

成果与应用

超声波在固体中传播和散射的研究

应崇福 张守玉 沈建中 谭建伟

(声学研究所)

一、概 述

超声波在固体中的散射问题,是超声学科中的一个基本问题;也是超声一些应用领域中的基础问题。在媒质中,超声一经产生,即向前传播。在多数情况下,媒质可以被看作是均匀的,但不能是无限的。由此,超声的传播终将遇到媒质的边界;另一种可能是,在均匀媒质的内部,有局部的不均匀区,此时超声在到达媒质的边界之前,先撞上了这个区。超声碰上了媒质的边界或在媒质内部的局部不均匀区,原来单向传播的超声波被干扰向各方散开的现象,称为散射现象。

本文着重讨论均匀媒质内部存在局部不均匀区的问题。

在实际生活中,存在不均匀区的可能性是很大的。于是常需要了解它是否存在,以及它是什么性质的。对不透明固体,需要用非光学的检测手段。内部的不均匀区常称缺陷或伤,文章中有时称之为散射区或称散射体。常用超声对固体材料内部的伤进行无损检测。通常对钢材、铝材、复合材料、工业陶瓷等,以及像核电站的高压容器、航天飞机的一些结构等大小部件,都需要进行无损探伤。目前在无损检测诸手段(包括 X 射线、 γ 射线等等)中,超声的使用率约占 50% 以上。此外,在医学诊断、地质勘探、建筑工程等方面,也常使用声波或超声波。了解超声遇到非均匀区的散射性能,从而根据不同类型非均匀的散射特征,反过来确定这个区的状态,例如区的形状、大小等,成为检测应用的基础。

从散射波的分布来了解媒质内部散射区的特征,称为逆散射的问题。散射区是怎样散射超声的,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。对流态媒质,已进行了多年的散射分析,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,固体中的散射问题成为新的课题,从 50 年代才开始得到认真的考虑。到 70 年代后期,随着定量检测需要的增长,散射课题得到新的、更广泛的重视,至今未衰。固体内超声的传播现象,比起流体要复杂些,主要原因是,不计固体可能有的各向异性,在固体内可以存在横波,而且纵波和横波之间有模式转换,即纵波和横波的耦合。

我们对散射问题的研究,是从 70 年代末开始的。当时首先建立了用动态光弹技术显示声场的设备,可直接观察透明体内超声传播的情况。随后重点研究了超声散射的情况,并进行了部分有关问题的理论分析。发表了三篇论文。

动态光弹技术是力学工程中光弹技术的延伸,国外也是在 70 年代得到完善的。力学工程中长期用光弹技术来直接显示透明固体内的应力分布,肉眼可以看到。采用动态光弹技术则可以眼见透明固体内运动着的应力区,而传播着的声波正是运动着的应力区。声波运动的速率很高,在固体内的数量级为 5×10^3 m/s,但用闪光照耀可以抓住一刹那的状态,配以重复照

耀则可以得到比较明亮的图象,而改变照耀的时刻又可以显示任何一刹那的情景。这样可以见到超声传播或散射的全过程。固体必须是透明的,我们常用光学玻璃,但声波在其中传播和散射的规律,同非透明固体应当是类同的。我们的理论分析以研究超声脉冲和求算散射的近场为主,这不同于较通常的重点分析超声连续波在散射远处的行为。更重要的是,我们采用动态光弹技术严密地验证理论结果,还用实验观察来指导理论计算,这样分析比较可靠。需要提到,动态光弹技术目前还不能较简易地给出定量的测量数据,此外,只能有意义地观察二维声场。

关于具体的散射内容,我们研究了固体内几种不同类型声波分别受几种不同形状散射体的散射。散射体主要是一些空腔,如圆柱形孔或裂缝,但也有其它类型,如固体的一个角。所谓声波类型,常见的有前面提到的纵波和横波,这两类波是固体内部的基本波型,但在固体的表面,或在两种固体的界面,还可以存在其它类型的声波,像在固体表面,可以有沿表面浅层传播的表面波,这就是在地震现象中熟知的瑞利波。假如固体材料在一个方向的尺寸特别小,其结果把体内声波集中导向这个方向,这个材料便形成波导,而波导内存在导波。导波实际上是通常的纵波和横波多次反射和相互转换的综合体,但常常具有可以独立地简便描述的性能。这在电磁波里也是常见的,我们研究了薄板内通常称为板波这种类型的声波,研究了它的一个散射问题。需要指出,由于动态光弹技术目前只能观察二维声场,也由于回避过于复杂的计算,我们的散射都限于是二维的。

二、理论和实验结果例举

下面举两个我们做过的实例。例一,纵波或横波脉冲在固体内部传播时遇上了一个与传播方向相垂直的圆柱形孔,孔的直径比声波波长大一个数量级左右。理论上曾有人预计,声波会绕着孔壁“爬行”,但未经验证。我们用动态光弹技术对超声横波受圆柱形孔的散射情况进行了观察,得到如图 1 所示的时间序列照片图中光学玻璃里孔的直径是 10.7 毫米,超声频率是 2.5 兆赫。图 a 显出一个平面横波脉冲由右上角向空腔传来,随后的几张照片(时间序列按 b, c, …… f)显出,这个横波不是被空腔挡住,在空腔的背后形成几何阴影区,而是绕着空腔的壁爬行,几乎爬了一圈。我们还拍了电影和录了像,更明确地显示了爬行现象,引起了国内外同行们的兴趣。对空腔内充水以及空腔是半圆形的情况也曾拍摄出类似的照片。

例二,固体内部有一个有限宽的长薄平面缝,在垂直于缝长的方向射入一个平面纵波或横波脉冲,声波和缝面的夹角可是任意的,如图 2 所示。我们从理论上和实验上来了解入射声波是怎样被薄缝所散射的。缝的问题在理论上比较复杂,因为牵涉到尖锐的两个缝端,但在应用上比较重要,因为薄缝模拟裂纹,它的两端是应力集中的区域,裂纹比起气泡等表面圆滑的缺陷来,是更危险的伤。理论上我们从固体内的波动方程着手,采用了单边和双边拉氏变换的方法,又由于薄缝是有限宽的,边界条件也相应地只在有限宽度上有给定值,我们还引用了 Wiener-Hopf 技术。按这些步骤,引入已知的人射声波表达式,我们试图推算拉氏域中散射声波应力的解。但遇到一组联立积分方程。为此,我们引用了一项近似,从而求得一种近似的解析解,适用于缝宽比声波波长较大的情况。为了进一步寻求时空域中的解,接着采用了 Cagniard-deHoop 方法来逆转换拉氏域中的解,并对所得到的数学式逐项解释了它们的物理意义,由此识别入射声波被薄长裂缝散射出来的各类声波在不同时刻在空间的波前形状和位置。

一般地说,在上述问题中会出现如下的散射图象:斜入射平面声波脉冲从远处传来,首先

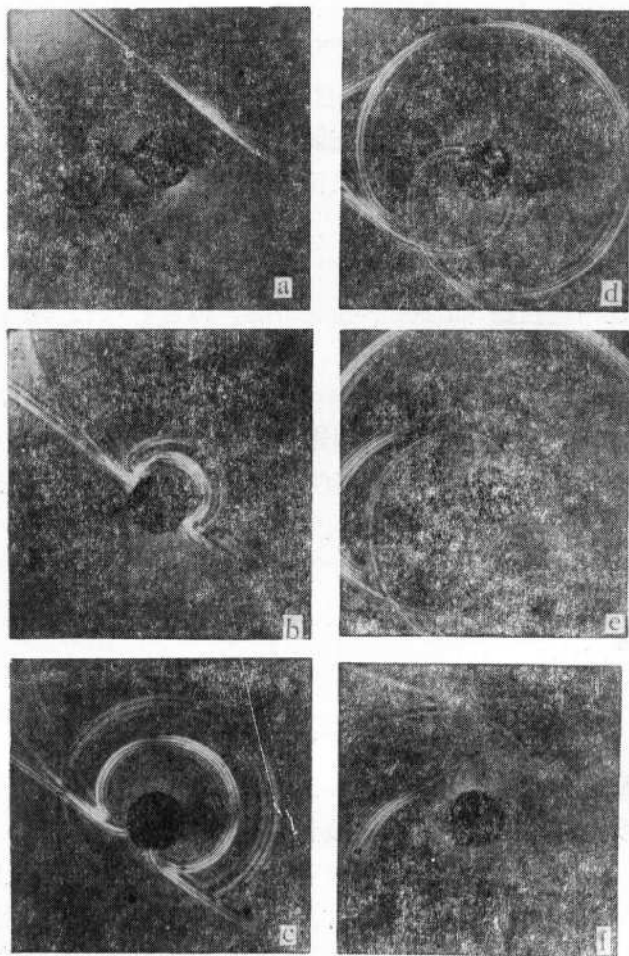


图 1 平面横波脉冲投射到圆柱形孔上产生爬波

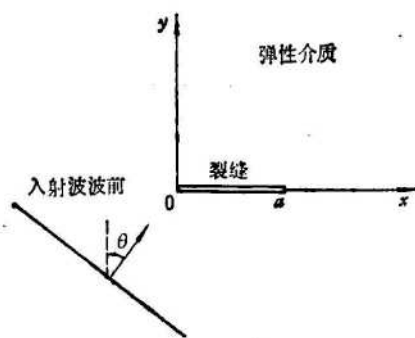


图 2 平面声波脉冲投射薄缝的示意图

们的第二次散射波。这种过程多次重复,以至虽然入射声波已经离去,在第一尖端和第二尖端之间却有初始散射波、第二次散射波和第三次散射波……相继出现,形成所谓多次散射现象,直到能量全部耗尽。这些是我们理论分析所预计的散射图象。

用动态光弹技术观察到的一组时间序列照片在图 3 中给出。这里纵波入射角 θ 是 10° 。从

接触薄缝的一个尖端,在接触的瞬间即刻从端点散射出一个波前为圆柱形的纵波脉冲、一个同形波前的横波脉冲和两个沿上下缝面各自传开的平面瑞利波脉冲。入射声波继续前进,将不再受薄缝的干扰。但在入射波最早接触第一尖端的时刻起,从第一尖端散射出来的各类声波会独立地扩展,先后和第二尖端遭遇,在那里先后受到再散射,产生新的、或说第二次的散射波。入射声波在第二尖端产生的各类散射波,也同样地先后扩展到第一尖端,在这个尖端产生它

图可以看到,理论预计和实验结果是相符的。值得提到的是,要在玻璃内部制作一个长的有限宽的平面薄缝,并无前例可循,因而我们自己发明了一种工艺,制出了这种内部缺陷。用此工艺,实际上可以制作任意形状的内部缺陷。

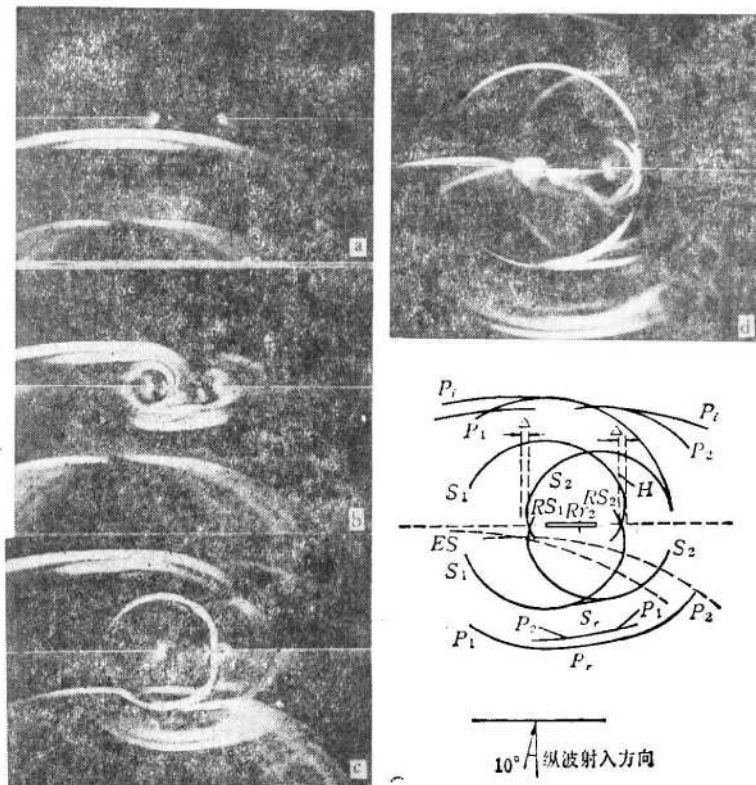


图 3 平面脉冲纵波投射有限宽的长平面薄缝时的散射图像

三、小 结

超声波在固体中的散射现象是超声学科和超声检测应用的基础。对散射现象的深入研究可为检测的定量化开辟道路。我们对几种类型平面波超声脉冲分别受某些形状散射体的散射问题进行了较系统的理论和实验研究,得到了比较清晰和明确的散射图像。理论上,结合物理概念进行了一些较复杂的计算,实验上采用并发展了动态光弹技术,创造了在玻璃内部制作指定形状缺陷的工艺,从而得到相当直观的图像显示。理论预期的散射过程与实验观察到的定性相符,有助于人们对固体中的散射现象有比较可信的了解。此结果受到一定的重视。

当然,问题还远远没有解决。从理论分析方面讲,迄今为止,我们以及国际上研究的散射体,还仅限于几何形状比较简单的,而实际缺陷是多种多样的。不过,裂缝问题倒相对地接近实况,也有重要意义;国外当前有些学者在发展求解的数学技巧,比我们高深。另一方面,前面曾提到,在正散射解的一定基础上还应开展逆散射问题的研究,以获得更直接的应用。这个问题的难度要更大些,特别是对固体材料。从实验手段讲,动态光弹技术看来是一种有效的手段,但还需要不断提高,例如寻找较方便的定量测量方法,从二维显示扩展到三维显示等。对定量测量问题我们正在做一些工作。此外应当看到,这种实验手段不是唯一可行的,其它实验手段,如常用的电子学方法,也有其优点,不应忽视。