DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0491-06

# 适用于自洽强度方法的冲击加载-再加载实验技术*

俞宇颖[1,2],谭 叶[1,2],谭 华[1,2],戴诚达[1,2],彭建祥[1,2],李雪梅[1,2],吴 强[1,2],王 翔[1,2]
(1.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;
2.中国工程物理研究院压缩科学研究中心,四川 绵阳 621999)

**摘要**:针对自洽强度方法存在的冲击加载-再加载的难题,提出了一种采用较高硬度材料为支撑制作组合飞片的简便方法。利用该方法获得了铝、锡和锆基金属玻璃较理想的冲击加载-再加载粒子速度剖面,验证了该方法的有效性。由本文获得的冲击加载-再加载粒子速度剖面,并根据自洽方法,计算得到了铝、锡和锆基金属玻璃再加载过程剪应力变化数据。进一步分析表明,在本文涉及的压力范围内,仅由冲击加载-卸载实验得到的铝、锡和锆基金属玻璃屈服强度将比实际结果降低 20%~50%。因此,在采用自洽方法计算高压强度时,冲击加载-再加载数据不可或缺。

**关键词**:固体力学;高压强度;冲击加载-再加载;自洽方法;组合飞片
**中图分类号**:O347;O521.2 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

高压下材料屈服强度特性是当前爆炸力学、冲击动力学、高压物理和材料科学等学科领域重点关注的基础问题,研究成果在装甲防护、航空航天器防护等方面有重要的应用价值。自 20 世纪 60 年代以来,先后发展了静水压线比较法[1]、压剪方法[2]、横向应力计方法[3]和自洽方法[4](也称为双屈服面方法或 AC 方法)等高压强度研究方法。静水压线比较法受状态方程精度影响,在高压下精度并不高。压剪方法和横向应力计方法分别受到加载技术和测试技术的限制,往往局限于 20 GPa 以内。自洽方法原则上没有压力限制,但需要进行一组冲击加载-卸载实验和冲击加载-再加载实验才能获取一个强度数据。其中冲击加载-再加载实验相对复杂,需要采用由高、低阻抗材料构成的组合飞片进行冲击才能实现。由于组合飞片在气炮驱动的过程中容易发生分离,导致在待测材料中形成冲击加载-卸载-再冲击加载,而非预期的冲击加载-再加载,也就无法获得强度数据。在现有的高压强度研究方法中,自洽方法是目前应用最广泛的一种方法,提供了包括金属材料(如铝及合金[4-10]、铜[6]、钒[11]、钨[12-14]、钽[15]、铍[16]、钢[17-18]等)、陶瓷材料($B_4C$[19]、SiC[20])、金属玻璃($Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$)[21]和复合材料[22]等大量材料的高压强度数据。但正如前面所指出的,由于冲击加载-再加载实验难度大,目前自洽方法提供的高压强度数据大部分仅来自冲击加载-卸载实验,这类强度数据实际上并不完备。

针对上述自洽方法的问题,胡建波等[9-10]通过采用平面焊接技术加强组合飞片之间的结合力来避免其分离。为了简化波系作用,利于数据处理分析,组合飞片的第一层通常为待测样品材料。胡建波等[9-10]利用由此制作的 TC4/LY12 铝组合飞片成功地加速到 3.2 km/s,并对 LY12 铝样品进行了对称碰撞,获得了 34 GPa 压力下(指第一次冲击压力,下同)LY12 铝的冲击加载-再加载粒子速度剖面。在此之前,铝的冲击加载-再加载实验的最高压力仅为 22 GPa[5]。类似地,M. D. Furnish 等[18]则采用爆炸焊接技术制作了 Ta/2169 钢组合飞片。该飞片被成功地加速到 2.0 km/s,并由此获得了 48 GPa 压力下 2169 钢的冲击加载-再加载粒子速度剖面。上述焊接技术的应用极大提升了冲击加载-再加载实验能力,拓展了自洽方法的实验压力范围。然而,上述焊接技术比较复杂,更重要的是焊接处理时会经历高温、高压作用过程,可能改变组合飞片中的待测样品材料初始状态,从而对高压强度结果造成影响。值得注意的是,大量的轻气炮实验数据表明:在轻气炮驱动飞片加速过程中,飞片会发生如弓形或马鞍

* **收稿日期**:2014-11-28;**修回日期**:2015-05-27
**基金项目**:国家自然科学基金项目(10972206,11172281)
**第一作者**:俞宇颖(1976— ),男,博士,副研究员,yuyinyu@caep.cn。

形等复杂的弯曲变形,而且不同材料飞片的变形量及形状也不同[23-24]。事实上,上述因素极易造成组合飞片在气炮驱动的过程中发生分离。

基于上述分析,本文中提出一种实现冲击加载-再加载实验的简便方法—采用较高硬度材料为支撑,通过环氧树脂与待测样品粘接制成组合飞片,由此减小气炮加载下飞片的弯曲变形来避免分离,并通过铝、锡和锆基金属玻璃的冲击实验验证该方法的有效性。在此基础上,获得铝、锡和锆基金属玻璃再加载过程剪应力的变化情况,并初步分析其对强度结果的影响。

## 1 实验方法

实验采用如图 1 所示的反向碰撞方式,即由组合飞片直接撞击透明的单晶 LiF 窗口。组合飞片的第一层为待测材料(即样品),其后为用于支撑样品的具有较高硬度的材料,两层飞片之间采用环氧树脂进行粘接,环氧树脂厚度约 10 μm。上述组合飞片的制作过程均在常温、常压下进行,不会改变组合飞片中的待测样品材料初始状态。LiF 窗口尺寸为∅28 mm×12 mm,碰撞面镀有 1 μm 厚的铝膜作为光学测试的反射面,同时为保护长历时测量过程中铝膜不受破坏,铝膜前粘接了 8 μm 铜箔。一种激光干涉测速技术—DISAR(displacement interferometer system for any reflector)技术[25]用于测量样品/LiF 窗口界面粒子速度剖面,通过剖面可以直观判断样品中是否经历预期的冲击加载-再加载过程。组合飞片冲击 LiF 窗口的速度由磁测速技术进行测量。根据实测的飞片速度以及样品和窗口材料的 Hugoniot 参数,采用阻抗匹配法可以计算得到样品的冲击压力和冲击波速度,结合图 1 所示的波系作用可以进一步计算得到再加载弹塑性波的声速 $c_L$。

组合飞片中支撑材料除具有较高硬度外,其阻抗应高于样品材料的阻抗,以实现对样品的冲击加载-再加载。当然,为确保再加载过程出现弹塑性特征信息,再加载压力幅度不能过高,以避免形成冲击波。根据上述条件,针对 LY12 铝样品采用了 TC4 钛合(成分为 Ti90-Al6-V4)作为支撑材料,锡和锆基金属玻璃($Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$,详细参数参见文献[26])则采用 45 钢作为支撑材料。

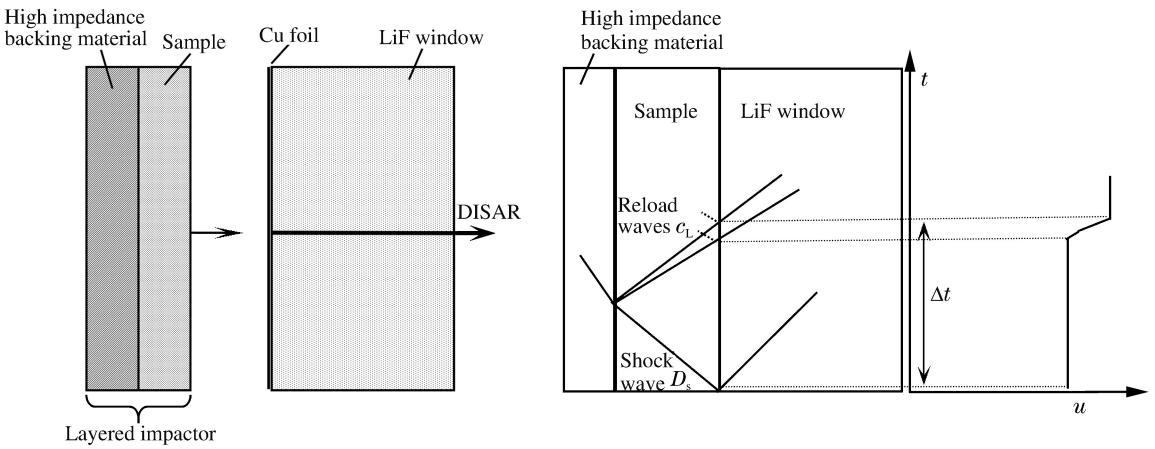


图 1 实验装置及波系作用示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental setup and wave interactions

## 2 实验结果与初步分析

利用图 1 所示的实验装置,在∅30 mm 二级轻气炮上进行了 5 发铝、锡和锆基金属玻璃为样品的冲击加载-再加载实验,冲击速度范围为 2.49～4.39 km/s,在样品中产生的压力范围为 28～48 GPa,样品和支撑材料的直径均为 28 mm,详细实验参数见表 1,表中 $H_s$ 为样品厚度,$h_s$ 为支撑材料厚度,$D$ 为冲击波速度,$p$ 为冲击压力,$\tau_H$ 和 $\tau_c$ 分别为 Hugoniot 状态剪应力和临界剪应力。为了尽量减小气炮加载下组合飞片的弯曲变形,支撑材料总厚度不小于 3 mm。尤其是在最高冲击速度为 4.39 km/s 的实验中(实验 2),除 2 mm 厚的 TC4 外另增加了 3 mm 厚的钽作为支撑材料。

**表 1 平板冲击实验条件及结果**

**Table 1 Experimental conditions and results for planar plate-impact experiments**

| 实验编号 | 样品材料 | $H_s$/mm | 支撑材料 | $h_s$/mm | $D_s$/(km·s$^{-1}$) | $p$/GPa | $(\tau_c-\tau_H)$/GPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LY12 铝 | 1.445 | TC4 | 3.01 | 3.67 | 38.3 | 0.73 |
| 2 | LY12 铝 | 1.465 | Ta/TC4 | 3.05/2.09 | 4.39 | 48.5 | 0.77 |
| 3 | 锡 | 2.013 | 45 钢 | 4.50 | 2.49 | 28.7 | 0.07 |
| 4 | 锡 | 2.015 | 45 钢 | 4.50 | 3.08 | 38.1 | 0.16 |
| 5 | 锆基金属玻璃 | 3.135 | 45 钢 | 4.50 | 3.00 | 39.1 | 0.53 |

由 DISAR 测得的铝、锡和锆基金属玻璃为样品的冲击加载-再加载粒子速度剖面如图 2～4 所示。从图中可以看到，5 发实验均获得了预期的冲击加载-再加载波剖面，这表明采用较高硬度材料为支撑以减小组合飞片弯曲变形来避免分离的方法是简便、有效的。此外，铝、锡和锆基金属玻璃为样品的再加载波剖面均出现一定程度的弹塑性波剖面特征，表明相对应支撑材料的阻抗选取是合适的。图中 $u_{w,H}$ 和 $u_{w,1}$ 分别为再加载弹性波和塑性波起始对应的粒子速度。

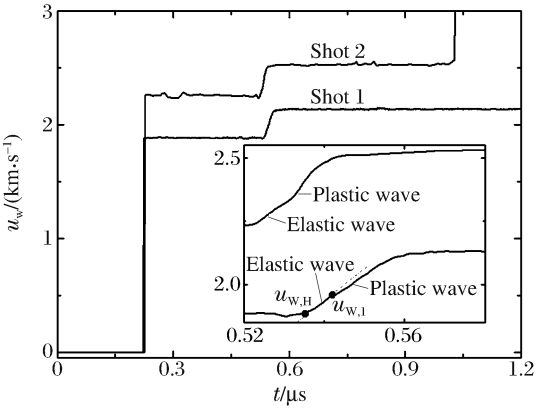


图 2 LY12 铝样品/窗口界面粒子速度剖面

Fig. 2 Particle velocity profiles measured at LY12 aluminum sample/window interface

根据图 1 所示的波传播特性，由图 2～4 的粒子速度剖面可以计算得到沿着再加载过程的拉格朗日纵波声速：

$$c_L = \frac{H_s}{\Delta t - H_s/D_s} \tag{1}$$

式中：$D_s$ 为碰撞时样品中产生的冲击波的速度（由实测的飞片速度以及样品和窗口材料的 Hugoniot 参数，通过阻抗匹配法计算得到冲击波速度），$\Delta t$ 为如图 1 所示的来自样品/支撑材料界面的再加载波到达样品/窗口界面时间与碰撞时间之差。

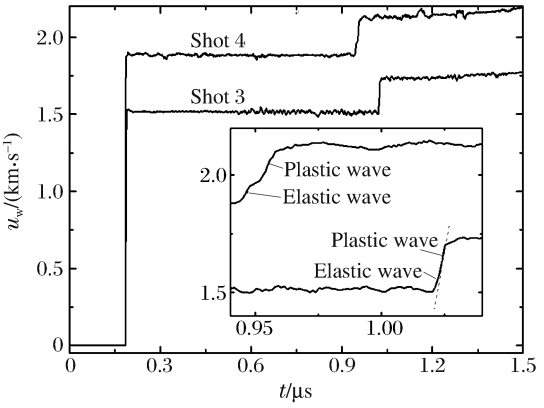


图 3 锡样品/窗口界面粒子速度剖面

Fig. 3 Particle velocity profiles measured at Sn sample/window interface

图 5 给出了 LY12 铝再加载过程拉格朗日纵波声速随粒子速度 $u$ 变化的典型结果（实验 1）。其中，粒子速度 $u$ 由样品/窗口界面粒子速度 $u_w$ 结合增量型阻抗匹配法[12,27]计算得到，由此得到的粒子速度计及了加载波在样品/窗口界面反射造成的影响。$u_H$ 和 $u_1$ 分别为 Hugoniot 状态对应的粒子速度和再加载进入塑性屈服时对应的粒子速度，由图 2 对应的 $u_{w,H}$ 和 $u_{w,1}$ 根据增量型阻抗匹配法计算得到。图 5 中同时给出了由 LY12 铝冲击加载-卸载粒子速度剖面计算得到的卸载过程拉格朗日纵波声速的结果[28]。从图中可以看到，再加载过程也呈现与卸载过程相同的准弹性行为特征，即弹、塑性波速为光滑过渡，而没有发生突降。如图中虚线所示，将卸载过程塑性段声速线性外延可得到再加载过程的拉格朗日体波声速 $c_b$。

在获得纵波和体波的基础上，根据 J. R. Asay 等[4]提出的自洽强度方法，对再加载过程的声速进行如下计算可得到剪应力的变化：

$$\tau_c-\tau_H=\frac{3}{4}\rho_0\int_{u_H}^{u_1}\frac{c_L^2-c_b^2}{c_L}\mathrm{d}u \qquad (2)$$

式中：$u_H$和$u_1$分别为图 5 所示的 Hugoniot 状态对应的粒子速度和再加载进入塑性屈服时对应的粒子速度，$\rho_0$为材料的初始密度，$c_L$和$c_b$分别为图 5 所示的再加载过程对应的拉格朗日纵波和体波声速。由此计算得到的 LY12 铝的$\tau_c-\tau_H$结果见表 1。结合胡建波等[29]和俞宇颖等[21]分别给出的锡和锆基金属玻璃卸载过程声速数据，采用上述相同方法计算得到了锡和锆基金属玻璃再加载过程的$\tau_c-\tau_H$，计算结果见表 1。

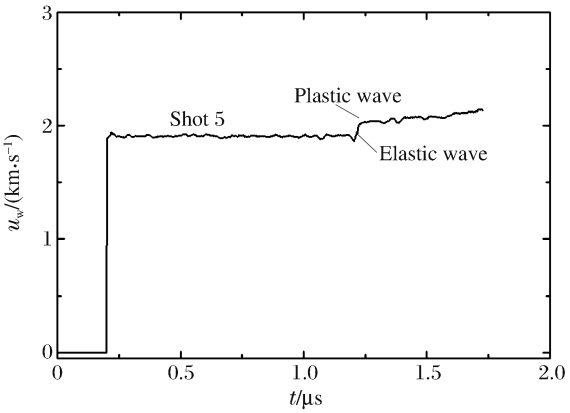


图 4 锆基金属玻璃样品/窗口界面粒子速度剖面

Fig. 4 Particle velocity profile measured at Zr-based bulk metallic glass sample/window interface

在获得$\tau_c-\tau_H$的基础上，如能获得相同冲击压力下卸载过程的声速则可计算得到$\tau_c+\tau_H$，进而可以确定在该冲击压力下材料的屈服强度$Y=(\tau_c-\tau_H)+(\tau_c+\tau_H)$。由于冲击加载-再加载实验的困难，先前大量文献中将屈服强度$Y\approx\tau_c+\tau_H$，即认为再加载过程的$\tau_c-\tau_H$可以忽略。就 LY12 铝而言，本文再加载实验得到的 38.3 和 48.5 GPa 冲击压力下的$\tau_c-\tau_H$分别为 0.73 和 0.77 GPa；胡建波等[10]通过卸载实验得到的 32.2 和 54.7 GPa 冲击压力下的$\tau_c+\tau_H$分别为 0.85 和 1.05 GPa。显然，在上述压力范围内仅由冲击加载-卸载实验得到的 LY12 铝强度$Y\approx\tau_c+\tau_H$将比实际结果$Y=2\tau_c$降低约 45%。对于锡，本文再加载实验得到的 28.7 和 38.1 GPa 冲击压力下的$\tau_c-\tau_H$分别为 0.08 和 0.19 GPa；依据胡建波等[29]的卸载实验剖面数据计算得到的 28.3 和 39.2 GPa 冲击压力下的$\tau_c+\tau_H$分别为 0.07 和 0.17 GPa。仅由冲击加载-卸载实验得到的锡强度$Y\approx\tau_c+\tau_H$将比实际结果$Y=2\tau_c$降低约 50%。同样地，就锆基金属玻璃而言，本文再加载实验得到的 39.1 GPa 冲击压力下的$\tau_c-\tau_H$为 0.53 GPa，俞宇颖等[21]通过卸载实验得到的 37.3 GPa 冲击压力下的$\tau_c+\tau_H$为 1.73 GPa，仅由冲击加载-卸载实验得到的强度$Y\approx\tau_c+\tau_H$将比实际结果$Y=2\tau_c$降低约 20%。综上所述，在采用自洽方法计算高压强度时冲击加载-再加载数据不可或缺。

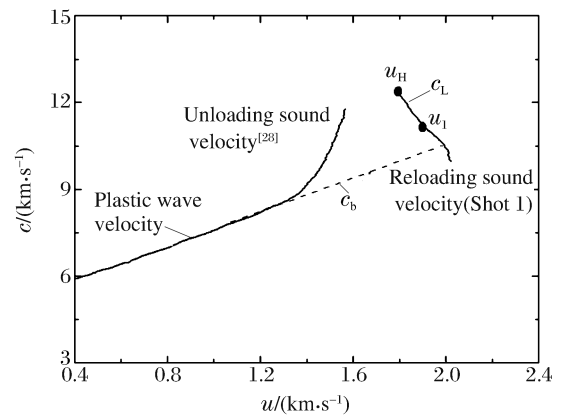


图 5 LY12 铝从冲击压缩态再加载和卸载过程的拉格朗日纵波和体波声速随粒子速度的变化

Fig. 5 Longitudinal and bulk Lagrangian wave speeds during reloading and unloading from shocked state of LY12 aluminum

## 3 结 论

针对自洽高压强度方法存在的因组合飞片分离而难以实现冲击加载-再加载的难题，提出了一种简便方法—采用较高硬度材料为支撑，通过环氧树脂与待测样品粘接制成组合飞片，由此减小气炮加载下飞片的弯曲变形来避免分离。采用该方法，在二级轻气炮上进行了冲击速度 2.49～4.39 km/s、冲击压力 28～48 GPa 范围内铝、锡和锆基金属玻璃为样品的验证实验，5 发实验均获得了较理想的冲击加载-再加载粒子速度剖面，表明了该方法的有效性。由本文获得的冲击加载-再加载粒子速度剖面，根据自洽方法计算得到了铝、锡和锆基金属玻璃再加载过程剪应力变化数据。结合已有的冲击加载-卸载过程

剪应力变化数据的分析表明，在本文涉及的压力范围内，仅由冲击加载-卸载实验得到的铝、锡和锆基金属玻璃屈服强度将比实际结果降低约 20%～50%。因此，在采用自洽方法计算高压强度时冲击加载-再加载数据不可或缺。

## 参考文献：


[1] Fowles G R. Shock wave compression of hardened and annealed 2024 aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 1961,32(8):1475-1487.

[2] Clifton R J, Klopp R W. Pressure-shear plate impact testing[M]// Metals Handbook: Mechanical Testing. OH: American Society for Metals, 1985:230-239.

[3] Rosenberg Z, Partom Y, Yaziv D. The use of in-material stress gauges for estimating the dynamic yield strength of shock-loaded solids[J]. Journal of Applied Physics, 1984,56(1):143-146.

[4] Asay J R, Chhabildas L C. Determination of the shear strength of shock compressed 6061-T6 aluminum[C]// Meyers M M, Murr L E. Shock Waves and High-strain-rate Phenomena in Metals: Concepts and Application. New York: Plenum Publishing Corp., 1981:417-431.

[5] Asay J R, Chhabildas L C, Kerley G I, et al. High pressure strength of shocked aluminum[M]// Gupta Y M. Shock Waves in Condensed Matter. New York: Plenum Press,1986:145-149.

[6] Morris C E, Fritz J N, Holian B L. Quasi-elastic high pressure waves in 2024 Al and copper[C]// Nellis W J. Shock Waves in Condensed Matter. AIP, 1982:382-386.

[7] Huang H, AsayJ R. Compressive strength measurements in aluminum for shock compression of the stress range of 4－22 GPa[J]. Journal of Applied Physics, 2005,98(3):033524.

[8] Huang H, Asay J R. Reshock and release response of aluminum single crystal[J]. Journal of Applied Physics, 2007,101(6):063550.

[9] 胡建波，戴诚达，俞宇颖，等. 双屈服面法测量金属材料动高压屈服强度的若干改进[J]. 爆炸与冲击，2006,26(6):516-521.
Hu Jianbo, Dai Chengdai, Yu Yuying, et al. Some improvements of the self-consistent method for measuring the dynamic yield strength of ductile metals[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(6):516-521.

[10] 胡建波，谭华，俞宇颖，等. 铝的动态屈服强度测量及再加载弹性前驱波的形成机理分析[J]. 物理学报，2008,57(1):405- 410.
Hu Jianbo, Tan Hua, Yu Yuying, et al. Measurements of dynamic yield strength of aluminum alloy and mechanism analysis of elastic precursor during reloading[J]. Acta Physica Sinica, 2008,57(1):405- 410.

[11] Chhabildas L C, Hills C R. Dynamic shock studies of vanadium[C]// Murr L E. Metallurgical Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena. New York: Marcel Dekker, 1985:429-448.

[12] Asay J R, Chhabildas L C, Danderkar D P. Shear strength of shock-loaded polycrystalline tungsten[J]. Journal of Applied Physics, 1980,51(9):4774-4783.

[13] 华劲松. 高温高压下钨合金的本构方程研究[D]. 北京：中国工程物理研究院北京研究生部，1999:1-118.

[14] 张江跃，谭华，虞吉林. 双屈服法测定 93W 合金的屈服强度[J]. 高压物理学报，1997,11(4):254-259.
Zhang Jiangyue, Tan Hua, Yu Jilin. Determination of the yield strength of 93W alloys by using AC techniques [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997,11(4):254-259.

[15] Chhabildas L C, Barker L M, Asay J R, et al. Relationship of fragment size to normalized spall strength for materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990,10(1):107-124.

[16] Chhabildas L C, Wise J L, Asay J R. Reshock and release behavior of beryllium[C]// Nellis W J. Shock Waves in Condensed Matter. AIP, 1982:422-426.

[17] Duffy T S, Ahrens T J. Dynamic compression of an Fe-Cr-Ni alloy to 80 GPa[J]. Journal of Applied Physics, 1997,82(9):4259-4269.

[18] Furnish M D, Alexander C S, Brown J L, et al. 2169 steel waveform measurements for equation of state and strength determination[J]. Journal of Applied Physics, 2014,115(3):033511.

[19] Vogler T J, Reinhart W D, Chhabildas L C. Dynamic behavior of boron carbide[J]. Journal of Applied Physics,

2004,95(8):4173-4183.

[20] Vogler T J, Reinhart W D, Chhabildas L C, et al. Hugoniot and strength behavior of silicon carbide[J]. Journal of Applied Physics, 2006,99(2):023512.

[21] 俞宇颖,习锋,戴诚达,等.动高压加载下锆基金属玻璃强度测量[J].爆炸与冲击,2014,34(1):1-5.
Yu Yuying, Xi Feng, Dai Chengdai, et al. Measurement of strength in a Zr-based bulk metallic glass under dynamic high-pressure loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(1):1-5.

[22] Yuan F P, Tsai L, Prakash V, et al. Dynamic shear strength of S2 glass fiber reinforced polymer composites under shock compression[J]. Journal of Applied Physics, 2008,103(10),103537.

[23] 王翔.金属材料状态方程精密实验测量技术研究[D].北京:中国工程物理研究院北京研究生部,2004:1-94.

[24] Mitchell A C, Nellis W J. Shock compression of aluminum, copper and tantalum[J]. Journal of Applied Physics, 1981,52(5):3363-3374.

[25] Weng Jidong, Tan Hua, Wang Xiang, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution[J]. Appled Physics Letters, 2006,89(11):111101.

[26] 俞宇颖,习锋,戴诚达,等.冲击加载下 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ 金属玻璃的塑性行为[J].物理学报,2012,61(19):382-387.
Yu Yuying, Xi Feng, Dai Chengda, et al. Plastic behavior of $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$ metallic glass under planar shock loading[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(19):382-387.

[27] 谭华.实验冲击波物理导引[M].北京:国防工业出版社,2007:163-167.

[28] Yu Yuying, Tan Hua, Hu Jianbo, et al. Determination of effective shear modulus of shock-compressed LY12 Al from particle velocity profile measurements[J]. Journal of Applied Physics, 2008,103(10):103529.

[29] Hu Jianbo, Zhou Xianming, Dai Chengda, et al. Shock-induced bct-bcc transition and melting of tin identified by sound velocity measurements[J]. Journal of Applied Physics, 2008,104(8):083520.

# A shock-reload wave technique for dynamic strength study of materials at high pressure by self-consistent method

Yu Yuying[1,2], Tan Ye[1,2], Tan Hua[1,2], Dai Chengda[1,2], Peng Jianxiang[1,2], Li Xuemei[1,2], Wu Qiang[1,2], Wang Xiang[1,2]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
2. *Center for Compression Science, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

**Abstract**: A convenient method for fabricating a layered impactor with a sample backed up by high hardness materials was developed to overcome the obstacle of the shock-reload experiments in the self-consistent yield strength technique. This method was validated by a series of ideal shock-reload particle velocities of aluminum, tin, and Zr-based bulk metallic glass obtained from the reverse-impact experiments at the peak shock stresses from 28 GPa to 48 GPa. The sum of the shear stresses for these materials in the reload process from the shocked state was estimated, and compared with the previously reported data in the release process. It is shown that the yield strength under a high pressure for the materials investigated will underestimate 20%—50% if without the reload data. Thus, shock-reload experiments are essential for the self-consistent yield strength method.

**Key words**: solid mechanics; high-pressure yield strength; shock-reload wave technique; self-consistent method; layered impactor

(责任编辑 张凌云)