文章编号:1000-5773(2013)06-0807-06

爆轰驱动飞片击靶波形精密控制技术*

金　柯,习　锋,谭　叶,刘晓海,戴诚达,蔡灵仓,吴　强

(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　621999)

摘要:以有效装药长度模型为基础,通过沿径向向中心方向逐渐增加低阻抗材料缓冲层厚度的方法,实现了飞片击靶波形的精密控制。实验结果显示,在∅80 mm范围内飞片击靶波形差小于80 ns,一维平面冲击波有效使用范围由原来的∅40 mm提升至∅80 mm,可以布置实验样品的面积提高了约3倍。以此爆轰加载装置为平台,测量了钽的冲击Hugoniot物态方程参数和无氧铜的高压声速数据,实验结果与以往的实验数据吻合得很好,表明该技术可用于材料多物理量联合测量的精密物理实验研究。

关键词:爆轰加载;飞片;击靶波形

中图分类号:O383;O521.3　　**文献标识码**:A

1　引　言

表征高温高压条件下凝聚态物质压力(p)-体积(V)-温度(T)关系的多相物态方程和精密相图研究,是凝聚态物理领域的基础问题,具有重要的科学意义和明确的应用背景。构建多相物态方程理论模型的基础是高精度的实验数据,要求必须在p-V-T空间开展宽区物态方程、相变特性和精密相图等精密物理实验研究。以爆轰加载、气体炮加载和激光加载为平台开展的冲击压缩实验是上述实验研究的重要组成部分,大都是通过高速运动的飞片撞击样品,在样品内部产生强间断冲击波阵面,实现对样品的冲击压缩。在实际应用中,还必须满足两个基本要求:第一是样品内部产生的冲击压力应连续可调,第二是冲击压缩过程应满足一维应变条件[1]。影响冲击压缩是否满足一维应变条件的主要因素是飞片击靶波形差(冲击波阵面到达某一特定位置的时间差),在很大程度上决定了样品内冲击波阵面的弯曲和倾斜程度。由于爆轰加载技术具有飞片击靶波形平面性好、样品测试布局范围大等优点,在冲击压缩实验研究中得到了广泛应用。

国内学者对爆轰加载技术进行了长期的、系统的实验[2-3]和理论[4-6]研究,获得了大量的实验数据以及系列化爆轰加载装置。然而,就爆轰加载技术而言,与国外还有较大差距。Partouche-Sebban等基于∅300 mm平面波透镜,实现了∅180 mm范围内9～11块样品布局[7],测试内容涵盖了冲击Hugoniot、off-Hugoniot、高压声速、温度、表面发射率和粒子速度剖面,单发冲击压缩实验的信息获取量非常大,效费比非常高。因此,深入开展爆轰驱动飞片击靶波形精密控制技术的研究,并建立具有较大一维平面冲击波有效使用范围的爆轰加载平台,可以为持续开展凝聚介质多相物态方程、高压声速、温度和冲击相变等实验研究提供坚实的技术基础。

2　实验物理设计

在一维条件下(即不考虑边侧稀疏波的影响),飞片在空腔中的飞行距离x及运动速度u_f随时间的

* **收稿日期**:2012-02-17;**修回日期**:2012-05-09

基金项目:国防基础科研计划(B1520110001);中国工程物理研究院科学技术发展基金(2010A0101001)

作者简介:金　柯(1976—),男,博士,副研究员,主要从事物态方程和动态加载技术研究. E-mail:jinke_102@caep.cn

变化可以根据以下公式进行简单估算[1]

$$x = Dt\left(1+\frac{\theta-1}{\eta\theta}\right) \tag{1}$$

$$u_f = D\left(1+\frac{\theta-1}{\eta\theta}-\frac{L_B\theta}{Dt}\right) \tag{2}$$

$$\theta = \left[1+2\eta\left(1-\frac{L_B}{Dt}\right)\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$\eta = \frac{16}{27}\frac{m_B}{M} = \frac{16\rho_{0B}L_B}{27\rho_{0F}\delta} \tag{4}$$

式中:D 为爆轰波速度,L_B 为有效装药长度,m_B 为炸药质量,M 为飞片质量,δ 为飞片厚度,ρ_{0B} 为炸药密度,ρ_{0F} 为飞片密度,t 为时间,η、θ 均为中间变量。

由(1)式～(4)式可以看出,飞片速度与爆轰波速度、有效装药长度、炸药质量以及飞片质量相关。在不考虑边侧稀疏波的影响时,飞片各点的运动速度完全一样,运动的位移也完全一样,撞击样品后产生的冲击波阵面是理想的平面波。然而,在实际应用中,边侧稀疏波对爆轰产物流场的影响是不可避免的,由此造成沿飞片径向单位宽度内、相同飞片质量对应的有效装药长度不同。因而,从飞片中心向边缘看,飞片速度存在一定的梯度分布,单位时间内,飞片各点飞行的距离是不同的,飞片必然发生弯曲。此即经福谦等提出的有效装药长度模型。

根据有效装药长度模型和(1)式～(4)式,实现扩大一维平面冲击波有效使用范围的技术途径主要有两种:第一种方法是将主药柱设计成具有一定弧度的结构,沿飞片径向实现有效装药长度的均一化,以此达到沿飞片径向单位宽度内飞片接受的爆轰驱动能量基本相同的目的;第二种方法是根据沿飞片径向单位宽度内飞片运动速度与单位宽度内的质量相关,通过沿飞片径向向中心方向逐步增加低阻抗材料缓冲层厚度的方法,可以在有效装药长度不同的情况下,实现飞片飞行速度一致的目的。可以看出,第一种方法必须加工异形炸药部件,其设计、制造、验证成本较高,且需要专业技术人员和专用加工场所。第二种方法仅需要对低阻抗缓冲层材料进行车削加工,且整个曲面的加工精度很高,有利于实现飞片击靶波形的精密控制。本研究采用第二种方法开展爆轰驱动飞片击靶波形精密控制技术的物理设计和实验研究。

张柱等[8]将飞片设计为锥形,利用炸药直接驱动飞片,通过数值模拟飞片的动力学运动过程,确定了飞片和炸药的几何尺寸,并进行了实验验证。需要说明的是,张柱等的 3 发实验测量的∅100 mm 范围内飞片击靶波形差分别为 1 240、1 200 和 660 ns。结合同时监测的飞片速度,飞片几何弯曲分别为 2.26、1.77和 1.07 mm。此外,3 发实验测量的飞片速度存在约 20%的差异,他认为主要原因是炸药铸造过程中局部存在的气泡对爆轰波的影响。考虑到张柱使用的飞片厚度为 13 mm,飞片飞行过程很可能发生了层裂现象,如果同时测量飞片的自由面速度剖面,即可加以甄别。我们采用的飞片设计原理与张柱等的方法相似,就飞片击靶波形的质量而言,研究结果为∅80 mm 范围内小于 80 ns,满足精密物理实验一维应变条件。

3 实验研究

3.1 实验装置和探针布局

实验装置由雷管、∅200 mm 平面波透镜、JO-9159 炸药药柱、变厚度铝缓冲层(2A12)、黄铜飞片(H62)和无氧铜靶板(TU1)组成,结构示意图如图 1 所示。用于监测飞片击靶波形的 45 根同轴电探针布局如图 2 所示。

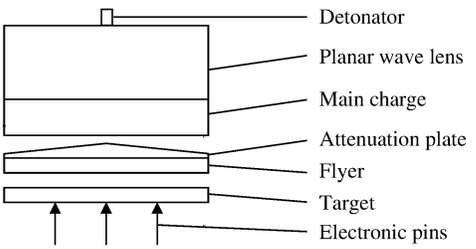


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

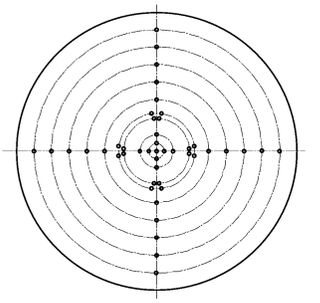


图 2 飞片击靶波形监测探针布局

Fig. 2 Layout of electronic-charged pins for measuring the shock wave front

3.2 飞片击靶波形调试实验结果与讨论

按照上述思路,共进行了 4 发飞片击靶波形调试实验,通过对实验结果的详细分析,逐步调整了变厚度铝缓冲层的锥面角度,掌握了飞片击靶波形精密控制技术。

EOS1006-01 实验是第一发飞片击靶波形调试实验,使用的变厚度铝缓冲层的锥面角度为 2.3°,由于变厚度铝缓冲层中心厚度较大,导致飞片中心部位运动速度过慢,飞片击靶波形中心部位相应地出现滞后现象,∅80 mm 范围内飞片击靶波形极差约 525 ns,但旋转对称性较好。飞片击靶波形未受爆轰产物侧向稀疏影响的范围为∅80 mm,表明采用该技术可以实现扩大一维平面冲击波有效使用范围的目的。根据 EOS1006-01 的实验结果,对变厚度铝缓冲层的曲面进行了重新设计,锥面角度由2.3°调整为 1.2°,并进行了 EOS1012-01 实验。实验结果表明,变厚度铝缓冲层曲面调整后,飞片击靶波形中心滞后现象明显改善,∅80 mm 范围内飞片击靶波形差约 175 ns,且旋转对称性非常好,∅50 mm 范围内两条相互垂直的径向波形基本重合,飞片整体倾斜约 0.02°。飞片击靶波形未受爆轰产物侧向稀疏影响的范围没有明显变化,如图 3 所示。

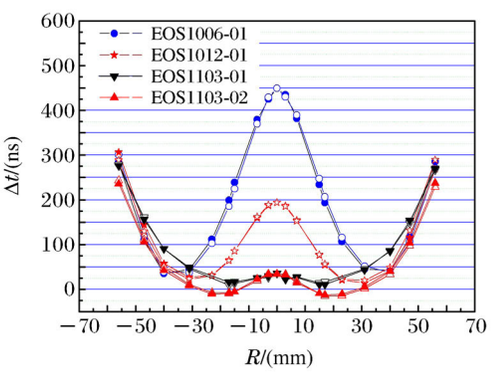


图 3 飞片击靶波形监测结果

Fig. 3 Experimental results of shock wave front

由于 EOS1012-01 实验的飞片击靶波形中心仍然滞后,飞片击靶波形差约 175 ns,因此进一步优化了变厚度铝缓冲层的曲面,并进行了两发飞片击靶波形调试实验,即 EOS1103-01 和 EOS1103-02 实验,变厚度铝缓冲层的锥面角度降低为 0.35°。EOS1103-02 实验的爆轰加载系统增加了∅200 mm×30 mm 的 JO-9159 炸药药柱,以获得更高的飞片速度,并在样品中产生更高的冲击压力,其它技术状态均与 EOS1012-01 实验相同,实验结果如图 3 所示。可以看出,飞片击靶波形未受爆轰产物侧向稀疏影响的范围基本保持为∅80 mm,扩大了一维平面冲击波有效的使用范围。同 EOS1012-01 实验结果相比,通过进一步减小变厚度铝缓冲层的锥面角度,飞片中心部位击靶波形滞后现象得到了明显改善,在∅80 mm 范围内,EOS1103-01 和 EOS1103-02 实验的飞片击靶波形差分别为 80 和 63 ns。考虑到冲击压缩实验样品的直径一般小于 20 mm,可以实现 7 样品布局,即在∅30 mm~∅70 mm 的环带内布置 6 块样品,在中心部位∅25 mm 范围内布置 1 块样品,与样品布置范围相对应的飞片击靶波形差分别小于 35 和 25 ns。如果使用∅20 mm 和∅16 mm 的样品,可以在∅80 mm 范围内实现 12 样品布局,有助于实现同一初始冲击压缩条件下多物理量联合测量的精密物理实验研究。

4 初步应用

本研究发展的爆轰驱动飞片击靶波形精密控制技术极大地扩展了冲击压缩实验的样品布局范围，将此技术初步应用于材料冲击 Hugoniot 数据和高压声速测量实验研究中，获得了高精度的实验数据。

4.1 冲击 Hugoniot 数据测量

材料冲击 Hugoniot 参数的测量是物态方程实验研究的基本内容。采用 EOS1103-01 和 EOS1103-02 确定的实验装置参数，基于阻抗匹配原理[1]，以无氧铜为标准材料，进行了 2 发钽冲击 Hugoniot 数据测量实验。实验结果表明，无氧铜和钽的冲击波速度相对扩展不确定度均小于 1%，在钽中产生的冲击压力分别是 86.5 和 97.5 GPa。由于飞片击靶波形有了明显改善，钽的 Hugoniot 物态方程数据与以往实验数据[9-10]非常吻合，如图 4 所示；同时也表明，在爆轰驱动过程中变厚度铝缓冲层与黄铜飞片没有发生脱离，可以确保在实验测量时间内，样品中为单一冲击波。

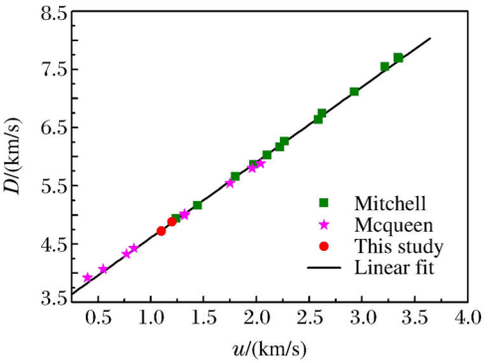


图 4 钽的冲击波速度-粒子速度实验结果

Fig. 4 Shock wave velocity versus particle velocity of tantalum

4.2 高压声速测量

高压声速是压力的一阶偏导量，当材料发生固－固相变或冲击熔化时，声速-冲击压力曲线会发生拐折，因而精确测定材料沿 Hugoniot 线的声速-压力关系，可以确定材料的相变压力。此外，体波声速实验数据是 Grüneisen 系数的有力约束条件。因而，材料高压声速实验测量[11]一直是冲击波物理的基本研究内容。受飞片击靶波形范围的限制，在采用轻气炮加载技术结合台阶法[12]测量材料高压声速时，样品台阶一般只有 3 个，导致通过线性拟合计算追赶比的精度较差，最终会影响高压声速的实验精度。采用本研究改进的实验技术，可以实现在∅80 mm 范围内布置 7 块样品，有助于提高材料高压声速的测量精度。

基于爆轰驱动飞片击靶波形精密控制技术和对称碰撞台阶法，测量了无氧铜的高压声速，得到了 60～100 GPa 冲击压力范围内无氧铜的高精度高压声速数据，与 Hayes 等[13]的实验数据和 Zhou 等[14]的拟合结果吻合很好，如图 5 所示。在实验中，还同时监测了∅30 mm～∅80 mm 环带内的飞片击靶波形(由于飞片击靶中心区域设置了 1 块样品，∅30 mm 范围内未进行飞片击靶波形监测)，如图 6 所示。可以看出，在样品布置范围内 (∅30 mm～∅70 mm 环带)，EOS1110-01 和 EOS1110-04 实验的飞片击靶波形差分别为 32 和 22 ns。

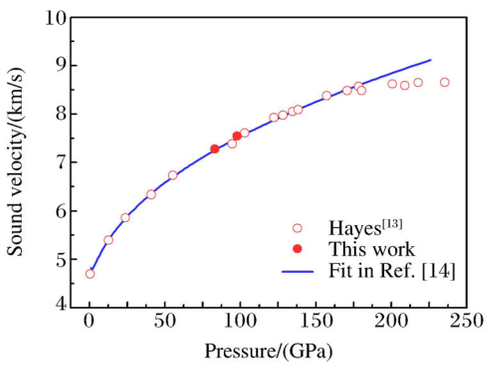


图 5 无氧铜高压声速实验结果

Fig. 5 Measured sound velocity results of copper

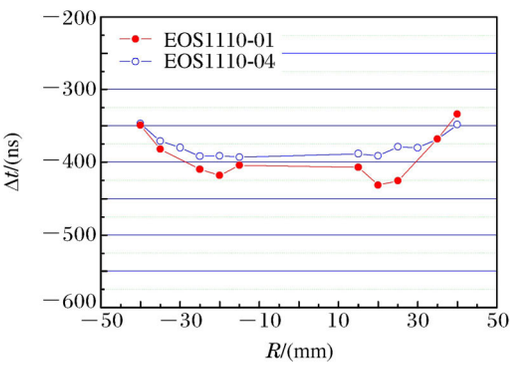


图 6 高压声速实验飞片击靶波形监测结果

Fig. 6 Detected shock wave front results in sound-velocity experiments

5　结　论

爆轰驱动飞片击靶波形精密控制技术极大地扩展了冲击压缩实验的样品布局范围,研究结果显示,∅80 mm 范围内飞片击靶波形差小于 100 ns,一维平面冲击波有效使用范围由原来的∅40 mm 提升至∅80 mm,可用于布置实验样品的面积提高了 3 倍,在同一冲击压缩实验中可以实现 7～12 块样品布局。在此基础上,开展了材料冲击 Hugoniot 数据和高压声速测量实验研究,获得了高精度的钽冲击 Huginiot 物态方程数据和无氧铜高压声速数据,为今后持续开展材料多相物态方程、高压声速、冲击温度和相变特性等实验研究奠定了技术基础。

References:

[1] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1999: 125-169. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 2 版. 北京:科学出版社,1999:125-169.

[2] Jin K, Xi F, Yang M S, et al. Design of serialization explosive loading device [J]. Energetic Materials, 2003, 11(3): 113-115. (in Chinese)
金　柯,习　锋,杨慕松,等. 化爆加载装置系列化设计 [J]. 含能材料,2003,11(3):113-115.

[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] Jin K, Li P, Wu Q, 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. (in Chinese)
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.

[5] Wen S G, Deng W R, Zhao F, et al. Analysis of two stage 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.

[6] Luan G B, Hao L, Zhang Z. Numerical study on the acceleration of metallic flyers driven by planar detonation wave of explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(5): 451-456. (in Chinese)
栾广博,郝　莉,张　柱. 平面爆轰波驱动金属飞片运动的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报,2011,25(5):451-456.

[7] Partouche-Sebban D, Pelissier J L, Abeyta F G, et al. Measurement of the shock-heated melt curve of lead using pyrometry and reflectometry [J]. J Appl Phys, 2005, 97(4): 043521.

[8] Zhang Z, Luan G B, Ning J G. Flatness study on the metallic flyer driven by explosive loading assembly [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(3): 221-226. (in Chinese)
张　柱,栾广博,宁建国. 爆炸载荷作用下锥形飞片的平面度研究 [J]. 高压物理学报,2011,25(3):221-226.

[9] Mitchell A C, Nellis W J. Shock compression of aluminum, copper and tantalum [J]. J Appl Phys, 1981, 52(5): 3363-3374.

[10] McQueen R G, Marsh S P, Taylor J W, et al. High-Velocity Impact Phenomena [M]. New York: Academic Press, 1970.

[11] Hu J B, Dai C D, Yu Y Y, et al. Sound elocity measurements of tantalum under shock compression in the 11-110 GPa rang [J]. J Appl Phys, 2012, 111(3): 033511.

[12] McQueen R G, Hopson J W, Fritz J N. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures [J]. J Appl Phys, 1982, 53(2): 245-250.

[13] Hayes D, Hixson R S, McQueen R G. High pressure elastic properties, solid-liquid phase boundary and liquid equation of state from release wave measurements in shock-loading copper [C]//Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter-1999. New York: AIP, 2000: 483-488.

[14] Zhou X M, Liu X, Li J B, et al. Shock-induced decomposition of a high density glass (ZF6) [J]. J Appl Phys, 2011, 110(1): 013507.

Precise Control Technique for Flatness of Flyer under Explosive Loading

JIN Ke, XI Feng, TAN Ye, LIU Xiao-Hai,
DAI Cheng-Da, CAI Ling-Cang, WU Qiang

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

Abstract: Based on the effective charge length model, the flyer flatness under explosive loading is improved by increasing the thickness of the attenuation plate gradually along radial orientation. The experimental results show that the difference of shock wave front arrival time is less than 80 ns within a range of ∅80 mm. The area, which is suitable for setting multiple samples in shock compression experiments, is enlarged by about four times than before. Measurements on shock Hugoniot data of tantalum and sound velocities of copper were performed by using the developed explosive loading technique. The obtained experimental data are all in excellent agreement with previously published results, showing that the new explosive loading technique can be used for multi-physics parameter measurements in shock compression experiments.

Key words: explosive loading; flyer; shock wave front