

超声在固体中的散射

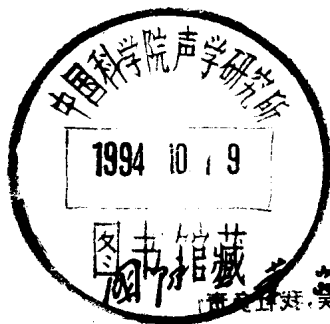
应崇福 张守玉 沈建中 著

国防工业出版社



DG56/12

应崇福 张守玉 沈建中 著



版社
查及行時，新辭書時育成件本

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

超声在固体中的散射/应崇福等著. —北京:国防工业出版社,1994

ISBN 7-118-01217-3

I. 超…

II. 应…

III. 超声学

IV. O426

超声在固体中的散射

应崇福 张守玉 沈建中 著

责任编辑 杨其眉

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京大兴兴达印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 5 $\frac{1}{2}$ 147 千字

1994 年 5 月第 1 版 1994 年 5 月北京第 1 次印刷 印数:1—1000 册

ISBN 7-118-01217-3/O. 96

定价:6.30 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新专著、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开

放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘书长：刘琯德

前 言

本书作者和少数其他同志,在 80 年代的近 10 年中对固体中超声的正散射问题作了一些实验和理论研究工作,现将这些研究成果撰写成本专著。

固体中超声的散射是声学的基本问题之一,同时是超声无损探伤的核心问题。在地质勘探(包括石油勘探)等领域也是引人关注的研究项目。在无损检测方面,近 10 多年来对超声探伤提出了量化的高层次要求,由此超声散射的定量分析成为国际上较大的和深入的研究内容。我们在 80 年代初也开始了这方面的工作。所得研究结果除在国内外有关期刊先后分题发表外,还曾于 1990 年在美国物理声学方面的一本丛书上用约 50 页的篇幅扼要总结。这里我们更详尽地加以介绍,包括一些未发表过的技巧细节,期望对读者有参考价值。

全书共九章。撰写分工如下:第一、二、九章由应崇福执笔,第三章由张守玉执笔,第五、六章由沈建中执笔,第四、八章由张守玉、应崇福联合执笔,第七章由张守玉、沈建中联合执笔。全书由应崇福审阅。

在本课题研究的全过程中,特别是前期,得到中国科学院和声学研究所的拨款支持,1986 年以后,又得到国家自然科学基金的资助。第三世界科学院也曾资助添购部分设备。除本书作者外,参加过本课题研究工作的还有王丽生、张胜勇、谭建伟、张吉明等同志,他们各自的贡献从本书所引文献中可以看到。我们曾对直接看见的散射过程进行了电影拍摄和录像,在这项工作中,韩家鼎同志给予了不少帮助。邓京军同志对本书的绘图给予了帮助。

目前,我们这个小组的散射研究工作已告一段落。但据我们所知,在国内,对这个国际上方兴未艾的课题,过去和现在尚没有其

他单位系统进行过研究。作者忠诚希望来日将有有志之士(也许包括我们自己)能够填补国内这项空白,继续推进我国在这一科学领域的发展。

应崇福

目 录

第一章 引言	(1)
1.1 散射的含义和研究超声在固体中散射的意义	(1)
1.2 我们的研究工作和本书的安排	(5)
参考文献	(7)
第二章 固体中超声散射的基础理论	(8)
2.1 无限大固体中超声传播的基本运动方程	(8)
2.2 无限大固体中超声遇到障碍物时散射的基本方程	(13)
2.3 固体波导(有限大固体)中和固体界面上超声传播的 基本方程	(16)
2.3.1 固体波导中超声传播的基本方程	(16)
2.3.2 固体界面上超声传播的基本方程	(22)
附录 2.1 连续散射波求解的几种常用方法	(25)
参考文献	(30)
第三章 直接察看超声脉冲在透明固体中传播行为的 有效技术——动态光弹法	(32)
3.1 显示声波方法概述	(32)
3.2 光弹法的原理及静态光弹技术	(33)
3.3 动态光弹技术和声波的显示	(36)
3.3.1 光弹法显示声波的原理	(36)
3.3.2 实验装置及技术	(38)
3.3.3 提高光弹图像质量的一种新方法——旋转重复曝光法	(39)
3.3.4 光弹显示举例	(41)
3.4 光弹图像的数字化及图像处理	(43)
3.5 声波应力的定量测量	(45)
3.5.1 一般测量原理	(45)
3.5.2 底片灰度计量法	(47)
3.5.3 旋转分析法	(48)
附录 3.1 显示透明液体中超声的施利仑法	(50)

参考文献	(53)
第四章 超声脉冲受圆柱形孔散射的理论分析和实验	
观察	(54)
4.1 无限大固体中横穿圆柱孔对超声散射的前人理论分析	(54)
4.2 玻璃中圆柱形孔散射的实验观察	(62)
4.2.1 纵波入射的情况	(64)
4.2.2 横波入射的情况	(67)
参考文献	(74)
第五章 超声脉冲受带状裂缝散射的理论分析	(75)
5.1 问题的列式及拉氏变换域中散射声场的形式解	(76)
5.1.1 带状裂缝的散射问题	(76)
5.1.2 入射脉冲声场的描述	(78)
5.1.3 散射声场的通解	(79)
5.1.4 边界条件按对称性的分解	(81)
5.1.5 边界条件的拓展和散射声场的定解	(82)
5.2 任意角入射时拉氏变换域内散射场的一级近似解	(92)
5.2.1 半无限宽裂缝的散射声场	(92)
5.2.2 有限宽裂缝的散射声场	(93)
5.3 任意角入射时空域内散射场的一级近似解	(97)
5.3.1 卡尼亚-德胡普反演方法	(97)
5.3.2 一阶散射纵波	(99)
5.3.3 一阶散射横波	(103)
5.3.4 一阶散射瑞利波	(106)
5.3.5 诸散射体波波前上的强度分布	(107)
5.3.6 全散射声场概貌	(108)
5.4 时空域内脉冲纵波掠入射时的散射场二级近似解	(110)
5.4.1 纵波掠入射特例的意义	(110)
5.4.2 拉氏变换域内的级数解	(110)
5.4.3 时空域内的二级近似解	(113)
5.4.4 纵波掠入射时的散射声场	(120)
参考文献	(121)
第六章 超声脉冲受带状裂缝散射的光弹观测	(123)
6.1 实验样品的制备	(123)
6.2 带状裂缝散射声场的显示	(125)

6.3 头波应力分布的定量测量	(136)
参考文献	(138)
第七章 超声兰姆波的传播和散射	(139)
7.1 玻璃板材中兰姆波的理论描述	(139)
7.2 用动态光弹技术观察和研究兰姆波	(141)
7.2.1 兰姆波形成过程的观察	(143)
7.2.2 兰姆波应力分布的观察及模式识别	(143)
7.2.3 兰姆波受裂缝散射现象的显示	(146)
7.3 兰姆波受板边端的散射——理论分析和光弹观察	(147)
7.3.1 理论分析	(148)
7.3.2 理论数值计算与光弹实验结果	(151)
参考文献	(156)
第八章 超声脉冲在固体尖角散射的光弹法观察	(157)
8.1 脉冲体波在固体直角棱边的散射	(157)
8.1.1 理论分析	(157)
8.1.2 光弹观察	(160)
8.2 端利波在固体尖角的散射	(162)
参考文献	(170)
第九章 结论与展望	(171)
9.1 结论	(171)
9.2 展望	(173)
参考文献	(174)

第一章 引 言

1.1 散射的含义和研究超声在固体中散射的意义

声波在均匀介质中会不变方向地前进,但若遇到介质的边界,或遇到障碍物时,将部分地向多方向偏折,或说部分地向多方向散开,称为散射。这里所谓边界,是指原介质和另一介质的交界处,这另一介质是从声学性质的角度讲的。所谓障碍物也是这样,是指原介质内声学性质不同的异体。对于各向同性的均匀介质,表达声学性质的关键参数,是介质的密度和介质的弹性系数,后者有诸如流体的压缩系数或固体的拉梅(Lamé)常数。所以两种介质的不同,在于二者密度不同,或者弹性系数不同,或者两个参量都不同。

如果声波进入一个整体是非均匀的介质,即密度或 ν 和弹性系数有起伏的介质,那么声波在一般情况除主体会变方向外,还会沿途散射。在超声学中,生物软组织就是这类介质。近年来,为了使超声分辨人体组织内部有无不成形的病变,正在利用这类散射现象。但本书将不涉及基体是非均匀的介质。

作为均匀介质中障碍物散射的例子,先讨论空气中一个固体圆球的情况。设空气中有平面连续纵波,从左向右投射到一个刚性圆球。理论计算和实际测量都得出,在球的表面这时 $|p/p_0|$ 随方向的分布如图 1.1 所示^[1.1]。这里, p 是实测的球表面声压值; p_0 是入射波的声压值; $|p/p_0|$ 的单位是分贝。由图可见,这个分布随声波在空气中的波长 λ 与球半径 a 之比而变。

声学中讨论散射现象已有很长的历史,但长期以来只分析流体中声波的散射。约从 40 年代开始,超声在固体中的应用得到发展,首先体现在超声无损检测中。钢、铝等材料或部件的内部有没

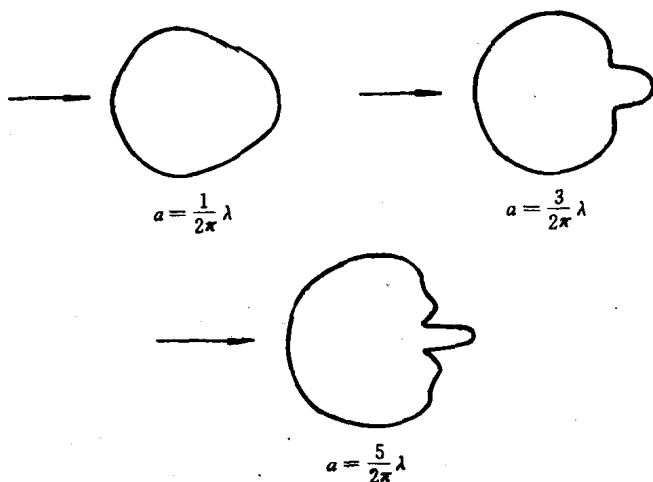


图 1.1 空气中平面连续声波受刚性圆球的散射。

对不同的 a/λ 值, $|p/p_0|$ 随方向的分布

有伤是使用者十分关心的问题,这牵涉到经济效益,更牵涉到安全这个重大问题。早期只要求了解有没有伤,以及伤的大致位置。这用超声一般是能够判断的。超声可以透入不透明(不透光)材料,它还有个特点是发射方向性好,就是说可以形成一个窄狭的波束。检测时常使用脉冲超声束,这个声束遇到内部伤时将被部分“反射”回来。从反射波的有无可以判断伤的有无;从反射波的来回时间可以判断伤的位置。但严格讲,所谓反射波实际上是散射波的背向部分,即同入射波方向相背的部分。在一般情况,伤(障碍物)受到入射(探测)超声照射的面并不是一个和入射超声垂直的理想平面。三维伤的表面常取不规则的形状,因此探测声波不是受镜面反射,而是向各方面散开,其中同原入射方向逆转的部分被原发射声波的换能器所接收,通常说成是“反射波”。

随着时间的推移,人们对超声无损检测提出了更高的要求。近十几年来,不仅要知道伤的有无及其位置,还希望知道伤的大小、形状、取向和内含物等。这样有可能确定伤的危害性大小和伤所在

部件的可使用寿命。这些额外信息,只有试从接收到的散射波汲取。这时,需要首先了解不同形状、不同大小等等障碍物所散射的超声各有什么特征。这样,超声的散射研究便由定性上升到定量的范畴,亦要求细致而较严格的分析。而在无损检测应用中,声波的载体绝大多数是固体,伤则是固体中的障碍物。于是,固体中超声的散射研究变得突出起来。尤其近十几年来,可以说变得相当突出。另一方面,固体中超声的散射研究也十分艰难。流体中的声波散射问题本已很复杂,而和流体相比,固体中声波的传播和散射规律有其独特的复杂性。常有人用弹性波的术语来表示固体中的力学波。本书对各类介质中的力学波,不论这些介质是气体、液体、等离子体,还是固体,将统叫声波,因为传统的流体中的声波同样依赖于流体的弹性。

下面,回到固体中的声波散射问题。我们再以球形障碍物作例。图 1.2 给出钛合金中一个球形空腔散射的测试结果^[1,2],这个空腔的半径为 $4000\mu\text{m}$,这时入射声波是脉冲式平面纵波。图中给出了远离空腔处散射波的方向分布。从图见到,空腔除了散射纵波以外,还散射横波。这表现了固体中声波传播的主要规律之一。在流体(非粘滞的)中只存在声纵波,在固体中却可存在声纵波和声横波,而纵波和横波在固体界面会相互激发,这增加了固体中超声散射问题的复杂性。本书只涉及各向同性的固体;如果固体是各向异性的,例如是铌酸锂等单晶,那么传播和散射的复杂性便更大了。

最后,谈一下散射和散射波这两个术语的确切定义问题。有些文献用“衍射”这一术语来表达本书讨论的“散射”。严格些说,在光学里,衍射是指光束通过一个孔径(或屏幕)的边缘时稍许偏离直线途径而进入边缘后面的几何阴影区这一现象。这个术语同样适用于声束。其实,在 19 世纪前半期,光波曾经是用弹性以太中的弹性微扰来解释的。但散射现象不仅包括声波在边缘的偏转而进入几何阴影区,而这偏转又可能部分地起因于折射,散射现象还包括回返到照射区的反射。在这个意义上,散射的含义比衍射更广

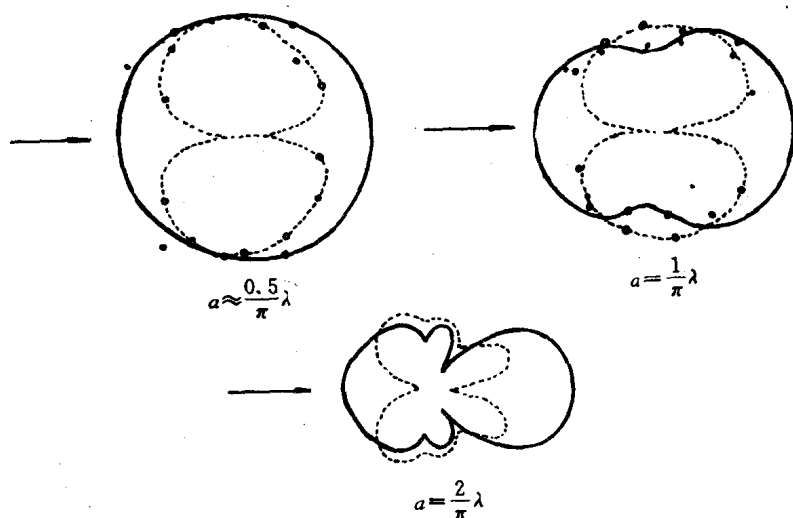


图 1.2 钛合金中平面脉冲超声受球形空腔的散射。

对不同的 a/λ 值, 空腔远处声压随方向的分布

实线 — 纵波; 虚线 — 横波。

阔。有少数人认为, 折射和反射易于作为整体来处理, 为了强调偏入阴影区的现象, 宜选择衍射这个术语来表达全部效应。本书则保留衍射的原义, 采用散射这个术语来表示入射波遇到障碍物或边界时所出现的全部响应。

第二个要明确定义的术语是“散射波”。应当说, 入射波遇到障碍物后被后者散开, 这个向多方面散开的整体便是散射波。这时不应再去识别哪些部分是原来的入射波, 而且这通常是不可能的。实验中围绕障碍物测量到的就是这个意义的散射波。但是, 在理论分析中, 为了简化计算和解释, 一般把这种“总”散射波, 在扣除设想未受干扰的入射波后, 才称为“散射波”。按照这个定义, 在入射波遇到障碍物之后, “总”散射波是“纯”散射波加上假想的、形状和途径都未改变的入射波。当然, 这个相加不是简单的算术相加, 而包含相位的叠加, 就是说, 两个波将相互干涉。图 1.3 说明了空气中平面连续纵波受刚性圆球散射时, 在钢球远处“纯”散射波的能量

量随方向的分布情况^[1,3]。与图 1.1 所示钢球近处的“总”散射波相比,两种分布是迥然不同的,而这些不同主要起因于对散射波的不同定义。在本书后面,散射波将常指“纯”散射波,但一般不再加定语“纯”字。在实验观察中,由于我们着重脉冲超声的散射,入射波和“纯”散射波却常是分离的和可以区别的。

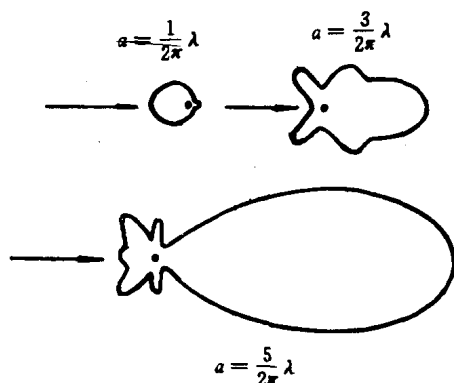


图 1.3 空气中平面连续声波受刚性圆球的散射。对不同的 a/λ 值,在圆球远处“纯”散射波的能量随方向的分布

1.2 我们的研究工作和本书的安排

本书作者和少数其他同志一起,从 80 年代初开始了固体中超声散射的研究,前后工作近 10 年。我们首先引用和发展了动态光弹法显示超声的技术,它可以使人们在透明固体内目睹超声传播的过程,包括散射过程。这为我们的研究打下了实验观察的基础。我们使用光学玻璃作为透明固体。我们认为,玻璃中超声散射的过程,同一般的金属或非金属等非透明固体材料中的散射过程应当是类同的,只要这些非透明固体是均匀的和各向同性的。在无损检测应用中,除了粗晶粒材料、复合材料等等介质外,这个假设一般是成立的。目前,动态光弹显示法只能显示二维声场。此外,迄今我

们在固体中所制作的“伤”都是几何形状比较规则的,并且大多是空腔式的。这是因为,制作多种多样类型的伤不但在人力物力上难以承受,而且相应的理论难度很大。我们选作对象的障碍物包括了颇有代表性的几大类型。它们是:(1) 边缘是连续的、光滑的散射体,如横穿圆柱孔;(2) 边缘有不连续处或尖锐角的散射体,如带状裂缝和材料顶角;(3) 波导中的散射体,如大薄板的边端。这三大类型的散射体是相当典型的。在玻璃的内部制作“伤”是我们的创新。我们研究的声波,不只限于体波,还有导波和表面波。

在实验观察的同时,我们对某些障碍物(如有限宽裂缝、板的边端、材料的直角棱边等)的散射独立地进行了理论分析。这些分析和国外前人的工作相比,其特点简要说来有:第一,为了接近实际情况,主要讨论了脉冲超声的散射,而不是连续超声的散射;第二,为了验证我们的特殊观察手段,主要求解了散射体附近的散射过程,而不是只求远离散射体的散射波值。理论预期与光弹观察一般相符。对前人已有理论解的一些散射例子,本书不再作完整计算,而我们所选择的这类例子,是其理论过去从未经过实验验证的。我们的研究结果最引人注意的是所观察到的声波围绕圆柱孔的爬行。兰姆(Lamb)波的显示也较独特,这种波是熟知的,但从未显过真面目,我们用动态光弹法看到了它,并且验证了前人理论关于应力分布等量的预计结果。

本书的撰写大体上是按上述思路安排的。第二章是为散射概念和理论分析作定量的阐述和准备,简要地介绍各向同性弹性固体中声波传播和散射的一些基本方程,以及求解方法概要。声波包括体波,也包括导波和表面波。第三章介绍能显示透明固体中超声传播和散射过程的实验方法,即我们所采用并有所发展的动态光弹法。第四章到第八章分别列举对固体内几种特殊形状障碍物的散射研究,这些障碍物分别是横穿圆柱孔、带状裂缝、板的边端和样品尖角。对所有这些障碍物的散射都作了光弹观察,对其中的带状裂缝、薄板边端和材料直角棱边的散射则进行了自己的理论分析。我们只重点介绍对裂缝的理论计算,专列作比较长的第五章;