

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

超声波检测

辽宁省质量技术监督局特种设备处 组编
辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会 编



*CHAOSHENGBO
JIANCE*

辽宁大学出版社

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

超声波检测

辽宁省质量技术监督局特种设备处 组编
辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会 编



*CHAOSHENGBO
JIANCE*

辽宁大学出版社

©辽宁省质量技术监督局特种设备处 辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会 2008
图书在版编目 (CIP) 数据

超声波检测/辽宁省质量技术监督局特种设备处组编, 辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会编. —沈阳: 辽宁大学出版社, 2008. 3

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

ISBN 978-7-5610-5552-6

I. 超… II. ①辽…②辽… III. 超声检验—技术培训—教材 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 023212 号

出版者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印刷者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发行者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 14.5

字 数: 358 千字

出版时间: 2008 年 3 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 3 月第 1 次印刷

责任编辑: 韩行章

封面设计: 刘桂湘

责任校对: 齐 悦

书 号: ISBN 978-7-5610-5552-6

定 价: 45.00 元

联系电话: 024-86864613

邮购热线: 024-86830665

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

电子邮件: lnupress@vip.163.com

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

编 委 会

主 审：王宏新

主 编：王 俊

副主编：张忠新 徐富民 金宝辉

教材编写组组长：王凤志 李敬军 高迎峰 张永杰

王丽萍

编 委：周 震 陈东初 贾胜军 杨跃存 于清泉

王钰玮 王庆云 王成功 王 宁 王晓林

白洪海 卢天惠 史向东 田景涛 曲邦宁

刘振营 杜 辉 李增甫 李耀武 吴云法

张 轲 金静华 单志军 杨继斌 徐 彦

徐德昆 郭 超 董 辉 綦振国

序 言

无损检测是特种设备安全工作中一种重要的检验方法和手段，在特种设备制造、安装、改造、维修、使用和检验等环节中应用十分广泛。

辽宁省特种设备无损检测人员考核委员会成立二十多年来，在各相关单位、专家和各位委员的大力支持和积极努力下，为全省无损检测培训考核工作做出了可喜的成绩，对提高无损检测人员的技术水平和操作技能起到了积极的促进作用。为了更好地配合无损检测人员培训与考核工作，更加适应当前特种设备无损检测相关标准的贯彻实施，考委会组织相关人员编写了这套培训教材和培训考核习题集。

本人有幸参加了几次教材编写讨论活动，各位编委会成员高度负责的工作态度、一丝不苟的工作热情、精益求精的钻研精神，非常让人钦佩和感动。本套教材倾注了他们的辛勤汗水，凝聚着他们的智慧博才。相信这套教材的出版对特种设备无损检测人员培训与考核工作的规范化、系统化会起到一个极大的推动作用，对进一步保障特种设备安全运行具有重要意义。

刘普明

2007年12月

前言

为了更好地贯彻实施国家质检总局即将颁布的《特种设备检验检测人员管理办法》，切实有效地规范特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核工作，全面提高特种设备无损检测人员实际检测能力和业务水平，确保特种设备无损检测工作质量安全可靠，受辽宁省质量技术监督局特种设备处委托，由辽宁省特种设备无损检测人员考核委员会组织编写了本套特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训教材和培训考核习题集。

本套教材以特种设备无损检测现行有关国家法规、安全技术规范和 JB/T4730—2005《承压设备无损检测》标准为依据，按照辽宁省特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核大纲要求，全面系统地阐述了特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员必须熟悉和掌握的特种设备相关基础知识、无损检测工作中常用四种检测方法的基础理论和实际操作等内容。是一套既适合特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核使用，又方便其他设备监理、金属监督、质量管理和安全监察等部门人员日常学习和参考使用的好教材。

本套教材包括《射线检测》、《超声波检测》、《磁粉检测》、《渗透检测》、《特种设备基础知识》五本书和一本《特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核习题集》。本教材针对Ⅱ级无损检测从业人员的工作特点，突出体现应知应会理论、工艺与实际工作关系，既注重基础知识的普及，又密切联系生产实际。在教材编写过程中，重点强调特种设备无损

检测实际应用工艺，增加了典型检测工艺卡和应用实例的介绍。为了适应特种设备无损检测人员工作需要，开阔视野，教材对国内外无损检测新技术应用方面也作了简明扼要的介绍。为了方便广大学员和读者学习使用，《特种设备基础知识》中收集了大量无损检测方面的相关法规与标准的具体条款。考虑到实际工作情况，教材未对Ⅰ级无损检测人员的培训内容进行明确区分，只是在习题集编著中标注了必备的知识要点。

习题集作为特种设备无损检测培训考核工作的辅助教材，其结构编排与教材章节一一对应，编著要点也是特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员初、复试考核命题的重点。

本套教材的编写工作得到了辽宁省安全科学研究院有关同志、行业内专家和辽宁省考委会秘书处人员的大力支持和帮助，在相关资料整理过程中也得到了孟祥飞同志全力协作，在此一并表示衷心的感谢！

限于编者的水平和经验有限，加之编写时间仓促，整套教材的编著工作难免有疏漏或不当之处，真诚希望广大读者和有关人士提出宝贵建议，以便今后进一步修订完善。

编 者

2007年12月

编写说明

本教材结合 JB/T 4730—2005 《承压设备无损检测》以及有关的超声检测现行标准，按照辽宁省特种设备 I、II 级检测人员培训考核大纲的要求，在参考全国无损检测人员资格考核教材《超声波检测》（II、III 级）基础上编写的。其基础理论部分力求简明扼要；突出体现了 I、II 级超声检测人员必须掌握的理论知识，增加了数字超声波探伤仪内容介绍，充实了超声检测工艺部分，比较系统地说明了超声检测灵敏度、焊缝超声检测等实用内容。本教材是为了满足超声 I、II 级检测人员实际工作需要编写的一本教科书。

本教材共分八章，主要内容包括：超声检测的物理基础、超声波发射声场与规则反射体声压、超声检测设备与器材、超声检测方法和通用检测技术、板材和管材超声检测、锻件与铸件超声检测、焊接接头超声检测、超声检测工艺编制。

本教材第 1 章、第 2 章、第 6 章由杨继斌编写；第 3 章由金静华编写；第 4 章由卢天惠编写；第 5 章、第 8 章由李敬军编写；第 7 章由吴云法、杨继斌编写。全书由白洪海、杨继斌统稿。

此外，本教材在编写过程中李增甫、徐彦、刘英和、王建忠、刘振营等对编写内容提出了许多有益的意见和建议，在收集资料的过程中得到了杨海全同志的帮助，同时得到了国内有关超声仪器厂家的大力支持，在此一并表示真诚的感谢！

由于编者水平有限，错误和疏漏在所难免，敬请读者提出宝贵意见，以便不断完善。

绪 论

超声波检测是应用最广泛的无损检测方法之一。超声波检测方法是利用进入被检材料的超声波对材料表面及内部缺陷进行检测。利用超声波进行材料厚度的测量也是常规超声波检测的一个重要方面。此外,作为超声波检测技术的特殊应用,超声波还可用于材料内部组织和特性的表征以及应力的测量。

1. 超声波检测发展简史

利用超声波来进行无损检测始于20世纪30年代。1929年,前苏联人首先提出了用超声波探测金属物体内部缺陷的建议,并于第二次世界大战后研制成第一种穿透式检测仪器对材料中的缺陷进行初级阶段检测。

超声波检测技术得以广泛应用,应归功于脉冲反射式超声检测仪的出现。20世纪40年代,美国的Firestone首次介绍了脉冲回波式超声检测仪。利用该技术,超声波可从物体的一面发射并接收,且能够检测较小缺陷,较准确的确定其位置及深度,评定其相对尺寸。随后,由美国和英国开发出了A型脉冲反射式超声探伤仪,并逐步应用于锻钢和厚钢板的检测。20世纪60年代,超声探伤仪在灵敏度、分辨率和放大器线性等主要性能上取得了突破性进展,焊缝检测问题得到了很好的解决。A型脉冲反射方法至今仍是通用性最好、使用最广泛的一种超声检测技术。在此基础上,超声检测发展为一个有效而可靠的无损检测手段,并在工业上得到了广泛的应用。

随着工业生产对检测效率和检测可靠性要求的不断提高,人们要求超声检测更加快速,缺陷的显示更加直观,对缺陷的描述更加准确。因此,原有的以A型显示手工操作为主的检测方式不再能够满足要求。20世纪80年代以来,对于规则的板、棒类等大批量生产的产品,逐渐发展了自动检测系统,配备了自动报警、记录等装置,发展了B型显示和C型显示。与此同时,对缺陷的定性、定量评价的研究得到了较大的进展,利用超声技术进行材料特性评价也成为重要的研究方向。

随着电子技术和计算机技术的发展,超声检测设备不断向小型化、智能化方向改进,并于20世纪80年代末出现了数字式超声仪器。目

前，数字式仪器已日益成熟，正逐渐取代模拟式仪器成为主流产品。

2. 超声波检测的应用

超声检测的适用范围非常广，从检测对象的材料来说，可用于多种金属材料和非金属材料；从检测对象的制造工艺来说，可以是锻件、铸件、焊接件、胶接件、复合材料构件等；从检测对象的形状来说，可以是板材、棒材、管材等；从检测对象的尺寸来说，厚度可小至1mm，也可大至几米；即可以是表面缺陷，也可以是内部缺陷。

在特种设备领域中，超声波检测均采用常规的无损检测方法。超声波检测在特种设备中主要应用见下表：

超声波在特种设备中的主要应用

特种设备	典型检测应用
锅炉	焊缝的检测、钢板的检测、锻件的检测、管材的检测、管板与锅壳、管板与炉胆 T 型连接焊缝的检测、回燃室 T 型连接焊缝的检测、集中下降管座角焊缝检测、集箱、管子对接焊缝检测等
压力容器	钢焊缝的检测、钢板的检测、钢锻件的检测、钢管材的检测、复合板检测、大型螺栓及棒材的检测、奥氏体不锈钢锻件的检测、封头及筒体壁厚的测定、管座角焊缝的检测、钛合金与铝合金的棒材检测、管材检测、板材焊缝的检测等
压力管道	焊缝的检测、锻件的检测、板材的检测、钢管的检测、弯头的检测、三通的检测、不锈钢管材的检测、管材厚度的测定、阀门最小厚度的测定
气瓶	焊缝的检测，钢板的检测
结构件	结构件焊缝的检测、特种结构的 K、T、Y 型管座焊缝的检测

绪 论	(1)
1. 超声波检测发展简史	(1)
2. 超声波检测的应用	(1)
第 1 章 超声波检测的物理基础	(1)
1.1 机械振动与机械波	(1)
1.2 超声波的基本概念	(3)
1.3 超声波的传播	(13)
第 2 章 超声波发射声场与规则反射体回波声压	(31)
2.1 纵波发射声场	(31)
2.2 横波发射声场	(37)
2.3 规则反射体的回波声压	(40)
2.4 AVG 曲线	(44)
第 3 章 超声波检测设备与器材	(49)
3.1 超声波检测设备	(49)
3.2 超声波探头	(60)
3.3 试块	(71)
3.4 仪器和探头的性能及其测试	(79)
第 4 章 超声波检测方法和通用检测技术	(86)
4.1 超声波检测方法概述	(86)

4.2	仪器与探头的选择	(90)
4.3	耦合与补偿	(93)
4.4	仪器探头系统的校准及检测灵敏度设定	(96)
4.5	检测方法	(107)
4.6	影响缺陷定位、定量的主要因素	(110)
4.7	缺陷性质分析	(115)
4.8	非缺陷回波的判别	(118)
4.9	侧壁干涉	(122)
第5章	板材和管材超声波检测	(123)
5.1	板材超声波检测	(123)
5.2	复合钢板超声波检测	(129)
5.3	无缝钢管超声波检测	(132)
第6章	锻件与铸件超声波检测	(138)
6.1	锻件超声波检测	(138)
6.2	铸件超声波检测	(151)
第7章	焊接接头超声波检测	(154)
7.1	焊接及其常见缺陷	(154)
7.2	中厚板对接焊接接头超声波检测	(155)
7.3	管座角焊缝和T型焊接接头超声波检测	(177)
7.4	堆焊层超声波检测	(181)
7.5	铝对接焊接接头超声波检测	(185)
7.6	钢制承压设备管子和压力管道环向焊接接头超声波检测	(189)
第8章	超声波检测工艺编制	(204)
8.1	超声波检测通用工艺编制	(204)
8.2	超声波检测专用工艺编制	(206)
	主要参考文献	(217)

第1章 超声波检测的物理基础

1.1 机械振动与机械波

振动和波动是物质运动的基本形式之一。超声波是一种机械波，是机械振动在介质中的传播。

1.1.1 机械振动

1.1.1.1 振动的一般概念

物体沿着直线或曲线在某一平衡位置附近往复周期性的运动，称为机械振动。

日常生活中到处可以见到振动现象，如弹簧振子的运动、钟摆的运动和汽缸中活塞运动等都是可以直接观察到的振动现象。

物体（或质点）受到一定力的作用，将离开平衡位置，产生一个位移（最大位移位置），该力撤销后，它将回到其平衡位置，并且还要越过平衡位置移到相反方向的最大位移位置，然后再返回平衡位置。这一个完整运动过程为一个“循环”或叫一次“全振动”。

振动是往复、周期性的运动，振动的快慢常用振动周期和振动频率两个物理量来描述。

周期 T ——振动物体完成一次全振动所需要的时间，称为振动周期，用 T 表示。常用单位为秒（s）。

频率 f ——振动物体在单位时间内完成全振动的次数，称为振动频率，用 f 表示，常用单位为赫兹（Hz）。1 赫兹表示 1 秒钟内完成 1 次全振动，即 $1\text{Hz}=1$ 次/秒。此外还有千赫（kHz），兆赫（MHz）。 $1\text{kHz}=10^3\text{Hz}$ ， $1\text{MHz}=10^6\text{Hz}$ 。

由周期（ T ）和频率（ f ）的定义可知，二者互为倒数

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

1.1.1.2 谐振动

最简单最基本的直线振动称为谐振动。任何复杂的振动都可视为多个谐振动的合成。

如图 1.1 所示，质点 M 作匀速圆周运动时，其水平投影就是一种水平方向的谐振动。质点 M 的水平位移 y 和时间 t 的变化关系可用谐振动方程来描述：

$$Y = A \cos(\omega t + \Phi) \tag{1.2}$$

式中 A—振幅，即最大水平位移；

ω —圆频率，即 1 秒钟内变化的弧度数，

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Φ —初相位，即 t=0 时质点 M 的相位；

$\omega t + \Phi$ —质点 M 在 t 时刻的相位。

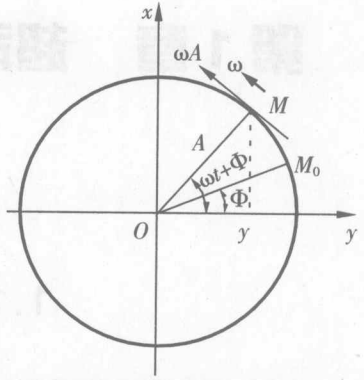


图 1.1 质点谐振动参考图

谐振动方程描述了谐振动物体在任一时刻的位移情况。

谐振动的特点是：物体受到回复力大小与位移成正比，其方向总是指向平衡位置，如弹簧振子的振动、单摆与音叉的振动等。谐振物体的振幅不变，为自由振动，其频率为固有频率。

由于物体做谐振动时，只有弹性力或重力做功，其他力不做功，符合机械能守恒的条件，因此谐振动物体的能量遵守机械能守恒。在平衡位置时动能最大势能为零，在位移最大位置时势能最大动能为零，其总能量保持不变。

1.1.2 机械波动

1.1.2.1 机械波的产生与传播

振动的传播过程，称为波动。波动分为机械波和电磁波两大类。

机械波是机械振动在弹性介质中的传播过程，如水波、声波、超声波等。

电磁波是交变电磁场在空间的传播过程，如无线电波、可见光、x、γ射线等。

由于这里研究的超声波是机械波，因此下面只讨论机械波。

为了简单说明机械波的产生和传播，不妨建立如图 1.2 所示的弹性模型。图中质点间以小弹簧联系在一起，这种质点间以弹性力联系在一起的介质称为弹性介质。一般固体都可视为弹性介质。

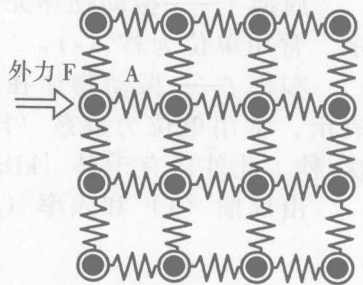


图 1.2 物质的弹性模型

当外力 F 作用于质点 A 时，A 就会离开平衡位置，这时 A 周围的质点将对 A 产生弹性力使 A 回到平衡位置。当 A 回到平衡位置时，具有一定的速度，由于惯性 A 不会停在平衡位置，而会继续向前运动，并沿相反方向离开平衡位置，这时 A 又会受到反向弹性力，使 A 又回到平衡位置，这样质点 A 在平衡位置往复运动，产生振动。与此同时，A 周围的质点也会受到大小相同方向相反的弹性力作用，使它们离开平衡位置，并在各自的平衡位置附近振动。这样弹性介质中的一个质点的振动

这样弹性介质中的一个质点的振动

就会引起邻近质点的振动，邻近质点的振动又会引起较远质点的振动，于是振动就以一定的速度由近及远地向各个方向传播开来，从而就形成了机械波。

液体和气体介质中的弹性波是由液体和气体受到压力时体积的收缩和膨胀产生的。

由此可见，产生机械波必须具备以下两个条件：

(1) 要有作机械振动的波源。

(2) 要有能传播机械振动的弹性介质。

振动与波动是互相关联的，振动是产生波动的根源，波动是振动状态的传播。波动中介质各质点并不随波前进，只是以交变的振动速度在各自的平衡位置附近往复运动。

波动是振动状态的传播过程，也是振动能量的传播过程。这种能量的传播，不是靠质点的迁移来实现的，而是由各质点的位移连续变化来逐渐传播出去的，犹如人们传递砖块一样。

1.1.2.2 波长、频率和波速

(1) 波长 λ ：同一波线上相邻两振动相位相同的质点间的距离，称为波长，用 λ 表示。波源或介质中任意一质点完成一次全振动，波正好前进一个波长的距离。波长的常用单位为毫米 (mm)、米 (m)。

(2) 频率 f ：波动过程中，任意给定点在 1 秒钟内所通过的完整波的个数，称为波动频率。波动频率在数值上同振动频率，用 f 表示，单位为赫兹 (Hz)。

(3) 波速 C ：波动中，波在单位时间内所传播的距离称为波速，用 C 表示。常用单位为米/秒 (m/s) 或千米/秒 (km/s)。

由波速、波长和频率的定义可得：

$$C = \lambda f \text{ 或 } \lambda = \frac{C}{f} \quad (1.3)$$

由上式可知，波长与波速成正比，与频率成反比。当频率一定时，波速愈大，波长就愈长；当波速一定时，频率愈低，波长就愈长。

1.2 超声波的基本概念

1.2.1 超声波的定义

人们在日常生活中听到的声音是由于各种声源产生的机械波传播到人耳所引起的耳膜振动，能引起人耳听觉的机械波其频率范围在 20Hz~20kHz 之间。超声波是频率高于 20kHz 的机械波。

1.2.1.1 次声波、声波、超声波

次声波、声波和超声波都是在弹性介质中传播的机械波，在同一介质中的传播速度相同。它们的区别主要在于频率不同。人们把能引起听觉的机械波称为声波，频率在 20Hz~20kHz 之间。频率低于 20Hz 的机械波称为次声波，频率高于 20kHz 的机械波称为超声波。次声波、超声波人耳不可闻。

1.2.1.2 超声波的特性

超声检测所用的频率一般在 0.5MHz~10MHz 之间,对钢等金属材料的检验,常用的频率为 1MHz~5MHz。超声波波长很短,由此决定了超声波具有一些重要特性,使其能广泛用于无损检测。

1. 超声波方向性好:超声波像光波一样具有良好的方向性,可以定向发射,在方位上可准确地在被检材料中发现缺陷。

2. 超声波能量高:超声波检测使用的频率远高于声波,而能量(声强)与频率平方成正比。因此超声波的能量远大于声波的能量。

3. 超声波能在界面上产生反射、折射和波型转换:超声波在传播过程中,如遇异质界面可产生反射、折射和波型转换。

4. 超声波穿透能力强:超声波在大多数介质中传播时,传播能量损失小,传播距离大,穿透能力强,在一些金属材料中其穿透能力可达数米。这是其他检测手段所无法比拟的。

1.2.2 超声波的分类

超声波的分类方法很多,下面简单介绍几种常见的分类方法。

1.2.2.1 根据质点的振动方向分类

根据波动传播时介质质点的振动方向相对于波的传播方向的不同,可将波动分为纵波、横波、表面波和板波等。

1. 纵波 L

介质中质点的振动方向与波的传播方向互相平行的波,称为纵波,用 L 表示。如图 1.3 所示。

当介质质点受到交变正应力作用时,质点之间产生相应的伸缩形变或体积变化,这种变化又会产生弹性恢复力,从而形成纵波。这时介质质点疏密相间,故纵波又称为压缩波或疏密波。

凡能承受拉伸或压缩应力的介质都能传播纵波。固体介质能承受拉伸或压缩应力,因此固体介质可以传播纵波。液体和气体虽然不能承受拉伸应力,但能承受压应力产生容积变化,因此液体和气体介质也可以传播纵波。检测应用其他波型时,常采用纵波声源经波型转换后得到所需的波型。

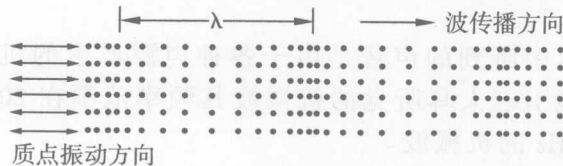


图 1.3 纵波

2. 横波 S

介质中质点的振动方向与波的传播方向互相垂直的波称为横波,用 S 表示。图 1.4 所示。

当介质质点受到交变的剪切应力作用时,产生切变形变,从而形成横波。

故横波又称为切变波。

因固体介质能够承受剪切应力，所以固体介质中能够传播横波。而液体和气体介质不能承受剪切应力，因此横波不能在液体和气体介质中传播。横波只能在固体介质中传播。

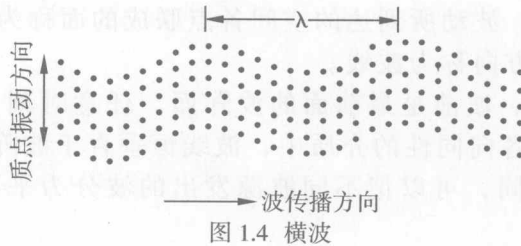


图 1.4 横波

3. 表面波 R

当介质表面同时受到交变正应力和切应力作用时，产生沿介质表面传播的波，称为表面波，常用 R 表示，图 1.5 所示。表面波是瑞利 1887 年首先提出来的，因此表面波又称为瑞利波。

表面波在介质表面传播时，介质表面质点作椭圆振动，椭圆长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于波的传播方向。椭圆振动可视为纵向振动与横向振动的合成，即纵波与横波的合成。因此表面波同横波一样只能在固体介质中传播，不能在液体和气体介质中传播。

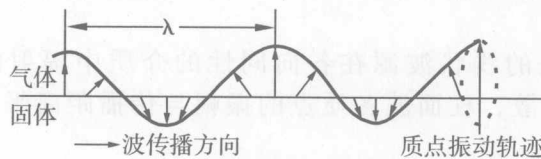


图 1.5 表面波(瑞利波)

表面波只能在固体表面传播。表面波的能量随传播深度增加而迅速减弱。当传播深度超过 2 倍波长时，质点的振幅就已经很小了。因此，一般情况下，表面波检测只能发现距工件表面 2 倍波长深度内的缺陷。

4. 板波

在板厚与波长相当的薄板中传播的波，称为板波。根据质点的振动方向不同可将板波分为 SH 波和兰姆波。各种类型波的比较归纳见表 1.1。

表 1.1 主要几种类型波的比较

波的类型		质点振动特点	传播介质	应用
纵波		质点振动方向平行于波传播方向	固、液、气体介质	钢板、锻件检测等
横波		质点振动方向垂直于波传播方向	固体介质	焊缝、钢管检测等
表面波		质点作椭圆运动,椭圆长轴垂直波传播方向,短轴平行于波传播方向	固体介质	钢管检测等
兰姆波	对称型(S型)	上下表面:椭圆运动 中心:纵向振动	固体介质(厚度与波长相当的薄板)	薄板、薄壁钢管等 ($\delta < 6\text{mm}$)
	非对称型(A型)	上下表面:椭圆运动 中心:横向振动		