

光致声波及其应用

尚志远 董彦武 仝杰

(陕西师范大学应用声学研究所,西安 710062)

着重讨论了光致声波的四种机理:电致伸缩机理、热膨胀机理、汽化机理和光击穿机理。概略地介绍了光致声波的检测方法和可能应用于材料的无损评价和介质中某些参数的测量以及海洋中的声探测等领域。由于光致声波具有非接触的特点,可应用于一些特殊环境而更具有广阔的发展前景,最后提出了迫切需要研究解决的光声转换效率和检测器件灵敏度的问题。

光致声波是近几年来发展起来的产生声波的一种新技术。早在19世纪末,A. G. Bell就观察到光声效应(photoacoustic effect)。即用强度调制的光束射入闭合的介质空间时会产生声波的效应。60年代,R. M. White又提出用各种辐射来激发介质使其产生声波的理论。早期,由于激发的光强弱,被激样品的发声效率低以及接收器件的灵敏度低等多种原因,使这项技术的研究进展缓慢。自从大功率脉冲激光器问世以来,这项工作得到迅速发展,形成了激光超声技术。并在检测声学与材料的无损评价(NDE)技术中已经开始应用。它在高温、有毒以及放射性等恶劣的环境中,更会显示出这种非接触检测的独特优点。由于用激光激发样品产生声波时,可以采用窄脉冲激光,所以声波也是窄脉冲。它在空间有着极高的分辨率,特别适合于超薄材料的检测和物质微结构的研究。另外,在探伤中,它还能极细致地反映材料的缺陷性质和特征。光致声波技术由于有突出的优点而正在崛起并被广泛关注。下面就其产生的机理,检测的方法和存在的问题作一简单介绍。

一、光致声波的机理

光致声波是产生声波的一种新技术,它的机理会由于不同的光强及作用的介质不同而有所不同,大致可归纳为以下四种。

1. 电致伸缩机理

电介质在外电场的作用下会诱导电极化而引起电介质的形变,这种现象称为电致伸缩效应。电极化由三个因素组成:(1)电子的位移极化;(2)离子的位移极化;(3)固有电矩的转向极化。诱导电极化是对所有电介质而言,即无论是晶态物质还是非晶态物质,也不论是中心对称性的晶体还是极性体乃至液体,它们都具有电致伸缩效应。光波是电磁波,而且是波长极短的电磁波。介质在强光能量的作用下,诱导电极化引起形变产生声波,其形变与电极化强度平方成比例。一般情况下,由于电极化强度很小,因此电致伸缩效应引起的形变是微小的。

2. 热膨胀机理

光致声波的效率一般非常低。为了获取较高的声能,大多采用脉冲宽度极窄的高能量密度光束入射介质。对于不透明介质,在脉冲光照下,部分光能被浅表层吸收,一部分被反射。吸收光能的浅表部分,温度上升,随之这部分介质发生膨胀,受热膨胀后介质发生形变。(如图1所示),其形变的大小与入射到介质上的光能量成正比。由于入射的光波是脉动的,浅表部分的周期性形变在周围介质中激发声波。激光射入样品,不仅能产生声波,而且样品在强激光作用下,在其周围几百微米范围内,由于样品局部很快受热膨胀产生冲击波^[1],但这个冲击波

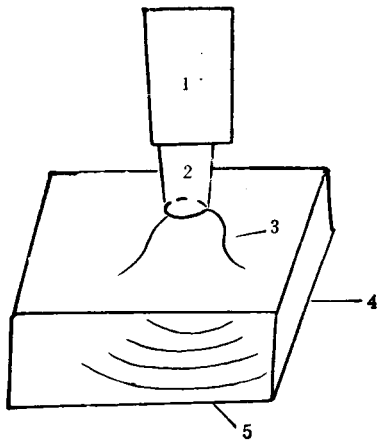


图1 激光使介质受热膨胀后产生声波示意图
1.激光器; 2.光束; 3.吸热膨胀后介质产生的形变;
4.样品; 5.声波

随距离增大而急剧衰减成为声波。

3. 汽化发声机理

对于液体介质,吸收光能后产生热膨胀。若这时光能量继续增加,足以使介质中被光作用的区域内的温度达到沸点,直至汽化。在汽化的初级阶段为弱汽化。光能量再增加,被光作用的部分沸腾。形成汽化的高级阶段,也叫汽化阶段。此时,介质的光辐照区聚集大量的蒸气,这些蒸气在脉动光源照射下产生涨缩形成声波。介质从受热膨胀到汽化是一个相变过程。这个跃变过程用数学来描述是很复杂的。

4. 介质的光击穿机理

介质的光击穿一般是对流体而言。当入射到液体中的光能量密度很高时,在液体中,在光束聚集的圆柱腔内会发生光击穿。这时,在圆柱体内有微气泡,并且有发光的等离子体。这些等离子体吸收光能量,使腔体膨胀产生声波。介质的光击穿机理在四种发声机理中,是光声转换效率最高(可达30%以上)的一种。光在介质中产生声波,其声压振幅和介质的光吸收系数成比例。

以上四种光激声波的机理,除电致伸缩外,从热膨胀—汽化—光击穿是光能量逐步增加的过程。其实,当光波辐照介质时,这四种或更多种的作用是随着照射的光能强弱而在不同的程度上发生的。

激光产生超声波,不总是沿垂直方向传播的,也可以依一定的角度 α 射出。只要把激光束按一定速度 v 偏转即可。此时,速度 $v = c / \sin \alpha$, c 是介质中的声速。但要求偏转的激光束是窄激光束,如图2所示。一束激光沿样品快速偏转,获得在一定方向上传播的声波。

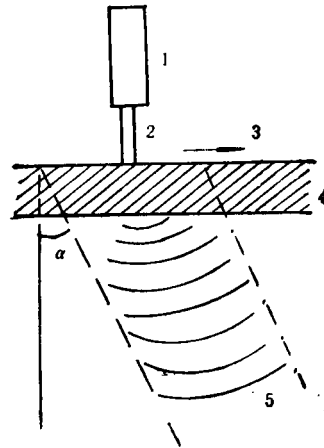


图2 通过偏转激光束获得一定角度的声束
1.激光器; 2.窄光束; 3.光束偏转方向;
4.样品; 5.激励声波的方向

二、光致声波的检测方法

要知道光致声波的存在及其性质,检测手段是一个关键技术。光声信号的检测分为两大类:

1. 声信号的光学检测

光学检测中又分为干涉法和非干涉法。而干涉法是基于迈克耳孙干涉仪的原理而建立的。当聚焦的激光束照射于被测的样品表面时,入射的聚焦的激光束被表面反射并与参考光束(由光源分离出的)发生干涉,使光束发生频移。然后由接收器检测这些频移光束,即可有效地测量表面的振动位移。非干涉法的检测原理是:当入射样品表面的检测光斑直径小于被激发的声波长时,由于声波的起伏而使反射光束偏转,其偏转的大小由位置敏感器接收。这个偏转量直接与声波的振幅及其性质有关。当检测的光斑直径大于声波长时,可采用光衍射

法（布拉格衍射或拉曼-纳斯衍射）进行检测。这时样品表面产生的声波等同于一个空间光栅，光通过时发生衍射。利用光通过声波时的衍射，不仅能确定声波的存在，而且能确定声波的传播形式和方向。

2. 光声信号的非光学检测法

非光学检测法有以下三种：

(1) 电磁声换能器 (EMAT)

电磁声换能器既可以产生超声波也可以接收超声波。接收超声波时用的是它的逆效应，即当激光作用在导体上产生声波时，导体的一部分发生形变。若把该导体置于一静磁场内，导体内感应出涡流。这一涡流可以用放置在导体表面附近的线圈耦合而得到。电磁声换能器可以用间接的和非接触的方式接收光声信号，且接收频带较宽（0—2MHz）。其缺点是灵敏度低，而且仅限于金属材料的检测。

(2) 电容声换能器 (ESAT)

电容声换能器的工作原理如图 3 所示。被

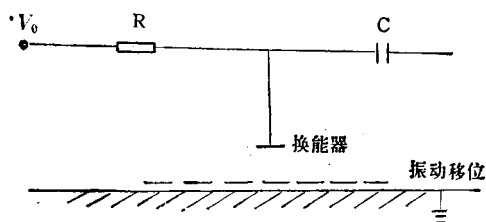


图 3 电容声换能器原理图

检测的样品作为电容声换能器的一个极板，另一个极板通过一个电阻 R 加一较高的直流偏压 V_0 。当被测样品表面产生位移后，平板电容器之间距离发生变化，因而电容量发生变化，这样就可通过电容 C 输出交变的电压。电容声换能器与电磁声换能器相比响应频带很宽（10 kHz—10MHz），但检测灵敏度也较低，同样只限于对金属材料的检测。

(3) 气介超声换能器

气介超声换能器作为检测空气中的光声信号是由 PZT 类的接收型压电材料构成的。基本形式和性能类似于一般压电换能器。所不同的是在换能器前表面上附有一个 $1/4$ 波波长的

物理

匹配层，以改善换能器与空气的阻抗匹配，减少声能损失。气介超声换能器的灵敏度较高，但频带窄，所以用它检测宽频带的脉冲光声信号不太适宜。

三、光致声波的应用前景

光声声源比常规的声源（如压电声源等）有突出的优点，因而有广阔的应用前景。

1. 光致声波在材料无损检测与评价中的应用

脉冲激光束射入固体介质产生的声波可作为无损检测的声源。发声器件不与被检测工件接触，而且不需要耦合剂，这就给检测工作带来许多方便。就其分辨率来说，常规的声学检测方法（如声脉冲回波法）由于时间分辨率受到整个系统脉冲宽度的限制。其空间分辨率较低。在一般情况下，利用压电换能器激发的声脉冲很难达到 ns 级。对钢来说，1ns 的时间分辨率（ $\Delta z = \frac{2\Delta S}{c}$ ， c 是声速）相当于空间分辨率约

2.5 μm 。由于工业技术的不断发展，超薄材料的生产量随着需求量的增加而增加。超薄材料及其叠层压粘等结构的质量检验和评价技术需要相当窄的声脉冲。因为激光脉冲宽度可小于 10^{-14}s (10fs 级)，产生的声脉冲宽度极窄。其空间分辨率可达几十至几百埃，因此特别适合于对上述薄层材料的检测与评价。H. Nakano 等人^[2]用 Q 开关 Nd:YAG 激光器，产生脉冲半宽度为 10ns 的激光，去照射横截面为 $30 \times 5 \text{ mm}^2$ 、厚度为 $50 \mu\text{m}$ 、处在高温下 ($t > 1000^\circ\text{C}$) 的硅板，产生非对称型板波 (Lamb 波)，而 Lamb 波对于检测和评价薄板材料是相当成功的。美国约翰霍普金斯大学无损评价中心的 A. D. W. Mckie 等人^[3]用激光线阵产生极窄带超声波。他们的方法是选择检测角度和激光阵元之间的最佳空间组合来达到产生窄带声波的目的。同时提高了声波的方向性，也抑制了噪声。

2. 用光致声波测量介质中的某些参量

由于激光超声具有非侵入性和窄脉冲大带宽（0—100MHz）等特点，适合于测量介质中

的声速^[4]和衰减及其随温度、频率的变化,且测量精度较高。其方法和经典的压电超声技术基本相同,这里不再赘述。近几年来也有报道用激光超声技术测量液体中的弱光吸收系数^[5,6]。这种方法测量精度比较高,如对水,可达 10^{-4} cm^{-1} 量级

3. 光致声波在海洋探测和研究中的应用

在地球上,海洋面积约占2/3。海洋中的各种动植物、矿产以及石油等是人类的宝贵财富。海洋中的声探测技术是开发这些资源的重要组成部分。由于无线电波在水中强烈的衰减,所以声呐是水下探测和通信的有力工具,而激光超声中的激光器可装在距海面几十米的地方,既可遥控又可扫描。因此,它可用在海洋中的鱼群探测,海底的地貌特征的研究和海洋深度的测量^[7]。同时,用激光超声研究海洋波浪形成因素与气候条件的关系也取得成功。目前,由于激光超声的系统结构庞大,设备昂贵,不便于推广应用,有待进一步研究改进。

四、急待解决的几个问题

光致声波的发展虽有不可估量的前景,但尚存在一些问题急待研究解决。

1. 提高光声转换效率问题

光声转换效率太低是阻碍激光超声开发利用的主要原因之一。加大激光辐射能量是提高光声强度的主要途径。但加大激光辐射能量是有限度的,过大会损害样品表面。近来,一些学者^[8]开始研究如何提高光的吸收效率,减少光的散射,以提高光声转换效率。最简单的办法是在样品表面涂上各种不同的液体涂料,这种涂料会对光能量的吸收起到一定的增强效应。表1说明了样品表面涂层会对纵波幅度产生不同程度的影响。如果材料对光能量吸收强,那么这就相应地提高了信噪比,降低了对光源辐射功率的要求。以上方法仅是初步探讨。对如何提高光声转换效率这个问题,尚待进一步研究。

表1 样品表面涂层对纵波幅度的影响

表面涂层	与未涂层表面相比纵波幅度增加的 dB 数		
	铝	铜	低碳钢
轻油	25	27	26
硅脂	21	24	26
水	21	23	24
丙酮	25	24	32
无光黑漆	22	36	38
无光白漆	25	29	22

2. 提高光声信号检测灵敏度问题

如果检测光声信号的设备非常灵敏,则同样可以降低对激发声信号光功率的要求。在本文第二部分介绍的有关光致声波的检测方法中,提到了两类检测方法,即光学的和非光学的方法。光学检测法与压电换能器相比一般灵敏度都较低,但光学检测法特别适合于窄脉冲激光产生的宽频带超声检测。在光学检测法中,如果采取一些相应的措施,改善或补偿由于环境干扰引起的噪声,则相应可以提高检测灵敏度的极限值。因此,提高光学检测法的检测灵敏度是目前积极发展和探索的目标之一。另外,在非光学检测法中,气介超声换能器在检测空气中的高频光声信号方面具有灵敏度高的优点,但由于其频带较窄,对于检测脉冲光声信号不太合适。如果能在保证检测灵敏度的条件下,尽量扩展频带,以适应脉冲光声信号检测的需要,岂不是两全齐美的办法。笔者认为,在激光超声技术的研究、开发和应用中,当前最紧迫需要解决的问题不外乎以上两个方面。如果这些问题能很快得到妥善解决,光致声波这项新技术将会上升到一个崭新的阶段。

- [1] A. D. Zweig et al., *Appl. Phys.*, B54 (1992), 76.
- [2] H. Nakane, et al., *Ultrasonics*, 29 (1991), 230.
- [3] A. D. W. Mckie et al., *Ultrasonics*, 27 (1989), 323.
- [4] J. D. Aussel et al., *Ultrasonics*, 27 (1989), 165.
- [5] H. M. Lai et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, 72 (1982), 2000.
- [6] A. C. Tam et al., *Appl. Opt.*, 18 (1979), 3348.
- [7] G. D. Hickman et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, 73 (1983), 840.
- [8] 沈俊等, *声学学报*, 16(1991), 407.