子速度计实验装置主要由平面电磁粒子速度计单元和示波器组成。铝基组合式电磁粒子速度计如图5所示,量计整体为一薄片,矩形纹理由铝箔激光刻蚀而成。

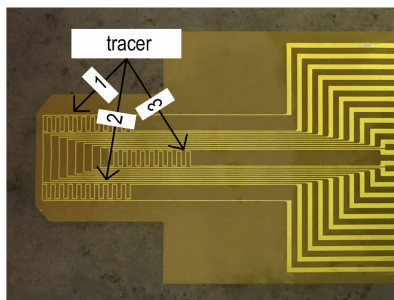


图5 组合式电磁粒子速度计

Fig. 5 Multiple electromagnetic particle velocity gauge

实验中冲击波示踪器包含在组合式电磁粒子速度计薄片,呈锯齿状,沿冲击波方向锯齿间距为0.5 mm,如图5所示。图5中三个锯齿形铝箔纹理即为冲击波示踪器,可以记录冲击波前沿到达靶内不同位置的时刻,分析示踪器波形可以得到与楔形炸药实验相似的 $x-t$ 图。其中1[#]、2[#]示踪器与第一根电磁粒子速度计在同一位置切割磁感线,3[#]示踪器在最后一根电磁粒子速度计后方2 mm处(沿冲击波方向1 mm)。

实验采用2套独立的铝基组合式电磁粒子速度

计,通过硅油分别固定在靶前表面和内部。靶前表面即靶样品与缓冲层交界面处,采用3根粒子速度计来测量靶前表面粒子速度历史。靶内分布11根量计,其中3根锯齿形冲击波示踪器,8根粒子速度量计。靶内组合式电磁粒子速度计薄片与靶前表面夹角为30°,沿冲击波传播方向8根金属丝切割磁感线有效长度由12 mm依次递减至5 mm。第1根速度量计距靶前表面0.5 mm,相邻两根速度量计沿冲击波方向间隔1 mm,第8根量计距离靶前表面7.5 mm。靶样品前表面及内部粒子速度的测量依据为法拉第电磁感应定律,因此粒子速度 u_p 为^[10]:

$$u_p = \frac{E}{BL} \quad (1)$$

式中, B 为均匀磁场强度, T; L 为切割磁感线有效长度, mm; E 为感应电动势, V。

第 i (i 表示采集数据的通道序号) 根电磁粒子速度计所在位置粒子速度为:

$$v_i = \frac{E_i}{BL_i} \left(1 + \frac{R_i - R_0}{R} \right) \quad (2)$$

式中, R_0 为电阻计本底值, Ω ; R_i 为电阻计测量电阻, Ω ; R 为示波器电阻, Ω ; L_i 为磁感线长度, mm; E_i 为示波器显示电动势, V。

采用激光测速技术可以较为精确的测量飞片撞击缓冲层前的速度,激光测速环如图6所示,飞片通过测速环时会依次遮挡每一束激光。飞片每遮挡一束激光,示波器会记录下这束激光的压力下降沿,三次下降沿的时刻分别记为 t_1, t_2, t_3 。如图7中所示,可以取示波器显示电压为1 V时的对应时刻作为下降沿的时刻,下降沿的实际时刻为图7中A点所示位置。相邻激光孔间隔 L_0 为25 mm。考虑到第2、3束激光离靶样品最近,因此所测飞片速度 v_f 更接近飞片撞击靶样品前的速度,飞片速度计算公式如下:

$$v_f = \frac{t_3 - t_2}{L_0} \quad (3)$$

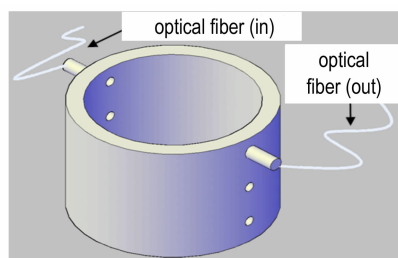


图6 飞片速度测量环^[10]

Fig. 6 Flyer vel-measuring ring^[10]

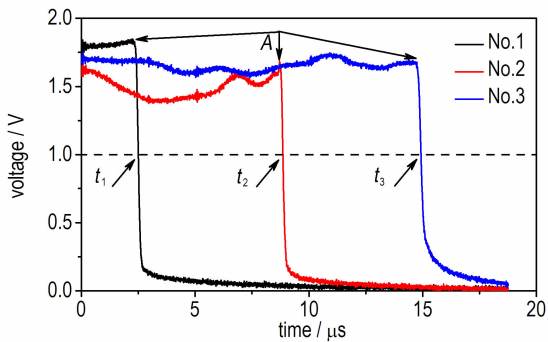


图7 激波压力下降沿

Fig.7 Negative edges of laser pressure

3 实验结果与讨论

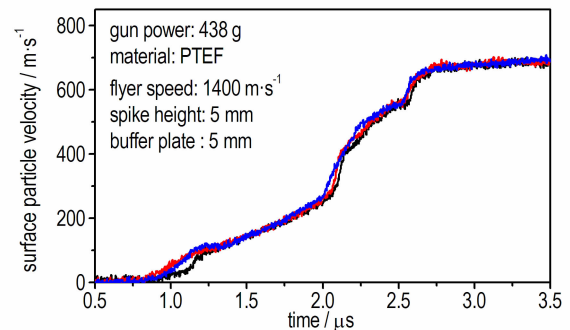
3.1 撞击界面粒子速度

平面组合式电磁粒子速度计首先测试到靶前表面处粒子速度历史,如图8所示为PTEF靶前表面粒子速度历史。火炮加载系统中的引爆火药量控制在435 g附近,能够使飞片获得 $1300 \sim 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的初始冲击速度。由图8a可知,PTEF靶测试实验中飞片尖峰高度为5 mm,靶前表面准等熵压缩过程持续时间约 $1.75 \mu\text{s}$,表面粒子速度攀升至 $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后保持稳定,但压缩过程不够平滑。图8b中,减小飞片尖峰高度到2.5 mm时,准等熵压缩过程持续时间减小至 $0.22 \mu\text{s}$,压缩持续时间剧烈减小,说明准等熵压缩过程对飞片尖峰高度的变化较为敏感。观察波形可以发现,准等熵压缩过程中波形图先下凸,快速上升后上凸。

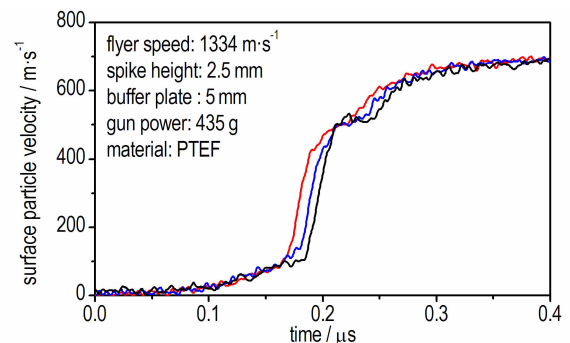
基于PTEF靶的测试结果,为了产生平滑的等熵压缩过程,对JB-9014炸药靶进行冲击加载实验(采用尖峰高度为2.5 mm的飞片),结果如图9,炸药靶前表面的准等熵压缩过程平滑攀升,同一平面三个监测点的波形图重合度较高,表明该表面各点同时受到冲击波的压缩作用。JB-9014炸药靶在2.5 mm尖峰高度下准等熵压缩过程持续时间约为 $0.37 \mu\text{s}$,压缩过程波形图先以下凸的方式较缓攀升,在表面粒子速度达到 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时急剧攀升到 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后波形略上凸,速度缓慢增至约 $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对比图8b、图9可以发现,飞片结构参数相同的条件下,PTEF靶比JB-9014靶的靶前表面准等熵压缩持续时间减少 $0.15 \mu\text{s}$ 并且JB-9014靶中靶前表面准等熵压缩曲线更加光滑,主要原因是材料的声速与粘弹性各不相同。通过波形的对比,可以将BON飞片

产生的准等熵压缩过程概括为三个阶段:开始呈下凸缓慢平滑攀升,中期急剧增加,后期上凸快速攀升。



a. 5 mm



b. 2.5 mm

图8 PTEF靶前表面粒子速度历史

Fig.8 The history of surface particle velocity on PTEF target

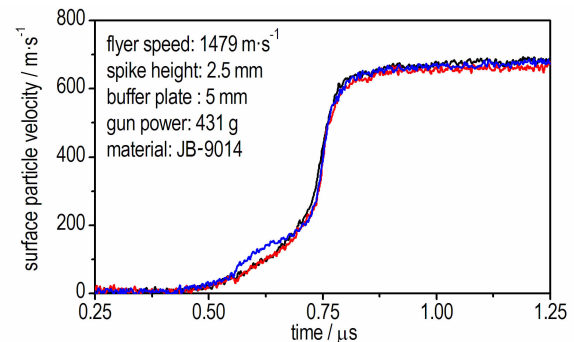


图9 JB-9014靶前表面粒子速度历史

Fig.9 The history of surface particle velocity on JB-9014 target

3.2 靶样品内部粒子速度历史

准等熵压缩波穿过缓冲层传入靶样品内部时,组合式电磁粒子速度计测试到距靶前表面不同距离处的粒子速度。当尖峰高度为5 mm时,PTEF靶内粒子速度如图10a所示,沿冲击波方向距离靶前表面0.5, 1.5 mm处能够观察到明显的准等熵压缩过程,2.5 mm处压缩过程的第一阶段即下凸攀升过程消失,3.5 mm后已经完成了由压缩到冲击的过程。当尖峰高度减小到2.5 mm时,PTEF靶内已经形成冲击

波,未能观察到准等熵压缩过程,如图 10b 所示。

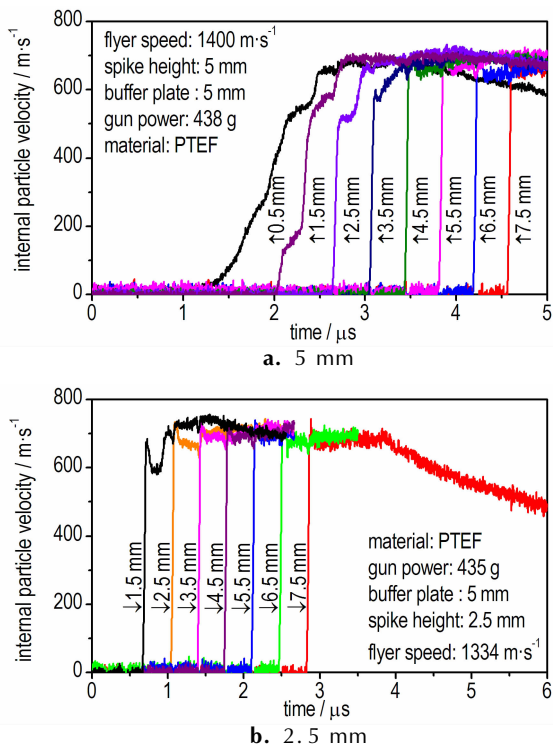


图 10 PTEF 靶内粒子速度历史

Fig. 10 The history of internal particle velocity on PTEF target

JB-9014 炸药靶内粒子速度历史如图 11 所示。由图 11 可知,当飞片尖峰高度为 2.5 mm 时,沿冲击波方向距靶前表面 0.5 mm 处,能够观察到粒子准等熵压缩过程的后两个阶段,之后靶内部已经完成压缩到冲击的过程。三次实验中靶内与表面最终的粒子速度保持在约 $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

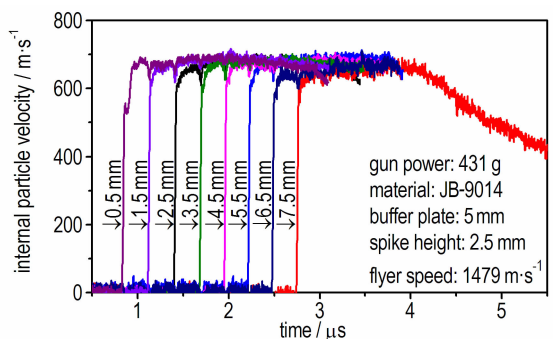


图 11 JB-9014 靶内粒子速度历史

Fig. 11 The history of internal particle velocity on JB-9014 target

当粒子速度为 $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,图 11 中相邻两曲线之间的距离沿冲击波方向均为 1 mm,可以直接测量时间间隔,计算得出冲击波的近似传播速度,图 12

所示中曲线斜率即为冲击波速度。由图 12 可知,飞片尖峰高度为 5 mm 时 PTEF 靶内距前表面 2.5 mm 时形成稳定冲击波,冲击波速度约为 $2568 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;当飞片尖峰高度减小到 2.5 mm 时,PTEF 靶中冲击波速度约为 $2768 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;JB-9014 靶在飞片尖峰高度为 2.5 mm 时的冲击波速度约为 $3662 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;在尖峰高度为 2.5 mm 时 PTEF 靶、JB-9014 靶内均已经形成冲击波。

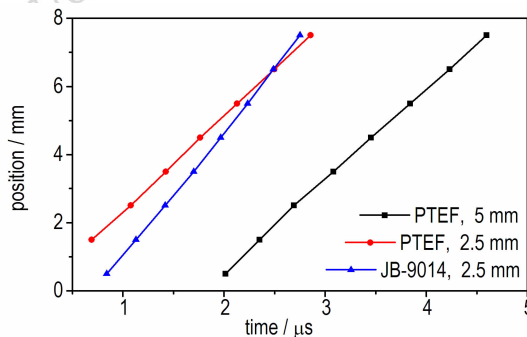


图 12 不同飞片尖峰高度下的冲击波速度

Fig. 12 Shock wave speed under different flyer spike heights

对比以上两种靶的实验结果可以发现,采用火炮加载技术和组合式电磁粒子速度计技术能够实现 BON 飞片的准等熵压缩过程。随着飞片尖峰高度的变化,准等熵压缩过程的持续时间变化较大。此外,在目前的实验系统下,靶前表面粒子准等熵压缩过程波形图呈现下凸、快速上升后上凸的特点。靶内未观察到较好的准等熵压缩过程,主要原因在于飞片尖峰高度的减小。此外,5 mm 的缓冲层相对于 2.5 mm 的尖峰而言,缓冲层厚度过大。准等熵压缩过程被限制在缓冲层后半部分,传入靶样品内时已经完成准等熵压缩到冲击的过程。相同高度的缓冲层和尖峰的组合,能够在靶内产生压缩时间较窄的准等熵压缩过程。因此可以对飞片装置的成型工艺进行优化,减小缓冲层厚度或者增加飞片尖峰的高度从而在靶内捕捉到波形特征明显、持续时间较宽的准等熵压缩过程。

3.3 冲击波示踪器

冲击波示踪器^[11]记录靶内不同位置处冲击波到达的时刻,2[#]、3[#]示踪器的记录结果见图 13。由图 13 可见,2[#]示踪器最先被冲击波扰动,由于在示踪器后半部分的信号采集效果不理想,所以在 2[#]示踪器结束探测冲击波位置前布置了 3[#]示踪器,3[#]示踪器的引入将可探测到的冲击波传播距离增加到 17.5 mm。图 13 中 t_1 表示冲击波到达该位置扰动了该处的铝丝使其

开始切割磁感线, t_2 表示冲击波已经到达沿传播方向 1 mm 处的下一根铝丝位置即将开始冲击铝丝做切割磁感线运动。

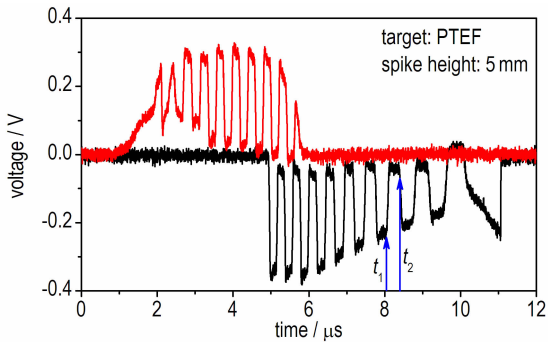


图 13 示踪器波形图

Fig. 13 Oscillogram of tracers

通过提取冲击波到达各位置的时刻, 得到冲击波到达靶内不同位置的 $x-t$ 图, 如图 14 所示。由图 14 可知, 冲击波速度变化趋势并非完全线性, 距靶前表面 12 mm 时 PTEF 靶中冲击波速度变化趋势由线性转变为非线性, 而在 JB-9014 靶内冲击波速度变化趋势由线性转变为非线性的位置为距靶前表面 14 mm 处。冲击波速度后期衰减的原因之一是侧向稀疏波的膨胀使波阵面的强度降低, 进而导致冲击波传播速度下降。当飞片尖峰高度减半时 PTEF 靶内部冲击波 $x-t$ 图平行下移, 曲线曲率变化不明显; 当飞片尖峰高度相同时, PTEF 靶和 JB-9014 靶内冲击波 $x-t$ 图曲率明显不同, 说明不同靶材料中冲击波速度的衰减效应存在差异。

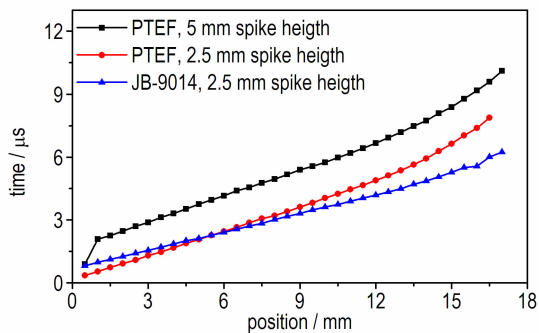


图 14 不同飞片尖峰高度下的冲击波 $x-t$ 图

Fig. 14 Position versus time curves for shock waves under different flyer spike heights

4 结论与展望

(1) BON 飞片装置能够在缓冲层与靶的撞击界面产生明显的准等熵压缩过程。JB-9014 炸药靶在

2.5 mm 尖峰高度下准等熵压缩过程持续时间约为 $0.37 \mu\text{s}$, 压缩过程波形图先以下凸的方式较缓攀升, 在表面粒子速度达到 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时急剧攀升到 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后波形略上凸, 速度缓慢增至约 $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。准等熵压缩过程波形图有三个典型的阶段: 开始下凸缓慢平滑攀升, 中期急剧增加, 后期上凸快速攀升。

(2) 不同材料准等熵压缩时间的差异是由于靶材料的声速和粘弹性不同引起的。当飞片尖峰高度减小到 2.5 mm 时, PTEF 靶和 JB-9014 靶中的冲击波速度分别约为 $2768 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3662 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。靶内并未观察到准等熵压缩过程, 主要原因是飞片尖峰高度不大于缓冲层厚度, 将准等熵压缩区限制在缓冲层内造成的。

(3) 恰当配置飞片尖峰高度和缓冲层厚度能够在靶内产生较宽的准等熵压缩过程, 这也是接下来需要深入研究和开展的工作。此外, 对同型号的炸药进行多次火炮冲击-准等熵压缩实验, 通过不同位置的准等熵压缩曲线可以计算其 $p-V$ 关系, 进而可以求得完全的状态方程。

参考文献:

- [1] 经福谦, 陆景德, 刘仓理. 斜坡发生器的设计准则[J]. 高压物理学报, 1987(1): 7-12.
JIN Fu-qian, LU Jing-de, LIU Cang-li. Design rule of ramp-wave generators[J]. *Journal of High Pressure Physics*, 1987(1): 7-12.
- [2] 沈强, 王传彬, 张联盟, 等. 为实现准等熵压缩的波阻抗梯度飞片的实验研究[J]. 物理学报, 2002(8): 1759-1763.
SHEN Qiang, WANG Chuan-bin, ZHANG Lian-meng, et al. A study on generating quasi-isentropic compression via graded impedance flyer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002(8): 1759-1763.
- [3] 刘杰, 王延飞, 王广军, 等. HMX 基 PBX 粒子速度测量的铝基组合电磁粒子速度计技术[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 300-305.
LIU Jie, WANG Yan-fei, WANG Guang-jun, et al. Al-based electromagnetic particle velocity gauge technique of measuring the particle velocity of HMX-based PBX explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(3): 300-305.
- [4] Winter R, Cotton M, Harris E, et al. A novel graded density impactor [C] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014: 142034.
- [5] Taylor P, Goff M, Hazell P J, et al. Ramp wave generation using graded areal density ceramic flyers and the plate impact technique [C] // 18th APS-SCCM and 24th AIRAPT IOP Publishing; doi: 10.1088/1742-6596/1500/14/142016 *Journal of Physics: Conference Series*. 2014, 500: 142016.
- [6] Goff M, Hazell P J, Appleby-Thomas G J, et al. Gas gun ramp loading of Kel-F 81 targets using a ceramic graded areal density flyer system [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 80: 152-161.
- [7] 王延飞, 刘杰, 张旭, 等. 未反应炸药 JOB-9003 的 JWL 状态方程[J]. 高压物理学报, 2016, 30(5): 387-391.

- WANG Yan-fei, LIU Jie, ZHANG Xu, et al. JWL equation of state of unreacted JOB-9003 explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(5): 387-391.
- [8] ZI Pan-deng, Chen Jun, Zhang Xu, et al. Double shock experiments on PBX explosive JOB-9003 [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42: 784-790.
- [9] 赵锋, 池家春. JOB-9003 炸药的冲击引爆和反应速率研究 [J]. 爆轰波与冲击波, 1992(4): 1-6.
ZHAO Feng, CHI Jia-chun. Reaction rate and shock initiating of JOB-9003 explosive [J]. *Detonation and Shock Waves*, 1992 (4): 1-6.
- [10] 瞿攀登, 陈军, 张旭, 等. 二次压缩条件下 JOB-9003 炸药特性研究 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 155-161.
ZI Pan-deng, CHEN Jun, ZHANG Xu, et al. Characteristics of JOB-9003 in double shocks experiments [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(2): 155-161.
- [11] ZHANG Xu, WANG Yan-fei, HUNG Wen-bin, et al. Reaction buildup of PBX explosives JOB-9003 under different initiation pressures [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 35(2): 197-212.

Experimental Technology of Quasi-isentropic Compression Process Generated by a Graded Areal Density Flyer System Under Impact Loading

ZHAO Kang¹, ZHANG Xu², LIU Jun-ming¹, ZHONG Bin², ZHANG Rong²

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. National Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: To study the quasi-isentropic compression of solid explosive, a graded areal density flyer termed the 'bed of nails' (BON) was used. Through changing the flying spike height combined with gun loading technology and aluminum base multiple electromagnetic particle velocity gauge technique, when the buffer layer after the flyer spike hit the buffer layer then impacted the solid explosive, the quasi-isentropic compression process generated by the front surface and inside of the explosive were tested and captured. The particle velocity at front surface and different depths of explosive inside was measured by Al-based multiple electromagnetic particle velocity gauge. The shock wave tracer was used to capture the time of shock wave reaching each depth of the explosive. The comparative experiments with different peak heights were performed. Results show that the quasi-isentropic compression duration of front surface of target are 0.37 μs for JB-9014 target and 0.22 μs for PTEF target when the flyer spike height is 2.5 mm. The front surface of the target has complete quasi-isentropic compression process and inside the target has completed the process of quasi-isentropic compression to impact. The $x-t$ diagram of shock wave shows that the velocity of shock wave in the target is stable at the early stage, and it attenuates at later stage. When the flyer spike height and the thickness of the buffer layer are properly allocated, the quasi isentropic compression process with a wider time will take place in the target sample.

Key words: quasi-isentropic compression; graded areal density flyer; impact loading device; Al-based multiple electromagnetic particle velocity gauge technique; JB-9014 explosive

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.06.009