文章编号:1000-5773(2010)03-0187-05

三级炮加载技术在超高压状态方程研究中的应用*

王青松,王 翔,戴诚达,柏劲松,谭 华,胡建波

(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国防科技重点实验室,四川绵阳 621900)

摘要:根据阻抗梯度飞片设计原则和超高速数值模拟技术设计出一种新的叠层波阻抗梯度飞片,并利用三级炮加载技术将 Ta 飞片加速至 9 km/s 以上,测量了 Ta 在超高压下的状态方程。三级炮实验实现了冲击波速度与粒子速度的同时测量,Ta 的 Hugoniot 数据与文献中发表的数据具有很好的线性关系,说明三级炮加载技术适合于材料超高压状态方程研究。

关键词:阻抗梯度飞片;三级炮;状态方程

中图分类号:O521.3 **文献标识码**:A

1 引 言

在天体物理、地球物理、固体物理、核武器以及惯性约束聚变等研究中,常常需要精确了解极端压力(太帕)条件下物质的动态响应特性和状态方程,而常规的动态加载技术,如化爆、轻气炮等一般只能够将飞片发射至 8 km/s 以下的速度,在重材料中实现的压力也不过数百万大气压,远不能满足上述研究的要求。为获得更高的压力,近年来人们发展了一些动态超高压加载技术,如磁压缩、激光驱动、多级爆轰等[1-3]。其中,利用成熟的二级轻气炮加载技术将一种波阻抗沿其厚度方向按一定规律连续或准连续变化的多层组合飞片(阻抗梯度飞片)驱动至高速后撞击均质飞片(二级飞片),将其发射至更高的速度,从而实现超高压力,这种实验技术也被称为三级炮加载技术[4]。由于实验所需设备简单、费用低,而且在测试精度、数据可信度等方面具有较为明显的优势,因而此实验技术是核禁试后开展极端高压物理研究的重要手段之一。

美国在 20 世纪 80 年代末期就已经在二级轻气炮进行了大量的三级炮加载技术探索工作。经过 Chhabildas 等人将近 10 年的系统研究,Sandia 国家实验室的超高速发射技术,尤其是非会聚型超高速发射技术,已初步进入实用阶段,如:Chhabildas[5] 等利用三级炮加载技术将 TC4 飞片发射至 10 km/s 以上的速度,用于 TC4 状态方程测量。不过其实验技术有许多不足:(1) 实验采用的二级飞片阻抗比较低,即使将其发射至 10 km/s 以上的超高速,在待测材料中实现的压力非常有限,无法用于超高压状态方程研究;(2) 实验无法实现冲击波速度与二级飞片速度的同时测量,其二级飞片速度是通过数值模拟技术与其它实验结果比对给出,这种处理方法大大降低了实验结果的可信度;(3) 其 Hugoniot 数据与传统的加载方式测量的数据相比,线性关系比较差,说明实验结果精度较差。近年来,我们也开展了三级炮加载技术的研究工作,并取得了较大的进展。本研究利用三级炮超高速发射技术将高阻抗 Ta 飞片发射至近 10 km/s,并用于 Ta 超高压状态方程的研究。

* **收稿日期**:2009-11-16;**修回日期**:2010-01-19

作者简介:王青松(1974—),男,硕士,助理研究员,主要从事实验加载技术研究. E-mail:wqswwh123@yahoo.cn

2 阻抗梯度飞片的设计

由于三级炮加载技术是在成熟的二级轻气炮加载技术的基础上，利用阻抗梯度飞片的准等熵压缩性来实现二级飞片的超高速发射，因此阻抗梯度飞片的设计是三级炮超高速发射实验中的关键技术[6]。

为了实现对二级飞片较好的准等熵驱动，要求梯度飞片的前界面(撞击面)的波阻抗值应尽量低，而后界面的波阻抗值尽可能高，两者相差在 10 倍以上。基于上述原则，同时考虑到材料的综合性能，可以在一个较宽的波阻抗变化范围内选取几种材料作为阻抗梯度飞片的复合体系，以制备多层阻抗准连续型梯度飞片。

梯度飞片的波阻抗沿厚度方向的分布有如下关系式

$$Z(x)=Z_0+A(x/d)^P \tag{1}$$

式中：$Z(x)$为飞片任意厚度坐标 x 处的波阻抗值，d 为飞片厚度，P 为波阻抗分布指数。Z_0 为碰撞面的波阻抗，A 为比例系数，其值为前后界面的波阻抗值之差。研究表明，当波阻抗分布指数 P 在 2～3 之间时[7-8]，阻抗梯度飞片的准等熵压缩性最佳。因此根据上述关系式，可以选取阻抗梯度飞片中每层材料合理的厚度。

由于三级炮加载技术十分复杂，阻抗梯度飞片的物系选择、阻抗分布与二级飞片和发射装置存在一定的匹配关系，单纯依靠实验来确定实验装置中的优化参数，非常不经济。因此，国内外均开展了准等熵驱动的超高速发射数值模拟技术研究，为三级炮加载实验中状态参数的优化提供参考[9-11]。我们根据上述阻抗梯度飞片设计原则设计了一种 6 层阻抗梯度飞片，利用二级轻气炮将其发射至 6.3 km/s，对 Ta 二级飞片进行准等熵驱动，二级飞片的直径与阻抗梯度飞片相当。通过全光纤位移干涉测试技术(DPS)测量了二级飞片的速度剖面历史，并采用柏劲松[11]等开发的多介质流体高精度欧拉计算程序 MFPPM 模拟二级飞片的速度剖面，测量结果与数值模拟如图 1 所示。

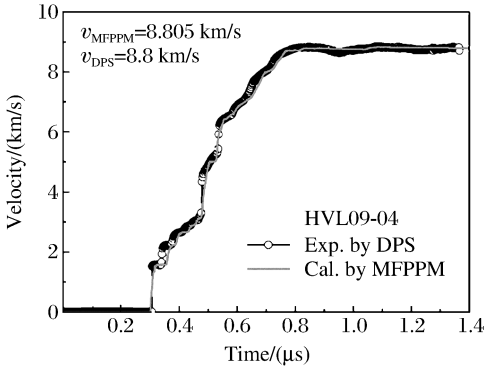


图 1 测量和理论计算的二级飞片速度剖面历史

Fig. 1 Measurement and numerical simulation for profiles mapping flyer-plate acceleration history

从图 1 中可以看出，二级飞片的起始速度远低于其最终稳定速度，波剖面的上升时间约 0.6 μs，阻抗梯度飞片对二级飞片的加载速率较低，接近于准等熵驱动。钽飞片的稳定速度约 8.8 km/s，而传统的加载装置很难将这种高阻抗材料发射至 8 km/s 以上，说明本研究设计的阻抗飞片的物系选择、阻抗分布设计是比较合理的，能够实现对高阻抗飞片的准等熵驱动，使其达到 8 km/s 以上的超高速。另外超高速数值模拟技术(MFPPM)对二级飞片速度剖面的计算结果与实验结果是一致的，说明其有较高的可信度，能够为阻抗梯度飞片的设计以及二级飞片、加速腔等实验装置的设计提供有价值的参考。

3 超高压状态方程测量

目前三级炮加载技术的主要用途之一是超高压状态方程测量，下面我们将这种技术用于 Ta 超高压状态方程测量。

3.1 实验方法

实验所用的阻抗梯度飞片由武汉理工大学制作完成。超高压状态方程测量实验在中国工程物理研究院流体所二级气体炮上进行，实验装置见图 2。二级飞片、基板、样品厚度的设计满足样品设计原则。实验过程：在二级轻气炮上将阻抗梯度飞片发射至较高速度，撞击 TPX 缓冲层以驱动二级飞片达到更高速度，二级飞片在加速腔内飞行一段距离后，撞击 Ta 靶板和样品。实验利用激光反射式测试技术(OBR)测量弹丸速度，用全光纤位移干涉仪测试技术测量二级飞片速度历史剖面，用电子学测试技术测量样品前后界面电探针响应时间，即冲击波达到时间，进而测得冲击波速度。

上述实验方法与国外三级炮用于状态方程测量实验过程大体一致,不过本研究所采用的三级炮加载技术具有两点较为明显的优势:(1) 实验使用的二级飞片为高阻抗材料,在同种材料样品中能够实现 600 GPa 以上的压力,其压力范围通过传统的加载技术是很难达到的;(2) 实验能够实现冲击波速度与二级飞片速度的同时测量,实验结果具有更高的可信度。

3.2　实验结果分析

利用上述三级炮加载技术将 Ta 飞片加速至约 9.5 km/s 的超高速,并撞击 Ta 样品。利用 DPS 测试技术测得二级飞片的速度历史剖面如图 3 所示。

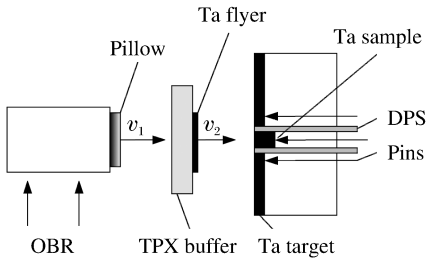


图 2　超高速发射实验装置示意图

Fig. 2　Hypervelocity launching of projectile driven by graded-density impactor

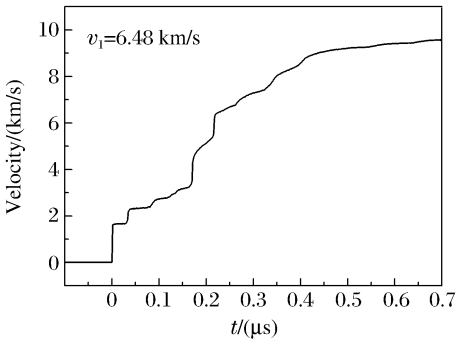


图 3　二级飞片速度剖面历史

Fig. 3　Profiles mapping flyer-plate acceleration history

从图 3 中可以看出阻抗梯度飞片每层材料对二级 Ta 飞片的加速历程,二级飞片速度上升前沿超过 0.6 μs,其中阻抗梯度飞片最后一层材料对二级飞片的加载时间超过其它 5 种材料加载时间的总和,说明阻抗梯度飞片对二级飞片的加载速率主要由高阻抗材料决定。

为了方便与其它实验测得的实验数据进行比对,本研究还利用三级炮实验技术进行了一次弹速小于 8 km/s 的 Ta 样品状态方程测量实验,两次三级炮超高速发射实验结果列入表 1 中,样品初始密度为 16.65 g/cm^3。

表 1　超高速发射实验结果和 Ta 的 Hugoniot 数据

Table 1　Result of hypervelocity launcher and Hugoniot data of Ta

Exp. No.	v_1/(km/s)	v_2/(km/s)	D/(km/s)	u/(km/s)	p/(GPa)
1	5.338	7.853	8.352	3.927	546
2	6.478	9.430	9.382	4.715	737
3	7.850	—	8.349	3.925	546

表 1 中 v_1、v_2 分别为一级飞片速度和二级飞片速度,D、u、p 分别为冲击波速度、粒子速度和压力。前两次 Hugoniot 实验是利用三级炮技术完成的,其中实验 2 在 Ta 样品中实现了 700 GPa 以上的超高压,而传统的实验加载方式(如二级轻气炮)是很难达到这样的压力范围的。实验 3 是通过二级轻气炮加载方式完成的,因为在 500 GPa 以上的压力区域内,Ta 的 Hugoniot 数据非常少,所以利用成熟的实验技术补充了一个压力较高的数据点,以便于实验数据之间的比对。

将 3 次实验结果与文献中发表的 Hugoniot 数据进行对比[12-13],如图 4 所示。图中的曲线为所有

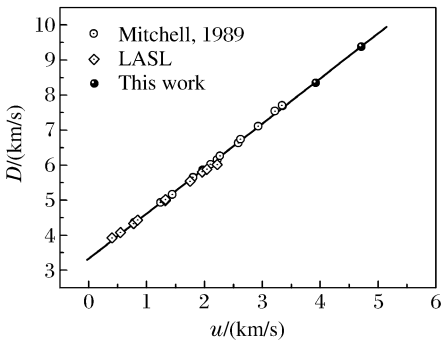


图 4　Ta 的 Hugonit 数据

Fig. 4　Hugoniot data for Ta

Hugoniot 数据线性拟合的结果，可以看出，利用三级炮加载方式测得的 Ta 的 Hugoniot 数据均分布在拟合曲线上，说明其与通过传统的实验方式测得的 Hugoniot 数据有很好的线性关系，尤其是表 1 中实验 1 和实验 3，这两个实验数据分别通过三级炮和二级炮两种不同的实验方式测得的，它们是完全重合的(见图 4)，进一步说明了通过三级炮加载技术测得的 Ta 的 Hugoniot 数据是有效的，且精度比较高，这种实验技术适用于材料超高压状态方程研究。由图 4 得到 Ta 的 Hugoniot 参数为 $c_0=(3.33\pm0.02)$ km/s，$\lambda=1.29\pm0.02$，适用范围 26 GPa$<p<$740 GPa。

在实验 3 中，弹速已经接近二级轻气炮的发射极限，通过二级轻气炮是很难实现更高压力的。实验 2 在样品中实现的压力比实验 3 高得多，且其一级弹速相对较低。在三级炮加载技术中，可以进一步提高一级飞片速度，将二级飞片发射至更高速度，以实现更高压力。另外，还可以选取更高阻抗材料作二级飞片，如 Pt，将这种飞片发射至近 10 km/s，可以在同种材料中实现太帕量级的压力，因此，可以看出三级炮加载技术是从事超高压状态方程研究比较理想的实验方法之一。

下面扼要讨论三级炮加载实验中飞片温升的问题。尽管实验中阻抗梯度飞片对二级飞片进行的是无冲击(准等熵)驱动，但二级飞片在加速过程中仍然会出现一定程度的温升，这种现象给实验数据的处理造成一定的困难。目前通常的处理方法是忽略二级飞片的温升，在数据处理中，仍引入飞片在常温下的状态参数，这种处理方法无疑会给实验结果带来一定的误差。国内外一些学者根据格林乃森物态方程初步进行了超高速实验中飞片温升的研究工作[5,14]，通过理论预估，认为飞片温升对实验结果的影响非常小，是可以忽略的，从而肯定了目前超高速实验中的数据处理方法。本研究在数据处理中，借鉴了以上的研究工作，没有考虑飞片的温升效应，即将实验看作是对称碰撞，粒子速度为弹速的一半。而最终的实验结果仍与其它实验数据保持良好的线性关系，说明目前关于飞片温升的一些理论研究工作存在一定的合理性，同时也说明了 Ta 是一种比较理想的用于超高压状态方程研究的标准材料。

4 结 论

利用三级炮加载技术测量了 Ta 在超高压下的状态方程，实验数据与通过传统实验方式测得的 Hugoniot 数据有很好的线性关系，说明这种实验技术适合于材料超高压状态方程研究，大大拓展了二级轻气炮的加载能力。

References:

[1] Zhang F, Wen S G, Sun C W, Experimental Studies on Multiple-stage Flyers [J], Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 13-16. (in Chinese)
赵 峰，文尚刚，孙承纬. 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.

[2] Knudson M D, Lemke R W, Hayes D B. Near-Absolute Hugoniot Measurements in Aluminum to 500 GPa Using a Magnetically Accelerated Flyer Plate Technique [J]. J Appl Phys, 2003, 94(7): 4420-4431.

[3] Cottet F, Romain J P, Fabbro R. Ultrahigh-Pressure Laser-Driven Shock-Wave Experiments at 0.6 μs Wavelength [J]. Phys Rev A, 1983, 52(21): 1884-1886.

[4] Chhabildas L C, Kmetyk L N, Reinhart W D. Enhanced Hypervelocity Launcher-Capabilities to 16 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17(1-3): 183-194.

[5] Winfree N A, Chhabildas L C, Reinhart W D. EQS Data of Ti-6Al-4V to Impact Velocities of 10.4 km/s on a Three-Stage Gun [A]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: AIP, 2002: 75-78.

[6] Wang C B, Sheng Q, Zhang L M. A Flier-Plate Material with Graded Impedance Used in Dynamic High-Pressure Physics [J]. Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science Edition, 2002, 17(4): 32-35.

[7] Sheng Q,Zhang L M,Wang C B,et al. Design and Optimization of Wave Impedance Distribution for Flyer Materials [J]. Chin Phys Soc,2003,52:1663-1667. (in Chinese)
沈　强,张联盟,王传彬,等. 梯度飞片材料的波阻抗分布设计与优化 [J]. 物理学报,2003,52:1663-1667.

[8] Sheng Q,Zhang L M,Wang C B,et al. A Study on Generating Quasi-Isentropic Compression via Graded Impedance Flyer [J]. Chin Phys Soc,2002,51(8):1759-1763. (in Chinese)
沈　强,张联盟,王传彬,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,2002,51(8):1759-1763.

[9] Timothy G T,Chhabildas L C. Computational Design of Hypervelocity Launchers [J]. Int J Impact Eng,1995,17:849-860.

[10] Bai J S,Hua J S,Hu J B,et al. Experimental Research and Numerical Analysis for Hypervelocity Lauch [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2008,25(2):177-181. (in Chinese)
柏劲松,华劲松,胡建波,等. 超高速发射实验及数值分析 [J]. 应用力学学报,2008,25(2):177-181.

[11] Bai J S,Tan H,Li P,et al. Numerical Simulation Method for 2-D Hypervelocity Laucher under the Graded Density Impactor Drives [J]. Chinese Journal of Computational Physics,2004,21(4):305-310. (in Chinese)
柏劲松,谭　华,李　平,等. 阻抗梯度飞片加载下的超高速发射二维数值模拟方法 [J]. 计算物理,2004,21(4):305-310.

[12] Mitchell A C,Nellis W J. Shock Compression of Aluminum,Copper and Tantalum [J]. J Appl Phys,1981,52(5):3363-3373.

[13] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. London:University of California Press,1980.

[14] Dai C D,Tan H,Hu J B. Hugoniot Evaluation of the Preheated Metal from Its Principal Hugoniot [J]. J Appl Phys,2006,99:56102(-1)-56102(-3).

Research on EOS at Extremely High Pressure Using a Three-stage Gas Gun Hypervelocity Launcher Techniques

WANG Qing-Song,WANG Xiang,DAI Cheng-Da,
BO Jin-Song,TAN Hua,HU Jian-Bo

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics*,
Institute of Fluid Physics,*CAEP*,*Mianyang* 621900,*China*)

Abstract:A new material system for fabricating graded-density impactors was designed based on the standard design principle of graded wave-impedance materials and numerical simulation method for hypervelocity launching. The secondary Ta flyer-plate was accelerated over 9 km/s by a three-stage gun and used to study equation of state(EOS) of Ta at extremely high pressure. The particle velocity and shock velocity were measured simutaneously in EOS experiments. The obtained Hugoniot data were well consistent with the corresponding experimental data published previously. It shows that the three-stage gas gun hypervelocity launcher technique is suitable to research on EOS at extremely high pressure.

Key words:graded wave impedance flyer-plate;three-stage gun;EOS