

脉冲超声在固体中散射的理论实验研究¹⁾

——国家自然科学基金项目

应崇福 张守玉 沈建中 谭建伟

(中国科学院声学研究所,北京 100080)

文章首先阐明,由于超声无损检测技术的发展及更高的要求,脉冲超声散射问题的研究不仅具有重要的学术意义,而且有十分紧迫的实际需要。

本课题从 1979 年开始,十年来在理论和实验上都取得了一定成绩。理论上创立了一套解决脉冲问题的方法,所获散射问题的解具有明确的物理意义;实验上成功地使用了“脉冲光弹显示技术”,不仅可以验证理论结果,而且在无理论可循时也能先显示出实际现象。最后,文章以两个比较基本的散射问题为例说明我们的工作,并提供了光弹照片。

超声波在介质中传播时,会遇到障碍物、缺陷、各类边界等不均匀区域,入射的波将被反射、折射、绕射及波模式被转换,我们统称这些现象为“散射”,那些不均匀区则称为散射体或散射区。在实际生活中,固体介质中存在不均匀区的可能性是很大的;无损检测等实际工作恰恰正是对这种区域的探测。所以,超声在固体中的散射问题,是超声学中的一个基本问题,也是超声一些应用领域中的基础问题^[1]。

在工业高度发展的今天,无损检测常是不可缺的。例如,对钢材、铝材、复合材料、工业陶瓷等需要做出无损的检测及评价;对核电站的高压容器、航天飞机的一些构件都必须无损地定期监视。目前在无损检测诸手段(包括射线法、电磁法等)中,超声波方法占 50% 以上。此外,在医学诊断、地质勘探、建筑工程等方面,也常使用超声波来检查。近年来,对超声检测的定量化要求越来越高,因此需要研究并确定不同类型的散射体对不同类型入射超声波的散射特性,并反过来确定这个散射体的状态,例如它的形状、大小、位置等。从散射波的分布来了解媒质内部散射区的特征,称为逆散射问题;散射区是怎样散射超声的,则有时相对地叫正散

射问题。要解决逆散射问题,在一定程度上要先解决正散射问题。传统声学所讨论的媒质是流体,包括气体和液体。对流态介质,已进行过多年的散射分析,取得了一些有益的结果。在开辟超声应用后,媒质对象扩大到固体,固体中的散射问题从 50 年代开始得到认真的考虑。到 70 年代后期,正如上面所提到的由于定量检测的需要,散射课题得到新的、更广泛的重视,至今不衰。固体内超声的传播现象,比起在流体中要复杂些,因为即使在各向同性的固体中,也存在着纵波和横波两种体波模式,它们之间在一定条件下还会互相转换,在有边界的情况下,又可能产生瑞利波、兰姆波等波导波。在各向异性的固体中,传播现象将更加复杂。

我们对散射问题的研究,是从 70 年代末开始的。十年来,逐渐形成了自己独特的研究方法,取得了一些成绩。首先,我们选取难度较大(相对连续波)的脉冲超声波作为研究对象,因为在实际应用中很少用连续波,而常用脉冲调制波或单脉冲波。在散射理论上,完善了一套对脉冲声波混合边界问题的分析方法^[2,3],对一

1) 本课题获 1989 年国家自然科学基金三等奖,1988 年中国科学院科技进步一等奖。

系列脉冲散射问题作了较深入的研究,得到了这些问题中声波散射场的近场解,而近场分析是声学中公认的难题。所得理论解的物理意义明确,能够和实验观察直接对比,使理论结果得以验证。在实验上,我们使用了能够直接看到声波传播和散射过程的“动态光弹显示技术”^[1],借助这项技术,可以使透明样品中的声波清楚地显示出来,在调节声和光之间的延迟后,可以进而获得传播及散射过程中各个不同阶段的瞬时图象。我们较系统地研究了固体中的散射现象,拍摄了迄今国际上可以算最佳的系列照片、录像和电影,生动地演示了这些散射过程,不仅

验证了我们的理论,而且在有些无理论可循的情况下也显示了相应的散射现象。

下面我们例举几个比较简单但具普遍意义的散射现象的研究结果,附有光弹照片,以说明我们的一部分研究工作。

超声调制脉冲波是实际工作中常用的一种入射波形,这种波在介质中传播,经常遇到具有尖锐边角的裂缝或具有圆滑边界的空洞。图1显示的便是两种典型情况,即裂缝尖端和圆柱形空腔对入射纵波平面波的散射场^[2,3]。当超声波从上而下平行于裂缝运行,碰上裂缝的尖端时,即被尖端散射,所散射的波包括四部分:

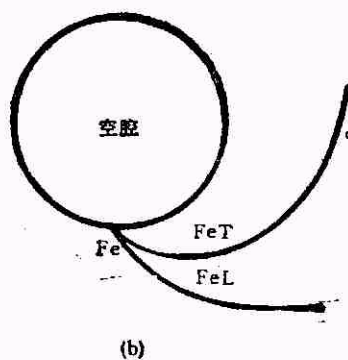
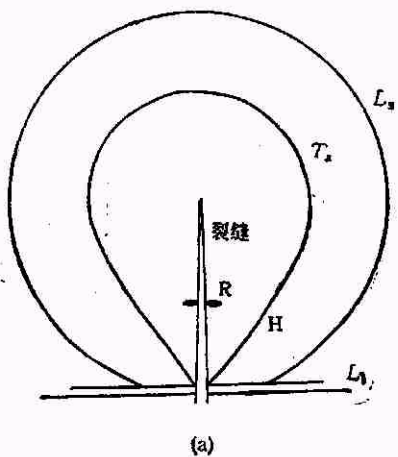
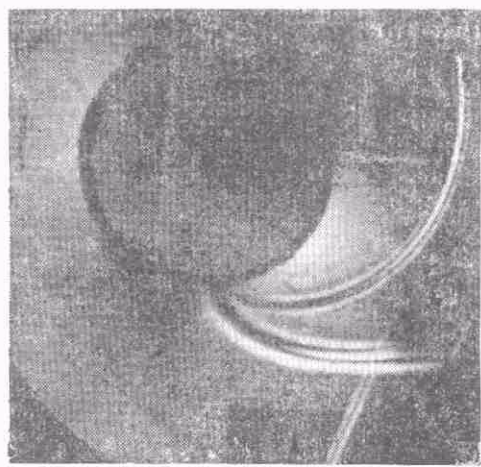
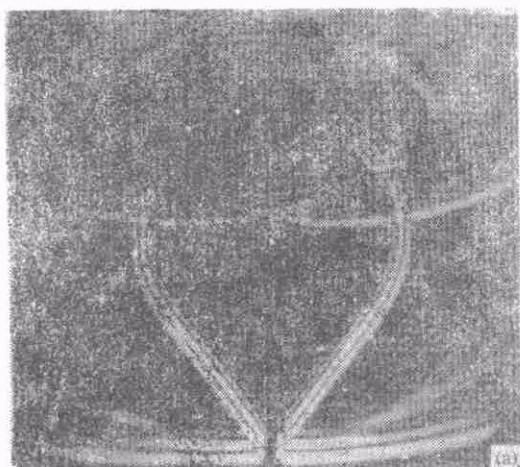


图 1

(a) 裂缝尖端对纵波平面波的散射光弹图; (b) 纵波爬波的光弹照片

散射纵波(L_2)、散射横波(T_2)、头波(H)及表面波(R)。图1(a)显示了这样的散射场,几乎

达到裂缝底部的是入射纵波(L_1)。在理论上,我们计算了 0° 入射(即平行于裂缝入射)的情

况,也计算了任意角度入射的情况,结果都与实验符合得很好^[2]。

当同样的纵波垂直入射到一个圆柱形空腔时,将发生有趣的爬波现象,如图 1(b)所示,入射纵波自上往下传播,碰到腔壁时,首先被反射,在到达圆周上切点以后,入射波一部分继续照直前行,一部分则沿腔壁向阴影区绕行,沿腔

壁爬行的波我们称为爬波 Fe。爬波在行进中同时向介质内辐射纵波(FeL)及横波(FeT),使几何阴影区充满了声波。由于爬波不断地辐射能量,所以衰减得比较快,它的脉冲速度可以从光弹图上测量出来,在本图的实验条件下,即空腔直径约 20mm,声的频率 2.5MHz 时,爬波速度约为直行纵波体波的 96%。

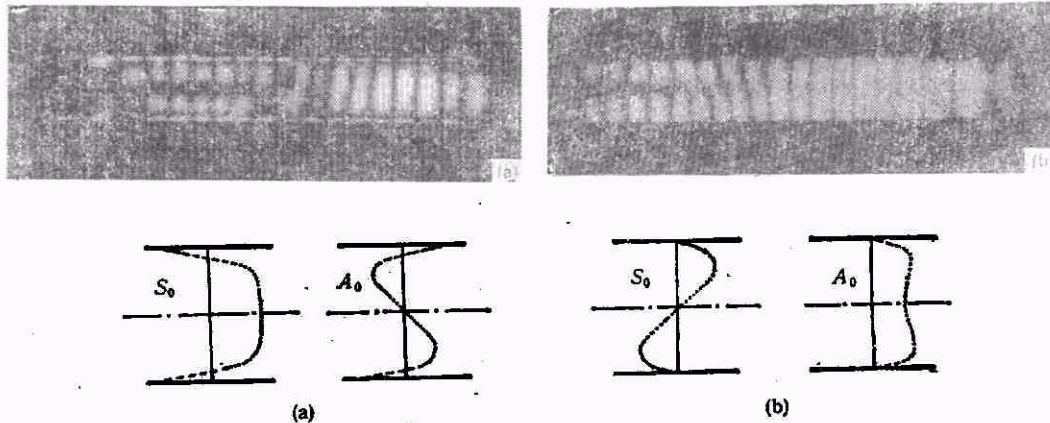


图 2 两种低阶模兰姆波的正应力及切应力沿板厚方向的分布,实验光弹照片及理论计算结果的对比。

(a) 正应力; (b) 切应力

声波在薄板中会形成板波,这是一种导波,在板的两边都是真空或空气情况下将形成不衰减的沿板面方向传播的兰姆波。兰姆波分对称及反对称两类,每一类又包括许多种模式。我们成功地激发并用光弹法观察了不同模式的兰姆波,观察它们的应力分布及传播特征。图 2 显示了 S_0 及 A_0 两种模式的板波应力分布图(上),并与理论计算结果(下)相对照。此外,我们还研究了低阶模在板端反射中的模式转换现象,观察了板中裂缝对兰姆波的散射^[6,7]。

除了上述几例外,我们还对其它一些类型的超声脉冲受多种形状散射体的散射问题进行了较复杂的理论计算和实验研究,例如:带状裂缝对不同角度入射的平面横波的散射;多个柱形孔对平面纵波的散射;直角边界对纵波和横波的散射;瑞利波受有限深度表面裂缝散射等问题,都得到了明确的理论结果或清晰的散

射图像,这些都有助于人们对固体中的散射现象有比较可信的直观的了解。今后,还有许多比较实际但也比较复杂的散射问题需要我们去研究、解决。理论上还可以开辟更高深的路子。光弹实验也应扩展到更多的模拟材料中去。而在正散射问题的基础上,对逆散射问题也应逐步进行更直接的研究,以求获得更直接的应用。

- [1] C. F. Ying, *Physical Acoustics*, Academic Press, INC. Vol. 19 (1990), 291.
- [2] 沈建中等, *声学学报*, 10-1(1985), 13.
- [3] 沈建中等, *声学学报*, 14-2(1989), 81.
- [4] C. F. Ying et al., *Nondestructive Evaluation*, 4-2 (1984), 65.
- [5] 应崇福等 *中国科学*, No. 6 (1981), 681.
- [6] Zhang Shouyu et al., *Materials Evaluation*, 46 (1988), 638.
- [7] Shen Jian zhong et al., *Chinese Journal of Acoustics*, 9-1 (1990), 27.