

辐射驱动下主动式高精度冲击波速度精密诊断技术

王 峰 彭晓世 刘慎业 蒋小华 徐 涛 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 激光加载可以产生比气炮加载更高的压力,是高压状态方程研究中一种新的加载方式。在激光加载高压状态方程(EOS)研究中,台阶靶是常用的靶型。针对传统台阶靶存在的预热膨胀问题,提出了使用主动式任意反射面速度干涉仪(VISAR)进行台阶靶预热和冲击波测量的方法。该技术利用条纹图移动量计算厚度增加量,利用冲击波到达自由面产生条纹跳变的时刻来获得精确的冲击波到达时刻。通过修正已测量台阶厚度与膨胀量,可以获得更加精确的台阶厚度值。通过精确的时间间隔可以得到冲击波传输的时间。在匀速传输的条件下可以获得高精度的冲击波传输速度。该方法在辐射驱动超高压条件下具有很好的适用性,可以为状态方程实验提供高精度的冲击波速度数据。

关键词 测量;冲击波速度;烧蚀;预热

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1114004

Active High-Accuracy Shock-Wave Velocity Measure Technique in Laser Indirect-Drive Experiment

Wang Feng Peng Xiaoshi Liu Shenye Jiang Xiaohua Xu Tao Ding Yongkun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Laser indirect-drive has potential to get ultra-high pressure which is very useful for shock-wave physics. A step target is used to get the equation of state (EOS) data under high pressure with laser drive experiment. Since there are preheat effects in step targets, an active velocity interferometer system for any reflector (VISAR) is presented to adjust the thickness change. The thickness change can be obtained after the calculation of fringe changes. The step thickness can be achieved accurately after corrected preheat effect on the thickness. Under conditions for the steady velocity in step target, shock-wave velocity can be gained from experimental data. This technique is suitable for the shock-wave experiment with radiation drive, which provides data of the shock-wave velocity for equation of state with high accuracy.

Key words measurement; shock-wave velocity; ablation; preheat effect

OCIS codes 120.4630; 120.7250; 120.5050

1 引 言

辐射驱动条件下的冲击波是由腔靶内产生的 X 射线对靶材料烧蚀产生的,其冲击波的产生方式与气炮加载和激光直接驱动加载产生冲击波的方式都有很大的区别。气炮加载中,Al 材料中会产生 100 GPa 以上的压力。激光加载辐射驱动条件下,能够产生比气炮加载更高的压力。这为开展超高压条件下的冲击波物理研究开辟了新的研究领域。强激光进入腔

靶以后,在腔靶内产生 X 射线,之后 X 射线烧蚀材料产生冲击波。因此,在激光加载条件下,其冲击波的波系结构与气炮加载下有很大不相同。在获得超高压的同时,也会引入 X 射线对材料的预热和离化等问题^[1~8]。

在激光驱动状态方程研究中,获得平面台阶靶中冲击波速度是基本的手段。一般使用同种或不同材料制作台阶靶,利用激光烧蚀作用产生冲击波,采

收稿日期: 2012-05-14; 收到修改稿日期: 2012-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0102020)资助课题。

作者简介: 王 峰(1975—),男,博士,副教授,主要从事光学诊断技术研发方面的研究。E-mail: xiaozei7566@163.com

用光学条纹相机记录冲击波到达台阶靶后界面卸载的时刻。通过设计激光驱动加载源,综合台阶厚度以及冲击波卸载时刻的时间差最终获得台阶靶材料中冲击波速度,从而为状态方程研究提供数据。该方法中唯一需要在实验中动态测量的就是冲击波在台阶靶后界面卸载的时刻。这可以通过精密标定技术做到非常精确。另一个静态测量数据是台阶靶的厚度,一般在离线状态下通过台阶仪或干涉仪可以精确获得,其精度可以做到亚微米量级。该方法在激光直接驱动或间接驱动的压力范围为百万大气压时精度很高,但是在到达千万甚至几亿大气压后就会遇到厚度修正的问题。

在激光驱动产生冲击波的过程中,冲击波是由X射线烧蚀基底材料产生的。也就是说,X射线是先于冲击波在材料中传输的。在X射线辐射流较弱时,台阶材料表面不会有什么明显变化。但是当X射线强到一定程度引起基底材料的预热,继而造成其膨胀后,就会带来台阶材料厚度的变化,从而影响数据的精度。同时,X射线也会在冲击波到达样品材料之前对样品材料进行预热、离化等^[9,10]。预热效应引起的基底材料厚度变化是物理上可以分析得到的一个物理过程。这个过程是一个动态过程,也就是说只有在打靶时才能反映出来。所以,这些预热膨胀数据对此类状态方程实验有很好的参考价值。

本文以在神光 III 原型装置上开展的获得亿大气压的高压状态方程实验结果为例,介绍了高精度的成像型速度干涉仪获得的预热膨胀数据。同时,根据冲击波达到自由表面引起相位跳变获得的条纹图提出了一种高精度的主动式状态方程诊断技术,以达到为超高压状态方程实验提供精密诊断技术的目的。利用高时间分辨的数据还有可能为研究粒子速度、冲击波速度和自由面速度在更高压力下的关系提供直接的数据。

2 被动冲击波诊断技术基本特点

现在使用的被动式冲击波诊断技术的基本特点是,利用台阶靶的卸载时刻来确定冲击波速度。图1是被动冲击波诊断技术的典型实验结果。一般取标准材料为基底,冲击波在标准材料中首先卸载,发出可见光。而后,在标准材料和被测材料后界面相继卸载,发出可见光。用测量3次可见光产生时间差距的方式,可以获得冲击波在台阶靶中传输的时间差 Δt 。利用白光干涉仪等设备离线测量台阶靶厚度 Δd 。则冲击波速度可以用下式计算得

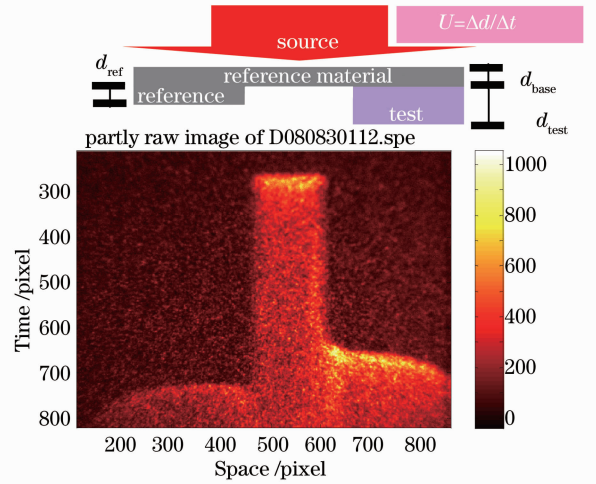


图1 被动冲击波测量系统排布和数据示意图
Fig.1 Diagram of passive shock wave measurement system and recording data

到^[11]:

$$U = \Delta d / \Delta t. \quad (1)$$

通过仔细分析不难发现,该方法的精度由台阶靶测量精度和冲击波卸载时间测量精度决定。其基本假设是实验中使用的台阶靶厚度与离线测量的结果相同。也就是说,用静态的台阶靶厚度测量数据可以代替动态实验中台阶靶厚度值。但是,这种假设在辐射驱动的实验并不是完全成立的。在辐射驱动和激光驱动产生冲击波的实验中,其冲击波是由辐射烧蚀效应产生的。激光与材料相互作用后产生X射线,X射线对材料进行烧蚀,产生冲击波。可以知道,X射线会在冲击波之前对材料进行预热,从而改变物质的某些性质。也有可能使物质的后界面在预热效应的驱使下产生膨胀,从而影响被动冲击波测量中厚度值的选取。为了验证该思路,利用主动式成像型任意反射面速度干涉仪(VISAR)^[4~8]完成该实验。

使用主动式诊断技术的好处主要是:1)可以观察冲击波在材料后界面卸载前材料界面膨胀的全过程数据;2)可以准确判断冲击波达到后界面的时刻,从而精确获得冲击波卸载的时间差。实验装置如图2所示,探针光发出的激光通过多模光纤进入实验系统,光纤输出的激光通过透镜扩束,进入成像系统聚焦后,打到靶上。靶反射的光重新被成像系统收集,并被分光进入两个光路。实验中使用的激光器波长为532 nm(2.33 eV),激光脉宽为7 ns,线宽小于50 kHz。激光器输出激光为经过整形的方波,可以从光强的变化直接判断材料反射率的变化。

台阶靶结构如图3所示,主要采用Mo-Au阻抗

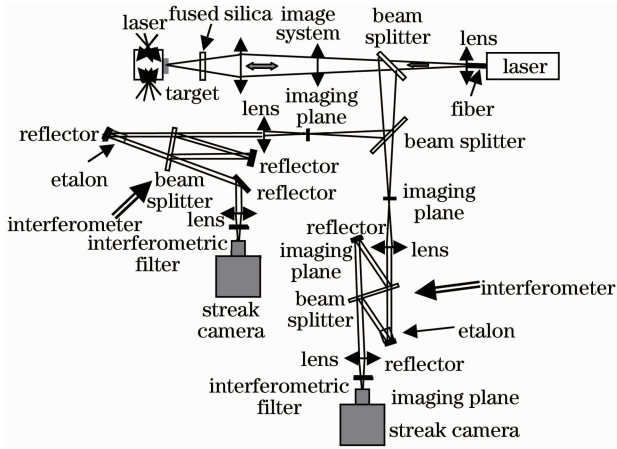


图 2 成像型 VISAR 系统排布示意图

Fig. 2 Configuration of imaging VISAR system

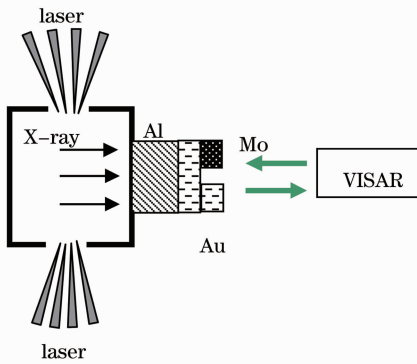


图 3 实验用靶示意图

Fig. 3 Schematic of target in the experiment

匹配技术。Al 基底厚度为 $40\ \mu\text{m}$ ，Au 台阶基底厚度为 $10\ \mu\text{m}$ ，Au 台阶厚度 $12\ \mu\text{m}$ ，Mo 台阶厚度 $9\ \mu\text{m}$ 。激光脉冲以 8 束，1000 J 能量进入黑腔，经过烧蚀过程产生冲击波。图 4 左边的曲线表示黑腔

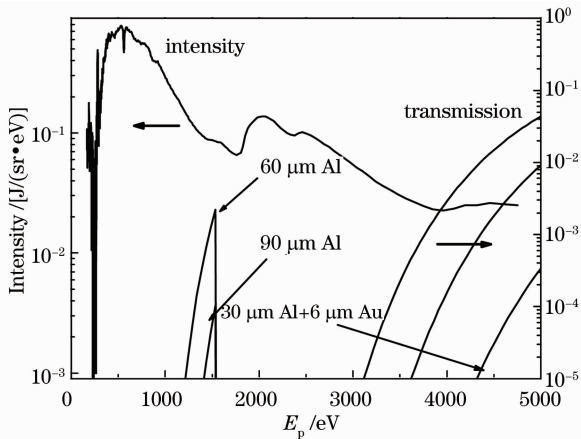


图 4 腔靶的辐射能谱分布与不同厚度 Al 基底透射率比较图

Fig. 4 Comparison of radiation energy spectra from Hohlraum and transmission of Al with different thicknesses

里面辐射的 X 射线的能谱分布，横坐标表示 X 射线能量。可以看到，大部分能量集中在 $1.5\ \text{keV}$ 以下。分析图 4 后发现，使用 $60\ \mu\text{m}$ 的铝会在 $1.5\ \text{keV}$ 附近和 $3\ \text{keV}$ 以上出现两个窗口。而使用 $30\ \mu\text{m}$ 的铝加上 $5\ \mu\text{m}$ 的金以后，仅有 $4.4\ \text{keV}$ 以上很小一部分 X 射线从腔内辐射出来。但是，总体而言，这些 X 射线都会在材料内部沉积，对材料进行加热，从而使材料温度上升，体积膨胀，最终影响状态方程的研究。本次实验中使用 $1\ \text{ns}$ 方波，产生的最高辐射温度达到了 $245\ \text{eV}$ 。所以，有可能产生可观的预热膨胀效果。

3 实验结果与分析

图 5 是实验结果，是时间分辨率为 $30\ \text{ps}$ 的 3 台阶条纹图。可以看到，3 个台阶的解体过程非常明显。根据(1)式^[9]，在获得 Au 台阶厚度和 Au 台阶的渡越时间后，得到 Au 中冲击波速度为 $39.83\ \text{km/s}$ 。同样，在获得 Mo 台阶厚度和 Mo 台阶的渡越时间后，得到 Mo 中冲击波速度为 $48.7\ \text{km/s}$ 。

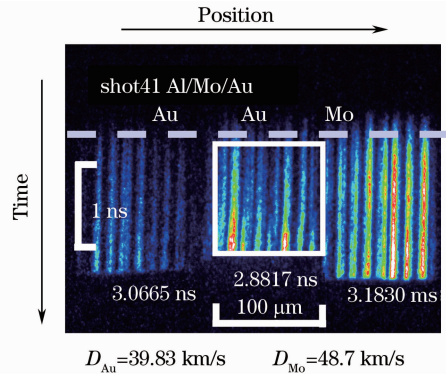


图 5 VISAR 系统获得的 3 台阶 Al/Mo/Au 靶的数据，时间分辨率为 $30\ \text{ps}$

Fig. 5 Data of Al/Mo/Au target with imaging VISAR system with time resolution of $30\ \text{ps}$

这个数据的获得有一定的不确定性。冲击波卸载时刻并不是非常准确。该实验中使用的是条纹端点强度下降到 50% 时刻的时间作为冲击波卸载的时刻。由于该扫描档下的时间分辨率达到 $30\ \text{ps}$ 左右，这个卸载时刻存在一定的不确定性。在 Au 基底还未解体之前，速度干涉仪的条纹已经发生了轻微的移动。这说明 Au 的后界面在 X 射线烧蚀作用下发生了很小的膨胀。虽然膨胀的量很小，但是已经足以对冲击波速度的计算产生影响。在辐射温度较低的实验中，预热膨胀的影响可能会很小，所以并没有引起足够的注意。但是，在辐射温度达到 $245\ \text{eV}$ ，材料中

压力达到亿大气压左右(根据已有 Au 的状态方程, 可以知道本实验中 Au 材料中卸载时刻的冲击波压力已达到亿大气压量级)的时候, 这个膨胀的效应就不能忽略了。综合这两个因素, 需要更加精密化地判断冲击波卸载时刻和后界面移动量的数据。

对图 5 中方框部分单独处理, 得到图 6 所示的条纹整体移动图。可以用移动条纹包含的面积获得台阶靶膨胀的数据(图 6 中三角形框图内的面积), 使用

$$X_v = \int_{t_0}^{t_1} F_s f(t) dt \quad (2)$$

来表达, 式中 X_v 为积分的面积; t_0 为积分起始时刻, 也就是条纹开始移动的时刻; t_1 为积分的截止时刻, 也就是冲击波卸载的时刻; F_s 表示条纹常数, $f(t)$ 表示与条纹数相关的速度曲线。实验中使用的速度灵敏度为 $5.16 \text{ km} \cdot \text{fringe}/\text{s}$ 。这个条纹灵敏度意味着测量得到的速度变换量达到 $5.16 \text{ km}/\text{s}$ ($5.16 \mu\text{m}/\text{ns}$) 的时候, 才能移动一个整条纹。根据图 6 可以获得条纹移动量在卸载时刻也只有 0.3 个条纹移动量, 与时间积分获得的膨胀数目为 $0.4 \mu\text{m}$ 。如图 7 所示, 这个修正量主要是对 Au 基底厚度的修正, 所以 Au 台阶厚度需要改成 $11.6 \mu\text{m}$, Mo 台阶厚度改成 $8.6 \mu\text{m}$ 。从而使获得的冲击波速度将更加准确。修正后 Au 中冲击波速度为 $38.50 \text{ km}/\text{s}$, Mo 中冲击波速度为 $46.54 \text{ km}/\text{s}$ 。这些数据与修正前还是有很大差距的。

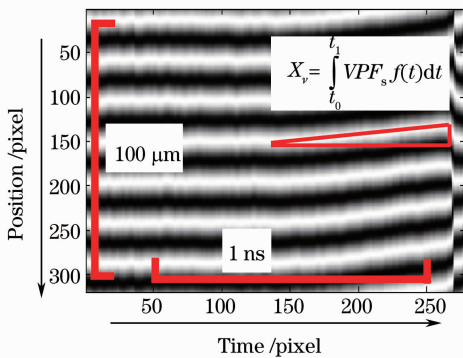


图 6 图 5 中方框中预热部分条纹移动处理图
Fig. 6 Preheat fringe pattern in the block in Fig. 5

这里综合图 5 和图 6 获得的数据是时间分辨率为 30 ps 条件下的冲击波速度。如果将时间分辨率缩小到 10 ps , 将同时获得冲击波到达时刻数据、后界面膨胀数据、自由面速度数据。这些数据的获得, 为超高压下研究粒子速度、冲击波速度和自由面速度的关系以及材料状态方程的研究都具有重要意

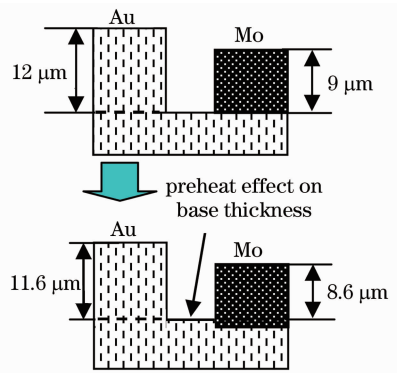


图 7 引入预热膨胀的修正数据后, 台阶靶厚度的修正值变化图

Fig. 7 Diagram of step-target thickness changes after using preheat effect on base thickness

义。图 8 是另一发实验获得的时间分辨率为 10 ps 的图像。靶型和激光能量均与图 5 实验相同, 只是时间分辨率换成了 10 ps 。同时, 探针光的到达时间也略微延迟了几百皮秒。从图可以得到丰富的信息: 1) 可以获得 Au 台阶的膨胀量, 从而可以修正台阶厚度。由于探针光时间延迟的问题, 在图 8 中还不是很明显。但是参照图 5 的结果, 这个数据是可以获得的。2) 可以精确获得冲击波达到后界面的时刻。图 9 是对图 8 中 3 个时间点的细分。可以看到在冲击波到达后界面的时候, 后界面还未解体, 会产生一个条纹的跳变。冲击波到达时刻就是每个信号开始下降的时刻, 其时间点更加准确。3) 可以获得自由面速度。从图 8 可以看出条纹跳变之后有一个持续几十皮秒的条纹信号, 之后条纹消失。这个持续几十皮秒的条纹信号就是自由面的反射信号。如果获得两台相机的自由面信号, 用双灵敏度法就可以获得亿大气压下的自由面速度数据。

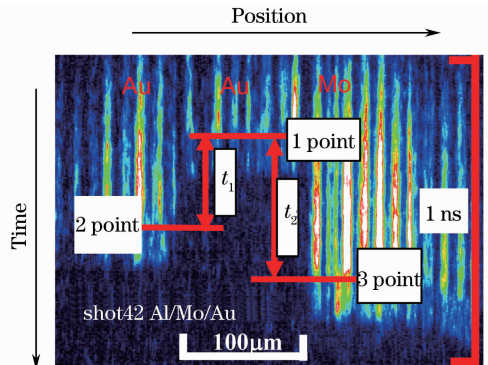


图 8 高时间分辨下获得的 3 台阶 Al/Mo/Au 靶的数据, 时间分辨率为 10 ps

Fig. 8 Data of Al/Mo/Au target with imaging VISAR system with time resolution of 10 ps

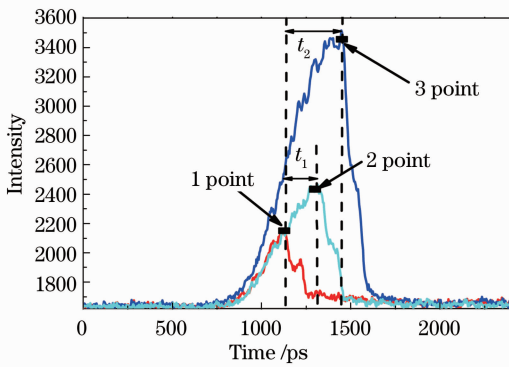


图9 图8中3个条纹卸载时刻图的分析

Fig. 9 Analysis of shock-wave break-out timing in Fig. 8

应用双灵敏度方法获得冲击波速度的思想,在用另一台条纹相机可以获得与图8对应的不同灵敏度的数据条件下,可以比较容易地得到条纹移动量、条纹跳变的时间点和自由面反射信号,从而可以精确的判断冲击波速度和自由面速度。可见使用更高的时间分辨率后,就可以更准确地获得同样实验条件下的冲击波到达时刻数据。由于实验发次的原因,没有获得同一发次同样是10 ps分辨率的两台条纹相机的数据,所以不能从自由面解体后条纹的移动来反推自由面的速度。但是,冲击波达到时刻产生的条纹跳变仍然是十分清晰的。

4 结 论

通常的冲击波直接诊断技术没有考虑由X射线对材料后界面的预热作用,从而对后续的冲击波速度计算带来很大的测量不确定度。这里提出的利用主动探针的方法结合任意反射面速度干涉仪来获得冲击波速度的方法,通过积分获得条纹移动产生的厚度变化。将这个厚度变化作为修正值,来校准实际实验中动态测试过程中台阶厚度值。如果采用时间分辨率达到10 ps的扫描档,还可以同时获得自由面的速度。在一定的压力范围内,还可以用来比对粒子速度与自由面速度的差别。在压力较小范围内,自由面速度倍增定律是比较准确的。但是,在更高压力下探讨两者之间的规律可为高压状态方程

的研究提供更加丰富的数据。利用10 ps分辨率的数据有可能为自由面与粒子速度、冲击波速度之间关系研究提供直接的研究数据,从而推动冲击波物理的进一步发展。

参 考 文 献

- 1 L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(11): 4669~4675
- 2 R. M. Malone, J. R. Celeste, P. M. Celliers *et al.*. Combining a thermal-imaging diagnostic with an existing imaging VISAR diagnostic at the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 2005, **5874**: 87~94
- 3 R. M. Malone, J. R. Bower, D. K. Bradley *et al.*. Imaging VISAR diagnostic for the National Ignition Facility (NIF) [C]. *SPIE*, 2005, **5580**: 505~516
- 4 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Liu Shenye *et al.*. Development of an imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3207~3211
彭晓世, 王峰, 刘慎业等. 成像型任意反射面速度干涉仪研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3207~3211
- 5 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Shock wave velocity measurement in the Al_2O_3 under ultrahigh pressure[J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(6): 065202
- 6 Hu Shaolou. Laser Interferometry for Measuring Velocities[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 45~46
胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 国防工业出版社, 2001. 45~46
- 7 P. M. Celliers, D. K. Bradley, G. W. Collins *et al.*. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(11): 4916~4929
- 8 R. E. Olson, D. K. Bradley, G. A. Rochau *et al.*. Time-resolved characterization of Hohlraum radiation temperature via interferometer measurement of quartz shock velocity[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 5231~5235
- 9 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Ionization effect in the transparent window for shock-wave diagnosis under in-direct drive[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312002
王峰, 彭晓世, 刘慎业等. 辐射驱动条件下冲击波诊断用透明窗口离子化现象研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312002
- 10 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *et al.*. Shock wave velocity calculation under X-ray preheat effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1327~1331
王峰, 彭晓世, 刘慎业等. 预热效应影响下冲击波速度推算方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1327~1331
- 11 Shu Hua. Error Pertinence Study and on-Line Program Development in Laser-Drive Equation of State Experiment[D]. China Academic of Engineering Physics, 2005. 29~34
舒桦. 激光状态方程实验中的误差相关性研究及数据在线处理程序开发[D]. 中国工程物理研究院, 2005. 29~34

栏目编辑: 何卓铭