

# 超声检测技术

J. 克劳特克洛默 著  
H. 克劳特克洛默

李 靖 马羽宽 蔡清福 译  
姜志明 赵洪发 冯庆吉

姜志明 蔡清福 校

马羽宽 总校



广东科技出版社

## 内 容 提 要

本书系统地论述了超声检测理论，详细地叙述了各种超声检测方法 and 仪器、各种金属材料和非金属材料的超声检测技术，书末附有超声检测有关的公式和图表。

该书可供从事无损检测的工程技术人员和工人使用，也可供高等院校有关专业的师生和医疗部门的有关医务工作者参考。

### 超 声 检 测 技 术

J·克劳特克洛默 著  
H·克劳特克洛默

李 靖 马羽宽 蔡清福 译  
姜志明 赵洪发 冯庆吉

姜志明 蔡清福 校

马羽宽 总校

\*

广东科技出版社出版发行

长春市印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 29·125印张 690千字

1984年9月第 1 版 1984年9月第 1 次印刷

印数 1—7,000 册

统一书号15182·111 定价：4.70 元

## 译 序

我国早在五十年代就开始利用超声波对金属材料及其制品进行探伤。二十多年来，这项无损检测技术已被普遍应用，形成了一支庞大的探伤技术队伍，活跃在各个工业部门。超声检测技术对保证产品质量、设备的安全运行等起了重要的作用，具有很大的经济效益。

此外，超声检测技术在生物医学工程上也同样得到广泛的应用。

目前我国的超声检测技术，无论在理论研究、检测方法及推广应用方面，还是在仪器设备性能方面，都已有非常明显的进步。

鉴于国际学术交流、引进国外技术、对外贸易、商品检验等活动日益增多，为了使广大超声检测技术人员了解外国有关技术情况，机械工业部长春试验机研究所和汕头超声仪器研究所有关人员翻译，广东科技出版社出版了西德 Josef Krautkrämer 博士和 Herbert Krautkrämer 博士兄弟合著的《Werkstoffprüfung mit Ultraschall》中译本。这是一本较好的超声检测技术基础著作，其英译本在好几个国家出版，1980年又被译成日文在日本出版，颇受人们好评。现在出版的中译本，是根据日文版并参照英文版（第二版）和德文版（第三版）译出的。

由于这本书在理论和实际应用方面都有较深入的论述，内容比较丰富，相信对促进我国超声检测技术的发展有一定的作用。

姚锦钟

1984年5月14日



40120

## 原 序

声学，即声音的科学，是叙述固体、液体和气体中的机械振动及其传播现象的科学。

我们知道，在真空的空间是没有声音的。这是因为光或者其他电磁波的振动是空间电和磁状态的振动，而声的振动是物质的质点自身振动的缘故。

在空气中，声波仅使某些有限量的空气在中性点附近前后移动，而光波对空气静态或者动态都没有影响。

如果把物质中有规律的即周期性的按一定时间重复的机械运动，以每秒钟的循环数分类的话，就能够明确地确定人的耳朵作为检测器可以使用的范围。即，声音通过空气或者人体的某些部位若能够到达耳朵，就是能够听到的。然而，这就要求声音的频率既不能过高也不能过低，也就是约10Hz（赫芝=周/秒=c/s）以下和15,000~20,000Hz以上的声音，人的耳朵是听不见的。（可是，最初的记载仅仅对于正弦波的振动是严密、正确的。其他形式的振动由耳分解为高次谐波，构成的声音或者使劲敲打物体产生的连续声音，就能够听到。）

恰好与光波的情况一样，用眼睛看不到的高频波叫做紫外线，而20,000Hz以上的声波就叫做超声波。也有这样的提法，10Hz以下的声波叫做次声波。这种分类完全是任意确定的，取决于人的耳朵的情况。对于其他的发生方法和检测方法，可以使用完全不同的分类方法。

无疑，超声波是自然界和日常生活中极其普遍发生的现象，有时象汽笛那样有很强的超声波，但幸运的是可以认为它对于我们的耳朵没有引起有害的作用。

为研磨试块而采用的旋转研磨（板），除了产生耳朵能够听到的噪音外，还一起产生具有用于材料试验相同程度的100,000Hz（100kc/sec）~10,000,000Hz（10Mc/sec）高频强超声波。

声波和超声波很多的技术上的应用，可以分为两类。就象医学界的X射线一样，利用它的作用，用于治疗组织（照射癌细胞）和研究某种状态的诊断（胸部X射线照象）两种完全不同的目的。声波也一样，第一，使用它对给定材料进行作用，第二，用于了解其物理状态。第一种情况是利用声波的能量。例如，在洗涤中既能从产品上清除污粒，又能在洗净时从给定的表面除去异物；用钻头钻孔的时候，既能清除屑末，又能在乳化时降低表面张力。它既能用于使物与物的混合，又能用于其他很多利用机械能的场合。这些都是有关声能的应用。

第二种情况，仅仅是将声波的能量用于能够传播充分明确信号的范围。例如，利用于扩音装置、船的海上定位、探测海深和探知鱼群。另外，例如用于检查机械性缺陷、板厚、弹性和称之为材料特性的材料状态。

上述皆为诊断方面的应用，而本书只对材料试验加以叙述。

为确定某种材料的机械性能，机械方法是最直接最方便的方法。可。种方法确

4012919

定轴中有没有裂纹时，就必须对轴加以拉伸或弯曲应力，一直到裂纹开口为止。这就是机械的方法。然而，遗憾的是这是破坏性试验。与此相比，对于同一目的，声或者超声波则可以形成非破坏性的试验方法。非破坏试验基本上与拉伸、压缩、剪切和弯曲一样，都是利用由其产生的机械应力。可是，由各种波型引起的应力是非常弱的。

然而，电、磁、射线和其他物理学方法与试件的机械性能之间的关系是明确的。这些物理学方法与机械方法相比较，有时也不意味着这些间接方法是不太适合的，例如，在裂纹附近显示出磁力线的磁学方法等。去掉“超”字，就声对材料来说，比如对于锻造的材料，很长时间就使用在试验上了。这种场合，用锤子敲打试件，根据敲打声音的变化，可以检出内部大缺陷。这种方法现在也在使用。每个家庭主妇也都知道，用敲一敲的办法，能够检查杯子是不是有裂痕。所以，可以想到，采用声的试验早已为发明陶瓷的人所使用，可以说，这是自古以来发现隐藏缺陷最早的无损检测方法之一。随着最近的电子学的应用，已成为最新而且用途最广的试验手段之一。随着代替锤子和耳朵发生和检测声的方法的近代化，由声到超声的转移已是可能的了。然而，实际上用锤子敲打所产生的自然振动，与锤子并没有多大关系，而大大地依赖于试验件的形状和敲打的位置。如果采用电气的声发射体，就可以预先确定声的频率。在高频的时候，由于波长与频率成反比，波长变短，比试验件的尺寸小得很多，因此不会受试验件的形状和尺寸的影响，这种波的声束在试验件中就能够具有指向性。这恰恰与投影仪射出的光一样。到现在为止，它对试验件用得完善的方面就是“探伤”。这种方法由 Sokolov 于 1929 年开始用于缺陷检查，他是利用与无缺陷的部分比较，有缺陷的部分透过声强减弱的方法。1942 年，Firestone 首先把在海上船只定位和测深中已熟悉的声波深度测量原理，应用于材料试验。1945 年以后，随着无损检测的迫切要求，这种方法作为实用的手段渐渐得到了普及。

## 英文版序

英文版第2版是由德文版第3版译出的。从最近的技术发展来看，德文版第2版有很多地方是需要补充的，还有一部分是需要全部修订的。

超声波发射和接收方法除压电方法外，在第8章中做了广泛地叙述。就强度法来说，在新的9.4节中叙述了超声全息。在第2编中，按分类把共振法包括在通过时间法中。

对脉冲反射式仪器特性和测定方法做详尽地叙述是必要的(10.4)。由于最近发现的脉冲频谱分析和声发射分析(12)，其重要性尚有讨论的余地，所以只能做简单地叙述。除许多补充的内容而外，特别对自动探伤装置的部分做了详述。在第4编中，补充了如何进行原子反应堆检验新的一章(28)和简单地叙述表面硬度试验的一节(32.4)。在第33章中，要包括重要标准的评价和分析是不可能的，由于某些部分已对最重要的项目做了论述(例如第26章对焊缝试验的叙述)，第33章表中只列出其他的标准。

目前，在大量的文献中选择参考文献是困难的。对因篇幅有限而没能收录到本书中的论文作者，谨致以歉意。

值此本英文第2版发行之际，对表示理解并给予大力协作的出版社致以谢意。对寄来宝贵资料的各位原著者及担任各种修订补充的新的合作者，也表示感谢。

对承担由德文译成英文工作的 B.W.Zenzinger 及其助手 J.E.Bobbin，致以深切的谢意。

Josef Krautkrämer  
Herbert Krautkrämer

1977年8月 科隆

## 日文版序

发行约瑟夫·克劳特克洛默博士 (Dr. Josef Krautkrämer) 和哈伯特·克劳特克洛默博士 (Dr. Herbert Krautkrämer) 的名著《材料超声试验》(《Werkstoffprüfung mit Ultraschall》), 恰恰是我第一次访问科隆 (克劳特克洛默公司) 的1961年。对于以超声探伤为中心巡访了欧洲的我来说, 该公司也是这次访问中值得访问的几家超声仪器生产工厂之一。在听取了哈伯特·克劳特克洛默博士对这本新书的介绍, 参观了只生产脉冲反射式超声探伤仪就有150人工作的工厂, 以及在西德国家铁路上乘坐一天该公司承装的钢轨探伤车之后, 不得不认为这是一家值得重视的公司。可以说, 这家进入了世界的公司, 现在已经奠定了繁荣的基础。

日本对应于本书的唯一著作——《超声探伤法》(学振编), 先于本书初版五年, 于1956年出版, 已经经过了两次修订, 可是由于受到日语的限制, 达不到世界上广为应用。而本书第2版和第3版分别于1969年和1977年作为《材料超声试验》(《Ultrasonic Testing of Materials》) 英译出版, 众所周知, 在世界各国广泛利用。

日文版是以最新英文版为基础译出的。但是, 英译本有一部分与德文原版本有所不同, 所以也参考了原著德文第3版做了修正。翻译委员会做了不少工作。

总之这本世界有名的超声探伤著作, 现在, 日本人也容易读到了, 这是日本超声探伤界的大喜事, 敬请广泛利用。

东京大学教授 丹羽登

# 目 录

第一编 超声试验的物理原理.....	1
<b>1章 波动</b> .....	1
1.1 振动与波动.....	1
1.2 波动的形式与种类.....	3
1.3 合成波与驻波、干涉.....	6
1.4 公式与数值例.....	9
<b>2章 在界面上的平面波</b> .....	12
2.1 单一平面的垂直入射.....	12
2.2 多层面的垂直入射, 薄板及间隙.....	15
2.3 折射定律.....	18
2.4 界面的声压值.....	19
2.5 在直角的拐角及隅角的反射.....	25
2.6 表面波及界面波的发生.....	26
2.7 声波在平板中的传播、板波.....	26
<b>3章 超声波几何光学</b> .....	28
3.1 几何光学的适用范围.....	28
3.2 球面波及柱面波声压的距离特性.....	28
3.3* 球面波在平面上的反射与折射.....	29
3.4* 起凹面镜及透镜作用的曲面界面.....	31
3.5* 在中空及实心圆柱中的球面波.....	35
<b>4章 声场的波动论, 超声束</b> .....	39
4.1 波动论的基础.....	39
4.1.1 平面振子.....	39
4.1.2* 聚焦声源.....	48
4.2 声场的波带作图法.....	52
4.3 用不均匀激励及脉冲激励形成的声场.....	56
<b>5章 声场中障碍物的反射波与阴影</b> .....	59
5.1 与活塞振子的声束中心轴垂直的平面反射源的反射波 (AVG图).....	59
5.2 与声束中心轴垂直的圆形平面反射源的阴影.....	63
5.3 具有倾斜的缺陷, 由端波引起的反射.....	64
5.4 其他反射源.....	66
5.5 自然缺陷与反射面的粗糙度.....	66
5.6* 反射源对脉冲的频率分布的影响.....	68
<b>6章 固体中超声波的衰减</b> .....	69



6.1	吸收和散射	69
6.2*	在金属中的衰减, 各向异性和铸造组织	73
7	利用压电效应的超声波的发射和接收	76
7.1	压电效应	76
7.2	作为超声波发射器和接收器的压电元件	80
7.3*	脉冲激励的压电振子	86
7.4	压电材料	93
8	超声波发射和接收的其他方式	97
8.1	机械效应	98
8.2	热效应	98
8.3	静电方法	100
8.4	利用电流磁场作用以外效应的方法	101
8.5	电动力学方法	102
8.6	磁致伸缩的方法	106
8.7	光学方法	108
	第二编 各种超声试验方法和装置	114
9	强度测定法	114
9.1	原理、分类及与通过时间法不同	114
9.2	用于强度测定的装置	117
9.3	采用超声成象法的装置	119
9.4*	超声全息	121
10	脉冲反射法	125
10.1	历史和原理	125
10.2	脉冲反射式超声试验装置的结构和机能	128
10.2.1	示波管横轴的扫描部分	128
10.2.2	发射部分	131
10.2.3	放大器	134
10.2.4	距离刻度与时标	140
10.2.5	干扰电波的抑制	142
10.3	探头	143
10.3.1	直探头	143
10.3.2	斜探头	150
10.4	脉冲反射式超声试验装置和探头特性	155
10.4.1	图象显示器的特性	155
10.4.2	放大器的特性	156
10.4.3	声场特性	159
10.4.4	测定范围的调整	160
10.5	脉冲反射式超声检测仪器之例	161
10.6	电子数据处理方法及其辅助装置	163

# 第一编 超声试验的物理原理

## 1 章 波 动

### 1.1 振动与波动

如同在 X 射线透射试验中可使用电磁波一样，在材料的超声探伤中可使用机械波。所有的机械波，是由构成物质的每个质点的振动形成的。如图 1.1 所示，往下拉一下安装在弹簧上的小质点之后，由于松开而产生的运动称为振动，若质点回到原来状态，则质点在平衡位置的附近振动。这种振动是正弦函数性质的振动（若以时间为变量记录位移，则成为正弦曲线），所以特别重要。只有作用力（上述情况下由弹簧产生）与位移成正比地增加时才能得到这种振动，亦称为弹性振动。可以认为物体是由以弹性力保持平衡的各个质点构成的。如使之非常简化，则弹性体的模型如图 1.2 所示。但是，设模型具有立体结构，对这样的物体不施加超过其弹性极限的压力或拉力，它只能表示出像这样弹簧模型的动态。此模型中各质点可进行弹性振动。由此振动将产生什么样的波呢？

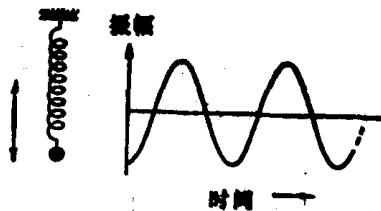


图 1.1 加荷弹簧的正弦运动

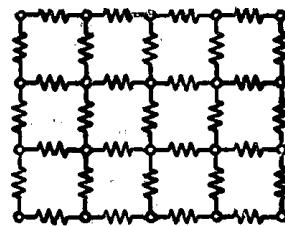


图 1.2 弹性体的模型

使模型左端物质的所有质点正弦振动而同时激振，例如，可认为是制作成用电的方法能够振动的振动板（扬声器）被粘结在模型的左端。那么，最初平面内的质点都从同一振幅（振动度）和频率（每秒的振动次数）振动，其弹性力将振动传给位于第 2 个平面内的质点。这些质点开始振动，又将其振动传给第 3 个平面内的质点。反复进行这种传递使振动依次传递下去。若所有的点硬连接，那么，那些点同时开始运动，保持同样的运动状态，即同样的相位。在弹性体中不会产生这种现象。之所以如此，是因为要使运动传递就需要一定的时间，且运动在稍后传到的平面与最初激振的平面比较，相位迟后的缘故。即，就某一瞬间的状态考虑在某一平面质点通过静止的位置从右向左运动，与此相反，在远离右侧平面内的质点，开始从左向右运动，后者相位的滞后，严格说来是  $1/2$  振动。图 1.3 为模型截面的某一瞬间图示的例子。图中，从左传播到右的波还未到达右端。由此可知，由于振动的相位发生变化，所以形成质点特别密集的区域。这些密的区域是与疏的区域交替出现的。表示波的时间经过的图样示出在激振侧不断产生

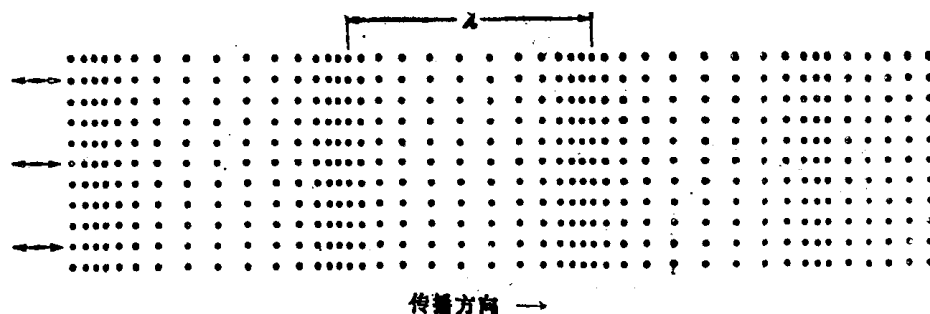


图 1.3 纵 波

疏区，这些区域以一定的速度和间隔在物体内部往右侧移动。这就是弹性波。

当然，图 1.3 中不能像电影那样以逼真的描写表示波的运动状态。然而，这种波动现象从其他种类的波，即，从水中的波亦能很好地了解到。波峰与密的区域对应着，在单纯的观察中，可用肉眼追踪波峰，因此或许认为波峰搬运水。实际上，漂浮在水上的物体，只不过是上下移动着。从这个事实可以证明波峰搬运水的情况并没有发生。在波中唯一移动的是质点状态，即，在弹性波的场合是疏密的状态。质点本身停留在一处，只在静止的位置附近振动。

只有固体在任一处都是一样的（均质状态）而且对所有的方向表示同样的弹性动态时，能以每个物质点聚集而构成的固体模型表示。此时，图 1.3 的各点等于表示小立方体的质点示于图 1.2 的弹性模型，不适用于液体和气体。这是因为液体和气体中每个质点不是固定在静止的位置上，而是自由运动的缘故。尽管如此这些物质也与气泵一样对压缩和膨胀表示一定的阻力。因此，液体和气体也同样能够使弹性波传播。

当由于示于图 1.3 及 1.4 的模型视觉化时，不要忘记包括各点的平面表示立体物体的截面。这是因为在界面上波的振动状态发生显著变化。示于图 1.3 及 1.4 的波，只能在离所有界面很远的时候才能存在。

有关波的一些参数，借助于图 1.3 定义如下。所谓波的频率，指的是质点在每秒钟内的振动次数。就所给出的波而言，频率对所有的质点是相同的，而且与可任意选择的波的发生器的频率相同。所谓波长，指的是质点处于同样运动状态的 2 个平面间的距离。例如，是 2 个密的区域间的距离。波长与频率成反比。即在高频下波长变短，相反在低频下变长。所谓声速，指的是波的状态，例如，密的状态的传播速度。该声速是做为对象的材料所固有的特性，一般与频率或波长无关，是取决于材料的值。关于这些数值和公式，将于 1.4 节中叙述。对于所提供的声场最重要的量是声压，质点密度越高的位置，声压比一般的压力就越高，另一方面在质点扩散的区域里声压就变低。在声波路径中放置极小且无惯性的压力计，它以正弦函数交替地表示出高压力和低压力。该交替压力便是声压。这样的现象，不仅是气体而且在液体和固体中也发生。偏离一般压力（无声波状态）的最大偏移称为声压的振幅，这与运动的振幅，即质点离开静止位置的最大偏移有着密切的关系。

为了用与图 1.3 同样的方法表示更短的波长，需要选择质量更小且更密的质点，即需要把物质分割得更微小。能够把物质分割得最微小的极限就是原子的大小。但是 在

原子领域里已不能期待使质量或力均匀分布。因此，弹性波与原子或分子间距离比较，只是波长颇大时才能成立。

## 1.2 波动的形式与种类

示于图 1.3 的波称为纵波，之所谓称为纵波，是因为振动发生在纵向，即传播方向。虽然纵波最重要，但波的种类不只是纵波。由于压缩力和膨胀力对纵波起作用，所以纵波亦称为压力波或压缩波。而且，由于该波的质点密度发生变化，所以纵波又称疏密波。

纵波是通过空气将声能源的振动传递到人们的耳朵，因此是真正意义的声波。凭经验得知，纵波通过液体或固体可传播声音。

但在固体中，其他种类的波，即横波也还能发生。图 1.4 以模型表示质点运动的瞬间变化。同图中，假定波从左至右传播。我们知道此时质点不是在传播方向振动，而是在与传播方向成直角的方向，即横向振动。

通过周期性的剪切力使物体左端界面的质点以正弦函数上下方向运动，由此可产生振动。在固体中能够把这种剪切力传给邻接平面的质点。但是，质点的横向振动表示出决定于离被激励平面距离的时间滞后，这种波亦称为切变波。这种场合波长也同样由质点处于同一状态的 2 个平面之间的距离来决定。图 1.4 中，波长是以质点从上方往下方移动，正要通过静止位置中性点的 2 个平面之间的距离来表示的。

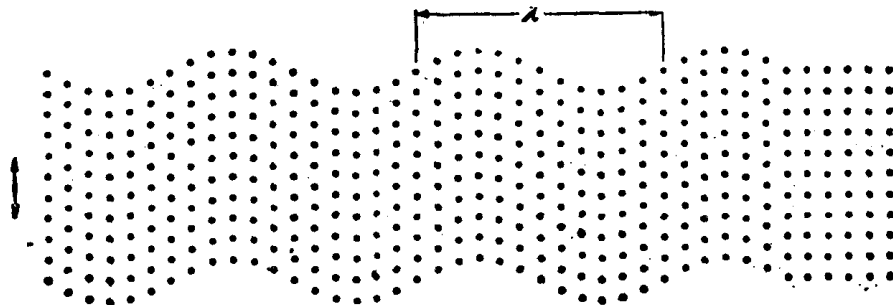


图 1.4 横波

在纵波里所说的声压，这时由交变剪切应力取代，但不能使用“声的剪切应力”这一术语。压力是用单位面积垂直作用的力来表示的，而剪切应力则是以对单位面积平行作用的力来定义的。因此，压力和剪切应力之间的差异仅是作用力的方向。在其余的所有方面两者的特性是完全相同的。因此，以下即使叙述横波中的剪切应力的场合，为使之具有一般性时，仍采用声压这一术语。

图 1.4 表示质点通过静止位置时为剪切应力最大。这是因为在这个位置上连接的 2 个质点平面的相对位移为最大。在振幅为最大的位置，剪切应力为零。对于图 1.3 的声压亦可看到同样的现象。即，质点通过静止的位置振动时，质点相互间最接近或离得最远时，这些点的声压表示出最大值或最小值。这样一般化的声压和质点的运动，不是在同一相位，而是彼此相差  $1/4$  周期。

在气体和液体中，实际上不能传播剪切力（如不是这样就不易于沿着管壁之类流动）。因此在实际探伤中只有试验材料为固体时才能使之传播颇远的距离。

各种各样的波的传播形式也很多。这里所说的波的形式，指的是波前的形态。以上我们叙述了平面波，即振动的相位在1个平面内是同一的波。这个同相位平面是波面，在传播中波面对它本身平行移动。波面不一定是平滑的，相反，在自然界声源的场合，严格说来不是平滑的，一般具有复杂的曲率。但是，为了更明确地表示或简化计算，以近似的简单形式例如可用平面波、球面波或柱面波取代自然声波。

在所提供的波面上，例如，在球面波的场合，在球面上只是相位相同，即只是振动通过零的时间相同，而声压的振幅不一定相同。声压振幅对某一限定范围的方向即使为颇大的值，在其它方向也有时完全消失掉。这表示球面波波束从具有指向性的扬声器传播到空气中的声波或在超声探伤中，从探头发出的波的例子，正符合于这一点。为了避免误解，应特别注意的是，用如平面波或球面波那样简单的波的形式叙述自然声现象，只能是在一定的限制条件范围内成立。例如，平面波是在离探头非常近处成立，与此相反球面波是在远离探头处成立。

在上述波的场合，假定这些波在无限大的物体中传播。如在板或棒那样大小有限的物体中传播的方式由于折射和反射而散乱。而且，在反射时纵波变换成横波，或产生相反的现象。由于这些影响甚至在较简单形状的物体中声传播的路径也是非常复杂的。为了叙述声在有限物体中的传播，应预先充分探讨做为对象的表面变形。其结果，对传播波的物体形状或大小必将引入特有的新种类的波。然而，下述种类的波，由于预先未详细论述过作为对象的物体中纵波或横波的传播形式，所以，反看成新的波，或与基本的纵波或横波传播无关的波，这一点应理解清楚。

在半无限大的固体物质的平面状或曲面状界面上存在的界面波，称为表面波或瑞利波（参照Lord Rayleigh [31, 137]）。图 1.5 为钢中表面波在某一瞬间的图，更确切地说是表示最表面质点运动的图。正如我们已经知道的那样，严格说来水面波引起的位移不是正弦振动。而且，水的表面波不是弹性波，是由重力引起的。水的表面波，其质点运动是圆形的，与此相反，瑞利波如图 1.5 右端所示，是椭圆形的。若距表面的位置变深，振动振幅就迅速减小，在约 1 个波长深的位置上，质点实际上处于静止状态，并不振动。在液体和固体的界面 [657] 或 2 个固体的界面 [707] 产生与瑞利波同样的波。有关各种类型的波或波的形式数学处理，请参照文献 [540]。

如果固体物质的尺寸进一步受到限制而成为板状。那么，如表面波的波长不远小于板厚，则纯表面波就不会存在。其结果，产生各种类型的板波。在某一板上如图 1.6a（参照 [3.4, 274]）所示。存在首先其振动方向与表面平行的纯横波。在超声试验中，这类波，目前并不甚重要。与此不同，通常称为拉姆（Lamb）波 [420, 34, 228] 的板波经常含有振动方向与表面垂直的成分。在超声波试验中是非常重要的。拉姆波是以称为对称波（或膨胀波）及斜对称波（或弯曲波）的两个不同的基本形式发生。中间区域的质点，即中立轴的质点在对称波的场合，产生纯纵向振动，而在弯曲波的场合，则产生纯横向振动。在其他区域的质点，不管哪一种型的场合都进行椭圆形振动。不管哪一种波都存在一些高次谐波。高次谐波的特征，简单说来在于存在着两个以上的中立轴。

拉姆波的场合，比较容易理解它是由基本的纵波和横波组成。即，由在两个界面之

间沿曲折的路径反射的平面波组合起来的（参照〔34, 542, 32, 604〕）。

在板的一面与不同的固体形成界面的特殊场合。例如，象表面层那样场合的纯横波（图1.6a）称为洛甫（Love）波〔274〕。

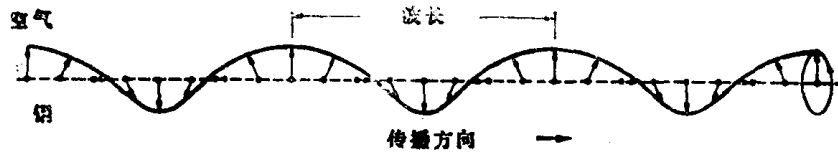


图 1.5 钢的表面波。右端为质点的振动椭圆和旋转方向（根据〔34〕，以轴比为0.44:1进行计算的）

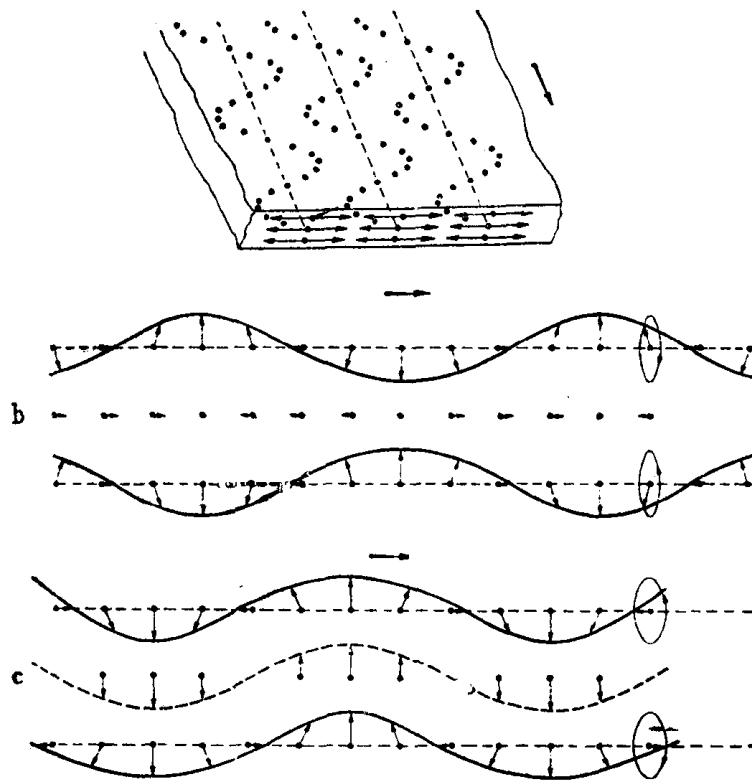


图 1.6 板中的波。a. 与表面平行的横波，b、c. 拉姆波，根据〔34〕计算的铝中对称形式和斜对称形式的基波（振动椭圆的轴比决定于板厚）

以上探讨的板还有两个方向的大小未受限制。若对大小再加以限制，截面则成为圆形或四边形。通常，柱波如图 1.6b 中具体表示的那样可理解为膨胀波。另外，还有弯曲波、扭转波、径向波及其高次谐波。但在超声试验中几乎没有采用这些波。

这里所叙述的波在有限物体中的形式，与在无限物体中的平面波或球面波的处理同样，只不过是把有关声传播的自然现象以简化的理想形态表示的。例如，表面波或拉姆波的现象可认为来源于平面波在界面的反射。实际上，只能在充分大的平面状声源附近在高度近似的情况下才可以得到平面波。在颇远的距离且小的声源的场合，声在板中的传播与理想拉姆波的状况颇不相同。

### 1.3 合成波与驻波、干涉

以上未特殊说明而假定的是，使之产生上述各种波之一的声源振动是单一频率，且持续颇长时间。复杂而短的振动现象能够由无限或有限个不同振幅、频率和相位的正弦函数质点振动迭加形成。在弹性介质中，振幅、频率和相位不同的质点能够分别产生各自的波。在大物体中的纵波或横波的场合，所有的频率实际上具有同一声速，所有的子波以等速度传播。其结果，等于各质点进行相同的振动。若忽略能量损失，则复杂而持续时间短的振动在各自子波无变化的情况下传播。当然，吸收和散射带来的影响随频率不同而不同。例如，在空气中远方的雷似乎可以看成具有低音色。这是因为高频波的衰减大。

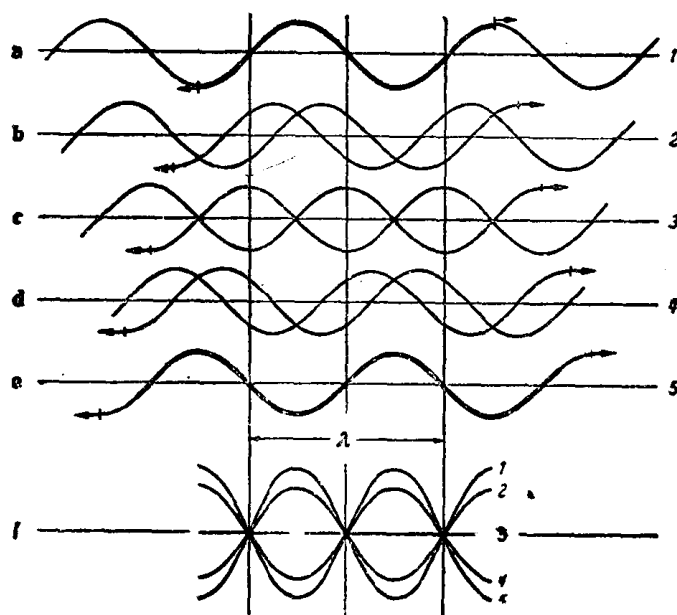


图 1.7 相对传播的两个波的驻波的形成

两种基本的波共存时，在使信号不发生畸变的情况下传播，一般说来是办不到的。板波或柱波的场合，一般声速决定于频率。在超声试验中经常所使用的声波的脉冲，在板波或柱波的场合不是传播到无限长的距离，由于其子波以不同的速度传播，故会消失掉。

现在考虑一下在某种材料中在二个不同点发生，具有不同的传播方向、频率及振幅的二个波。并且，试分析同时受该二个波作用的一个质点的运动。若根据二个波的振幅将材料弹性极限内的所谓比例极限内的应力施加到物体上，那么，这二个波的运动可以矢量地，即根据平行四边形法则相加，等于把质点在各自不同波中单独进行的运动合成。在频率不同的波的场合，一般说来结果是非周期性的，是复杂的，因此一般不怎么关心它。然而，在此过程中任一个波也不妨碍另一个波。例如，一个声波的声速不改变各自所具有的原来的传播方向、频率和振幅。

但是，二个波单纯迭加时，可得到有趣形式的质点运动，即驻波。这种看起来似乎有矛盾的波（因波的本质在于传播），具有同一频率、振幅及振动方向（横波的场合）

在只是传播方向不同的二个同样的平面波重叠时形成驻波。将二个波的传播方向完全相反的特殊场合的横波示于图 1.7。正弦曲线表示在某一瞬间连结一系列（物质的）质点的线。图 1.7 a 至 e 表示 5 个连续瞬间的状态。图 1.7f 为驻波的综合振动。与此有关的最重要的是某个位置的质点经常停留在静止的位置上，在一般的波中决不产生这种现象。二个波经常互相抵消的点称为波节（node），振幅最大的点称为波腹（antinode）。

一般通过拉紧的弦的自然振动可以了解这种波的形式。然而，在立体横波或纵波的驻波场合，图 1.7 中必须由在附加很多空间质点列的图形来表示。此时，波节和波腹位于固定的平面上。

不要忽略驻波或二个相对传播的波相互通过的状态不过是表现与  $2 + 2 = 4$  一样的物理事实。

纵波的驻波是在图 1.7 横波的驻波中，将正弦函数的振幅看做为波传播方向或质点在其反方向的位移就可得到（图 1.8）。最密的点和最疏的点在“波节”的平面中，相互之间只离开 1 个波长。因此，运动的波节同时又是声压的波腹，且其相反的情况也成立。这一点由图 1.8 可容易理解。如上所述，运动和声压的“波节”彼此各离  $1/4$  波长的位置。

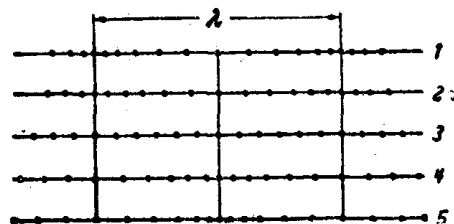


图 1.8 纵波的驻波。1~5 不同瞬间的图分别对应于图 1.7，运动的波节位于各  $\lambda/2$  的平面上

在实际的超声波中，如果波在平滑的表面被反射，那么，往往产生驻波。当然若波不是无限长，这仅限于使波被反射之后也仍能与其波本身完全重叠的时候。

图 1.9 为短的波群在壁上被反射的情况，在几个波长范围内形成了短的驻波。

图 1.9 为自由端，即波在某一物质和空气或真空的界面的反射，在这些地方波产生完全反射。根据其边界条件，质点运动在那点成为最大值，即成为波腹，但压力或剪切应力却成为波节。图 1.9 绘制出了质点运动的振幅在压力波的情况看做为纵向运动，而在剪切波的情况看做为横向运动。

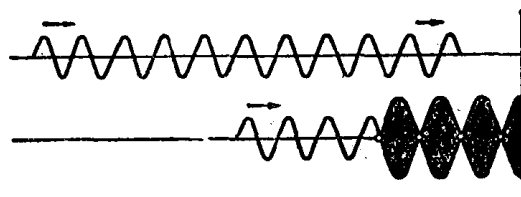


图 1.9 由自由界面的反射引起的驻波。绘制出  
质点振动的振幅，在自由界面产生波腹



根据共振法测量板厚时采用纵波的驻波，但是，在其他的场合，它们却成为混乱的原因，故应使之不要发生。

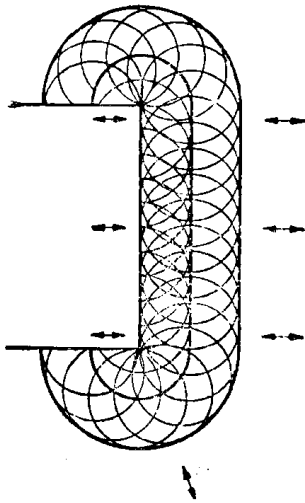


图1.10 根据惠更斯原理由子波产生的波面的作图



图1.11 球面波的栅线；为构成模拟声场而设计的图

驻波是使同一频率的不同波重叠的特殊情况，一般称为干涉。干涉是波面的形状或声场的形成用肉眼能观察到的说明方法，即成为惠更斯原理的基础。惠更斯原理在说明超声发射时，是最好的手段。简言之，根据该原理，任意波面的形态是由非常多的同一频率的单纯球面波，即所谓子波构成。但各子波应准确地选择其原点、相位及振幅。所有的波面可以用子波原点在其前波面上的子波包络线来表示。图1.10明确地表示了这种形态。该图表示根据惠更斯原理绘制的具有几个波面的活塞式声源的截面。可以看到在平面声源面前的中央形成平面波，其端部（从三维角度来看）成环状。

此外，根据惠更斯原理，可以理解无透射性的壁在声场中决不产生明显的阴影。这是因为其端部成为新的子波的原点，而这些子波从壁的附近也传播到阴影部分。

然而，即使采用此原理，对声场内的某一点，例如，在壁的阴影部分具有多大强度的波这一疑问也不能得到回答。只能根据菲涅耳的数学处理才能找出这一答案(4.2)。在实际产生的几种特殊情况，可用如下方法由球面波能够清清楚楚地构成声场。子波的声场是以黑和白的环状条纹的集合(图1.11)形式绘制的。并且，这是通过照片摄影反复互相迭加记录的。这时，各个照片的中心每次都要稍微移动一下，在波面上保持一定的距离(Pohl[29])。这种照片，根据条纹的平均光度就可明确波面的图形及(至少是定性的)振动的强度。

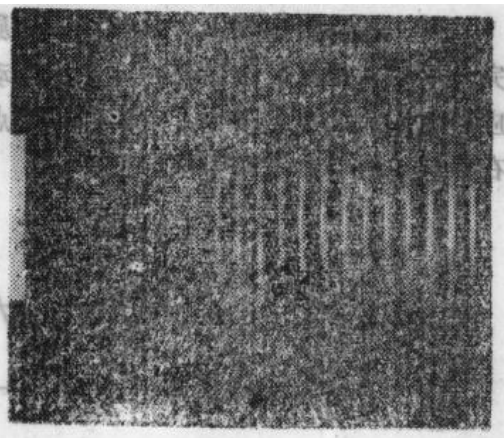


图1.12 直径与波长之比 $D/\lambda = 8$ 发生器前面的模拟声场照片

图1.12是采用这种方法进行模拟的平面振子前方声场的照片。由此图可知，如距声场的距离远，则形成波面清楚的球面波。我们所关心的强度分布，将于第四章详细叙述。