文章编号：1000-5773(2011)02-0128-05

利用激光超声技术测量介观尺度材料的声速*

马　云，张　毅，李加波，蔡灵仓，李剑峰，王　翔，
翁继东，李　军，敬秋民，李　俊

（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：设计并建立了一种可用于测量介观尺度（几十微米至几毫米）材料声速的激光超声系统。该系统采用脉宽为6.3 ns的调Q激光器作为超声波激发光源，使用光纤位移干涉仪进行超声位移探测。利用新建立的激光超声系统，测量了不同厚度铜箔的纵波声速。结果表明，激光超声系统得到的声速具有较高精度，可以将其应用于介观尺度材料声速测量。

关键词：激光超声；声速；干涉仪；铜
中图分类号：O521.3；O384　　**文献标识码**：A

1　引　言

激光超声技术是利用聚焦脉冲激光束在固体或液体等凝聚态物质中激发和检测超声的一项新型无损检测技术[1]。常规的超声检测中，超声波是由压电或压磁换能器产生的，检测时必须通过耦合剂与试件耦合。由于换能器本身带宽的限制以及换能器与试件之间的耦合等因素的影响，无法产生很窄的单个超声脉冲，因此常规的超声检测技术很难应用于具有介观尺度（几十微米至几毫米）材料的声学特性研究，尤其是材料的声速检测。而激光超声技术可以重复产生很窄的超声脉冲，在时间和空间上均具有极高的分辨力。此外，激光超声可以在不同形状的试件中激发，并且激发和探测都是非接触的，宜于在高温、高压、有毒和放射性等恶劣环境中进行超声检测，非常适合于介观尺度材料的检测和物质微结构的研究[2]。

激光超声脉冲的频带宽度可以通过选用不同的激发激光脉宽而方便地调节。目前，利用亚纳秒[3]、皮秒[4-5]、飞秒[6]等短脉冲或超短脉冲激光器，可以在凝聚态物质中激发出吉赫兹甚至太赫兹高频超声脉冲。高频激光超声脉冲的方便产生，为高压物理研究，如静高压加载下材料的声速测量、超高速发射实验中密度渐变材料的厚度测量，提供了一种极为有效的手段，并成为近几年高压物理前沿研究的热点[7-10]。但是，高频激光超声的产生和检测远未达到成熟的程度，尤其是高频激光超声检测，因为它要求干涉仪既要有吉赫兹量级的响应带宽，又要具有对粗糙表面检测的能力，这对干涉仪的设计提出了较高要求。

为了满足数十微米厚样品的声速测量需求，本研究采用纳秒级激光器作为激光超声激发光源，利用自主研制的高带宽光纤位移干涉仪进行激光超声检测，建立了一种可用于介观尺度材料声速测量的激

* **收稿日期**：2010-03-03；**修回日期**：2010-05-05
基金项目：中国工程物理研究院双百人才基金（2008R0106）；中国工程物理研究院科学技术基金（2009B0101001）；冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金（9140C6703010905）
作者简介：马　云（1975－），男，博士，副研究员，主要从事冲击波物理测试技术研究. E-mail：myun102@21cn.com

光超声系统。利用该系统,对不同厚度铜箔的纵波声速进行测量,验证系统的准确性和可靠性。

2　实验原理

当脉冲激光照射到固体样品表面时,一部分被反射,另一部分则被迅速吸收。被吸收的激光能量所产生的热量来不及扩散,在表层附近形成很大的热梯度,导致热膨胀,来自周围媒质的约束使其形成一个应力分布,由此产生了在固体中传播的超声脉冲。这种基于热膨胀效应的超声称为热弹激发超声[1]。当入射激光的强度达到足以烧蚀样品表面(入射光脉冲的功率密度一般大于 10^7 W/cm^2)时,固体表面温度急剧升高,并超过材料的熔点,致使约几微米深的表层材料发生烧蚀,从而在金属表面及其上方形成等离子体,在垂直于金属表面上产生反冲力,进而产生超声波场[1]。基于烧蚀效应的超声波位移振幅要大于热弹激发超声,因此在允许表面烧蚀的情况下,可以将激光超声工作在烧蚀模式,以利于超声位移信号的探测。在样品表面上粘贴透明窗口或者涂覆一层油膜等其它物质,使受辐照表面产生约束,也可以增强超声位移信号,形成类似烧蚀效应的超声波远场分布[1]。

材料纵波声速的测量原理如图 1 所示。激光入射到样品表面激发出超声纵波,超声纵波经过单倍样品厚度声程达到背面正中心干涉仪探测点,由干涉仪测量超声位移波形。为了得到纵波声速,需要测量超声纵波的走时和样品的实际厚度。超声纵波走时可通过测量激发脉冲激光穿过样品的时间获得,即超声波产生时刻 t_0 和超声波达到背面正中心干涉仪探测点的时刻 t_1 之差 $\Delta t = t_1 - t_0$。如果样品的实际厚度为 h,则所测材料的纵波声速为 $c_l = h/\Delta t$。

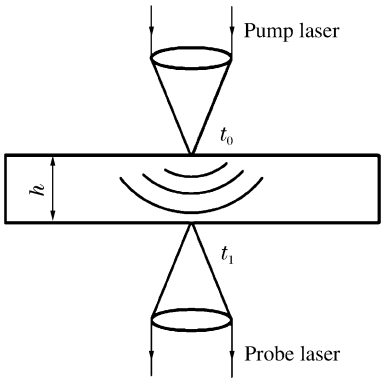


图 1　声速测量原理示意图

Fig. 1　Test configuration for measurement of sound velocity

3　实　验

激光超声实验系统示意图见图 2。用于激发超声的激光器为调 Q 纳秒激光器,工作波长为532 nm,脉宽为 6.3 ns,最大输出能量为 800 mJ。激光能量可以通过改变放大级电压或者 Q 开关相对闪光灯的延迟时间调节。激光可单次或以 1～10 Hz 的重复频率输出,本实验采用单次输出。纳秒激光器输出的激光经显微物镜 2(放大倍数为 5,工作距离为 20 mm)聚焦在样品上,聚焦光斑最小可达50 μm。通过调节显微物镜的聚焦距离或激光器的输出能量来改变照射在样品上的激光功率密度。实验中,将激光的功率密度调至烧蚀模式,以获得较强的超声位移信号。

超声位移的探测利用自主研发的光纤位移干涉仪。该光纤位移干涉仪采用迈克尔逊干涉仪结构,参考光来自平头光纤端面的菲涅耳反射,信号光来自于探测样品表面。光纤位移干涉仪光源为连续输出 DFB 光纤激光器,波长为 1 550 nm,线宽约为 300 kHz,最大输出功率为 2 W。干涉仪探测器可以在直流和交流两种模式下工作:直流模式下,响应带宽约为 3.5 GHz;交流模式下,响应带宽为 10 kHz～3.5 GHz,因此可以很好地过滤掉低频噪声和干涉信号中的直流部分。数字示波器的响应带宽为 3 GHz,最高采样率为 10 GHz。因此,整个干涉仪系统的响应带宽可达 1 GHz 以上。

在超声波引起的样品表面位移振幅很小(小于探测光波长)的情况下,示波器记录的电压信号与超声波引起的样品表面位移成正比。因此,可以直接将示波器电压信号的起跳点作为超声波到达样品背面干涉仪的探测点时刻,无需进行位移信息反演。

光纤位移干涉仪的出射光束经准直镜准直后,由显微物镜 3(放大倍数为 50,数值孔径为 0.42,工作距离为 20.5 mm)聚焦至样品表面。样品表面反射的信号光经显微物镜和准直镜进入干涉仪。实际上,当样品表面的探测点恰好与显微物镜焦点重合时,物镜和样品表面就构成了“猫眼动镜”[11],其特点是反射光的方向不受猫眼绕物镜光心摆动的影响,形成一个很好的逆向反射器。“猫眼动镜”和大数值

孔径显微物镜的使用，大大提高了信号光的收集效率，使光纤位移干涉仪能够应用于粗糙表面探测。

物镜 4、目镜和 CCD(Charge-Coupled Device)构成显微放大系统。一方面它可以测量聚焦光斑尺寸，另一方面它还可以用于观测激发光斑和探测光斑的位置。实验时，先用孔径为 5 μm 的针孔作模拟样品，将激发光束和探测光束调至共线，使干涉仪探测点正好在激发点的背向正中心。这样布局的好处是使超声波在样品中的行程等于样品厚度，从而提高声速测量的精度。

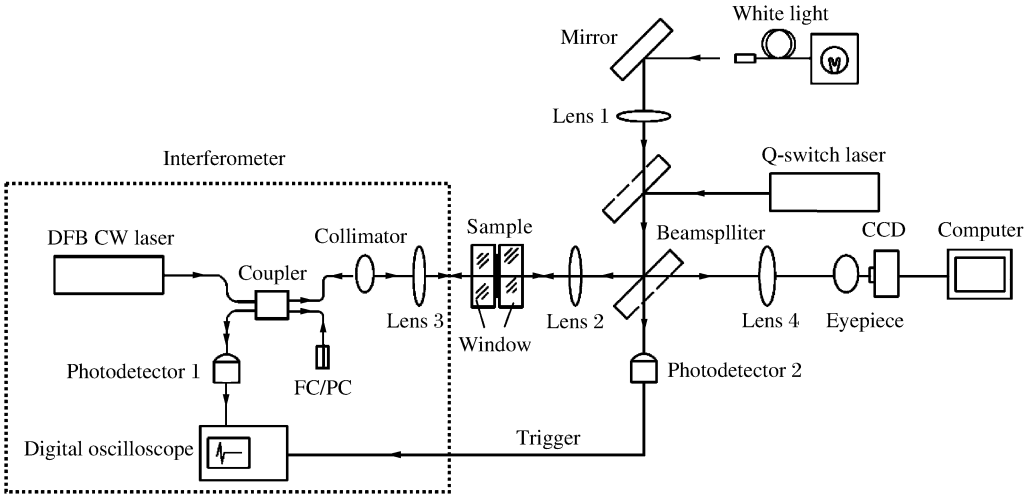


图 2 激光超声测试系统示意图

Fig. 2 Sketch diagram of laser-based ultrasound system

从激发光束分出一小部分由快速光电二极管 2 探测，用以记录系统的触发信号和超声波的产生时间。快速光电二极管的响应时间为 300 ps，配合宽带示波器可以很好地测量纳秒激光器的脉宽。

薄样品为铜箔(厚度小于 250 μm)，购于 Alfa 公司，表面未作任何处理。厚样品为无氧铜，两面经过抛光。样品皆由两块∅30 mm×3 mm 的 K9 玻璃夹持，用以获得较强的超声位移信号。

4 实验结果及分析

分别对名义厚度为 25、50、100、250 和 1 500 μm 的铜样品进行纵波声速测量，得到的实验信号波形如图 3 所示。其中：纵坐标为示波器记录的干涉仪输出信号强度，为便于区分观察，对干涉仪信号沿纵轴进行了平移；激光脉冲信号峰值对应时间 t_0 为激发激光到达样品表面时刻，并认为是超声波产生时刻。将干涉信号的起跳点作为超声纵波达到样品背面干涉仪探测点时刻。激发激光信号传输时间与干涉仪信号传输时间之间的固有延迟时间均进行了校准。

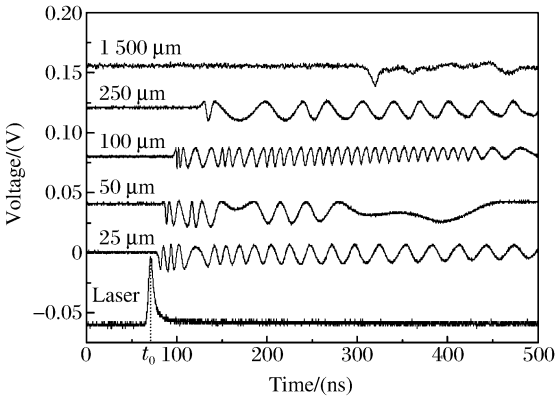


图 3 铜样品的原始干涉仪信号

Fig. 3 Raw waveform of copper sample

铜样品纵波声速的测量结果列于表 1，其中样品厚度为千分尺实测厚度。由表 1 可知，利用激光超声技术得到的铜样品纵波声速的平均值为 4.71 km/s，这与 Marsh 等人[12]的结果(4.76 km/s)较为一致，说明上述实验技术对于 25 μm 厚的铜箔仍有足够高的精度。

实验测量的最大偏差为 0.24 km/s,这主要归因于铜箔厚度和超声波走时的测量精度不高。如果提高箔厚度的测量精度,并选用更窄的超声激发激光脉宽,可获得更高的介观尺度材料声速测量精度。

表 1　激光超声技术测得的铜样品纵波声速

Table 1　Longitudinal wave velocity of copper measured by laser ultrasonic technique

Nominal thickness /(μm)	Measured thickness /(μm)	Transmitting time /(ns)	Longitudinal wave velocity /(km/s)
25	26	5.4	4.81
50	62	13.2	4.70
100	112	24.5	4.57
250	251	52.5	4.78
1 500	1 495	319.1	4.68

5　结　论

建立了一种可测量介观尺度材料声速的激光超声系统。利用该系统,测量了不同厚度铜箔的纵波声速。实验结果表明,该激光超声系统可以用于测量几十微米至几毫米厚的材料的纵波声速。如果选用更窄的激光作为超声激发光源,可以获得更高的测量精度。

References:

[1] Scruby C B, Drain L E. Laser Ultrasonics: Techniques and Applications [M]. New York: Adam Hilger, 1990.

[2] Chinn D, Huber R, Chambers D, et al. Acoustic Characterization of Mesoscale Objects, UCRL-TR-229835 [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2007.

[3] Chigarev N, Zinin P, Ming L C, et al. Laser Generation and Detection of Longitudinal and Shear Acoustic Waves in a Diamond Anvil Cell [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(18): 181905.

[4] Pezeril T, Ruello P, Gougeon S, et al. Generation and Detection of Plane Coherent Shear Picosecond Acoustic Pulses by Lasers: Experiment and Theory [J]. Phys Rev B, 2007, 75(17): 174307.

[5] Emery P, Devos A, Ancey P. Picosecond Ultrasonics: A Technique Destined for BAW Technology [A]//1st International Symposium on Laser Ultrasonics: Science, Technology and Applications [C]. Montreal, Canada, 2008.

[6] Rossignol C, Rampnoux J M, Perton M, et al. Generation and Detection of Shear Acoustic Waves in Metal Submicrometric Films with Ultrashort Laser Pulses [J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(16): 166106.

[7] Decremps F, Belliard L, Couzinet B, et al. Liquid Mercury Sound Velocity Measurements under High Pressure and High Temperature by Picosecond Acoustics in a Diamond Anvils Cell [J]. Rev Sci Instrum, 2009, 80(7): 073902.

[8] Armstrong M R, Crowhurst J C, Reed E J, et al. Ultrafast High Strain Rate Acoustic Wave Measurements at High Static Pressure in a Diamond Anvil Cell [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(10): 101930.

[9] Huber R, Chinn D, Balogun O, et al. High Frequency Laser-Based Ultrasound, UCRL-PROC-215718 [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2005.

[10] Decremps F, Belliard L, Perrin B, et al. Sound Velocity and Absorption Measurements under High Pressure Using Picosecond Ultrasonics in a Diamond Anvil Cell: Application to the Stability Study of AlPdMn [J]. Phys Rev Lett, 2008, 100: 035502.

[11] Yang G G. Modern Optical Testing Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. (in Chinese)
杨国光. 近代光学测试技术 [M]. 杭州:浙江大学出版社, 1997.

[12] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [M]. California: University of California Press, 1980.

Sound Velocity Measurement of Mesoscale Objects Using Laser Ultrasonics Technique

MA Yun, ZHANG Yi, LI Jia-Bo, CAI Ling-Cang, LI Jian-Feng, WANG Xiang, WENG Ji-Dong, LI Jun, JING Qiu-Min, LI Jun

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

Abstract: A laser-based ultrasound system was designed and built to measure the sound velocity of mesoscale (tens of micrometer- to millimeter-sized) objects. The system uses a Q-switch laser with 6.3 ns pulse width for excitation of broadband ultrasonic waves, and an optical fiber displacement interferometer for detection. The longitudinal acoustic wave velocities of the copper foils with different thicknesses were presented, which exhibit a relatively high degree of accuracy.

Key words: laser ultrasonics; sound velocity; interferometer; copper

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性，论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6 000～8 000 字以内，请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用网站(www.gywlxb.cn)的作者投稿系统进行投稿。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密，投稿时请附本单位保密审查意见，由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在 20 字以内。文中图、表应有自明性，所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名，请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等)，以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等)，以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号)，简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性，严禁抄袭，文责自负，请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要 摘要用第三人称书写，语言要简练，应有具体内容。要求：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，重点包括 4 个要素：即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。中文摘要应在 200～400 个字之间，英文摘要不少于 120 个实词。为便于 Ei Compendex 以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献，引用条数不宜太少，并尽量引用近期国内外文献，采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等，并被 Ei Compendex 光盘收录。凡经本刊录用的稿件，其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在 3 个月内刊出。

通信地址：四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

网　　站：www.gywlxb.cn；　电子邮件：gaoya@caep.ac.cn (征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；　传　　真：(0816)2485139

《高压物理学报》编辑部