文章编号:1000-5773(2008)02-0203-05

多通道辐射高温计与 VISAR 的联合诊断技术*

李 俊,周显明,李加波,王 翔

(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 621900)

摘要:利用二级轻气炮加载手段,开展了多通道辐射高温计结合可测量任意反射表面速度干涉仪(VISAR)的联合诊断技术研究。通过测量钽酸锂单晶的冲击相变,以确定联合诊断技术的可行性。结果显示,在同一发实验中,成功地获得了样品的界面速度剖面和光谱辐亮度历史,由此得到了钽酸锂单晶冲击相变的实验证据,表明该联合诊断技术是可行有效的。该技术对今后开展其它材料的高压物性研究具有一定的参考价值。

关键词:多通道辐射高温计;VISAR;多普勒光探针

中图分类号:O521^{+}.3 **文献标识码**:A

1 引 言

实验诊断技术对冲击波物理的发展至关重要[1],利用多种测试手段组成联合系统则可以在同一实验中获得更加丰富的实验信息,有助于人们更好地认识材料在高压高温极端条件下的力学性质和物理性质,同时提高实验的效费比,是近年来冲击波物理实验技术发展的趋势。

在冲击波实验中,通常都伴有样品材料的物理性质和力学性质同时改变,传统测试方法大多采用单一的诊断技术来获得某一方面性质的信息,例如通过时间分辨的 VISAR 速度波剖面测量以获得波的演化过程并由此反演材料冲击力学性质(如弹塑性转变)或物理性质(如相变)变化,或通过多通道辐射高温计测量辐亮度历史获得样品界面温度演化的信息。若能把高温计和 VISAR 两种诊断技术结合起来,同时测量样品材料在压缩过程中的速度波剖面和光谱辐亮度历史,获得两个物理量的变化过程,不仅可以更加全面地认识材料的动态响应特性,有效地节省实验费用,同时在某些时候还可以相互验证两种测试信息的真实性,是一种值得大力提倡和发展的实验测量技术。2004 年,美国 Los Alamos 国家实验室的 Frankle 等[2]曾报道过采用光学高温计和 VISAR 系统组成复合光探头,成功实现了样品表面温度和粒子速度剖面的同时测量,但细节不详。

本工作发展了一种多通道辐射高温计结合 VISAR 或多普勒光探针(DPS)的联合诊断技术,同时测量样品的界面速度剖面和光谱辐亮度历史,对该实验技术的可行性和实用性进行探索和研究。

2 实验原理与方法

多通道辐射高温计与 VISAR 联合测量的基本原理是:

(1) 利用两相同焦距的凸透镜组成透镜探头,根据光路转换原理使样品表面与测试光纤端面处于一共轭物像关系位置(见图 1),等效于将测试光纤安装在样品表面处,只是此时探头数值孔径应取透镜

* **收稿日期**:2007-07-13;**修回日期**:2007-11-12

基金项目:中国工程物理研究院科学技术基金(20050102)

作者简介:李 俊(1982—),男,硕士研究生,研究实习员,主要从事材料高压动态特性研究. E-mail:Leejun_200808@yahoo.com.cn

通讯作者:周显明(1963—),男,研究员,主要从事冲击波物理研究. E-mail:Xianming_zhou@tom.com

和光纤数值孔径的最小值；

(2) 将 VISAR 测试光纤排于光路中心，四周布置高温计测试光纤，两者保持一定间距，以避免样品的光辐射信号和 VISAR 测试激光的相互干扰，若存在干扰则 VISAR 反射光会给高温计带来一定的信号本底，影响光信号的正确解读。同时外围光纤也不能距离中心光纤太远，需满足旁轴成像关系，以确保有足够的光强进入高温计测试光纤。

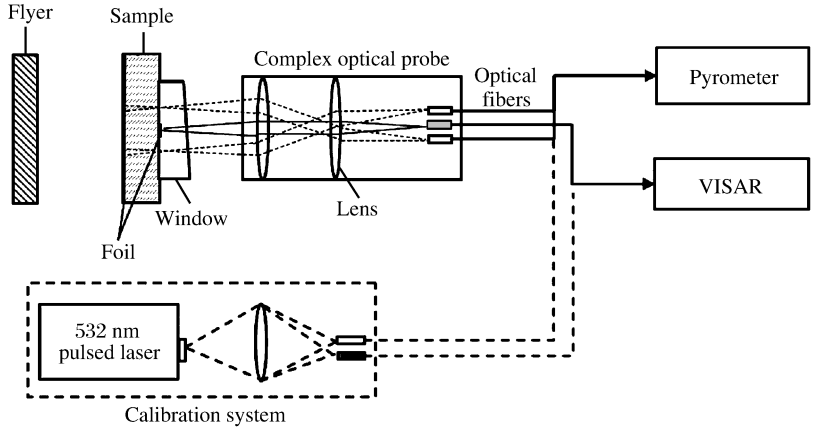


图 1 高温计和 VISAR 的联合诊断示意图

Fig. 1 Schematic drawing of a combined VISAR and pyrometer measurement

多通道辐射高温计与 VISAR 联合测量的实验装置如图 1 所示，在二级轻气炮上采用高速平板撞击实验产生冲击加载，飞片击靶速度则由发射管口的磁测速系统进行测量。选用无氧铜和铝合金作为飞片，钽酸锂单晶作为样品，尺寸设计满足宽厚比、追赶比要求。样品前端面粘贴铝箔，以避免残余压缩气体的发光对样品光辐射信号产生干扰；后端面压贴光学氟化锂窗口，界面之间夹压 2 mm×2 mm×17 μm 铝箔，以反射 VISAR 测试激光。中心 VISAR 测试光纤(芯径 600 μm，N_A=0.22)与四周高温计测试光纤(芯径 600 μm，N_A=0.37)间距约为 4 mm，实测信号波形均由高速数字储存示波器记录和储存。由于高温计和 VISAR 系统使用的光电转换器件和传输光纤长度并不相同，因此每次实验前都需对两套诊断系统的传输和响应时间差异进行标定。图 1 虚框部分为采用调 Q 纳秒激光器对联合诊断系统进行时间标定的测试框图，典型的标定实验波形如图 2 所示，其中光纤色散效应带来不同波长传输时间差异的影响被忽略。

为了确定样品发射的光谱辐亮度值，需在每次实验前用溴钨标准灯(OSRAM 400 W，已由中国测试技术研究院标定出光谱辐照度曲线见图 3)对高温计各通道进行标定[3]。若在标定和动态实验时示波器记录波形的幅度分别为 h_c 和 h，则根据光纤的空间张角(接收角 θ)按照被测源满足余弦辐射定律的前提下，可导出中心波长 λ_i 的光谱辐亮度 $I_{pl}(\lambda)$ 计算公式

$$I_{pl}(\lambda_i)=hR_cI_c(\lambda_i)/(\pi\sin^2\theta)h_cR_L,\quad i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中：R_L 为动态实验负载电阻，R_c 为标定负载电阻，$I_c(\lambda)$ 为标准灯的光谱辐照度随波长的变化曲线，n 为高温计通道数。

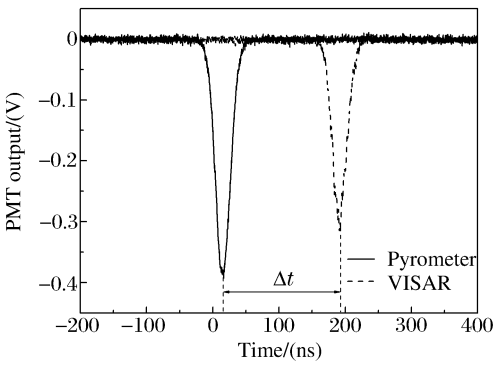


图 2 典型标定实验波形

Fig. 2 Typical time-base calibration waveform

利用 VISAR 测量样品粒子速度剖面时，由于系统的响应带宽限制(约 1 GHz)，当被测面加速度值很高时(冲击波阵面)常常会出现条纹丢失现象，此时得到的速度值将偏离样品真实运动速度。因此，本工作还探索了多通道辐射高温计结合高时间分辨(可达50 ps)的多普勒光探针(DPS)的联合测量技术，可有效避免此类问题的发生。实验装置如图 4 所示，四周高温计光纤紧贴于样品表面以记录样品的辐射光信号，而中心 DPS 测试光纤与样品后端面间距约为2 mm，直接测量样品自由面的运动速度。

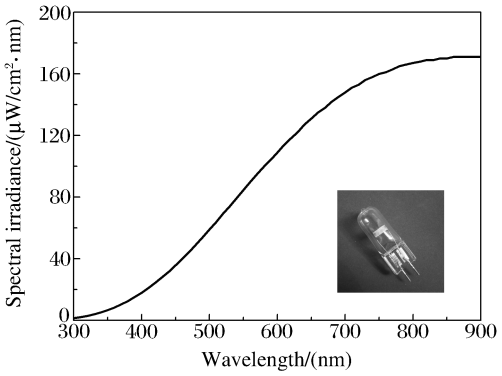


图 3　溴钨标准灯光谱辐亮度曲线

Fig. 3　Spectral irradiance of OSRAM standard lamp

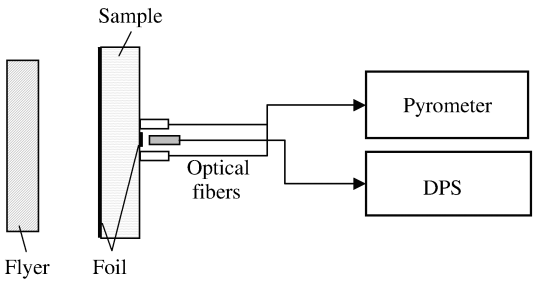
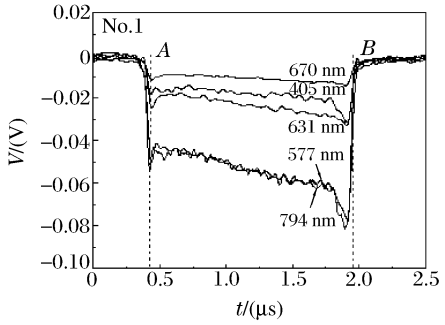


图 4　高温计和 DPS 的联合诊断示意图

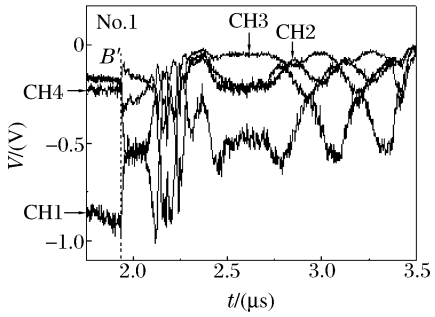
Fig. 4　Schematic drawing of a combined DPS and pyrometer measurement

3　结果与讨论

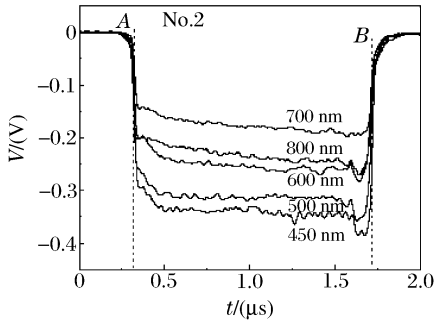
在中国工程物理研究院流体物理研究所二级轻气炮(发射管口径 32 mm)上,成功完成 2 发动态考核实验,实验结果列于表 1 中。图 5 为动态实验的典型信号波形,其中图 5(a)、图 5(b)为实验 1 的高温计信号和 VISAR 条纹监测原始波形,图 5(c)、图 5(d)为实验 2 的高温计和 PDS 信号波形。图中 A 点为冲击波到达样品前端面时引起光强信号的急剧上升,B 点为冲击波到达样品自由端面卸载导致辐射光强的截止;B'点为弹性先驱波到达自由面后粒子运动引起的干涉条纹信号。



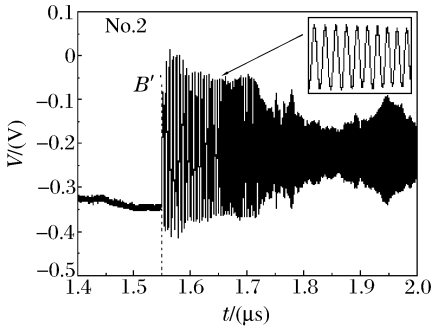
(a) The output signal of pyrometer for Shot 1



(b) The output signal of VISAR for Shot 1



(c) The output signal of pyrometer for Shot 2



(d) The output signal of DPS for Shot 2

图 5　动态实验的典型信号波形

Fig. 5　Signal waveforms of shock-wave experiments

根据联合测量的原理可知,若 VISAR 测试激光(中心波长 532 nm)对高温计产生干扰,则冲击波到达样品之前高温计各通道会有一定幅度的信号本底。但从高温计波形可见,A 点之前光信号平均幅度基本

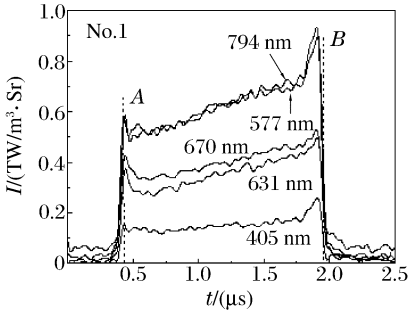
为零，只是由于示波器灵敏度设置不当，信噪比较低(约为 0.70～0.85)，说明了 VISAR 测试激光未对高温计测量产生影响。同时从 VISAR 和 DPS 信号波形可见，记录的干涉条纹清楚完整，信噪比较高(约为13.5～15.3)，说明了 VISAR 仪器内部具有较好的杂散光抑制能力，样品辐射光信号未对其测试产生干扰。

表 1 冲击波实验结果

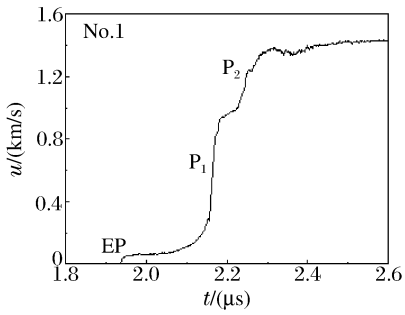
Table 1 The results from shock wave experiments

Shot No.	Flyer	w /(km/s)	Elastic wave			Plastic wave			Phase transition wave		
			u_p /(km/s)	D /(km/s)	p_H /(GPa)	u_p /(km/s)	D /(km/s)	p_H /(GPa)	u_p /(km/s)	D /(km/s)	p_H /(GPa)
1	Cu	2.76	0.058	6.11	2.65	0.946	5.28	38.0	1.419	5.03	53.0
2	Al	3.61	0.063	6.17	2.90	0.948	5.26	37.8	1.240	4.53	42.7

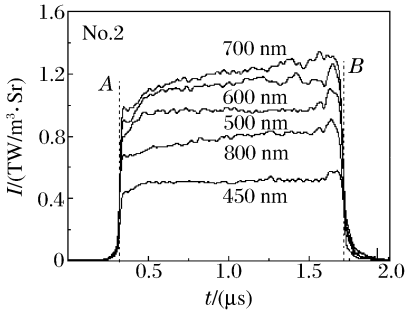
利用上述实验波形计算得到样品的光谱辐亮度历史和粒子速度剖面如图 6 所示，其中 LiF 晶体窗口的折射率变化修正因子为 0.281[4]。从光谱辐亮度历史可见，在 405～800 nm 光谱范围内各通道波形，实验 1 出现脉宽很窄(约 26 ns)的起始尖峰，而实验 2 则在起始阶段出现一幅度略低的小平台，对此可解释为前端面铝箔胶带中空气隙发光所致；之后两发实验均出现幅度近似线性地增加，说明发射率随着压缩层厚度的增加而增加，应该为 $LiTaO_3$ 单晶冲击发光的特征，这一现象在蓝宝石[5]、熔石英[6]和 $LiNbO_3$[7]等透明晶体的冲击实验中均有观测；最后出现约 120 ns 宽的“小鼓包”则是弹性先驱波反射物与随后的塑性波(P_1 波)作用的结果。由此可以推断，$LiTaO_3$ 单晶的冲击压缩层已接近黑体，这与高速电子相机扫描照相的结果是一致的[8]。同时，从两发实验的粒子速度剖面中均观测到明显的三波结构，即弹性先驱波 EP，塑性波 P_1 和相变冲击波 P_2，这为 $LiTaO_3$ 单晶高压相变的发生[9]提供了有力的实验证据。从实测辐亮度波形(5 个通道)上可读出冲击波到达时间数据及其统计平均值，结合实测速度剖面数据以及两套系统响应时间差的标定值(约 177 ns)即可确定弹性波、塑性波和相变波的走时和速度。应该指出，上述联合测量技术及实验结果虽然是在 $LiTaO_3$ 单晶样品中取得的，推广应用于金属样品/LiF 窗口界面辐亮度历史和速度波剖面的联合测量没有原则上的问题。



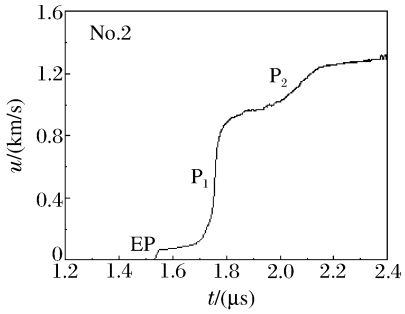
(a) Spectral radiance history for Shot 1



(b) Particle velocity profile for Shot 1



(c) Spectral radiance history for Shot 2



(d) Particle velocity profile for Shot 2

图 6 样品的光谱辐亮度历史和粒子速度剖面

Fig. 6 Radiance histories and particle velocity profiles of $LiTaO_3$ sample

4 结　论

本研究采用 VISAR/高温计的复合光探头,对样品/窗口界面的激光测试区域作特殊处理,实现了多通道辐射高温计与 VISAR 的联合测量,可在一发实验中同时得到样品的光谱辐亮度历史和粒子速度剖面。两发动态考核实验均成功观测到 $LiTaO_3$ 单晶在 405～800 nm 光谱范围内冲击发光的光谱辐亮度历史以及冲击相变发生时波剖面的多波结构。由此表明,两种测试系统的相互干扰并不明显,该联合诊断技术是切实可行的,推广应用于金属样品/LiF 窗口界面辐亮度历史和速度剖面的联合测量没有原则上的问题。

References:

[1] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. Beijing: Science Press, 1999: 228. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 北京:科技出版社, 1999: 228.

[2] Frankle C M, Holtkamp D B, Borror S D, et al. Optical Pyrometry on the Armando Subcritical Experiment [R]. LA-14202-PR, 2004.

[3] Zhou X M. The Feasibility Exploration for Shock Temperature Testing of Iron with $LiTaO_3$ as Window Material [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2004: 36. (in Chinese)
周显明. $LiTaO_3$ 单晶用作测量 Fe 冲击温度窗口材料可行性的探索 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2004: 36.

[4] Wise J L, Chhabildas L C. Laser Interferometer Measurement of Refractive Index in Shocked-Compressed Materials [R]. SAND-85-0310C, 1985.

[5] Have D E, Webb D J, Holmes N C. Imaging Shocked Sapphire at 200～460 Kbar: The Effect of Crystal Orientation on Optical Emission [A]//Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter-1999 [C]. New York: Elsevier Science, 2000: 637-640.

[6] Brannon P J, Konrad C, Morris R W, et al. Studies of the Spectral Characteristics of Shock-Induced Luminescence from x-Cut Quartz [J]. J Appl Phys, 1983, 54: 6374-6381.

[7] Brannon P J, Morris R W, Asay J R. Shock-Induced Luminescence from z-Cut Lithium Niobate [J]. J Appl Phys, 1985, 57: 1676-1679.

[8] Zhou X M, Wang X S, Li S N, et al. Optical Transparencies of z-Cut LiF, Al_2O_3 and $LiTaO_3$ Single Crystals under Strong Shock Compressions [J]. Acta Phys Sin, 2007, 53: 4965-4970. (in Chinese)
周显明,汪晓松,李赛男,等. 强冲击压缩下 LiF、Al_2O_3 和 $LiTaO_3$ 单晶的透光性 [J]. 物理学报, 2007, 53: 4965-4970.

[9] Li J, Zhou X M, Liang W Z, et al. Theoretical Investigations of High-Pressure Phase Transition of $LiTaO_3$ [J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2007, 24: 641-646. (in Chinese)
李　俊,周显明,梁万珍,等. $LiTaO_3$ 晶体高压结构相变的理论研究 [J]. 原子与分子物理学报, 2007, 24: 641-646.

A Combined Measurement with Pyrometer and VISAR

LI Jun, ZHOU Xian-Ming, LI Jia-Bo, WANG Xiang

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

Abstract: Combined measurement with two or three different diagnostic systems in one shock-wave experiment, which could provide more information on high-pressure physical properties of materials and help people better understanding the nature of these properties, is the inexorable trend for the development of the shock-wave experimental technique. A combined diagnostic technique with multi-channel pyrometer and VISAR was primarily developed in two-stage light gas gun experiments. In one experiment, we successfully obtained spectral radiance histories and particle velocity profiles of $LiTaO_3$ sample by this technique, which indicated shock-induced luminescence and shock-induced phase transformation of $LiTaO_3$. The results show that combined measurement with pyrometer and VISAR is practicable for our shock-wave experiment.

Key words: multi-channel pyrometer; VISAR; DPS